

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№1(37)/2025

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал
№ 1 (37)



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
 Грумпос П., 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, Wroclaw 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. Главный редактор
 Editor Tuktarova P.A. Редактор
 Editor Gaskova D.A. Редактор
 Editor Massel A.G. Редактор
 Tech. Editor Popova M.D. Техн. редактор
 Designer Pesterev D.V. Дизайнер

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Туктарова П.А. к.э.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Гаськова Д.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Попова М.Д. Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 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 12.03.2025 г. Тираж 50 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН
 Цена свободная (12+)

Методологические аспекты информационных и математических технологий	
Маркова Г.М., Барцев С.И. Предельно просто не значит предельно ясно: некоторые контринтуитивные результаты нейросетевого моделирования рефлексии.	5
Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта	
Антонов Д.И., Сухов С.В. Регуляризация весов в импульсных нейронных сетях	16
Лебедева А.А., Гаращенко А.А., Сидоров Д.Н. Прогноз пространственно-временной динамики аврорального овала с применением машинного обучения	25
Сиротинин А.А., Володько О.С. Применение генетического алгоритма для проектирования структуры оптимальной беспроводной сенсорной сети на трехмерной модели здания.	34
Виноградов Г.П. Интеллектуализация системы управления узлом в реагирующих беспроводных сенсорных сетях	41
Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях	
Крюков А.В., Овечкин И.С. Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта	53
Алексеев А.В., Новицкий Н.Н. Методы анализа и обеспечения показателей качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции	68
Иванько Я.М., Полковская М.Н., Сеницын М.Н. Алгоритм параметрического моделирования производства аграрной продукции с учетом предшественников	80
Холопов В.А., Клягин М.М., Огорельцев Р.М. Метод моделирования конечных автоматов технологических процессов с применением языка SQL	92
Цифровая экономика и управление	
Ничепорчук В.В., Кобыжакова С.В. Технология цифровизации управления безопасностью территорий	104
Туктарова П.А., Дмитриева И.В., Хамидуллина Д.И. Формирование многоуровневой системы ключевых показателей (KPI) региональной инновационной инфраструктуры	114
Углева В.А., Смирнов Г.А. Визуализация динамики учебного процесса с помощью когнитивных карт диагностики знаний в интеллектуальных обучающих системах.	122
Программные системы и комплексы	
Аршинский Л.В., Знайдюк А.Н., Кириллова Т.К., Старцев С.П., Сэлэнгэ М. Геоинформационная система поддержки принятия решений по действиям при угрозе размыва путей на Улан-Баторской железной дороге	130
Алексеев Р.В., Лукьянов Н.Д. Автоматизация создания фондов оценочных средств по образовательным программам, реализуемым университетом	143
Дунаев М.П., Саушкин А.А. Автоматизированное программное управление механизмами перемещения подъемного крана	153

Methodological aspects of information and mathematical technologies	
Markova G.M., Bartsev S.I. Extremely simple does not mean extremely clear: some counterintuitive results of neural network modeling of reflection	5
Methods, technologies and applications of artificial intelligence	
Antonov D.I., Sukhov S.V. Weight regularization in spiking neural networks	16
Lebedeva A.A., Garashchenko A.A., Sidorov D.N. Forecasting the spatiotemporal dynamics of the auroral oval using machine learning	25
Sirotnin A.A., Volodko O.S. Application of genetic algorithm to design the structure of an optimal wireless sensor network on a 3D building model	34
Vinogradov G.P. Intelligent node management system in responsive wireless sensor networks	41
Mathematical modeling and its application in scientific research	
Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modeling modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport	53
Alekseev A.V., Novitsky N.N. Methods of analysis and provision of water quality indicators in water supply systems with closed circulation loops	68
Ivanyo Ya.M., Polkovskaya M.N., Sinitsyn M.N. The algorithm of parametric modeling of agricultural production, taking into account the predecessors	80
Kholopov V.A., Klyagin M.M., Ogorelcev R.M. A Method for modeling Finite State Machines in technological processes using SQL	92
Digital economy and management	
Nicheporchuk V.V., Kobyzhakova S.V. Digitalization technology of territorial safety management	104
Tuktarova P.A., Dmitrieva I.V., Yaltonskaya D.I. Formation of a multi-level system of key indicators (KPI) of regional innovation infrastructure	114
Uglev V.A., Smirnov G.A. Visualization of the dynamics of the educational process using cognitive of knowledge diagnosis	122
Software systems and complexes	
Arshinskiy L.V., Znaidyuk A.N., Kyrillova T.K., Starcev S.P., Mukhsaikhan S. Geoinformation system for decision support on actions in case of threat of track erosion on the Ulaanbaatar railway	130
Alekseev R.V., Lukyanov N.D. Automation of creation of assessment funds for educational programs implemented by the university	143
Dunaev M.P., Saushkin A.A. Automated program control of crane travel mechanisms	153

Методологические аспекты информационных и математических технологий

УДК 577.38+004.81

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.001

Предельно просто не значит предельно ясно: некоторые контринтуитивные результаты нейросетевого моделирования рефлексии Маркова Галия Муратовна^{1,2}, Барцев Сергей Игоревич^{1,2}

¹Институт биофизики СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Россия, Красноярск, *GMarkova@ibp.ru*

²Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологий, Россия, Красноярск

Аннотация. В работе представлен ряд результатов по моделированию рефлексии, понимаемой в широком смысле, как наличие у активного агента внутреннего отображения внешнего мира, влияющего на его поведение. Выявлена способность простейших нейросетевых модельных объектов гомогенной и гетерогенной (модульной) структуры к решению задач, требующих наличия и использования устойчивых внутренних отображений (репрезентаций) внешних стимулов. Определено, что данные репрезентации являются декодируемыми, т.е. по текущему виду паттерна нейронной активности нейросетевого объекта возможно определить, какой конкретно стимул или временной ряд стимулов в данный момент в нём обрабатывается. Приведены изначальные предположения авторов, сделанные из общих соображений относительно эффективности нейросетевых модельных объектов различной структуры в задачах на рефлексии, и соответствующие полученные результаты. В частности, показаны следующие эффекты: 1) позиции в игре чет-нечет асимметричны при условии ограниченности вычислительных возможностей игроков; 2) формально близкие задачи на рефлексии (игра чет-нечет и реагирование на фиксированные временные ряды стимулов по правилам этой игры) различаются по требованиям к игрокам; 3) декодируемыми являются паттерны нейронной активности не только нейронных сетей, обученных реагированию на стимулы, но и сетей со случайными весовыми коэффициентами; 4) точность декодирования нейронной активности рекуррентных нейронных сетей, обладающих гетерогенностью во времени, превосходит точность отклика этих сетей при реагировании на ряды стимулов; 5) паттерны нейронной активности у гомогенных рекуррентных нейронных сетей сложнее для декодирования, чем у гетерогенных сопоставимого размера. Данные эффекты иллюстрируют богатую внутреннюю и поведенческую динамику простейших рекуррентных нейронных сетей, что, с одной стороны, перспективно для исследовательских и практических целей, а с другой – затрудняет предсказание и интерпретацию поведения объектов подобного рода.

Ключевые слова: рекуррентные нейронные сети, рефлексия, рефлексивные игры, декодирование нейронной активности, репрезентация внешних стимулов

Цитирование: Маркова Г.М. Предельно просто не значит предельно ясно: некоторые контринтуитивные результаты нейросетевого моделирования рефлексии / Г.М. Маркова, С.И. Барцев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 5-15. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.001.

Введение. Под рефлексией (в широком смысле) понимается феномен наличия у активного агента внутреннего представления внешнего мира, которое влияет на его активность. Условие влияния на активность является ключевым, поскольку в противном случае отпечаток ступни на мокром песке тоже можно считать отображением, что делает такое понимание отображения внешнего мира тривиальным и неоперациональным. Сохранение в памяти и своевременное извлечение из нее адекватных представлений о мире дает возможность осуществлять прогностическую обработку поступающей информации [1, 2]. Такое опережающее отражение действительности [3] позволяет реализовывать наиболее эффективное поведение, поскольку действующий агент принимает решение относительно ожидаемых событий и подготовлен к наиболее адекватному действию. В этом состоит отличие поведения, основанного на рефлексии, от реактивного или «рефлекторного» поведения.

Рефлексивное поведение демонстрируют не только люди, но и многие животные, в том числе, с чрезвычайно малым мозгом по сравнению с человеческим, например, шмели [4]. В таком случае естественно предположить, что поведение, основанное на рефлексии, может быть воспроизведено и исследовано на простых объектах, причем необязательно биологических, а, например, на искусственных нейронных сетях. Подобные модельные объекты устроены существенно проще своих биологических прототипов, так что исследователи получают полный контроль над внешними воздействиями на объект и могут отслеживать все его внутренние состояния. То, что простые нейронные сети, состоящие из 15-30 формальных нейронов, способны проходить классические тесты на рефлексивность, например, тест отложенного сравнения с образцом, показано нами ранее [5].

Согласно биофизическому подходу к моделированию рефлексии [6], в работе использовались наиболее простые конфигурации нейронных сетей, функционирующих в дискретном времени: полносвязные рекуррентные нейронные сети (РНС) без отдельных слоев для входа и выхода. Рекуррентная структура вместо прямого распространения выбрана в связи с тем, что динамическое отображение внешнего мира реализуемо только при условии использования рабочей памяти – кратковременного хранения информации, позволяющего судить о контексте, в котором появляются новые стимулы. Аналогом рабочей памяти в нейронной сети может служить рекуррентное возбуждение нейронов.

Функционирование РНС задавалось формулами:

$$\alpha_i^{n+1} = \frac{\rho_i^n}{a + |\rho_i^n|}, \rho_i^n = \sum_j w_{ij} \alpha_j^n + A_i^n, \quad (1)$$

где w_{ij} – матрица весовых коэффициентов, A_i^n – входные сигналы, α_j^n – выходной сигнал j -го нейрона в n -ый момент времени, a – константа, задающая крутизну активационной функции нейрона. Стимулы «0» и «1» кодировались как пары сигналов (01) и (10) соответственно, поэтому поступали на два входа. Отклик РНС определялся по соотношению сигналов двух выходных нейронов. Обучение РНС проводилось по классическому алгоритму backpropagation с глубиной распространения ошибки 5, использовалась квадратичная функция потерь.

В ряде экспериментов было обнаружено, что, несмотря на сравнительную простоту устройства, данные модельные объекты демонстрируют труднопредсказуемое, контринтуитивное поведение при решении простейших задач на рефлексивность. Статья посвящена рассмотрению некоторых обнаруженных неожиданностей.

1. Асимметрия позиций в рефлексивной игре чет-нечет. По литературным данным [7], в рефлексивной игре чет-нечет наблюдается смещение побед в пользу игрока за позицию «чет», т.е. того, кто должен предсказать ход противника на каждом шаге игры и сделать такой же. Это смещение связано с фреймингом – особенностями восприятия своей позиции у игроков. Игроки, не обладающие сложной психикой (например, РНС), не подвержены фреймингу. *Было сделано предположение*, что смещение в пользу РНС-игрока за «чет» всё равно может присутствовать, поскольку его задача – только предсказать ход противника и воспроизвести его, в то время как игрок за «нечет» должен предсказать и «перевернуть» этот ход, чтобы самому сделать противоположный, что является более сложной вычислительной процедурой.

Были использованы РНС, функционирующие согласно уравнениям (1), в нескольких вариантах модификаций: 1) рекуррентная полносвязная сеть, без отдельных слоев входа и выхода, размер 15 нейронов (SRN15); 2) аналогичная предыдущей, но с дополнительным входом, куда в виде сигнала +1/-1 поступают сведения о победе/поражении на предыдущем шаге игры (SRN+15); 3) аналогичная первой, но из 30 нейронов (SRN30); 4) аналогичная второй, но из 30 нейронов (SRN+30).

В эксперименте РНС играли против себе подобных. Весовые коэффициенты перед началом партии задавались случайным образом в диапазоне $(-0.025; 0.025)$ и модифицировались после каждого хода по алгоритму *backpropagation* с шагом 0,003. В партиях длиной 1000 ходов регистрировались показатели успешности РНС-игроков: 1) количество баллов, набранных РНС при игре за «чет» и за «нечет», 1500 партий за каждую позицию; 2) количество побед РНС при игре за «чет» и за «нечет», 15 раз по 100 партий за каждую позицию. Сравнивались средние значения показателей каждой конфигурации для разных позиций с помощью двухвыборочного *t*-теста с различными дисперсиями. Результаты показаны в таблице 1, в формате (среднее \pm ошибка среднего). Статистически значимые различия между средними значениями обоих показателей были зарегистрированы только для РНС типа SRN15, т.е. сетей минимального размера и с простейшей структурой.

Таблица 1. Показатели успешности РНС-игроков за позиции «чет» и «нечет»

Тип сети	Средняя доля выигранных ходов за партию, из 1000 ходов ($t_{кр} = 1,96$)			Среднее количество побед, из 100 партий ($t_{кр} = 2,02$)		
	Нечет	Чет	t-статистика	Нечет	Чет	t-статистика
SRN15	$(49,7 \pm 0,2)\%$	$(50,2 \pm 0,2)\%$	-4,6	48 ± 2	51 ± 2	-2,1
SRN+15	$(49,9 \pm 0,1)\%$	$(50,0 \pm 0,1)\%$	-0,5	49 ± 3	50 ± 2	-0,5
SRN30	$(50,0 \pm 0,1)\%$	$(50,1 \pm 0,1)\%$	-1,5	49 ± 3	50 ± 3	-0,7
SRN+30	$(49,9 \pm 0,1)\%$	$(49,9 \pm 0,1)\%$	-1,2	49 ± 3	48 ± 3	0,3

Следовательно, асимметрия позиций в игре чет-нечет наблюдается, если вычислительные возможности игрока ограничены. Однако даже небольшая модификация структуры РНС (введение дополнительного входа или увеличение количества нейронов) позволяет устранить этот эффект или, по крайней мере, сделать его малозаметным.

2. Эффективность гомогенных и гетерогенных РНС в разных задачах. Помимо игры чет-нечет, рассматривалась задача реагирования РНС на фиксированные временные ряды стимулов, сменявшие друг друга случайным образом. Эта задача соответствует смене ситуаций, происходящих при активном взаимодействии животного с окружающей средой. В качестве примера можно назвать охоту хищника, когда стадия поиска добычи или ожидания в засаде сменяется стадией активного преследования, но момент появления добычи заранее не известен. Более того, может появиться конкурент или более сильный хищник, и тогда необходима другая программа действий. В данной работе смена ситуаций имитировалась подачей на вход РНС одного из четырех временных рядов (см. таблицу 2), сменявших друг друга в случайном порядке по истечении определенного количества игровых шагов. РНС нужно было как можно быстрее распознать ряд, который начал подаваться, и сформировать отклик. Правильность отклика определялась также по правилам игры чет-нечет, то есть от РНС требовалось предсказать следующий элемент ряда и сгенерировать либо совпадающий сигнал (как при игре за «чет»), либо противоположный (как при игре за «нечет»).

Таблица 2. Фиксированные последовательности стимулов – временные ряды

Ряд 1	Ряд 2	Ряд 3	Ряд 4
110011001100	101100101100	010011010011	111000111000

В данном эксперименте использовались РНС типа SRN30 и SRN+30, состоявшие из одного функционального модуля, т.е. гомогенные (см. рис. 1А), а также другие модификации РНС – гетерогенные, состоявшие из двух функционально различающихся модулей. Гетерогенные РНС типа «сети двойного времени» (Dual-time RNN, DTRNN) содержали медленный модуль, функционировавший по внешним тактам подачи стимулов, и быстрый модуль, имевший 3 внутренних такта на обработку стимула перед выдачей отклика (см. рис.

1Б). Гетерогенные РНС типа «рефлексивные сети» (Reflexive Net, RefNet) содержали играющий модуль, функционировавший, как SRN15, и рефлексивный модуль, который получал на вход как внешние стимулы, так и отклик играющего модуля, и мог изменить его на противоположный (см. рис. 1В). Все модули гетерогенных РНС по структуре представляли собой SRN15 или SRN+15. Было сделано предположение, что гетерогенные РНС обладают преимуществом над гомогенными того же размера (30 нейронов).

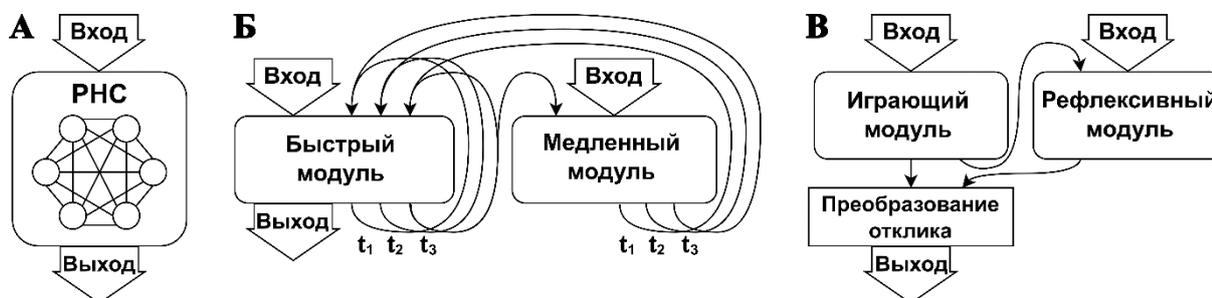


Рис. 1. Схемы структуры использованных РНС: А) SRN, SRN+ и все модули в составе гетерогенных РНС; Б) DTRNN, DTRNN+; В) RefNet, RefNet+

РНС, по 500 шт. каждой модификации, обучались в течение 1200 ходов. Ряды подавались по порядку, каждый в течение 60-и ходов (режим обучения). Далее весовые коэффициенты обученных РНС фиксировались, и на вход подавались те же ряды, каждый в течение 50-и ходов, в случайном порядке (режим теста). Для единообразия, и поскольку в предыдущем разделе статьи было показано, что успешность модифицированных РНС не зависит от позиции, все РНС функционировали в позиции «чет». Регистрировалась доля правильных откликов РНС в режимах обучения и теста. Важно отметить, что в данной задаче доля правильных ответов, равная 1, недостижима. После смены ряда РНС необходимо определить, что эта смена произошла, и распознать новый подаваемый ряд, поэтому в течение первых тактов подачи ряда (как правило, 3-5 тактов) РНС могут формировать неверный отклик.

На рис. 2А представлены результаты. Наилучшие показатели при обучении продемонстрировали гомогенные РНС: SRN (средняя доля правильных откликов 0,88) и SRN+ (0,83). Для них же характерно наибольшее снижение доли правильных ответов при тестировании. В режиме теста наибольшая средняя доля правильных ответов у гетерогенных РНС RefNet (0,81).

В целом, РНС с дополнительным входом в данной задаче показали результат хуже, чем без него. Однако, если сопоставлять эффективность тех же модификаций РНС с изменяемыми весовыми коэффициентами в игре чет-нечет против референсных РНС с гомогенной структурой (SRN), то наличие дополнительного входа, наоборот, способствует большему выигрышу (см. рис. 2Б). В этой задаче выигрыш всех гетерогенных РНС превысил таковой у контроля (SRN против SRN), $p < 0,001$ для всех конфигураций по t-тесту Уэлча. Но гомогенные РНС типа SRN+ также показали значимый выигрыш, превышающий таковой у гетерогенных РНС типа DTRNN и RefNet.

Следовательно, хотя обе рассмотренные задачи являются задачами на рефлекссию (подразумевают наличие внутреннего представления о противнике – другой РНС в рефлексивной игре, или квазипротивнике – временных рядах стимулов), наиболее эффективными оказываются РНС с разными модификациями. Данный результат свидетельствует о многогранности феномена рефлексии.

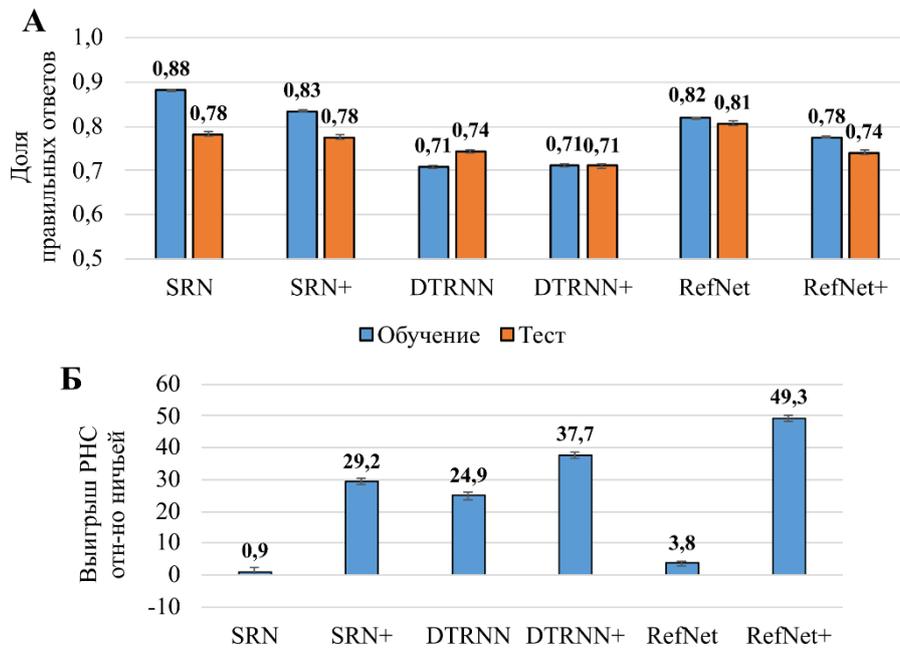


Рис. 2. А) эффективность РНС в реагировании на ряды; Б) эффективность РНС в игре чет-нечет против референсных РНС. В качестве погрешностей – ошибки среднего

3. Декодирование нейронной активности РНС, соответствующей различным стимулам. Внутренние представления внешнего мира, который для РНС сводится к определенным комбинациям получаемых стимулов, можно представить, как соответствующие этим стимулам паттерны нейронной активности. В этом случае возможно декодировать нейронную активность РНС, т.е. по виду паттерна распознать обрабатываемый в данный момент стимул.

3.1. Связь декодируемости нейронной активности и качества функционирования РНС. В вышеописанной задаче реагирования на фиксированные временные ряды стимулов, например, возможно распознать, какой ряд подается на РНС [8]. Было сделано предположение, что декодирование нейронной активности возможно только для РНС, хорошо освоивших задачу реагирования, т.к. формальный успех в данном случае свидетельствует о сформированности точных и правильных представлений о рядах.

РНС всех перечисленных ранее гомогенных и гетерогенных модификаций обучались задаче реагирования на фиксированные временные ряды стимулов в течение 1200 ходов. Были выбраны РНС каждой модификации, по 5 игравших за «чет» и за «нечет», показавшие наибольшую («лучшие») и наименьшую («худшие») доли правильных ответов в режиме теста. Также использовались РНС, получавшие в режиме обучения каждый ряд всего по одному разу в течение 24 шагов («one-shot») и не обучавшихся вообще («zero-shot»). Распознавание рядов по нейронной активности проводилось с помощью нейросетевого декодера (НС-декодера) – нейронной сети прямого распространения. Активационная функция внутренних нейронов НС-декодера имела сигмоидный вид (2а). Кусочно-линейная функция активации (2б) выходных нейронов НС-декодера использовалась для получения точного сигнала 0/1 на выходном нейроне, соответствующем номеру распознаваемого ряда:

$$a) f_h(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{x}{a+|x|} + 1 \right), \quad b) f_o(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq 0, \\ b \cdot x, & \text{if } 0 < x < 1, \\ 1, & \text{if } x \geq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Параметры функций активации (2) имели значения $a = 0.1$, $b = 1$, подобранные эмпирически для наиболее быстрого обучения НС-декодера, шаг модификации синапсов задавался равным 0,001. Декодирование производилось по отдельности для каждой РНС, т.к.

паттерны нейронной активности чрезвычайно вариативны. На вход декодеру подавалась нейронная активность РНС, записанная на одном такте при обработке текущего ряда. Требуемый отклик – сигнал, равный 1, на выходном нейроне, соответствующем номеру этого ряда, и 0 на остальных выходных нейронах.

Поскольку декодирование паттернов нейронной активности, в сущности, является задачей классификации, также использовался классический метод классификации k -ближайших соседей (KNN-декодер). Исходя из предварительных измерений, наилучший результат мог быть получен при $k = 3$. Помимо классов, соответствующих рядам стимулов, вводился класс «всё остальное». В обучении ему соответствовала нейронная активность РНС при подаче случайных последовательностей стимулов, не совпадавших с рядами. Предполагалось, что как «всё остальное» НС- и KNN-декодеры должны распознавать нейронную активность РНС, записанную на нескольких первых тактах при смене ряда, т.к. в это время происходит процесс переключения между репрезентациями рядов.

Декодирование нейронной активности, соответствовавшей четырем временным рядам стимулов, оказалось возможным для всех перечисленных выборок РНС («лучшие», «худшие», «one-shot», «zero-shot»), среднее качество декодирования около 0,8. У обученных РНС («лучшие» и «худшие») декодеры лучше выявляли класс «всё остальное» на первых тактах после смены ряда, подаваемого на вход РНС. Декодеры, распознававшие нейронную активность РНС из выборок «one-» и «zero-shot», в режиме теста не выделяли данный класс.

Данный результат соотносится с полученным ранее на другой задаче – тесте отложенного сравнения с образцом [9]: РНС формируют декодируемые динамические паттерны нейронной активности, соответствующие стимулам (или временным рядам стимулов), даже при отсутствии обучения, что обусловлено различиями в самих стимулах и внутренней нелинейной динамикой РНС. Благодаря обучению, в свою очередь, репрезентации стимулов становятся операциональными, т.е. РНС не просто отражают действительность, но и могут использовать это отражение для достижения цели. Сами репрезентации также становятся более оформленными, что позволяет декодерам уловить разницу между представлением рядов и промежуточными состояниями при переключении.

3.2. Декодирование нейронной активности гомогенных и гетерогенных РНС.

Поскольку нейронная активность РНС формируется в зависимости от весовых коэффициентов и структуры сети в целом, наличие функционально различных модулей может как упростить, так и усложнить декодирование, т.к. влияет на то, как в РНС хранится информация о полученных стимулах. В данной части работы проверялось, есть ли различия при декодировании гомогенных и гетерогенных модификаций РНС.

Использовались по 1500 РНС всех перечисленных ранее гомогенных и гетерогенных модификаций. После обучения задаче реагирования на ряды в течение 1200 ходов записывались доли правильных ответов РНС в режиме теста. Полученный результат соотносится с представленным в разделе 2 (рис. 2А): наибольшая доля правильных ответов в режиме теста в среднем наблюдается у гетерогенных РНС типа RefNet. Точность отклика прочих гетерогенных и гомогенных модификаций РНС имеет близкие значения в диапазоне (0,7-0,8), а модификации РНС с дополнительным входом (SRN+, DTRNN+, RefNet+) в среднем показывают результат чуть хуже, чем без него (SRN, DTRNN, RefNet).

Для дальнейшего исследования было выбрано по 5 РНС каждой модификации, продемонстрировавших наибольшую точность отклика в режиме теста. Результаты декодирования приведены на рис. 3.

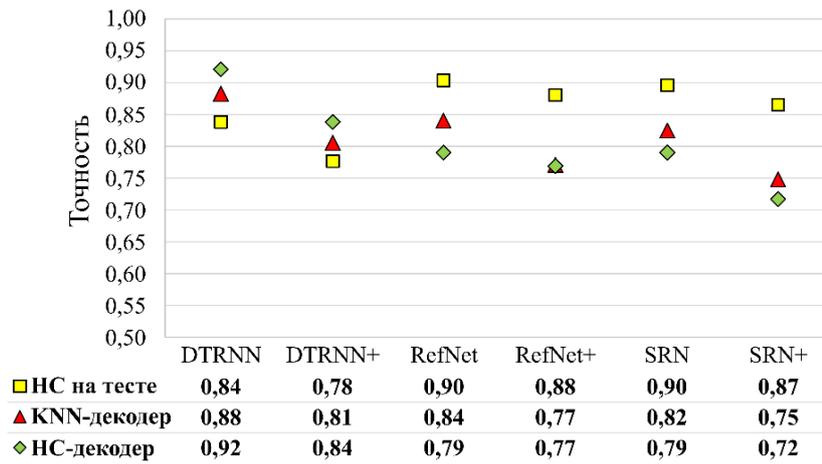


Рис. 3. Средняя точность отклика РНС (доля правильных ответов) в режиме теста, средние точности декодирования нейронной активности этих же РНС с помощью HC- и KNN-декодеров

Было сделано предположение, что декодирование, как процесс извлечения информации паттернов нейронной активности РНС, может сопровождаться потерями. РНС благодаря рекуррентной структуре способны сохранять сведения о контексте (предыдущих тактах), что позволяет им различать даже достаточно похожие между собой фрагменты разных рядов стимулов. Декодеры, в свою очередь, «видят» только картину возбуждения нейронов РНС на текущем такте, т.е. контекст им недоступен. Кроме того, при повторной подаче ряда на вход РНС паттерн нейронной активности может воспроизводиться неточно из-за различий в предыстории, поскольку ряды подаются в случайном порядке, что также может затруднять декодирование. Поэтому ожидалось, что точности декодирования нейронной активности РНС будут ниже, чем точности отклика этих РНС при реагировании на ряды.

На рис. 3 можно видеть, что для РНС типа RefNet, RefNet+, SRN, SRN+ точности декодирования действительно ниже, чем соответствующие точности отклика. Однако для РНС типа DTRNN и DTRNN+ наблюдается обратное: декодирование было проведено с большей точностью, чем само функционирование РНС. Иными словами, данные РНС формируют правильные, хорошо распознаваемые (до 0,92) репрезентации рядов, однако это не всегда приводит к формированию правильного отклика. Точности декодирования нейронной активности быстрого и медленного модулей по отдельности приведены в таблице 3.

Таблица 3. Декодирование отдельных модулей РНС типа DTRNN и DTRNN+

Модуль	Точность KNN-декодирования	
	DTRNN+	DTRNN
РНС целиком	0,889 ± 0,011	0,894 ± 0,002
Быстрый	0,863 ± 0,010	0,883 ± 0,004
Медленный	0,535 ± 0,038	0,563 ± 0,052

Паттерн нейронной активности медленного модуля распознается значительно хуже, чем быстрого. Однако наиболее точное декодирование возможно при рассмотрении всей РНС целиком, что свидетельствует о распределении информации о ряде между быстрым и медленным модулями.

Следовательно, гетерогенность по времени, реализованная в РНС типа DTRNN и DTRNN+, отражается на формировании репрезентаций временных рядов, в то время как функциональная гетерогенность РНС типа RefNet и RefNet+ не приводит к принципиальным отличиям от гомогенных конфигураций. Известно, что поддержание репрезентаций в рабочей памяти реализуется с помощью динамических паттернов [10, 11], что показывает значимость

кодирования во времени. Представленные в настоящей работе результаты показывают, что данное утверждение справедливо и для простейших нейросетевых модельных объектов.

3.3. Оценка сложности паттернов нейронной активности. Декодирование также позволяет оценить сложность паттерна нейронной активности. *Было сделано предположение*, что паттерны нейронной активности гетерогенных РНС обладают большей сложностью по сравнению с гомогенными РНС, поскольку информация распределена между модулями. Оценка сложности возможна, по крайней мере, двумя способами.

Во-первых, в результате предварительных измерений определено, что для обучения НС-декодеров при рассмотрении нейронной активности РНС разных модификаций оптимально разное количество нейронов внутреннего слоя (см. таблицу 4). Наибольший размер внутреннего слоя потребовался для обучения декодированию нейронной активности гетерогенных РНС типа RefNet и RefNet+ (30 нейронов), для прочих РНС значения близки (15-20 нейронов).

Таблица 4. Оптимальное количество нейронов внутреннего слоя НС-декодера

Тип РНС	DTRNN+	DTRNN	RefNet+	RefNet	SRN+	SRN
Количество нейронов внутреннего слоя декодера	20	20	30	30	15	20

Во-вторых, после того, как НС-декодеры обучены, возможно провести редукцию структуры и убрать связи между нейронами (синапсы), не влияющие на качество декодирования [5]. Если проверить, какая часть входных синапсов НС-декодера может быть удалена без потери качества декодирования, то можно оценить, все ли значения нейронной активности РНС на текущем такте функционирования необходимы для идентификации обрабатываемого ряда. Результаты для разных типов РНС приведены на рис.4.

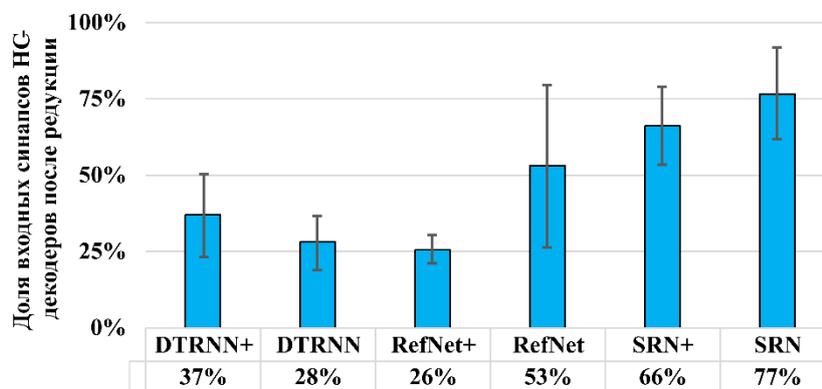


Рис. 4. Доля входных синапсов НС-декодеров, оставшихся после редукции структуры декодеров с сохранением качества декодирования. N=15 для каждой конфигурации, в качестве погрешностей – стандартное отклонение

После редукции НС-декодеры, идентифицировавшие ряды по нейронной активности гомогенных РНС, сохранили в среднем больше входных синапсов по сравнению с гетерогенными. В целом, наименьшую долю входных синапсов (30-40%) сохранили декодеры нейронной активности РНС типа DTRNN и DTRNN+, что согласуется с результатом, приведенным в разделе 3.2: данные РНС обладают наиболее распознаваемыми паттернами нейронной активности. НС-декодеры нейронной активности РНС типа RefNet и RefNet+ также продемонстрировали возможность редукции 50-75% входных синапсов.

Наконец, важно отметить, что паттерны нейронной активности даже в пределах РНС одного типа очень вариативны по сложности, о чем можно судить по величине стандартного отклонения на рис.4. Так, НС-декодер одной сети типа RefNet может редуцироваться на 70-80%, а другой – ни на один синапс.

Заключение. В статье показаны примеры контринтуитивных эффектов, наблюдаемых при моделировании рефлексии на простейших рекуррентных нейронных сетях. Из всех гипотез, приведенных в каждом разделе статьи и связанных с эффективностью и паттернами нейронной активности данных модельных объектов, ни одна не подтвердилась полностью, несмотря на малые размеры и «прозрачное» устройство объектов, а также простоту решаемых ими задач.

Описанные эффекты могут рассматриваться в одном ряду, например, с отображением Фейгенбаума – дискретной формой уравнения Ферхюльста, которое, являясь простым нелинейным уравнением вида $f(x_{n+1}) = rx_n(1 - x_n)$, в зависимости от величины параметра r может описывать разнообразные динамические режимы, в том числе хаотический из-за возникновения каскада бифуркаций [12]. Точки бифуркации, в свою очередь, представляют особый интерес, поскольку, согласно предположению В.А. Лефевра [13, с.10-18], в них поведение одушевленных (обладающих сознанием) тел физически недетерминировано, и наличие таких точек как раз может являться свидетельством наличия сознания. Используемые в работе рекуррентные нейронные сети являются модельными объектами, чье поведение детерминировано уравнениями функционирования (1), однако отклик РНС интерпретируется как «0» или «1» в зависимости от того, на каком из двух выходных нейронов сигнал больше, причем различие между сигналами на этих нейронах может быть сколь угодно малым. Такое различие и может являться источником «бесконечно малых толчков, направляющих эволюцию состояния тела» [13, с. 15].

Изложенный здесь материал может служить предостережением для тех исследователей, кто, как и авторы данной статьи, использует предельно простые модельные объекты для воспроизведения реальных феноменов и ожидает предельно ясных результатов, а также для всех использующих в исследовательской практике искусственные нейронные сети.

Благодарности. Работа поддержана грантом РНФ, Красноярского краевого фонда науки №23-21-10041 «Иерархия функциональных аттракторов в нейросетевых моделях рефлексии».

Список источников

1. Clark A. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science, Behavioral and brain sciences, 2013, vol.36, no.3, pp. 181-204, DOI:10.1017/S0140525X12000477.
2. Beren M., Anil S., Buckley Ch.L. Predictive coding: a theoretical and experimental review. arXiv, 2021, p. 2107.12979, DOI:10.48550/arXiv.2107.12979.
3. Анохин П.К. Избранные труды: философские аспекты теории функциональной системы / П.К. Анохин. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
4. Bridges Alice D. et al. Bumblebees socially learn behaviour too complex to innovate alone. Nature, 2024, v.627, no.8004, pp. 572-578, DOI:10.1038/s41586-024-07126-4.
5. Барцев С.И. Нейросетевое декодирование информации о внешнем стимуле по паттерну нейронной активности рекуррентной нейронной сети / С.И. Барцев, П.М. Батурина, Г.М. Маркова // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни, 2022. – Т. 502. – № 1. – С. 48-53. – DOI:10.31857/S2686738922010048.
6. Барцев С.И. Биофизический подход к моделированию рефлексии: обоснование, методы, результаты / С.И. Барцев, Г.М. Маркова, А.И. Матвеева // Философские проблемы информационных технологий и киберпространства, 2023. – №.2. – С.120-139. – DOI:10.17726/philIT.2023.2.9.
7. Eliaz K., Rubinstein A. Edgar Allan Poe's riddle: Framing effects in repeated matching pennies games, Games and Economic Behavior, 2011, v.71, no.1, pp. 88-99, DOI:10.1016/j.geb.2009.05.010.
8. Markova G.M., Bartsev S.I. Does a recurrent neural network form recognizable representations of a fixed event series? Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research VII. NEUROINFORMATICS 2023, Studies in Computational Intelligence, 2023, vol.1120, pp. 206-213, DOI:10.1007/978-3-031-44865-2_23.
9. Маркова Г.М. Кодирование внешних стимулов простыми рекуррентными нейронными сетями в ходе отложенного теста сравнения / Г.М. Маркова, С.И. Барцев // Сборник научных трудов XXIII Международной научно-технической конференции «Нейроинформатика-2021», Москва, 18-22 октября 2021 года. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 39-48. – EDN:ZTRMOY.

10. Stroud J.P., Duncan J., Lengyel M. The computational foundations of dynamic coding in working memory. Trends in cognitive sciences, 2024, vol. 28, iss. 7, pp. 614-627, DOI:10.1016/j.tics.2024.02.011.
11. Cueva Christopher J. et al. Low-dimensional dynamics for working memory and time decoding. PNAS, 2020, vol. 117, no. 37, pp. 23021-23032, DOI:10.1073/pnas.1915984117.
12. May R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, 1976, vol. 261, no.5560, pp. 459-467, DOI: 10.1038/261459a0
13. Лефевр В.А. Что такое одушевленность? / В.А. Лефевр. – М.: Когито-Центр, 2017. – 123 с.

Маркова Галия Муратовна. Младший научный сотрудник Института биофизики СО РАН, ассистент, аспирант кафедры биофизики Института фундаментальной биологии и биотехнологии СФУ. Основные направления исследований: нейросетевое моделирование когнитивных функций, нейроинформатика. AuthorID: 1075515, SPIN: 1664-7436, ORCID: 0000-0003-1726-8102, GMarkova@ibp.ru, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 50.

Барцев Сергей Игоревич. Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института биофизики СО РАН, заведующий лабораторией теоретической биофизики Института биофизики СО РАН, профессор кафедры биофизики Института фундаментальной биологии и биотехнологии СФУ. Основные направления исследований: нейросетевое моделирование когнитивных функций, нейроинформатика, малоразмерные биосферные модели, снижение сложности моделей биологических систем, проектирование биологических систем жизнеобеспечения для космического применения. AuthorID: 66068, SPIN: 1884-5876, ORCID: 0000-0003-0140-4894, BartsevSI@ibp.ru, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 50.

UDC 577.38+004.81

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.001

Extremely simple does not mean extremely clear: some counterintuitive results of neural network modeling of reflection

Galiya M. Markova^{1,2}, Sergey I. Bartsev^{1,2}

¹Institute of biophysics Siberian Branch of RAS,
Russia, Krasnoyarsk, GMarkova@ibp.ru

²School of fundamental biology and biotechnology, Siberian federal university,
Russia, Krasnoyarsk

Abstract. The paper presents results on modeling reflection, understood in a broad sense as the presence of an internal representation of the external world in an active agent that influences its behavior. The ability of the simplest neural network model objects of homogeneous and heterogeneous (modular) structure to solve tasks requiring the presence and use of stable internal representations of external stimuli is revealed. It is determined that these representations are decodable, i.e. based on the current type of neural activity pattern of a neural network, it is possible to determine which specific stimulus or time series of stimuli is currently being processed in it. The authors' initial assumptions made on the basis of general considerations regarding the effectiveness of neural networks of various structures in reflection tasks and the corresponding results are presented. In particular, the following effects are shown: 1) positions in the odd-even game are asymmetric under the condition of limited computational capabilities of the players; 2) formally similar tasks on reflection (the odd-even game and responding to fixed time series of stimuli according to the rules of this game) differ in the requirements for players; 3) decodable patterns of neural activity present not only in neural networks trained to respond to stimuli, but also in networks with random weight coefficients; 4) the accuracy of decoding the neural activity of recurrent neural networks with temporal heterogeneity exceeds the accuracy of the response of these networks when processing series of stimuli; 5) patterns of neural activity in homogeneous recurrent neural networks are more difficult to decode than in heterogeneous networks of comparable size. These effects illustrate the rich internal and behavioral dynamics of the simplest recurrent neural networks, which, on the one hand, is promising for research and practical purposes, and on the other hand, complicates the prediction and interpretation of their behavior.

Keywords: recurrent neural networks, reflection, reflexive games, neural activity decoding, representation of external stimuli

Acknowledgements: The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, Krasnoyarsk Regional Science Foundation No. 23-21-10041 «Hierarchy of functional attractors in neural network models of reflection».

References

1. Clark A. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science, *Behavioral and brain sciences*, 2013, vol.36, no.3, pp. 181-204, DOI:10.1017/S0140525X12000477.
2. Beren M., Anil S., Buckley Ch.L. Predictive coding: a theoretical and experimental review. *arXiv*, 2021, p. 2107.12979, DOI:10.48550/arXiv.2107.12979.
3. Anokhin P.K. *Izbrannyye trudy: filosofskie aspekty teorii funktsional'noi sistemy* [Selected works: philosophical aspects of functional system theory]. Moscow, Nauka [Science], 1978, 400 p.
4. Bridges Alice D. et al. Bumblebees socially learn behaviour too complex to innovate alone. *Nature*, 2024, v.627, no.8004, pp. 572-578, DOI:10.1038/s41586-024-07126-4.
5. Bartsev S.I., Baturina P.M., Markova G.M. Neyrosetevoye dekodirovaniye informatsii o vneshnem stimule po patternu neyronnoy aktivnosti rekurrentnoy neyronnoy seti [Neural network-based decoding input stimulus data based on recurrent neural network neural activity pattern]. *Doklady Biological Sciences*, 2022, vol. 502, no. 1, pp. 1-5, DOI:10.31857/S2686738922010048.
6. Bartsev S.I., Markova G.M., Matveeva A.I. Biofizicheskiy podkhod k modelirovaniyu refleksii: obosnovaniye, metody, rezul'taty [Biophysical approach to modeling reflection: basis, methods, results]. *Filosofskie problemy informatsionnykh tekhnologiy i kiberprostranstva* [Philosophical problems of information technology and cyberspace], 2023, no.2, pp. 120-139, DOI:10.17726/philIT.2023.2.9.
7. Eliaz K., Rubinstein A. Edgar Allan Poe's riddle: Framing effects in repeated matching pennies games, *Games and Economic Behavior*, 2011, v.71, no.1, pp. 88-99, DOI:10.1016/j.geb.2009.05.010.
8. Markova G.M., Bartsev S.I. Does a recurrent neural network form recognizable representations of a fixed event series? *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research VII. NEUROINFORMATICS 2023, Studies in Computational Intelligence*, 2023, vol.1120, pp. 206-213, DOI:10.1007/978-3-031-44865-2_23.
9. Markova G.M., Bartsev S.I. Kodirovaniye vneshnih stimulov prostymi rekurrentnymi neyronnymi setjami v hode otlozhenogo testa sravneniya [Encoding of external stimuli by simple recurrent neural networks during a delayed match-to-sample test]. *Sbornik nauchnykh trudov XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Neuroinformatika-2021»*, Moskva, 18-22 oktyabrya 2021 goda [Proc. of the XXIII International Scientific and Technical Conference “Neuroinformatics-2021”, Moscow, October 18-22, 2021], Moscow, 2021, pp. 39-48, EDN:ZTPMOY..
10. Stroud J.P., Duncan J., Lengyel M. The computational foundations of dynamic coding in working memory. *Trends in cognitive sciences*, 2024, vol. 28, iss. 7, pp. 614-627, DOI:10.1016/j.tics.2024.02.011.
11. Cueva Christopher J. et al. Low-dimensional dynamics for working memory and time decoding. *PNAS*, 2020, vol. 117, no. 37, pp. 23021-23032, DOI:10.1073/pnas.1915984117.
12. May R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 1976, vol. 261, no.5560, pp. 459-467, DOI: 10.1038/261459a0
13. Lefebvre V.A. Chto takoe odushevlenost'? [What is animateness?]. Moscow, Kogito-Centr, 2017, 123 p.

Markova Galiya Muratovna. Junior researcher at the Institute of Biophysics SB RAS, assistant, postgraduate student at the Department of biophysics at the Institute of fundamental biology and biotechnology SibFU. Main areas of research: neural network modeling of cognitive functions, neuroinformatics. AuthorID: 1075515, SPIN: 1664-7436, ORCID: 0000-0003-1726-8102, GMarkova@ibp.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok str., 50, building 50.

Bartsev Sergey Igorevich. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher at the Institute of Biophysics SB RAS, Head of the laboratory of theoretical biophysics at the institute of biophysics SB RAS, Professor at the department of biophysics at the Institute of fundamental biology and biotechnology SibFU. Main research areas: neural network modeling of cognitive functions, neuroinformatics, small-scale biosphere models, reducing the complexity of biological systems models, designing biological life support systems for space applications. AuthorID: 66068, SPIN: 1884-5876, ORCID: 0000-0003-0140-4894, BartsevSI@ibp.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok str., 50, building 50.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024; одобрена после рецензирования 14.01.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 12/20/2024; approved after reviewing 01/14/2025; accepted for publication 02/13/2025.

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.853

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.002

Регуляризация весов в импульсных нейронных сетях

Антонов Дмитрий Иванович^{1,2}, Сухов Сергей Владимирович²

¹Ульяновский государственный технический университет,
Россия, Ульяновск

²Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Россия, Ульяновск, *d.antonov@ulireran.ru*

Аннотация. Переобучение модели (overfitting) искусственной нейронной сети является нежелательным результатом её обучения. Подобный результат возникает из-за того, что в процессе обучения моделью учитываются как существенные, так и несущественные признаки, шум. Методы регуляризации предназначены для минимизации влияния случайного шума и выявления важных признаков. Существует ряд методов регуляризации для искусственных нейронных сетей 2-го поколения (метод исключения, L1-регуляризация, L2-регуляризация и др.), но они не подходят для 3-го поколения нейронных сетей – импульсных нейронных сетей (ИмНС), обеспечивающих более энергоэффективные и биологически правдоподобные вычисления. Информация в ИмНС передаётся с помощью коротких импульсов (спайков), а обучение происходит локально. Биологическая концепция работы нейронов мозга «используй или потеряешь» (use it or lose it) заключается в том, что если синаптическая связь не используется, то она слабеет и исчезает. Применение к ИмНС данной биологической концепции заключается в придании синаптическим весам сети временной зависимости, уменьшающей величину веса пропорционально времени «молчания» синаптической связи. В настоящей работе предложен новый метод регуляризации весов для ИмНС, основанный на том, что во время обучения сети производится обрезка (pruning) неиспользуемых весов, происходящая за счёт получения весами зависимости от времени, прошедшем с момента последнего импульса. В экспериментах была использована двухслойная ИмНС, обученная согласно комбинированному хеббовскому правилу, ранее разработанному авторами на базе локальных правил обучения STDP (spike-timing-dependent plasticity) и all-LTD (all-long-term-depression rule). Для обучения и тестирования ИмНС применялся набор данных MNIST (изображения рукописных цифр): 15000 изображений для обучения и 1500 изображений для тестирования, в опытах использовались только 3 класса изображений из 10 возможных.

Ключевые слова: импульсная нейронная сеть, переобучение, метод регуляризации

Цитирование: Антонов Д.И. Регуляризация весов в импульсных нейронных сетях / Д.И. Антонов, С.В. Сухов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 16-24. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.002.

Введение. Важным аспектом машинного обучения, связанным с его успешностью, является качественное отделение полезной информации от шума. Процессы извлечения полезных признаков и их дифференциации от шумовых входных данных присутствуют во многих приложениях искусственных нейронных сетей (ИНС).

Желаемым результатом любого вида машинного обучения является не просто запоминание признаков тех данных, на которых модель была обучена, но и приобретение моделью способности обобщать полученные знания для решения новых задач [1]. В процессе обучения ИНС происходят вычисление и минимизация ошибки на обучающем множестве. Однако бездумная минимизация функции потерь может привести к переобучению модели [2]. Переобучение является результатом того, что при обучении учитываются как существенные, так и несущественные признаки, шум. Методы регуляризации призваны минимизировать влияние случайного шума, выявить регулярные признаки в процессе обучения модели и тем самым предотвратить переобучение ИНС.

Следствием применения методов регуляризации может быть различная обработка знакомых, незнакомых данных и шума, что важно для предиктивной обработки информации

в ИНС. Незнакомая информация должна распространяться дальше по нейронной сети для обработки, знакомый (ожидаемый) результат не должен приводить к дополнительной обработке, а шум вообще не должен распространяться по сети [3].

Применение методов регуляризации может быть основой для решения важной проблемы защиты искусственных нейронных сетей от различных типов вредоносных атак (adversarial attacks) [4]. Незначительные для человеческого восприятия шумовые изменения изображений могут приводить к ошибкам в их классификации искусственными сетями, что, в свою очередь, влечёт серьезные сбои в работе устройств на основе ИНС.

1. Методы регуляризации искусственных нейронных сетей. Для ИНС 2-го поколения решение задач предотвращения переобучения и задач повышения устойчивости нейронных сетей к вредоносным атакам выполняется с помощью различных методов регуляризации. Многие методы регуляризации связаны с минимизацией или обрезанием (прунинг, pruning) избыточных весов [5, 6]. В практике обучения ИНС чаще всего используются три метода: метод исключения (дропаут, dropout), L1- и L2-регуляризация.

В L2-регуляризации, также называемой регрессией Риджа (Ridge regression), используется квадрат весов в качестве дополнительного слагаемого для функции потерь:

$$F_{loss} = E(Y - \hat{Y}) + \lambda \sum_{i=0}^n w_i^2, \quad (1)$$

где λ – параметр регуляризации, E – некоторая функция ошибки, измеряющая разницу между истинным значением Y и прогнозом \hat{Y} . L2-регуляризация способствует более сбалансированному распределению весов по признакам и не позволяет им приобретать большие значения.

В случае L1-регуляризации, также называемой регрессией Лассо (Lasso regression), в функцию потерь F_{loss} добавляется регуляризационный член с абсолютными значениями весов:

$$F_{loss} = E(Y - \hat{Y}) + \lambda \sum_{i=0}^n |w_i|. \quad (2)$$

Результатом L2-регуляризации является минимизация весов, а L1-регуляризация делает избыточные веса равными нулю, создавая разреженную модель.

Метод исключения, как и L1-регуляризация, предполагает случайное удаление весов или целых нейронов. Эффект метода исключения заключается в том, что сеть становится менее чувствительной к конкретным весам нейронов.

Все методы регуляризации преследуют своей целью создание более гладкой модели, наилучшим образом обобщающей закономерности данных.

2. Импульсные нейронные сети. Импульсные (спайковые) нейронные сети (ИмНС) – это следующее, 3-е поколение нейронных сетей, обещающее более энергоэффективные и биологически правдоподобные вычисления [7]. Нейроны в ИмНС передают информацию с помощью коротких импульсов (спайков), а обучение происходит локально. Отметим, что градиентные методы обучения, широко применяемые для обучения 2-го поколения ИНС, для ИмНС не являются имманентно присущими, хотя есть варианты их адаптации под импульсные сети, но псевдо-градиентные методы, разработанные для ИмНС на основе суррогатов, не био-подобны и ведут к возникновению дополнительных издержек.

Некоторые предыдущие исследования показали, что ИмНС более устойчивы к воздействию шума и более устойчивы к вредоносным атакам [8-10]. Однако в других исследованиях было обнаружено, что ИмНС все еще подвержены воздействию шума [11]. Здесь мы предлагаем метод регуляризации для ИмНС, который значительно снижает нейронную активность, вызываемую шумовым воздействием.

В ИмНС, как правило, используются локальные методы обучения. Так называемая пластичность, зависящая от времени спайка (spike-timing-dependent plasticity, STDP), является

наиболее часто используемым правилом обучения в ИмНС. Свойство STDP кластеризовать данные напрямую соответствует потребностям обучения без учителя. Во время такого обучения по правилу STDP синаптические веса изменяются по закону:

$$\Delta w(\Delta t) = \begin{cases} A_{pre} \cdot \exp(-\Delta t/\tau_{pre}), & \Delta t > 0 \\ A_{post} \cdot \exp(\Delta t/\tau_{post}), & \Delta t < 0 \end{cases} \quad (3)$$

где Δt – временной интервал между возникновением спайка в постсинаптическом и пресинаптическом нейронах, коэффициенты $A_{pre} > 0$, $A_{post} < 0$ и $\tau_{pre} > 0$ и $\tau_{post} > 0$ – постоянные времени. Правило STDP приводит к усилению синаптической связи w , если спайк на пресинаптическом нейроне предшествует постсинаптическому $\Delta t > 0$, в случае $\Delta t < 0$ синаптическая связь уменьшается (рис. 1а). Фактически, синаптическая связь усиливается, если пресинаптический спайк является причиной появления постсинаптического. Механизм STDP обеспечивает чувствительность постсинаптических нейронов к характерным чертам входного сигнала.

Обучение с учителем обычно используется для решения задач классификации и регрессии. В работах [12, 13] мы модифицировали STDP так, чтобы метод был применим для обучения с учителем. Система уравнений, похожая на систему уравнений (3), описывает еще одно биологически правдоподобное правило – правило «всевременной депрессии» (all-long-term-depression rule, all-LTD). Изменение синаптической связи в случае all-LTD определяется выражением:

$$\Delta w(\Delta t) = \begin{cases} -A_{pre} \cdot \exp(-\Delta t/\tau_{pre}), & \Delta t > 0 \\ A_{post} \cdot \exp(\Delta t/\tau_{post}), & \Delta t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Согласно правилу all-LTD, если пресинаптический спайк вызывает постсинаптический спайк ($\Delta t > 0$), то такое поведение нужно пресечь и уменьшить величину синаптической связи; изменение синаптической связи в случае $\Delta t < 0$ остается таким же, как и для STDP (рис. 1б). Описанные свойства all-LTD позволяют использовать это правило для обеспечения нечувствительности нейронов к определённым признакам.

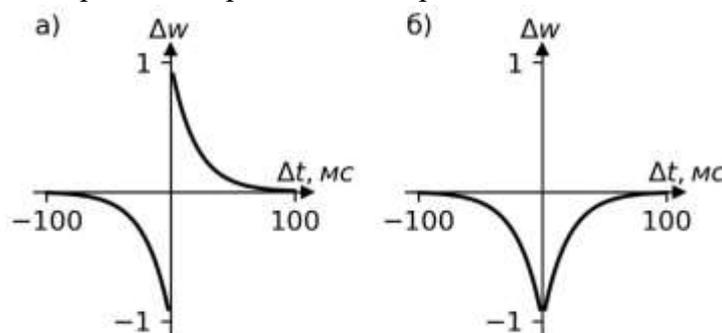


Рис. 1. Изменение силы синаптической связи в результате канонического STDP (а) и в результате all-LTD (б)

Для обучения с учителем ИмНС в экспериментах нами использовалось комбинированное хеббовское правило «STDP+all-LTD» [13].

Правила обучения STDP и all-LTD не используют глобальную функцию потерь. Таким образом, методы регуляризации (1), (2) и аналогичные им не подходят для ИмНС и избыточные веса не устраняются в процессе обучения. Из систем уравнений (3) и (4) видно, что веса изменяются только в случае активации пресинаптических нейронов, в случае «молчащих» пресинаптических нейронов их исходящие веса остаются такими же, как при инициализации. Эти избыточные веса могут быть впоследствии использованы для распространения в сети шума или ненужной/неблагоприятной информации.

3. Метод регуляризации весов в импульсных нейронных сетях. Биологическая концепция «используй или потеряешь» (use it or lose it) [14] заключается в том, что если синаптическая связь в мозге не используется, то она слабеет и исчезает.

Перенесение принципа данной биологической концепции на ИМНС означает, что для обретения подобных свойств веса ИМНС должны получить временную зависимость, уменьшающую величину веса пропорционально времени, прошедшего с момента последнего использования этой связи.

Мы предлагаем метод регуляризации весов для ИМНС, основанный на том, что во время обучения сети производится обрезка неиспользуемых весов, происходящая за счёт получения всеми весами зависимости от времени:

$$w(t) = w(t_s) \exp\left(-k_p \left(\frac{t-t_s}{\tau_{\text{prun}}}\right)^2\right), \quad (5)$$

где t_s – время последнего импульса, τ_{prun} – характерное время, в течение которого происходит обрезка весов, k_p – коэффициент обрезки.

Для весов, связанных с часто возбуждающимися нейронами, в уравнении (5) значение экспоненциального множителя оказывается близко к единице и затухания веса практически не происходит. Синаптические веса, связанные с нейронами, не испускающими спайки в течении времени, близкого или большего τ_{prun} , подвергаются обрезке (прунингу).

4. Эксперименты. Чтобы проверить нашу концепцию регуляризации, мы провели серию экспериментов с ИМНС. В экспериментах ИМНС обучалась для решения задачи классификации данных из набора MNIST, содержащего изображения рукописных цифр размером 28×28 пикселей. Целью экспериментов было сравнение выходной активности ИМНС с регуляризацией весов и без нее. В экспериментах применялась модель нейронов «интегрировать-и-сработать» с утечкой (leaky integrate-and-fire model) и с адаптивным порогом для возбуждающих нейронов.

Архитектура использованной в экспериментах двухслойной сети (рис. 2) аналогична описанной в работе [15]. Первый входной слой ИМНС содержит 784 пуассоновских нейрона, второй слой состоит из равного количества возбуждающих и тормозных нейронов (по 10 нейронов каждого вида на один класс данных). Каждый нейрон в пуассоновском слое соответствует одному пикселю входных данных (размер слоя соответствует количеству пикселей подаваемого на вход изображения).

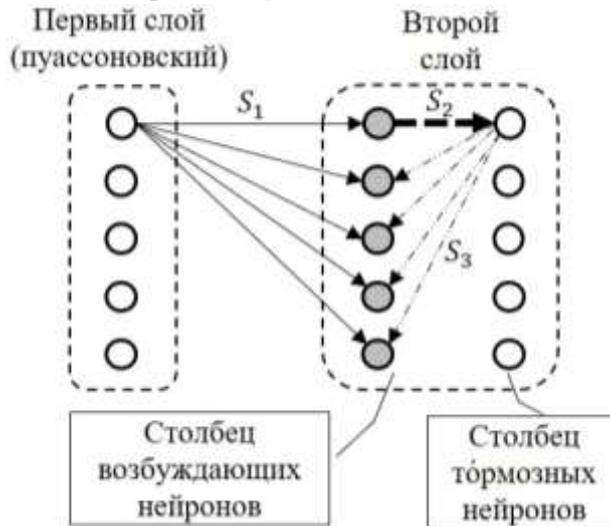


Рис. 2. Архитектура SNN: первый слой содержит 784 пуассоновских нейрона, второй слой содержит 30 возбуждающих и 30 тормозных нейронов (по 10 нейронов каждого вида на один класс); S1, S2, и S3 – синаптические связи

При поступлении на вход сети очередного изображения каждый пуассоновский нейрон генерирует последовательность импульсов (спайков) со средней частотой, равной интенсивности подаваемого пикселя, осуществляя частотное кодирование информации. Сигнал проходит от пуассоновских нейронов к возбуждающим нейронам второго слоя через синапсы группы S_1 , соединяющие нейроны по принципу «один ко всем». Через синапсы группы S_2 импульсы проходят к тормозным нейронам второго слоя, соединяющие нейроны по принципу «один к одному». Далее через синапсы группы S_3 импульсы, генерируемые тормозными нейронами, возвращаются к возбуждающим нейронам, соединённым с тормозными по принципу «один ко всем, кроме инициатора».

Для реализации комбинированного хеббовского правила обучения «*STDP+all-LTD*», описанного в работе [13], возбуждающие нейроны второго слоя были разделены на равные группы количеством, равным количеству классов данных. Обучение по правилу «*STDP+all-LTD*» производится следующим образом:

- на вход сети подаются данные определенного класса, вызывающие генерацию импульсов нейронами пуассоновского слоя;
- при прохождении сигнала синапсы группы S_1 , связанные с группой нейронов, распознающих целевой класс, обучаются по правилу *STDP*;
- в случае, если сигнал идёт через синапсы группы S_1 на возбуждающий нейрон из группы, не связанной с распознаванием целевого класса, то веса таких синапсов изменяются в соответствии с правилом *all-LTD*.

На этапе тестирования класс данных определяется по наибольшей активности групп нейронов, отнесенных к каждому классу.

В экспериментах мы использовали данные из набора MNIST: 15000 изображений для обучения и 1500 изображений для тестирования. Использовались только 3 класса изображений из 10 возможных. ИмНС была реализована в пакете Brian 2.0 – фреймворке с открытым исходным кодом для моделирования ИмНС. Для выполнения кода применялся компьютер с процессором Intel Core i9 (3,1 ГГц), 32 ГБ оперативной памяти, PyTorch 1.8.0 и Ubuntu 20.0.

Результат обучения с регуляризацией весов и без нее показан на рис. 3, где представлены веса синаптической группы S_1 , отвечающие за распознавание одного из признаков изображения цифры 7.

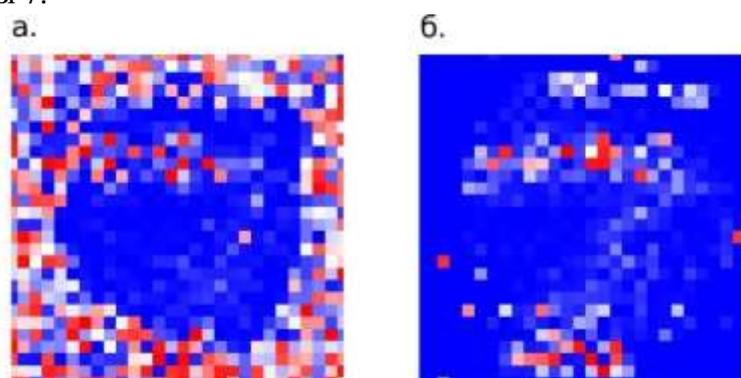


Рис. 3. Графическое изображение 784 весов синаптической группы S_1 , связанных с одним из возбуждающих нейронов: а) в модели без регуляризации; б) те же веса в модели с регуляризацией. Синий цвет соответствует нулевому весу, отличные от 0 веса обозначены различными градациями красного цвета

Синапсы, веса которых показаны, соединяют 784 нейрона пуассоновского слоя с одним из возбуждающих нейронов. На рис. 3а отображены веса в модели без применения метода регуляризации, а на рис. 3б – с применением регуляризации. Эффект регуляризации хорошо виден: на рис. 3а вдоль внешней границы рисунка во множестве расположены веса, связанные

с «молчащими» нейронами, но при этом имеющие ненулевое значение (ненулевые веса обозначены градациями красного цвета), на рис. 3б эти же веса уже обрезаны процессом регуляризации (обнулены) и приобрели синюю окраску, соответствующую нулевому значению.

Для изучения влияния регуляризации обученные сети были протестированы на четырех различных наборах данных по 1500 изображений в каждом:

- 1) 28×28 пиксельные изображения с дельта-коррелированным шумом со средней интенсивностью, равной средней интенсивности изображений в обучающем наборе данных;
- 2) 28×28 изображения с пиксельным шумом, обработанные гауссовым фильтром со стандартным отклонением 2 пикселя (изображения с шумом с конечной длиной корреляции);
- 3) изображения цифр, соответствующих тем же классам, на которых обучалась сеть;
- 4) изображения цифр, отличающихся от классов, на которых обучалась сеть.

Устранение незначительных синаптических весов, не участвующих в распознавании, выражается в снижении общей нейронной активности ИмНС при тестировании на изображениях как «известных» (классы изображений совпадают с теми, которые использовались при обучении), так и «неизвестных» цифр (таблица 1).

Таблица 1. Выходная активность нейронов

№	Набор для тестирования	Общее количество спайков	
		в модели без регуляризации	в модели с регуляризацией
1	Дельта-коррелированный шум	3162	1
2	Гауссово размытые изображения	3265	1
3	«Известные» цифры	416	344
4	«Неизвестные» цифры	346	240

В модели без регуляризации «неизвестные» данные генерировали на 17% меньше спайков, чем «известные», а в модели с регуляризацией разница в количестве спайков увеличилась до 30 % (строки 3 и 4 в таблице 1).

Также обученная сеть показала значительную разницу в спайковой активности нейронов для шумовых изображений с регуляризацией и без нее. По данным таблицы 1 видно, что ИмНС с регуляризацией практически не реагирует на шумовой сигнал (строки 1 и 2 в таблице 1), что позволяет надеяться на эффективность применения данного метода регуляризации для снижения влияния вредоносных состязательных атак (adversarial attacks) на ИмНС.

Заключение. В настоящей работе представлен новый метод регуляризации весов в ИмНС на основе биологической концепции «используй или потеряешь» (use it or lose it). Использование регуляризации в ИмНС устраняет веса, не участвующие или мало участвующие в процессе распознавания, что позволяет:

- значительно снизить влияние шума на процесс распознавания и тем самым существенно уменьшить риск вредоносных атак на ИмНС;
- снизить нейронную активность в ответ на «неизвестные» данные (в проведенных экспериментах в 1,8 раза), что повышает точность ИмНС и улучшает её способность к обобщению;
- модулировать распространение известной и неизвестной информации, что крайне важно для реализации предиктивных вычислений в ИмНС.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-21-00470).

Список источников

1. Urolagin S., Prema K.V., Reddy N.V.S. Generalization capability of artificial neural network incorporated with pruning method. *Advanced computing, networking and security. Lecture notes in computer science*, Springer, 2012, vol. 7135, pp. 171-178.
2. Montesinos López O.A., Montesinos López A., Crossa J. Overfitting, model tuning, and evaluation of prediction performance. In: *Multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction. multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction*, 2022, pp. 109-139, DOI:10.1007/978-3-030-89010-0_4
3. N'dri A.W., Barbier T., Teulière C. et al. Predictive coding light: learning compact visual codes by combining excitatory and inhibitory spike timing-dependent plasticity. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and pattern recognition*, 2023, pp. 3997-4006.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016, 800 p.
5. Hendrycks D., Mu N., Cubuk E.D. AugMix: A Simple method to improve robustness and uncertainty under Data shift. *International conference on learning representations*, 2020, pp. 1-15, DOI:10.48550/arXiv.1912.02781.
6. Yun S., Han D., Oh S. et al. CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features. *IEEE/CVF International conference on computer vision*, 2019, pp. 6022-6031, DOI:10.1109/ICCV.2019.00612.
7. Maass W. Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models. *Neural Networks*, 1997, vol. 10, no.9, pp. 1659–1671, DOI:10.1016/S0893-6080(97)00011-7.
8. Sharmin S., Panda P., Sarwar S.S. et al. A comprehensive analysis on adversarial robustness of spiking neural networks. *2019 International joint conference on neural networks*, Budapest, Hungary, 2019, pp. 1-8.
9. Tan Y.X.M., Elovici Y., Binder A. Exploring the back alleys: analysing the robustness of alternative neural network architectures against adversarial attacks. *arXiv*, 2020, DOI:10.48550/arXiv.1912.03609.
10. Marchisio A., Nanfa G., Khalid F. et al. Is spiking secure? A comparative study on the security vulnerabilities of spiking and deep neural networks. *2020 International joint conference on neural networks (IJCNN)*, 2020, pp. 1-8, DOI:10.1109/IJCNN48605.2020.9207297.
11. Leontev M., Antonov D., Sukhov S. Robustness of spiking neural networks against adversarial attacks. *2021 International conference on information technology and nanotechnology*, 2021, pp. 1-6, DOI:10.1109/ITNT52450.2021.9649179.
12. Antonov D., Batuev B., Sukhov S. Spiking neural networks training with combined Hebbian rules. *X International conference on information technology and nanotechnology (ITNT)*, Samara, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, DOI:10.1109/ITNT60778.2024.10582358.
13. Антонов Д.И. Обучение импульсных нейронных сетей-классификаторов с помощью локальных правил / Д.И. Антонов, С.В. Сухов // XXV Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2023», Сборник научных трудов, 2023. – С. 116-125.
14. Shors T.J., Anderson M.L., Curlik Ii D.M. et al. Use it or lose it: how neurogenesis keeps the brain fit for learning. *Behavioural brain research*, 2012, vol. 227, no. 2, pp. 450-458, DOI:10.1016/j.bbr.2011.04.023.
15. Diehl P., Cook M. Unsupervised learning of digit recognition using spike-timing-dependent plasticity. *Frontiers in computational neuroscience*, 2015, vol. 9, pp. 1-9, DOI:10.5167/uzh-107763.

Антонов Дмитрий Иванович. Научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Направления исследований: правила обучения импульсных нейронных сетей. AuthorID: 1128755, SPIN: 7847-8640, ORCID: 0000-0003-3113-8320, d.antonov@ulireran.ru, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2.

Сухов Сергей Владимирович. К. ф.-м. н. Старший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Направления исследований: импульсные нейронные сети, вычислительная нейробиология. AuthorID: 28708, SPIN: 6047-8716, ORCID: 0000-0002-8966-6030, sukhov@ulireran.ru, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2.

UDC 004.853

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.002

Weight regularization in spiking neural networks**Dmitry I. Antonov^{1,2}, Sergey V. Sukhov²**¹Ulyanovsk state technical university,
Russia, Ulyanovsk²Ulyanovsk branch of Kotelnikov institute of radioengineering and electronics RAS,
Russia, Ulyanovsk, *d.antonov@ulireran.ru*

Abstract. Overfitting an artificial neural network model is the result of training taking into account both essential and insignificant features, noise. Regularization methods are intended to minimize the influence of random noise and to identify regular features. There are a number of regularization methods for 2nd generation artificial neural networks (dropout, L1-regularization, L2-regularization, etc.). But these conventional regularization methods are not suitable for the 3rd generation of neural networks, spiking neural networks (SNN), which provide more energy-efficient and biologically plausible computations. Information in SNN is transmitted using short pulses (spikes), and training occurs locally. The biological concept of brain neurons "use it or lose it" is that if a synaptic connection is not used, it weakens and disappears. The application of the biological concept to the SNN consists in imparting a temporal dependence to the synaptic weights of the network, which reduces the weight value proportionally to the "silence" time of the synaptic connection. In this paper, a new method of weight regularization for SNN is proposed, based on the pruning of unused weights during the network training, which occurs due to the weights receiving a dependence on the time elapsed since the spike. In the experiments, a two-layer SNN was used, trained according to a combined Hebbian rule, previously developed by the authors on the basis of local learning rules STDP (spike-timing-dependent plasticity) and all-LTD (all-long-term-depression rule). For training and testing SNN, the MNIST dataset (images of handwritten digits) was used: 15,000 images for training and 1,500 images for testing, only 3 classes of images out of 10 possible were used in the experiments.

Keywords: spiking neural network, overfitting, regularization method**Acknowledgements:** The reported study was funded by the Russian Science Foundation (project number 24-21-00470).**References**

1. Urolagin S., Prema K.V., Reddy N.V.S. Generalization capability of artificial neural network incorporated with pruning method. *Advanced computing, networking and security. Lecture notes in computer science*, Springer, 2012, vol. 7135, pp. 171-178.
2. Montesinos López O.A., Montesinos López A., Crossa J. Overfitting, model tuning, and evaluation of prediction performance. In: *Multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction. multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction*, 2022, pp. 109-139, DOI:10.1007/978-3-030-89010-0_4
3. N'dri A.W., Barbier T., Teulière C. et al. Predictive coding light: learning compact visual codes by combining excitatory and inhibitory spike timing-dependent plasticity. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and pattern recognition*, 2023, pp. 3997-4006.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016, 800 p.
5. Hendrycks D., Mu N., Cubuk E.D. AugMix: A Simple method to improve robustness and uncertainty under Data shift. *International conference on learning representations*, 2020, pp. 1-15, DOI:10.48550/arXiv.1912.02781.
6. Yun S., Han D., Oh S. et al. CutMix: Regularization strategy to train strong classifiers with localizable features. *IEEE/CVF International conference on computer vision*, 2019, pp. 6022-6031, DOI:10.1109/ICCV.2019.00612.
7. Maass W. Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models. *Neural Networks*, 1997, vol. 10, no.9, pp. 1659–1671, DOI:10.1016/S0893-6080(97)00011-7.
8. Sharmin S., Panda P., Sarwar S.S. et al. A comprehensive analysis on adversarial robustness of spiking neural networks. *2019 International joint conference on neural networks*, Budapest, Hungary, 2019, pp. 1-8.
9. Tan Y.X.M., Elovici Y., Binder A. Exploring the back alleys: analysing the robustness of alternative neural network architectures against adversarial attacks. *arXiv*, 2020, DOI:10.48550/arXiv.1912.03609.
10. Marchisio A., Nanfa G., Khalid F. et al. Is spiking secure? A comparative study on the security vulnerabilities of spiking and deep neural networks. *2020 International joint conference on neural networks (IJCNN)*, 2020, pp. 1-8, DOI:10.1109/IJCNN48605.2020.9207297.
11. Leontev M., Antonov D., Sukhov S. Robustness of spiking neural networks against adversarial attacks. *2021 International conference on information technology and nanotechnology*, 2021, pp. 1-6, DOI:10.1109/ITNT52450.2021.9649179.

12. Antonov D., Batuev B., Sukhov S. Spiking neural networks training with combined Hebbian rules. X International conference on information technology and nanotechnology (ITNT), Samara, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, DOI:10.1109/ITNT60778.2024.10582358.
13. Antonov D.I., Sukhov S.V. Obuchenie impul'snyh neyronnyh setej-klassifikatorov s pomoshh'ju lokal'nyh pravil [Training of spiking neural networks-classifiers with local rules]. XXV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Nejroinformatika-2023". Sbornik nauchnyh trudov [Proceedings of XXV international conference on artificial neural networks "Neuroinformatics-2023"], 2023, pp. 116-125.
14. Shors T.J., Anderson M.L., Curlik Ii D.M. et al. Use it or lose it: how neurogenesis keeps the brain fit for learning. Behavioural brain research, 2012, vol. 227, no. 2, pp. 450-458, DOI:10.1016/j.bbr.2011.04.023.
15. Diehl P., Cook M. Unsupervised learning of digit recognition using spike-timing-dependent plasticity. Frontiers in computational neuroscience, 2015, vol. 9, pp. 1-9, DOI:10.5167/uzh-107763.

Antonov Dmitry Ivanovich. Researcher of the Ulyanovsk brach of Kotelnikov Institute of radioengineering and electronics RAS. Research directions: learning rules of spiking neural networks. AuthorID: 1128755, SPIN: 7847-8640, ORCID: 0000-0003-3113-8320, d.antonov@ulireran.ru, 432071, Ulyanovsk, Goncharov Str., 48/2.

Sukhov Sergey Vladimirovich. PhD, senior scientist of the Ulyanovsk brach of Kotelnikov Institute of radioengineering and electronics RAS. Research directions: spiking neural networks, computational neuroscience. AuthorID: 28708, SPIN: 6047-8716, ORCID: 0000-0002-8966-6030, sukhov@ulireran.ru, 432071, Ulyanovsk, Goncharov Str., 48/2.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024; одобрена после рецензирования 14.01.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 12/20/2024; approved after reviewing 01/14/2025; accepted for publication 02/13/2025.

УДК 004.9

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.003

Прогноз пространственно-временной динамики аврорального овала с применением машинного обучения

Лебедева Анастасия Александровна¹, Гарашенко Александр Алексеевич², Сидоров Денис Николаевич³

¹ПАО Сбербанк,
Россия, Иркутск

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, *garashchenkoaa@mail.ru*

³Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск

Аннотация. Ионосфера – часть атмосферы Земли с высокой концентрацией свободных электронов и ионов. К характерным чертам ионосферы относятся изменчивость и неоднородность. Одной из неоднородностей является так называемый авроральный овал, который определяет диапазон полярного сияния. Распознавание аврорального овала – важная задача для прогнозирования авроральных бурь, так как они влияют на работу систем связи на дальние расстояния, навигацию, связь между спутниками и землей, затрудняя или делая ее невозможной. Таким образом, возникает потребность в обнаружении и прогнозировании перемещения аврорального овала, чтобы быть осведомленным в области их возможного влияния в определенные периоды времени. На основе имеющегося набора изображений, полученных в системе SIMuRG, которые основаны на наборах данных GNSS, предлагается использовать модель LSTM и архитектуру CNN. В статье проводится обзор уже существующих реализаций и впервые предлагается способ применения Convolutional LSTM-архитектуры, которая объединяет обработку временных рядов и компьютерное зрение, для прогнозирования перемещений авроральных овалов на изображениях. Результатом работы является модель машинного обучения, которая может делать прогнозы, основываясь даже на небольших объемах данных.

Ключевые слова: архитектура предсказания кадра, компьютерное зрение, машинное обучение, исследование операций

Цитирование: Лебедева А.А. Прогноз пространственно-временной динамики аврорального овала с применением машинного обучения / А.А. Лебедева, А.А. Гарашенко, Д.Н. Сидоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 25-33 – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.003.

Введение. Магнитосфера Земли эффективно защищает ее поверхность от высокоэнергетических частиц, за исключением полярных областей, где геомагнитное поле вновь соединяется с полем солнечного ветра. Это повторное соединение вызывает проникновение заряженных частиц в атмосферу, нагревая и заряжая нейтральные атомы, производя ионы и электроны в ионосфере. Во время различных событий на Солнце (вспышки, выбросы корональной массы и т.д.) Земли достигает больше заряженных частиц. Кроме того, давление солнечного ветра искажает форму магнитосферы, позволяя большему количеству заряженных частиц проникать в атмосферу и вызывая магнитные бури и подбури. И те, и другие проявляются в полярных областях, как авроры (свечение заряженных атомов атмосферы), нагревая ионосферу и порождая электрические токи и неоднородности различных масштабов в ней [1].

Ионосферные неоднородности влияют на работу систем связи на дальние расстояния, навигацию, локацию, связь между спутниками и землей, затрудняя или делая ее невозможной. Также они оказывают значительное влияние на изменение электромагнитной индукции в Земле, в частности на поведение геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) [2, 3]. Влияние ионосферных неоднородностей различно на разных широтах, и области авроральных овалов под воздействием солнечного ветра индуцируют потоки поверхностных электрических полей,

движущихся в направлении с востока на запад [4]. Таким образом, возникает потребность в обнаружении и прогнозировании перемещения аврорального овала, чтобы быть осведомленными в области их возможного влияния в определенные периоды времени.

Неоднородности малого масштаба, среди прочего, вызывают частые изменения полного электронного содержания (total electron content, TEC), измеряемого на пути от спутника к приемнику. Характер изменений TEC рассчитывается по коэффициенту, именуемому ROTI (Rate of TEC Index). ROTI определяется по следующей формуле:

$$ROTI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=n-\frac{N}{2}}^{n+\frac{N}{2}-1} (ROT_m - \overline{ROT})^2},$$

$$ROT_m = \Delta I / \Delta t.$$

Здесь ΔI обозначает изменение TEC во времени Δt , которое представляет собой временное разрешение измерений (обычно 30 с). Расчет ROTI выполняется на 5-минутном временном интервале. ROTI для определенного времени включает ROTI из интервала $\pm 2,5$ мин, примыкающего к этому времени.

На основе TEC и карт полного ночного неба был создан метод, результатом которого является изображение с обнаруженным на нем авроральным овалом [5]. Однако неоднородности не являются статичными и через определенный промежуток времени могут создать помехи в других областях или выйти из зоны покрытия спутников. Таким образом, целью работы является прогнозирование перемещения авроральных овалов, используя набор изображений на определенном промежутке времени.

Для решения подобных задач используются методы компьютерного зрения, в частности, данная задача может рассматриваться как задача прогнозирования следующего кадра (Next-Frame Prediction) [6].

Прогнозирующее обучение предсказывает возможные события путем анализа имеющейся информации. Существуют несколько практических приложений, где используется предиктивное обучение [7]. Для подобного типа обучения используют рекуррентные сети. Рекуррентные сети подходят для поиска закономерностей в последовательных данных, например, для автомобильного трафика [8], прогнозирования погоды [9] или движений человека [10].

Обучение сети происходит последовательно, согласно временной последовательности изображений. Сеть находит последовательность изменений пикселей между изображениями. Кроме того, для конкретного изображения связь между пикселями является важным фактором, который необходимо учитывать при прогнозировании следующего кадра.

Ключевой признак может быть извлечен из пространственной структуры изображения по положению, внешнему виду и форме объекта. В работе [7] предлагается разделение сетей для предсказания следующего кадра на две архитектуры: «последовательность-один» и «последовательность-последовательность».

В первой архитектуре входными данными для модели глубокого обучения является набор кадров в порядке временных шагов от t до $t + k$. Предсказанием является следующий кадр [11-14].

Для второй архитектуры входными данными являются временные кадры, которые отдельно подаются в нейронную сеть [15-17]. В частности, кадр с временным шагом t подается на вход модели глубокого обучения, а предсказанием является следующий кадр с временным

шагом $t + k$ Эта операция выполняется непрерывно, пока модель глубокого обучения не получит кадр на $(t + k)$ -м временном шаге.

Иными словами, архитектура «последовательность-один» фокусируются на пространственной структуре из набора входных кадров, в то время как архитектуры «последовательность-последовательность» фокусируются на факторе временной последовательности.

Были рассмотрены несколько реализаций на основе сети CNN (Convolutional neural networks) и архитектуры LSTM (Long short-term memory).

Работа «VideoPredictionICLR2016» является представителем архитектуры «последовательность-один». Авторы этой работы [13] обучают сверточную сеть генерировать будущие кадры с учетом входной последовательности. Чтобы справиться с изначально размытыми прогнозами, полученными с помощью стандартной функции потерь среднеквадратичной ошибки (MSE), авторы предлагают три различных и дополнительных стратегии обучения функциям: многомасштабную архитектуру, состязательный метод обучения и функцию потери разницы градиентов изображения. Также авторы сравнивают прогнозы с различными опубликованными результатами, основанными на повторяющихся нейронных сетях в наборе данных UCF101.

Другая работа «Video Frame Synthesis using Deep Voxel Flow» [12] также имеет архитектуру «последовательность-один» и решает проблему синтеза новых видеок кадров в существующем видео либо между существующими кадрами (интерполяция), либо после них (экстраполяция). Авторы обучают сеть, которая учится синтезировать видеок кадры, передавая значения пикселей из существующих, что они называют глубоким потоком вокселей.

Принцип работы состоит в том, что DVF учится синтезировать целевой кадр из входного видео. Целевой кадр может быть промежуточным (интерполяция) или последующим (экстраполяция) входным видео. DVF использует архитектуру полностью сверточного кодера-декодера, содержащую три сверточных слоя, три уровня деконволюции и один слой узкого места. Единственное, что нужно для контроля DVF, – это синтезируемый целевой кадр.

В следующей работе PredRNN++ [18], которая является представителем архитектуры «последовательность-последовательность», предложена рекуррентная сеть для пространственно-временного прогнозирующего обучения. Авторы в своей работе использовали рекуррентную структуру под названием Causal LSTM с каскадной двойной памятью, а также блок Gradient Highway Unit, который обеспечивает альтернативные быстрые маршруты для градиентных потоков от выходов обратно к длинным предыдущим входам.

В работе Folded Recurrent Neural Networks [19], также придерживающейся архитектуры «последовательность-последовательность», использованы биективные рекуррентные блоки с управлением (bGRU). Стандартные GRU обновляют состояние, выставляемое, как выход с учетом входа. Авторы работы расширяют их, рассматривая вход, как другое рекуррентное состояние, и обновляют его с учетом выхода, используя дополнительный набор логических ворот. Укладка нескольких таких слоев приводит к рекуррентному автокодировщику: операторы, обновляющие выходы, составляют кодер, а те, что обновляют входы, образуют декодер. Состояния кодера и декодера являются общими, представление расслаивается в процессе обучения: некоторая информация не передается следующим слоям. Авторы используют только кодер или декодер для кодирования или предсказания. Это снижает вычислительные затраты и позволяет избежать повторного кодирования предсказаний при генерации нескольких кадров. Кроме того, можно удалять слои из обученной модели, что позволяет понять роль каждого слоя.

Несмотря на имеющиеся преимущества у этих работ, они также имеют ряд недостатков. Во-первых, в них используются устаревшая версия библиотеки TensorFlow, что делает невозможным доработку этих работ без полного или частичного переписывания изначального кода. Во-вторых, наборы данных, на которых тестировались работы, рассчитаны на определение человеческих движений или физики объекта, что не совсем подходит для решения нашей задачи.

Однако, методы, на которых основаны эти работы, могут быть использованы и в этом случае, но с определенной спецификой. Поскольку данные, которыми мы располагаем, являются своего рода временным рядом, то для них существует подходящий метод – ConvLSTM [9].

Convolutional LSTM-архитектуры объединяют обработку временных рядов и компьютерное зрение путем внедрения конволюционной рекуррентной ячейки в слой LSTM.

Методы. Для данного исследования использовались данные в виде набора изображений за определенные дни, которые являются совмещением данных ТЕС и данных карт полного ночного неба [5]. Эти данные, собранные за последовательные периоды времени, можно охарактеризовать, как временной ряд. В таких случаях подходящим подходом является использование модели на основе LSTM (Long Short Term Memory) [20], архитектуры рекуррентной нейронной сети. Математически ее можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma_g(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f), \\ i_t &= \sigma_g(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i), \\ o_t &= \sigma_g(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o), \\ c_t &= f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c), \\ h_t &= o_t \circ \sigma_{c_t}, \end{aligned}$$

где x_t – входной вектор, h_t – выходной вектор, c_t – вектор состояний, W, U, b – матрицы и вектор параметров, f_t – вес забывания старой информации, i_t – вес получения новой информации, o_t – кандидат на выход, σ_g – функция активации на основе сигмоиды, σ_c – на основе гиперболического тангенса. В такой архитектуре модель передает предыдущее скрытое состояние на следующий шаг последовательности. Таким образом, сеть хранит информацию о предыдущих данных и использует их для принятия решений.

При работе с изображениями лучшим подходом является архитектура CNN (Convolutional Neural Network) [21]. Изображение проходит через конволюционные слои, в которых несколько фильтров извлекают важные особенности. После последовательного прохождения нескольких конволюционных слоев выходной сигнал подключается к полносвязной плотной сети.

С такими последовательными изображениями одним из использованных подходов являлось использование слоев ConvLSTM. Математическое описание модели LSTM со сверточным слоем можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma_g(W_f * x_t + U_f * h_{t-1} + V_f \circ c_{t-1} + b_f), \\ i_t &= \sigma_g(W_i * x_t + U_i * h_{t-1} + V_i \circ c_{t-1} + b_i), \\ o_t &= \sigma_g(W_o * x_t + U_o * h_{t-1} + V_o \circ c_{t-1} + b_o), \\ c_t &= f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c(W_c * x_t + U_c * h_{t-1} + b_c), \\ h_t &= o_t \circ \sigma_{c_t}, \end{aligned}$$

где * обозначает свертку. Это рекуррентный слой, как и LSTM, но внутренние матричные умножения заменены операциями свертки. В результате данные, проходящие через ячейки ConvLSTM, сохраняют размерность входа, а не являются просто одномерным вектором с признаками.

Для обработки данных была решено использовать реализацию этих методов в библиотеке Keras. Для создания датасета используются несколько наборов из шестнадцати кадров с разрешением 320x320 пикселей. Наборы данных загружались в фреймворк с последующим созданием и предварительной обработкой обучающих и проверочных датасетов, которые имели соотношение 90 обучающих к 10 тестовым. На рисунке 1 представлены подготовленные данные.

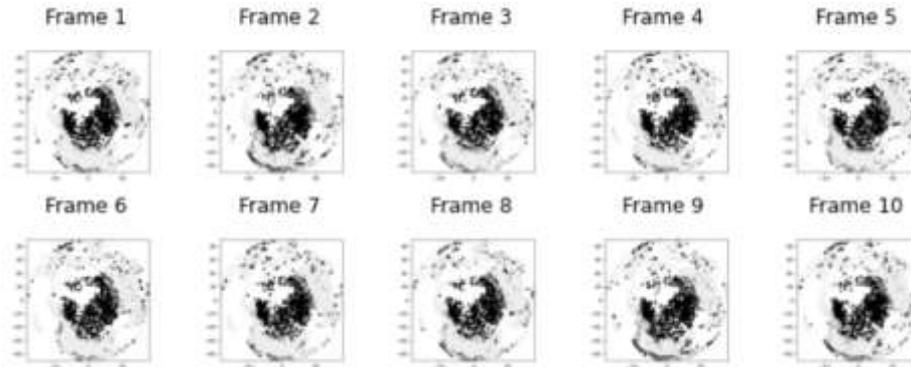


Рис. 1. Подготовленные данные для обучения сети

Для предсказания следующего кадра модель использует предыдущий кадр, который называется f_n , для прогнозирования нового кадра, называемого f_{n+1} . Чтобы модель могла создавать эти прогнозы, данные обработаны так, чтобы были «смещенные» входы и выходы, где входные данные – это кадр x_n , используемый для прогнозирования кадра y_{n+1} .

Для построения конволюционной LSTM-модели используется слой ConvLSTM2D, который принимает входные данные и возвращает прогноз кадра той же формы, то есть сначала строятся 3 слоя «ConvLSTM2D» с нормализацией пакетов, затем слой «Conv3D» для пространственно-временных выходов. После построения модели и подготовки данных определяются параметры и начинается обучение модели.

Для оценки точности полученных результатов было решено использовать Индекс структурного сходства (SSIM). Метрика индекса структурного сходства извлекает из изображения 3 ключевые характеристики: яркость, контрастность и структуру [22]. Сравнение двух изображений выполняется на основе этих трех характеристик.

Эта система рассчитывает индекс структурного сходства между двумя заданными изображениями, который представляет собой значение от -1 до $+1$. Значение $+1$ означает, что два заданных изображения очень похожи или одинаковы, а значение -1 означает, что эти два изображения очень разные. Часто эти значения корректируются, чтобы быть в диапазоне $[0, 1]$, где крайние значения имеют одинаковое значение.

Результаты. После построения и обучения модели, генерируется несколько примеров прогнозирования кадров на основе набора кадров. Выбирается случайный пример из проверочного набора и из него первые два кадра. После этого модель спрогнозирует два новых кадра, которые мы можем сравнить с реальными. Результаты представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1. Результаты прогнозирования

Количество наборов	Количество кадров в наборе	Средняя квадратичная ошибка	Индекс структурного сходства
2	16	0.08804311	0.64
10	16	0.071662135	0.76
20	16	0.03555805	0.81

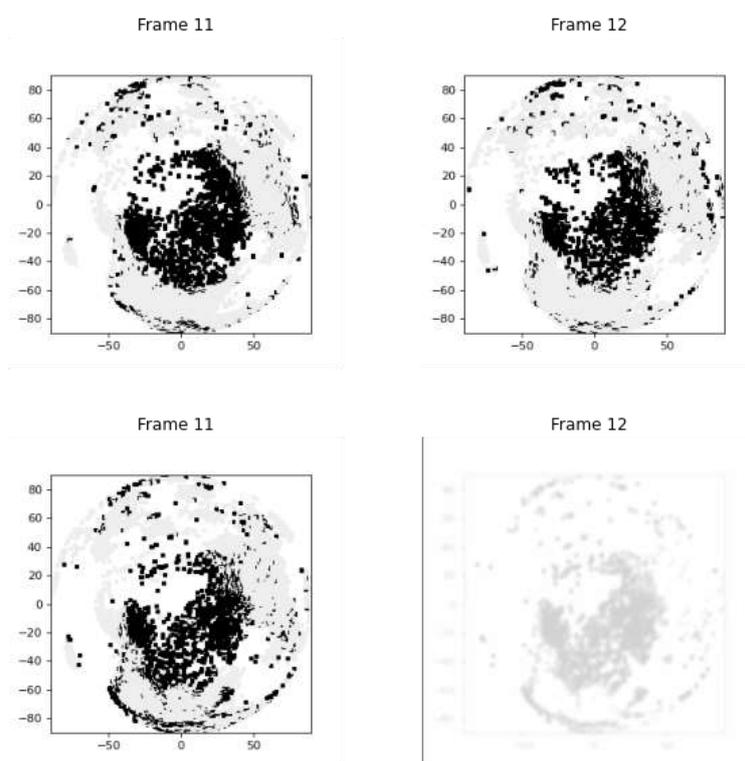


Рис. 2. Реальные кадры (сверху) и прогнозные кадры (снизу)

Заключение. В результате работы была выявлена высокая практическая эффективность в применении Convolutional LSTM-архитектуры для прогнозирования перемещения авроральных овалов на основе изображений, полученных в системе SIMuRG. В работе был использован сравнительно небольшой набор данных, в дальнейшем планируется его увеличение, что приведет к повышению точности модели.

Чтобы результат прогнозирования имел более очевидное практическое применение, требуется разработка методики обнаружения овала на прогнозируемых изображениях, что является следующим этапом этой работы.

Выполненная работа в сочетании с методом определения овалов может способствовать развитию стабильного подхода к определению и прогнозированию границ районов, характеризующихся возникновением сбоев в работе навигационных систем, большими ошибками позиционирования, которые могут возникать даже в средних широтах во время сильных магнитных бурь, когда авроральный овал смещен к экватору.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания FZZS-2024-0003.

Список источников

1. Opgehoorth H.J. et al. Earth's geomagnetic environment – progress and gaps in understanding, prediction, and impacts. *Advances in space research*, 2024, DOI:10.1016/j.asr.2024.05.016.
2. Pulkkinen A. et al. Geomagnetically induced currents: science, engineering, and applications readiness. *Space weather*, 2017, vol. 15, no. 7, p. 828-856, DOI:10.1002/2016SW001501.
3. Rajput V.N. et al. Insight into impact of geomagnetically induced currents on power systems: overview, challenges and mitigation. *Electric power systems research*, 2021, vol. 192, p. 106927, DOI:10.1016/j.epsr.2020.106927.
4. Thomson A. W. P. et al. Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids. *Advances in space research*, 2010, vol. 45, no. 9, p. 1182-1190, DOI:10.1016/j.asr.2009.11.023.
5. Vasiliev A., Yasyukevich Y., Garashchenko A., et al. Computer vision for GNSS-based detection of the auroral oval boundary. *International journal of Artificial Intelligence*, vol. 19, no. 2, 2021.
6. Yue B., Liang J. Frame prediction using recurrent convolutional encoder with residual learning. *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2018, vol. 1967, no.1, DOI:10.1063/1.5039073.
7. Zhou Y., Dong H., El Saddik A. Deep learning in next-frame prediction: a benchmark review. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 69273-69283, DOI:10.1109/ACCESS.2020.2987281.

8. Zhang J. et al. DNN-based prediction model for spatio-temporal data. Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems, 2016, pp. 1-4, DOI:10.1145/2996913.2997016.
9. Shi X. et al. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting //Advances in neural information processing systems, 2015, vol. 28, DOI:10.48550/arXiv.1506.04214.
10. Walker J., Gupta A., Hebert M. Dense optical flow prediction from a static image. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2015, pp. 2443-2451, DOI:10.1109/ICCV.2015.281.
11. Liang X. et al. Dual motion GAN for future-flow embedded video prediction. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2017, pp. 1744-1752, DOI:10.48550/arXiv.1708.00284.
12. Liu Z. et al. Video frame synthesis using deep voxel flow. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2017, pp. 4463-4471, DOI:10.1109/ICCV.2017.478.
13. Mathieu M., Couprie C., LeCun Y. Deep multi-scale video prediction beyond mean square error. arXiv preprint, 2015, DOI:10.48550/arXiv.1511.05440.
14. Michalski V., Memisevic R., Konda K. Modeling deep temporal dependencies with recurrent grammar cells. Advances in neural information processing systems, 2014, vol. 27.
15. Lotter W., Kreiman G., Cox D. Deep predictive coding networks for video prediction and unsupervised learning. arXiv preprint, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1605.08104.
16. Srivastava N., Mansimov E., Salakhudinov R. Unsupervised learning of video representations using LSTMs. International conference on machine learning. PMLR, 2015, pp. 843-852, DOI:10.48550/arXiv.1502.04681.
17. Finn C., Goodfellow I., Levine S. Unsupervised learning for physical interaction through video prediction. Advances in neural information processing systems, 2016, vol. 29, DOI:10.48550/arXiv.1605.07157.
18. Wang Y. et al. Predrnn++: Towards a resolution of the deep-in-time dilemma in spatiotemporal predictive learning. International conference on machine learning. PMLR, 2018, pp. 5123-5132.
19. Oliu M., Selva J., Escalera S. Folded recurrent neural networks for future video prediction. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018, pp. 716-731.
20. Schmidhuber J. et al. Long short-term memory. Neural Computation, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, DOI:10.1162/neco.1997.9.8.1735.
21. Yamashita R. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. Insights into imaging, 2018, vol. 9, pp. 611-629, DOI:10.1007/s13244-018-0639-9.
22. Wang Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE transactions on image processing, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, DOI:10.1109/TIP.2003.819861.

Лебедева Анастасия Александровна. ПАО Сбербанк, эксперт по цифровым технологиям аудита отдела аудита обеспечивающих процессов.

Гаращенко Александр Алексеевич. Младший научный сотрудник Иркутского национального исследовательского технического университета. SPIN: 7466-9182, AuthorID: 1016551, garashchenkoa@mail.ru.

Сидоров Денис Николаевич. Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Отдел прикладной математики, главный научный сотрудник. SPIN: 6049-9314, AuthorID: 14218. contact.dns@gmail.com, 664074, ул. Лермонтова, 83.

UDC 004.9

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.003

Forecasting the spatiotemporal dynamics of the auroral oval using machine learning

Anastasiia A. Lebedeva¹, Aleksandr A. Garashchenko², Denis N. Sidorov³

¹PJSC Sberbank, Russia, Irkutsk

²National research Irkutsk state technical university, Russia, Irkutsk, *garashchenkoa@mail.ru*

³Melentiev energy systems institute SB RAS, Russia, Irkutsk

Abstract. The ionosphere is a part of the Earth's atmosphere with a high concentration of free electrons and ions. The characteristic features of the ionosphere include variability and heterogeneity. One of the heterogeneities is the so-called auroral oval, which determines the range of the polar lights. Recognition of the auroral oval is an important task for predicting auroral storms, since they affect the operation of long-range communication systems, navigation, communication between satellites and the ground, making it difficult or impossible. Thus, there is a need to detect and predict the movement of the auroral oval in order to be aware of the area of their possible influence in certain periods of time. Based on the available set of images obtained in the SIMuRG system, which are based on GNSS datasets, it is proposed to use the LSTM model and the CNN architecture. The paper reviews existing implementations and proposes a method for predicting auroral oval movements in images using a Convolutional LSTM architecture that combines time series processing and computer vision. The result is a machine learning model that can make predictions based on even small amounts of data.

Keywords: frame prediction architecture, computer vision, machine learning, operations research

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state assignment FZZS-2024-0003.

References

1. Opgenoorth H.J. et al. Earth's geomagnetic environment – progress and gaps in understanding, prediction, and impacts. *Advances in space research*, 2024, DOI:10.1016/j.asr.2024.05.016.
2. Pulkkinen A. et al. Geomagnetically induced currents: science, engineering, and applications readiness. *Space weather*, 2017, vol. 15, no. 7, p. 828-856, DOI:10.1002/2016SW001501.
3. Rajput V.N. et al. Insight into impact of geomagnetically induced currents on power systems: overview, challenges and mitigation. *Electric power systems research*, 2021, vol. 192, p. 106927, DOI:10.1016/j.epsr.2020.106927.
4. Thomson A. W. P. et al. Present day challenges in understanding the geomagnetic hazard to national power grids. *Advances in space research*, 2010, vol. 45, no. 9, p. 1182-1190, DOI:10.1016/j.asr.2009.11.023.
5. Vasiliev A., Yasyukevich Y., Garashchenko A., et al. Computer vision for GNSS-based detection of the auroral oval boundary. *International journal of Artificial Intelligence*, vol. 19, no. 2, 2021.
6. Yue B., Liang J. Frame prediction using recurrent convolutional encoder with residual learning. *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2018, vol. 1967, no.1, DOI:10.1063/1.5039073.
7. Zhou Y., Dong H., El Saddik A. Deep learning in next-frame prediction: a benchmark review. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 69273-69283, DOI:10.1109/ACCESS.2020.2987281.
8. Zhang J. et al. DNN-based prediction model for spatio-temporal data. *Proceedings of the 24th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems*, 2016, pp. 1-4, DOI:10.1145/2996913.2997016.
9. Shi X. et al. Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting // *Advances in neural information processing systems*, 2015, vol. 28, DOI:10.48550/arXiv.1506.04214.
10. Walker J., Gupta A., Hebert M. Dense optical flow prediction from a static image. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, pp. 2443-2451, DOI:10.1109/ICCV.2015.281.
11. Liang X. et al. Dual motion GAN for future-flow embedded video prediction. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 1744-1752, DOI:10.48550/arXiv.1708.00284.
12. Liu Z. et al. Video frame synthesis using deep voxel flow. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 4463-4471, DOI:10.1109/ICCV.2017.478.
13. Mathieu M., Couprie C., LeCun Y. Deep multi-scale video prediction beyond mean square error. *arXiv preprint*, 2015, DOI:10.48550/arXiv.1511.05440.
14. Michalski V., Memisevic R., Konda K. Modeling deep temporal dependencies with recurrent grammar cells. *Advances in neural information processing systems*, 2014, vol. 27.
15. Lotter W., Kreiman G., Cox D. Deep predictive coding networks for video prediction and unsupervised learning. *arXiv preprint*, 2016, DOI:10.48550/arXiv.1605.08104.
16. Srivastava N., Mansimov E., Salakhudinov R. Unsupervised learning of video representations using LSTMs. *International conference on machine learning*. PMLR, 2015, pp. 843-852, DOI:10.48550/arXiv.1502.04681.
17. Finn C., Goodfellow I., Levine S. Unsupervised learning for physical interaction through video prediction. *Advances in neural information processing systems*, 2016, vol. 29, DOI:10.48550/arXiv.1605.07157.
18. Wang Y. et al. Predrnn++: Towards a resolution of the deep-in-time dilemma in spatiotemporal predictive learning. *International conference on machine learning*. PMLR, 2018, pp. 5123-5132.
19. Oliu M., Selva J., Escalera S. Folded recurrent neural networks for future video prediction. *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, 2018, pp. 716-731.
20. Schmidhuber J. et al. Long short-term memory. *Neural Computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, DOI:10.1162/neco.1997.9.8.1735.

21. Yamashita R. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. Insights into imaging, 2018, vol. 9, pp. 611-629, DOI:10.1007/s13244-018-0639-9.
22. Wang Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE transactions on image processing, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, DOI:10.1109/TIP.2003.819861.

Lebedeva Anastasiia Aleksandrovna. Sberbank PJSC, expert in digital audit technologies of the audit department of supporting processes.

Garashchenko Aleksandr Alekseevich. Junior research fellow at Irkutsk national research technical university. SPIN: 7466-9182, AuthorID: 1016551, garashchenkoa@mail.ru.

Sidorov Denis Nikolaevich. Melentiev energy systems institute SB RAS, Department of applied mathematics, chief research scientist. SPIN: 6049-9314, AuthorID: 14218, contact.dns@gmail.com, 664074, Lermontov str., 83.

Статья поступила в редакцию 21.11.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2025; принята к публикации 05.03.2025.

The article was submitted 11/21/2024; approved after reviewing 02/26/2025; accepted for publication 03/05/2025.

УДК 004.725

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.004

Применение генетического алгоритма для проектирования структуры оптимальной беспроводной сенсорной сети на трехмерной модели здания

Сиротинин Анатолий Андреевич, Володько Ольга Станиславовна

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, *slitch@icm.krasn.ru*

Аннотация. В работе классический генетический алгоритм применяется при решении задачи оптимального размещения связующих узлов (хабов) в беспроводной сенсорной сети на трехмерной модели здания, что позволяет учесть затухание сигнала не только в стенах, но и в межэтажных перекрытиях. Для проектирования структуры оптимальной БСС на основе генетического алгоритма была разработана программа на языке Python. Представлены результаты модельных расчетов для случаев оптимального размещения хабов.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, уровень мощности сигнала, интернет вещей, оптимизация сети, многокритериальная задача, генетические алгоритмы

Цитирование: Сиротинин А.А. Применение генетического алгоритма для проектирования структуры оптимальной беспроводной сенсорной сети на трехмерной модели здания / А.А. Сиротинин, О.С. Володько // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 34-40. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.004.

Введение. В настоящей работе представлены результаты решения задачи оптимизации для расстановки связующих узлов (хабов) в беспроводной сенсорной сети (БСС) на трехмерной модели здания. Проблематика построения БСС, выбора радиоволновой модели и алгоритма оптимизации обсуждались в предыдущей работе [1]. Построение БСС рассматривается на примере здания научного института для создания в нем безопасного и комфортного автоматизированного рабочего пространства.

Для решения задачи оптимальной расстановки хабов комбинируется радиоволновая модель – дополненная модель Мотли-Кинана [2], которая учитывает затухание сигнала в стенах и межэтажных перекрытиях, и оптимизационный метод – классический генетический алгоритм [3]. Генетические алгоритмы относятся к стохастическим методам, имитирующим процессы, происходящие в природе, и широко применяются для решения задач оптимизации [4], в том числе при проектировании БСС [5-9]. Хотя полученное с их помощью решение может быть квазиоптимальным, но при большом объеме входных данных они имеют существенно меньшую вычислительную сложность, чем детерминированные методы. Например, в работе [8] генетический алгоритм применялся для структурной оптимизации БСС с целью обеспечения надежности в условиях случайных отказов узлов. В работе [9] с помощью генетического алгоритма решается задача покрытия в коммутационном поле действия интернета вещей и учитываются препятствия на рассматриваемой территории. Задача оптимизации решается для двумерного пространства, хотя и предлагается расширение для трехмерного.

2. Постановки задачи оптимизации. В предыдущей работе была поставлена задача оптимизации для оптимального размещения связующих узлов (хабов) в БСС [1]. Задача оптимизации заключается в оптимальной расстановке хабов на трехмерной модели здания с учётом максимально возможного уровня мощности сигнала и минимально возможных затрат на оборудование и коммуникации. В настоящей работе задача оптимизации решается в модифицированной постановке (уровень мощности сигнала рассчитывается во всем здании, а не только в контрольных точках, как в предыдущей постановке):

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_p} RSS_i \rightarrow \max, f_2 = \sum_{i=1}^{N_p} (C_i + H_i)x_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

здесь N_p – количество клеток, на которое разбивается исследуемое здание, RSS_i – уровень мощности сигнала в i -ой клетке, C_i, H_i – стоимость коммуникаций и оборудования соответственно, булевый вектор $x_i = \{0, 1\}$, где 1 – хаб установлен в i -ой клетке, 0 – нет.

Поставленная задача оптимизации представляет собой многокритериальную задачу с двумя целевыми функциями (1). Для учета обоих критериев применялся метод взвешенной функции, в котором определяется новая функция в виде суммы целевых функций с соответствующими весами:

$$F(x) = \sum_{i=1}^K \omega_i f_i(x), \quad \omega_i \in [0; 1], \quad \sum_{i=1}^K \omega_i = 1,$$

где $f_i(x)$ – целевые функции, ω_i – соответствующие веса, K – количество целевых функций.

Для согласования оптимумов в целевой функции f_2 стоимость хабов и коммуникаций была взята отрицательной:

$$\bar{f}_2 = \sum_{i=1}^{N_p} (\bar{C}_i + \bar{H}_i)x_i \rightarrow \max, \quad \bar{C}_i = -C_i, \quad \bar{H}_i = -H_i$$

Таким образом, задача многокритериальной оптимизации имеет вид:

$$\omega_1 f_1 + \omega_2 \bar{f}_2 \rightarrow \max, \tag{2}$$

где веса ω_1, ω_2 выбираются в зависимости от приоритизации целевых функций.

3. Реализация генетического алгоритма. Для реализации генетического алгоритма здание научного института было разбито на клетки. Каждая клетка – это куб размером $3000 \times 3000 \times 3000$ мм. Всего получилось 484 клетки. На рис. 1 приведен пример разбиения этажа здания на клетки.

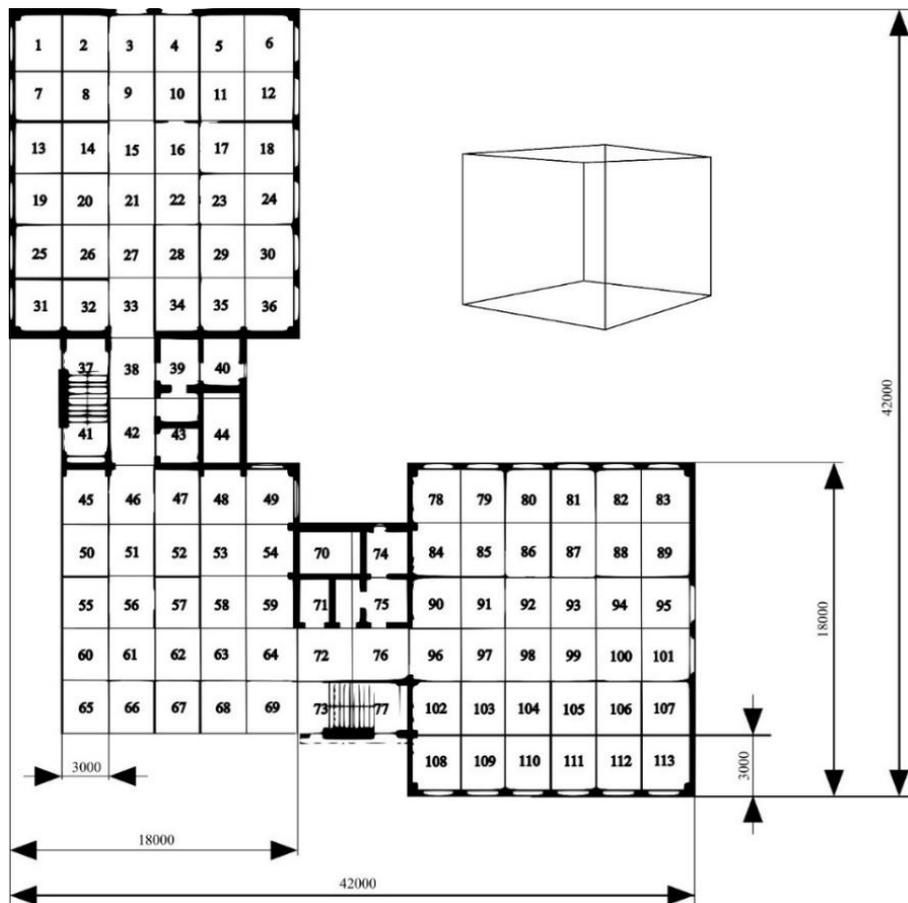


Рис. 1. Разбиение на клетки первого этажа здания научного института

В качестве хромосомы выбран булевый вектор x_i , который описывает расстановку хабов во всём здании. Каждый ген в хромосоме принимает значения 0 или 1 в зависимости от того, установлен хаб в рассматриваемой клетке или нет.

Генетический алгоритм представляет собой имитацию эволюционного процесса (рис. 2) и включает следующие этапы: отбор, скрещивание и мутацию [3].

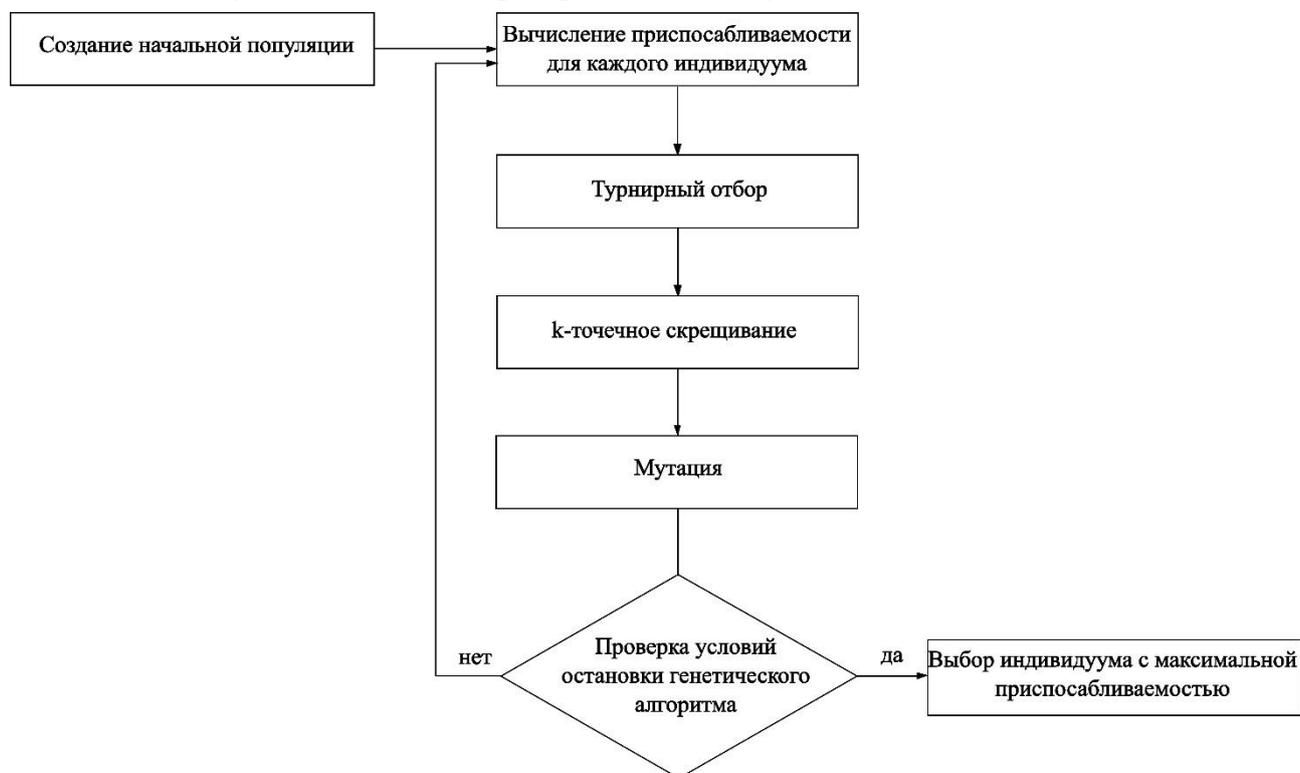


Рис. 2. Схема генетического алгоритма

В нашем случае в качестве метода отбора выбран турнирный отбор, метод k-скрещивания и мутация в виде инвертирования бита. Приспособляемость для каждого индивидуума вычисляется, как сумма двух целевых функций с соответствующими весами по формуле (2). Условием окончания работы ГА является прохождение заданного количества поколений, после которого функция приспособляемости выходит на плато. Для проектирования структуры оптимальной БСС на основе генетического алгоритма была разработана программа на языке Python [10]. На вход программы подается конфигурация здания, чтобы учесть наличие стен и перекрытий этажей.

Проведена серия модельных расчетов для трёх этажей одного крыла здания научного института. В ходе работы программы варьировались параметры расчета, такие, как размер популяции, количество поколений, вероятность мутации хромосомы и гена, вероятность и количество точек при k-скрещивании. Для того, чтобы оптимизировать количество хабов в рассматриваемом здании, была проведена серия расчетов и выбраны следующие веса для целевых функций: 0,8 для стоимости оборудования и коммуникаций; 0,2 для уровня мощности сигнала. В таблице 1 приведены оптимальные параметры, при которых были получены представленные в настоящей работе результаты.

По результатам работы генетического алгоритма были получены варианты оптимальной расстановки хабов для БСС. На рис. 3 представлена схема оптимальной расстановки трех хабов и тепловая карта уровней мощности сигнала в каждой клетке.

Таблица 1. Параметры расчета для генетического алгоритма

Затухание в стенах	-15 дБм
Затухание в перекрытиях этажей	-20 дБм
Затухание в несущих стенах	-30 дБм
Длина хромосомы	108
Количество поколений	50
Размер популяции	150
Вероятность скрещивания	0,5
Вероятность мутации хромосомы	0,1
Вероятность мутации гена	1/108
RSS	0,2

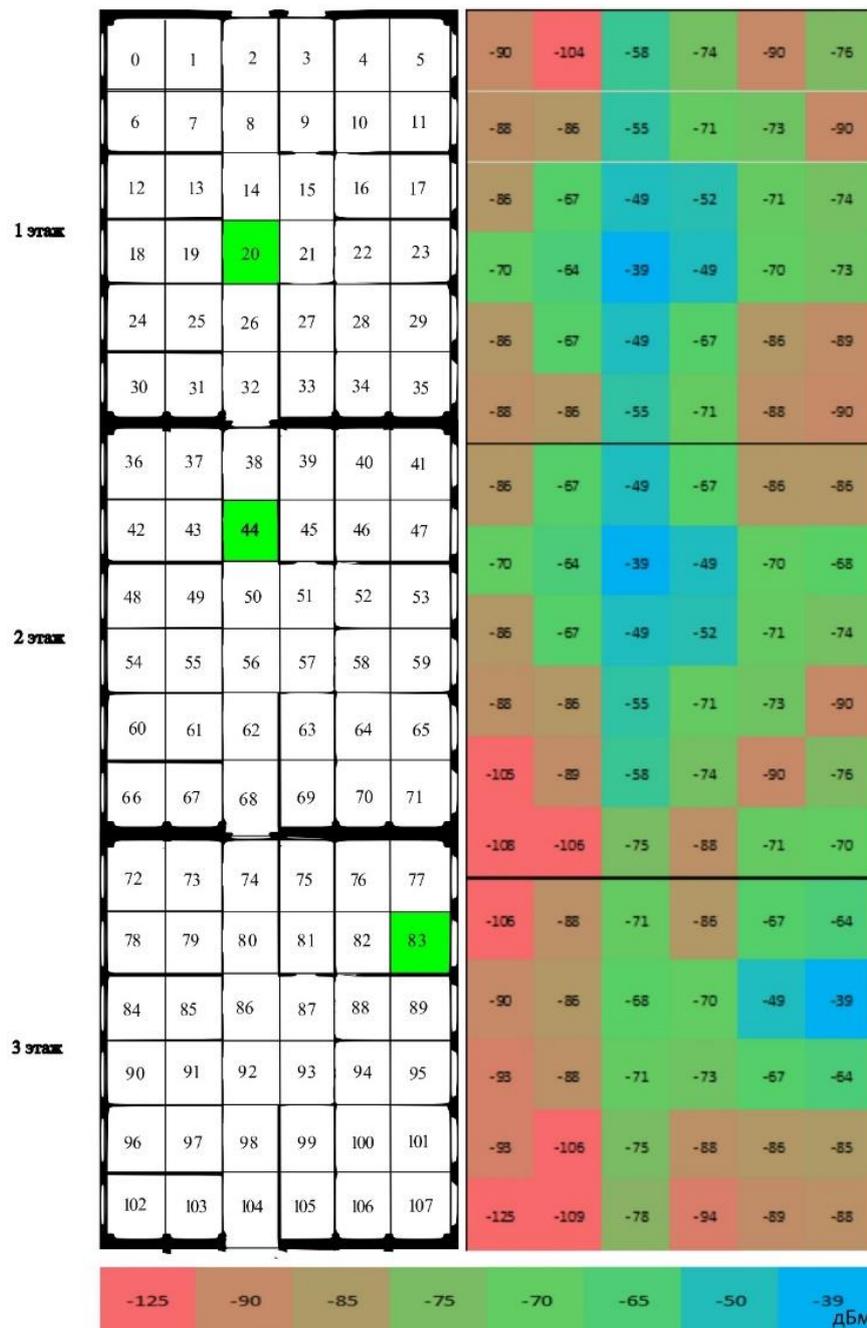


Рис. 3. Схема оптимального размещения трех хабов. Слева – план здания, зеленым обозначены места установки хабов. Справа – тепловая карта уровней мощности сигнала

При таком количестве хабов и их расстановки достигается практически полная зона покрытия, но при этом имеются несколько зон со слабым уровнем сигнала (≤ -100 дБм), что является недостаточным для связи с сенсорными устройствами. Для решения этой проблемы в программу было добавлено ограничение на минимальный уровень мощности сигнала (≥ -100 дБм) для всей рассматриваемой зоны покрытия в здании. Как следствие введенного ограничения, увеличилось количество хабов. На рис. 4 представлена схема оптимальной расстановки шести хабов и тепловая карта уровней мощности сигнала в каждой клетке. При анализе тепловой карты видно, что уровень мощности сигнала во всей области покрытия не менее -95 дБм.

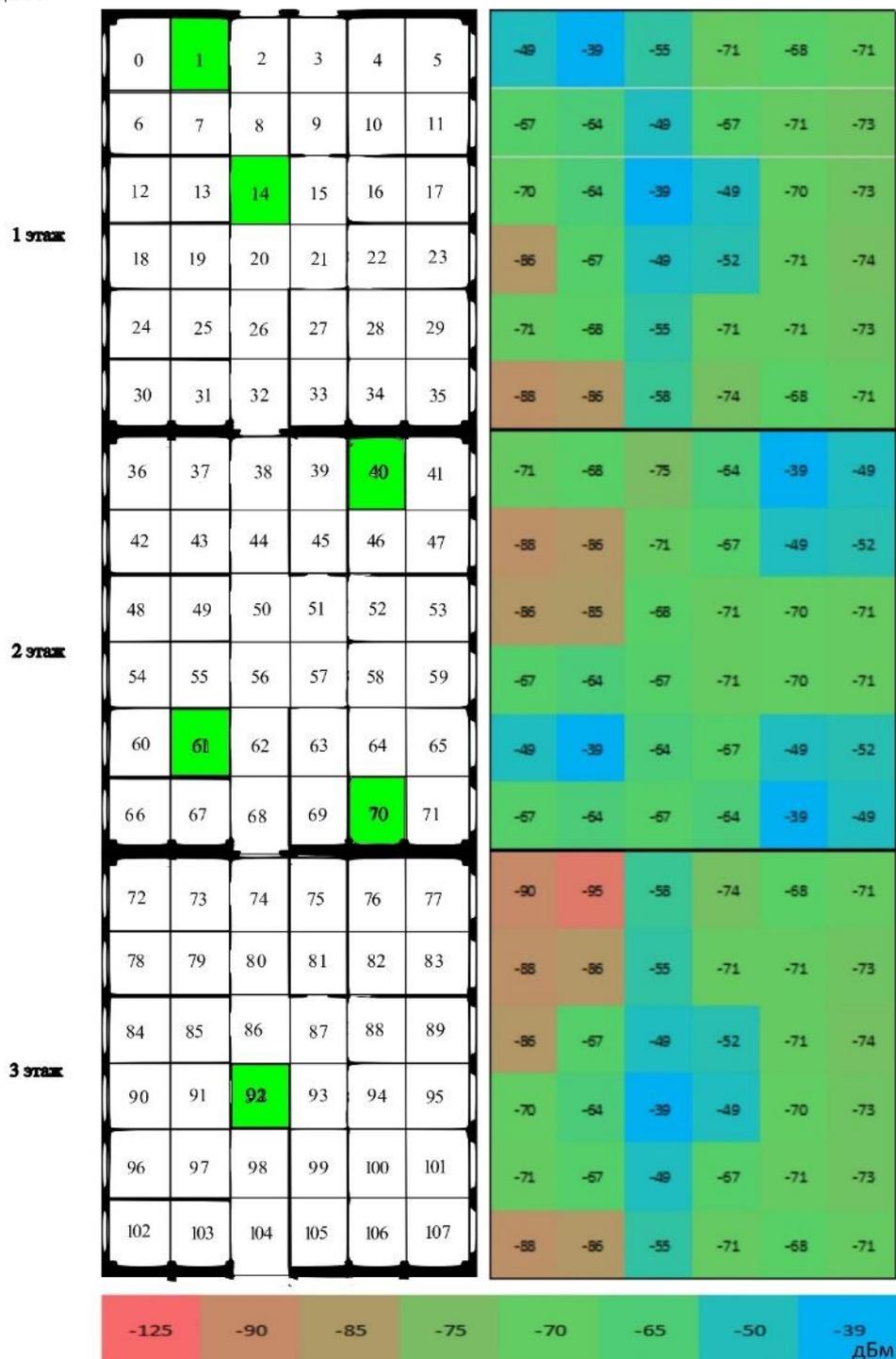


Рис. 4. Схема оптимального размещения шести хабов. Слева – план здания, зеленым обозначены места установки хабов. Справа – тепловая карта уровней мощности сигнала

В дальнейшем также планируется учитывать интерференцию сигналов, для того, чтобы исключить варианты, когда хабы располагаются близко друг к другу. Поставленная задача оптимизации для связующих узлов БСС может быть расширена с учетом расстановки сенсорных узлов, подключенных по стандарту ZigBee.

Заключение. В работе представлены результаты решения задачи оптимальной расстановки связующих узлов (хабов) для БСС внутри здания. Для решения поставленной задачи авторами была разработана программа для проектирования структуры оптимальной БСС внутри здания на основе генетического алгоритма. Проведена серия модельных расчетов для трех этажей одного крыла здания, в результате которых получена схема расположения связующих узлов сенсорной сети (хабов) для трехмерной модели здания. В дальнейшем также планируется учитывать интерференцию сигналов, чтобы минимизировать зоны перекрытия между соседними узлами.

Список источников

1. Сиротинин А.А. Построение оптимизационной модели беспроводной внутренней сети для использования технологии интернета вещей / А.А. Сиротинин, О.С. Володько // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024 – № 2(34). – С. 135-143. – DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.013.
2. Zhang Y., Wang F., Shen Y. et al. A study of indoor distributed calculation model of mobile communication. Information Computing and Applications: Second international conference, Qinhuaogdao, China. Proceedings, Part I 2, 2011, pp. 458-465, DOI:10.1007/978-3-642-27503-6.
3. Goldberg D.E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Canada: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989, 412 p.
4. Singh A., Sharma S., Singh, J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey. Computer science review, 2021, vol. 39, p.100342, DOI:10.48550/arXiv.2101.10453.
5. Srinidhi N.N., Kumar S.M.D., Venugopal K.R. Network optimizations in the Internet of Thing: A review. Engineering science and technology, an international journal, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 1-21, DOI:10.1016/j.jestch.2018.09.003.
6. Song B. Reliability analysis and optimization of computer communication network based on genetic algorithm. International journal of communication systems, 2022, vol. 35, no. 5, e4601, DOI:10.1002/dac.4601.
7. Li W., Tang R., Wang S., et al., An optimal design method for communication topology of wireless sensor networks to implement fully distributed optimal control in IoT-enabled smart buildings. Applied energy, 2023, vol 349, p.121539, DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121539.
8. Кутузов О.И. Решение одной задачи размещения сенсорных устройств в сетях интернета вещей / О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова., И.Н. Дзюбенко // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2018. – (6). – С.15-20.
9. Мигов Д.А. Генетические алгоритмы оптимальной по критерию надёжности расстановки стоков в беспроводных сенсорных сетях. / Д.А. Мигов, К.А. Волжанкина, А.С. Родионов // Автометрия, 2021. – №57(3). – С.19. – DOI:10.15372/AUT20210303.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682730. Программа для проектирования структуры оптимальной базовой сенсорной сети внутри здания с помощью генетического алгоритма: заявка №2024681352 от 17.09.2024 РФ / А.А.Сиротинин, О.С. Володько (РФ) – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.09.2024 г. (РФ).

Сиротинин Анатолий Андреевич. Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, аспирант. SPIN: 9617-6083, AuthorID: 1215100, slitch@ict.krasn.ru, 660036, Россия, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44.

Володько Ольга Станиславовна. Кандидат физико-математических наук, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, м.н.с. ORCID: 0000-0002-0580-9103, SPIN: 8080-9331, AuthorID: 907835, osv@ict.krasn.ru. 660036, Россия, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44.

UDC 004.725

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.004

Application of genetic algorithm to design the structure of an optimal wireless sensor network on a 3D building model

Anatoliy A. Sirotinin, Olga S. Volodko

Institute of computational modeling SB RAS,
Russia, Krasnoyarsk, *slitch@icm.krasn.ru*

Abstract. In this paper, the classical genetic algorithm is used to solve the problem of optimum placement of nodes (hubs) in networks of wireless sensors on a 3D building model, which allows taking into account not only signal attenuation in the walls, but also in interfloor ceilings. To design the structure of an optimal WSN based on the genetic algorithm, a program in Python was developed. The results of model calculations of optimum placement of hubs are presented.

Keywords: wireless sensor network, signal strength, Internet of Things, network optimization, multicriterial problem, genetic algorithms

References

1. Sirotinin A.A., Volod'ko O.S. Postroyeniye optimizatsionnoy modeli vnutrenney besprovodnoy seti dlya ispol'zovaniya tekhnologiy interneta veshchey [Building an optimization model of a wireless internal network for using interne of things technology]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]. 2024, no. 2(34), pp. 135-143.
2. Zhang Y., Wang F., Shen Y. et al. A study of indoor distributed calculation model of mobile communication. *Information Computing and Applications: Second international conference, Qinhuangdao, China. Proceedings, Part I 2*, 2011, pp. 458-465, DOI:10.1007/978-3-642-27503-6.
3. Goldberg D.E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Canada: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989, 412 p.
4. Singh A., Sharma S., Singh, J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Computer science review*, 2021, vol. 39, p.100342, DOI:10.48550/arXiv.2101.10453.
5. Srinidhi N.N., Kumar S.M.D., Venugopal K.R. Network optimizations in the Internet of Thing: A review. *Engineering science and technology, an international journal*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 1-21, DOI:10.1016/j.jestch.2018.09.003.
6. Song B. Reliability analysis and optimization of computer communication network based on genetic algorithm. *International journal of communication systems*, 2022, vol. 35, no. 5, e4601, DOI:10.1002/dac.4601.
7. Li W., Tang R., Wang S., et al., An optimal design method for communication topology of wireless sensor networks to implement fully distributed optimal control in IoT-enabled smart buildings. *Applied energy*, 2023, vol 349, p.121539, DOI:10.1016/j.apenergy.2023.121539.
8. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M., Dzyubenko I.N. Resheniye odnoy zadachi razmeshcheniya sensorykh ustroystv v setyakh interneta veshchey [Solution of one problem of placement of sensor devices in the networks of the Internet of Things]. *Izvestiya SPbGETU LETI* [Bulletin of ETU LETI], 2018, 6, pp.15-20.
9. Mígov D.A., Volzhankina K.A., Rodionov A.S. Geneticheskiye algoritmy optimal'noy po kriteriyu nadozhnosti rasstanovki stokov v besprovodnykh sensorykh setyakh [Genetic algorithms for optimal reliability allocation of drains in wireless sensor networks]. *Avtometriya*, 2021, no. 57(3), 19 p., DOI:10.15372/AUT20210303.
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2024682730. Programma dlya proyektirovaniya struktury optimal'noy bazovoy sensornoy seti vnutri zdaniya s pomoshch'yu geneticheskogo algoritma zaiavka №2024681352 ot 17.09.2024 RF [Certificate of state registration of the computer program No. 2024682730. Software for basic sensor network design for indoor using a genetic algorithm No. 2024682730 dated 09/17/2024 of the Russian Federation]. Sirotinin A.A., Volod'ko O.S. Zaregistrirvano v reestre programm dlia EVM 26.09.2024 g. (RF).

Sirotinin Anatoly Andreevich. The Institute of computational modeling SB RAS is a separate division of the FITC KNC SB RAS, postgraduate student. SPIN: 9617-6083, AuthorID: 1215100, slitch@icm.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, h. 50, b. 44.

Volodko Olga Stanislavovna. Ph. D., The Institute of computational modeling SB RAS, junior researcher, ORCID: 0000-0002-0580-9103, SPIN: 8080-9331, AuthorID: 907835, osv@icm.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, h. 50, b. 44.

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 11/13/2024; approved after reviewing 02/07/2025; accepted for publication 02/11/2025.

УДК 004.23, 004.72

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.005

Интеллектуализация системы управления узлом в реагирующих беспроводных сенсорных сетях¹

Виноградов Геннадий Павлович

НИИ Центрпрограммсистем,

Россия, Тверь, wgp272ng@mail.ru

Аннотация. *Актуальность.* Устойчивая тенденция расширения областей применения беспроводных решений и возрастание требований к их функциональности делают актуальными исследования по повышению их «интеллектуальности». *Цель работы.* Разработка методов, расширяющих функциональность системы управления узлом беспроводной сенсорной сети на базе нечеткого логического вывода и теории паттернов. *Использованы методы* теории нечетких множеств, теории построения нечетких моделей и сетей. *Основные результаты.* Вследствие сложности структурирования и математического описания поведения среды в зоне контроля узла, предложено использовать эффективные паттерны реагирования на изменение ее состояния. Для этого в информационные модели обстановки вводятся лингвистические переменные и нечеткие продукционные правила. Такой подход позволил обеспечить релевантное соотнесение вектора координат ситуации с тем или иным паттерном реагирования и уменьшить объем вычислений. Правила содержат ссылки на задачи по обработке первичных данных и процедуры реагирования средствами автономного узла сети. Для актуализации базы правил предложено использовать метаправила. Метаправила определяют параметры функций принадлежности и правила вывода при вычислении значений атрибутов. Это позволило дополнить пересылку данных пересылкой знаний, требуемых для необходимой настройки параметров алгоритмов локальных узлов. При таком подходе узел сети обладает знаниями о себе и о среде, становится способным к самостоятельному принятию решений и в составе группы. Для повышения робастности алгоритмов обработки данных в узлах предложено использовать понятие «типовая ситуация». В качестве примера в работе показано использование предложенного подхода в задачах комплексирования данных от нескольких сенсоров узла и обнаружения объекта проникновения.

Ключевые слова: модель, нечеткая логика, паттерн, беспроводная сеть, датчик

Цитирование: Виноградов Г.П. Интеллектуализация системы управления узлом в реагирующих беспроводных сенсорных сетях / Г.П. Виноградов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 41-52. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.005.

Введение. Беспроводные сенсорные сети (БСС) за счет таких характеристик, как низкое потребление энергии узлами, низкая стоимость, самоорганизация, небольшой размер и возможность определять местоположение событий получили применение в различных областях [1, 2, 3]. Увеличение объемов информации, передаваемой в БСС, породило ряд проблем, которые стали центром исследований в области беспроводных сенсорных сетей [1, 4, 5]. Они направлены на поиск путей расширения функциональности узлов сети, особенно при их применении в средах, характеризующихся неопределенностью [6]. Основные из них: осуществлять предварительную обработку информации, включающую кластеризацию, агрегацию и слияние разнородных данных [7, 8]; выполнять анализ обстановки; принимать решения с учетом получаемых данных от других узлов сети. Кроме того, система управления узлом должна осуществлять распределенную обработку сложных запросов внутри сети и маршрутизацию с оптимизацией расхода энергии. Реализация этих требований возможна путем совершенствования интеллектуальной составляющей системы управления, как сети в целом, так и отдельным узлом в частности. Работа посвящена разработке методов, расширяющих функциональность беспроводных сенсорных сетей и превращающих их в реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС) [8]. Наиболее удобной для построения

¹ Статья является расширенной версией доклада автора на конференции КИИ-23 в г. Смоленске [1]

интеллектуальных систем распознавания ситуаций и поддержки принятия решений на основе сенсорных сетей является модель нечеткого сенсора [8, 9], ядром которого является машина вывода [7]. В узлы по сети могут пересылаться шаблоны правил (номера переменных и термов, входящие в левую и правую часть базы знаний, параметры новых термов, параметры треугольных норм) [7]. При решении задачи, например, слежения за целью, такие пересылки могут осуществляться узлами самостоятельно, на основании имеющихся правил, в зависимости от положения цели и содержания запроса.

1. Проблемы обработки данных в РБСС, требующие интеллектуализации сенсоров.

Основными факторами, влияющими на функционирование РБСС, являются [8]:

- ограниченные вычислительные возможности узлов;
- малый радиус коммуникации между узлами (в военных приложениях он ограничен из-за требований скрытности);
- узлы и/или отдельные каналы связи могут временно прекращать функционировать, что приводит к изменению топологии РБСС;
- необходимость иметь множество дублирующих маршрутов передачи данных;
- неравномерный расход энергии в узлах;
- рост энергетических и временных затрат на передачу данных с увеличением размеров сети.

Две последние проблемы представляют для пользователя особую важность. Малая пропускная способность сети предполагает поиск решений снижения потока передаваемых данных через сеть за счет добавления распределенной иерархической обработки данных внутри сети и передачи пользователю лишь релевантных ответов на запрос. Известные же алгоритмы предполагают пересылку по сети больших объемов данных. Для решения данной проблемы предлагается дополнить пересылку данных пересылкой знаний, требуемых для необходимой настройки локальных узлов с целью решения задач предварительной обработки первичных данных, их агрегирования и комплексирования. Подобные решения позволяют рассматривать узел как интеллектуального агента, функционирующего в неопределенной, слабоструктурированной среде. Схемы поведения таких агентов, связанные с принятием решений и использованием «мягких» измерений, рассмотрены в [8]. Их реализация требует наличия базы знаний о себе и о среде, что делает агента способным к самостоятельному принятию решений, в том числе и в составе группы. Кроме того, у узла-агента возникает возможность управления имеющимися знаниями и их передачи другому узлу. Так, в [10] приведена схема интеграции алгоритмов поведения агента и интеграция схемы с языками машинного обучения

Ограниченные вычислительные ресурсы в условиях жестких требований к времени отклика, радиусу радиообмена и энергопотреблению предполагают разработку относительно простых алгоритмов для системы управления узлом РБСС. Известен ряд подходов к решению этой задачи. Так, в [11] предложено использовать процедурную матрицу знаний для «связывания» базы знаний с наблюдаемой ситуацией для выбора релевантного решения. Проблема при этом подходе состоит в формировании базы знаний, включающей способы действия и описание множества ситуаций, в которых они используются. Предлагаемая в данной статье технология основана на использовании методов нечеткой логики и эффективного опыта в форме паттернов [6, 8]. Пользователь задает характеристики объекта (виртуальные атрибуты), значения которых надо вычислить, и правила, при помощи которых эти атрибуты будут подсчитаны, и определяет правила обмена знаниями между узлами в сети.

2. Формальное определение паттерна. *Паттерн* – это модель поведения, получаемая как результат деятельности естественного или искусственного объекта, связанная с

мониторингом среды, принятием решения, его реализацией и т.д. [12]. Паттерн рассматривается, как шаблон (образец) для повторных действий в аналогичных типовых ситуациях (ТС). Поведение в ТС складывается из следующих компонентов:

- субъект, осуществляющий выбор (агент) $k \in K$;
- окружение выбора S – множество элементов среды и их существенных свойств, изменение в любом из которых может стать причиной или продуцировать изменение состояния выбора;
- доступные способы действий $c_j^k \in C^k, j = \overline{1, n}$ k -го агента, которые ему известны и могут быть использованы для достижения i -го результата;
- возможные в окружении S результаты, существенные для агента – $o_i^k \in O^k, i = \overline{1, m}$;
- способы оценки свойств получаемых результатов, отражающих их ценность для агента;
- модель ограничений, как требования на значения выходных переменных и выбор способов действия;
- модель предметной области, представляющая собой множество соотношений, описывающих зависимость результатов от выбора способа действия и возмущений (база знаний).

В соответствии с гипотезой о рациональном поведении агент формирует решение в соответствии с моделью [12]:

$$P_i^k(s \in S) = \underset{c_j^k}{\text{Arg max}} \left(\sum_{j \in J} E\varphi_i(o_i^k(c_j^k)) - EE_i^k(o_i^k(c_j^k)) \right)$$

$$c_j^k \in C^k(I_i^k), I_i^k \subseteq M, o_i^k \in O^k$$

$$\sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) \geq \chi_1^0, \sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0$$

$$\sigma^k(Es^k(X)) \geq \sigma_0^k \quad (1)$$

Такая модель индивидуального поведения агента предполагает формирование базы знаний путем обучения на основе как экспериментального опыта, так и опыта эксперта, что позволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта», аналогичного тому, что имеет место у естественных существ. Как показано в [12], описание паттерна имеет форму алгоритмической модели. Набор моделей или поведенческих паттернов формирует опыт или базу паттернов. Соответствующая методика построения алгоритмической модели паттерна описана в [12]. Все компоненты такой модели, за исключением логических связей, могут быть языковыми конструкциями на естественном или ограниченном профессиональном языке.

Реализация предложенного подхода связана: 1) с правильным соотношением вектора координат ситуации с тем или иным паттерном, как с точки зрения их количества, так и с точки зрения формы представления каждой координаты; 2) с полнотой описания ситуации.

На узле установлены сенсоры, воспринимающие различные сигналы физической природы. Поскольку оператор описывает ситуацию средствами естественного языка, то координаты ситуационного вектора являются лингвистическими переменными. Для этого количественные шкалы в датчиках преобразуются в лингвистические. Результат затем может использоваться, например, для определения типа цели, степени ее угрозы и т.п. Вычисления значений в таком виртуальном сенсоре целесообразно выполнять средствами нечеткого вывода. Для двух типов данных в узле k должны храниться списки имен, таблицы значений атрибутов. Для вычисляемых атрибутов должны храниться нечеткие правила для вычисления атрибутов, параметры функций принадлежности термов.

3. База знаний на основе паттернов. Пусть состояние ситуации описывается ситуационным вектором $x_i, i = \overline{1, n}$, каждая координата которого – лингвистическая переменная x_i с множеством термов $A_i = \{a_i^k, k = \overline{1, K^i}\}$ [8, 13]. Пусть определен набор классов реализаций ситуационного вектора, для которых есть паттерны поведения с успешным разрешением любой ситуации класса. При этом значения удельной ценности по результату и удельной ценности по эффективности превышают некоторый пороговый уровень при реализации паттерна.

Пусть накоплено множество паттернов $d_j, j = \overline{1, p}$, каждый из которых связан с множеством ситуаций кластера, для разрешения которых он был выбран. Тогда можно составить матрицу соответствия между классами ситуаций и располагаемым множеством паттернов поведения. Если сгруппировать строки матрицы по паттернам, где каждая строка матрицы представляет собой конкретный ситуационный кластер, при котором успешно реализован соответствующий паттерн, то в результате можно получить кластер типовой ситуации. Для него паттерн поведения по структуре будет один и тот же, отличие будет в значениях параметров. Пронумеруем строки блока паттерна двумя индексами: первый индекс – номер паттерна (он же номер блока); второй индекс – это номер ситуации, входящий в j -й кластер. Такая матрица определяет систему логических высказываний вида: если ... То ..., иначе ... (их примеры приведены ниже). Полученную упорядоченную таким образом систему логических высказываний будем называть нечеткой матрицей знаний или базой паттернов.

Первоначально каждый узел k имеет некоторый список физических атрибутов, который соответствуют его набору датчиков, пустую оболочку машины вывода и пустой список лингвистических атрибутов. Пользователь может добавить в список лингвистических атрибутов узла k новые лингвистические внутренние (выходные) атрибуты и послать правила их вычисления. После установления базы правил лингвистических атрибутов в машину вывода узел k начинает измерять значения внутренних физических атрибутов, получать от сети и пользователя значения внешних физических и лингвистических атрибутов [6, 7], и производить вычисления внутренних лингвистических атрибутов. Полученные значения внутренних физических и лингвистических атрибутов сохраняются в соответствующих списках и по требованию предоставляются пользователю или другим узлам сети. Пользователь или другие узлы сети могут добавлять в узел k или исключать лингвистические атрибуты базы правил.

4. Алгоритм вычисления функции принадлежности паттерна. Бортовая интеллектуальная система с помощью своих измерительных средств формирует вектор $x_i^*, i = \overline{1, n}$ с количественными характеристиками координат. В этой точке, полученной на момент t , требуется определить значение функции принадлежности паттерна $d_j(x_i, i = \overline{1, n}), j \in \overline{1, p}$. В этом случае функция принадлежности рассчитывается для каждого блока. Наиболее предпочтительным для разрешения проблемной ситуации будет паттерн d_j^* , вычисленный по правилу (2) [13]

$$d^*(x_i^*, i = \overline{1, n}) = \max_{j \in \overline{1, p}} d_j(x_i, i = \overline{1, n}) \quad (2)$$

Блок логических высказываний, относящийся к паттерну d_j , представляет собой объединение соответствующих нечетких множеств, образованных строками выделенного блока. Тогда функция принадлежности этого объединения будет определяться [13]:

$$\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n}) = \bigvee_{j=1}^p \bigwedge_{i=1}^n \mu_i^{jK_j}(x_i),$$

где « \wedge » и « \vee » означают операции \min и \max соответственно.

Формально алгоритм определения функции принадлежности паттерна d_j можно записать в виде:

1. Фиксируем произвольную точку $x_i^* \in \times_{i=1}^n U_i, i = \overline{1, n}$, где « \times » – символ n кратного декартового произведения множества U на себя.
2. Для каждого блока матрицы знаний, соответствующего d_j , определим $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$ в этой точке согласно правилу, приведенному в [13].

Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Окончательно алгоритм определения функции принадлежности паттерна d_j можно записать в виде:

1. Фиксируем произвольную точку $x_i^* \in \times_{i=1}^n U_i, i = \overline{1, n}$.
2. Для каждого блока матрицы знаний, соответствующего d_j , определим $\mu_{d_j}(x_i, i = \overline{1, n})$ в этой точке.

Операция $\min_i (a_i^{is})^*$ производится над числами, стоящими в строках « i » $\overline{1, n}$ и в столбец « \min » заносится минимальное число в соответствующей строке. Операция $\max_{j_s} \min_i (a_i^{js})^*$ определяет в полученном массиве строчных минимумов $j_s \in \overline{1, K_j}$ наибольшее значение. Проводя такие вычисления для каждой точки универсального множества, получим требуемые значения функции принадлежности.

Код каждого порождающего правила является самодостаточным, т.е. весь необходимый контекст активизации правила содержится только в его предпосылках. В теории нечеткого вывода отсутствует способ вызова из одного правила другого, сходного при вызове процедур. Единственный способ сделать это – использовать метаправила. Они направляют ход измерений и вычислений атрибутов, но не принимают непосредственное участие в процессе вычисления. Как показано в [7], для управления передачей баз правил по сети могут использоваться нечеткие продукционные правила, что позволяет считать их метаправилами и ввести в сеть два типа нечетких сенсоров: сенсоры-координаторы и сенсоры, соответствующие уровням представления данных. Следовательно, при управлении РБСС каждый пакет данных может сопровождаться капсулами с правилами для их обработки узлом. Таким образом, в сети существуют два вида уровня трафика: трафик данных и трафик знаний, причем трафик знаний ставит целью минимизацию трафика данных. Это требует использования специализированного нечеткого языка представления знаний.

5. Использование нечеткого сенсора для комплексирования данных. В оценке текущей ситуации при использовании паттернов важную роль играют механизмы восприятия и понимания [14, 15, 16]. Во-первых, необходимо использование в информационных моделях обстановки лингвистических переменных. Это предполагает: 1) представление первичной информации от датчиков в вербальной форме, например, *объект проникновения находится близко, над* и т.п.; 2) связывание первичных данных и лингвистических данных для определения идентичности или распознавания объектов, например, *объект проникновения танк, животное, солдат и т.п.* [17]. В последнем случае используется числовая информация и информация, представленная в нечисловой форме. Во-вторых, для понимания и оценки обстановки необходимо ввести «виртуальные» переменные. Эта операция может быть выполнена алгоритмами комплексирования.

В работе [17] обосновано значение влияния виртуальных параметров на оценку ситуации. Показано, что построение и использование этих параметров имеет фундаментальное значение для восприятия ситуации и напрямую определяют поведение автономных систем. Однако предложенные методы сложны для реализации и не могут быть скорректированы в реальном времени оператором. В [18] предложено объединять несколько атрибутов с одного узла РБСС, используя байесовский подход. Однако он требует знания соответствующих законов распределения и выполнения предположения о стационарности. В [16] описан метод комплексирования данных, основанный на структуре доверия, для уменьшения атрибуции в грубом наборе с несколькими гранулами данных. Изучены фактические характеристики неполных упорядоченных информационных систем с несколькими гранулами. Однако их использование связано с разработкой достаточно громоздких алгоритмов, что затрудняет их использование в РБСС.

Анализ показал, что в указанных выше двух случаях целесообразно использовать нечеткие сенсоры, которые вычисляют и передают лингвистические значения результатов агрегации и слияния численных измерений [19]. В этом случае могут быть использованы следующие два метода для комплексирования базовых измерений. Первый из них осуществляет комбинацию существенных параметров с помощью выраженных связей между ними в виде правил. Во втором методе агрегация и слияние данных реализованы с помощью нечеткого разбиения числового многомерного пространства измерений [3]. Наилучший результат дает гибридизация этих двух подходов. Кроме того, этот подход привлекателен из-за его простоты и сходства с человеческим мышлением. Он позволяет в экспериментальной установке создавать условия для имитации ситуаций миссии различной интенсивности. Результаты экспериментов подтверждают обоснованность предложенного подхода с точки зрения точности и меньшего количества ложных срабатываний.

Слияние данных внутри сети может быть осуществлено иерархией узлов, между которыми динамически распределяются знания, необходимые для обработки данных в конкретном узле и в конкретной ситуации. Следующий пример иллюстрирует механизм вычисления значения лингвистического атрибута степени опасности от объекта проникновения на основе измерения параметров вибрации, акустики и магнитного поля путем агрегирования данных.

R(1): ЕСЛИ (мощность сигнала сейсмотатчика – СРЕДНЯЯ И мощность акустического сигнала – ВЫСОКАЯ И сила сигнала магнитного датчика – ВЫСОКАЯ), ТО (опасность – ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ)

R(2): ЕСЛИ (мощность сигнала сейсмотатчика – НИЗКАЯ И мощность акустического сигнала – НИЗКАЯ И сила сигнала магнитного датчика – НИЗКАЯ), ТО (опасность – ОЧЕНЬ НИЗКАЯ)

R(3): ЕСЛИ (мощность сигнала сейсмотатчика – СРЕДНЯЯ И мощность акустического сигнала – СРЕДНЯЯ И сила сигнала магнитного датчика – НИЗКАЯ), ТО (опасность – НИЗКАЯ)

На рис. 1 представлена диаграмма передачи данных и знаний по сети при обработке запроса «Сообщите ID ближайшего узла, вблизи которого находится объект проникновения, и соответствующую степень опасности».

Узел-координатор получил сообщение о фиксации тремя узлами факта нахождения объекта проникновения в их зоне ответственности. Очевидно, что выполнение запроса о его нахождении равносильно задаче поиска максимума в массиве (параметр степень опасности имеет числовой тип) для случая, когда его элементы распределены по узлам. Для решения задачи поиска узел-координатор запрашивает у ближайшего к нему узла ID и значение параметра степень опасности, запоминает его в переменной St_0 , формирует правило

ЕСЛИ ($St_0 < \text{степень опасности}$), **ТО** ($St_0 = \text{степень опасности}$, $Id_0=Id$),

и посылает это правило в базу знаний второму ближайшему узлу, затем активизирует его. Полученные данные запоминаются, формируется правило для следующего узла и т.д. В результате формируется массив значений и будет установлено, что ближайший узел к объекту проникновения – это узел_3. Очевидно, что узел-координатор должен иметь таблицу подчиненных ему узлов с соответствующими данными.



Рис. 1. Пример обработки запроса

6. Обнаружение и локализация вторжения. Одной из важнейших функциональностей узлов РБСС является реализация двух задач: обнаружение объекта и локализация его в пространстве [10, 16]. Если, по крайней мере, три интеллектуальных узла (ИСУ) фиксируют событие проникновения, то для локализации объекта вторжения можно использовать эффективный метод триангуляции для локализации объекта. Три сенсора с достаточной степенью точности локализуют объект [20].

Поскольку ИСУ будут активизироваться по событиям, то поток данных будет направляться по нескольким ветвям сети от различных ИСУ из зоны вторжения. В связи с этим возникает задача (например, в пункте управления, или в головном узле кластера, или в обоих местах одновременно) обработки таких данных. Например, вторжение группы танков или бронемашин, или вторжение танков с мотопехотой и т.п. В этом случае от различных ИСУ, фиксирующих факт проникновения, будут поступать данные, предполагающие как слияние данных, так и слияние решений. При этом данные могут образовывать комбинацию зависимых (коррелированных) или независимых (некоррелированных) компонентов. Корреляция будет свидетельствовать об обнаружении одного и того же объекта различными ИСУ. Тогда обработка данных будет включать алгоритмы триангуляции с последующим агрегированием данных для уточнения сигнатуры объекта вторжения. В противном случае либо уточняются сигнатуры, либо фиксируется новый объект и выполняется его локализация [6, 21].

Поскольку сенсоры ИСУ рассчитаны на диапазон сигналов, то путем установки различных порогов можно обнаруживать и идентифицировать объекты с сигнатурами, характеризующимися отличающимися частотными диапазонами и мощностями спектров излучения. Узел должен иметь возможность хранить массив, например, измерений акустического поля: частота излучения, мощность излучения, формируемые с заданным интервалом дискретизации (определяется точностью измерения).

Полученные и обработанные данные в пункте управления РБСС используются для отображения ситуации вторжения и активизации задачи слежения за объектами вторжения.

Алгоритм слежения включает в себя: идентификацию таким ИСУ, который близок к объекту вторжения (сбор данных об изменении положения объекта, локализацию зоны вторжения, оценку основных параметров объекта вторжения, формирование сигнатур объектов вторжения, моделирование сигнатур, сопоставление записей с модельными, прогнозирование и оценка возможной траектории, создание и обновление записей о траектории объекта).

На рис. 2 иллюстрирована процедура активизации узлов, ближайших к узлу, обнаружившему факт проникновения объекта противника.

Пусть несколько ИСУ засекли цель и ее локализовали [6]. Возникает проблема, какой из этих ИСУ будет ее сопровождать. Пусть в сети РБСС выполняется отслеживание одной цели.

R(1): ЕСЛИ (степень опасности > d), ТО (активизировать узлы согласно таблице связей с соседними узлами).

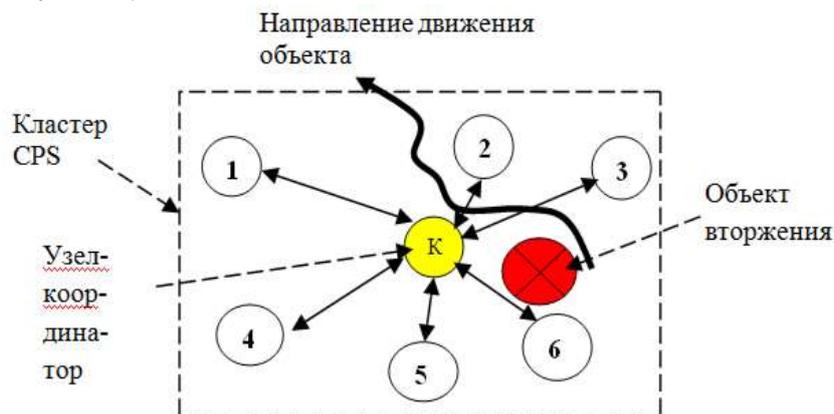


Рис. 2. Активизация ближайших узлов к узлу, зафиксировавшему факт проникновения в зону защиты

Каждый объект вторжения в поле сенсора ИСУ генерирует изменяющееся во времени поле пространственной сигнатуры, которое воспринимается с использованием нескольких модальностей. Тогда движущийся объект – это пространственный пик в поле сигнатуры, который перемещается во времени. Следовательно, отслеживание цели – это отслеживание местоположения пика в течение времени. Для этого с помощью правила в примере (рис. 2) в поле РБСС динамически определяется пространственная ячейка. Внутри ячейки узел ИСУ с максимальной степенью опасности координирует задачи слежения. Можно сформулировать пять основных шагов алгоритма слежения:

1. ИСУ вблизи центра кластера потенциальных целевых траекторий должны быть активированы. ИСУ внутри кластеров должны взаимодействовать для определения факта присутствия цели в кластере.
2. Ближайший ИСУ должен быть активирован, начать передавать информацию об объекте (тип и т.п.), инициировать отслеживание данным ИСУ.
3. ИСУ передает в центр информацию: оценку местонахождения цели, направление движения, скорость. Вычисляется прогноз будущей позиции цели.
4. Эта информация передается в соседние ИСУ и кластеры (для облегчения слежения).
5. Если цель обнаружена в зоне ответственности предупрежденного ИСУ, этот ИСУ активируется, и работа алгоритма повторяется с п. 1. Шаг траектории цели отображается в пункте управления.

Заключение. Предложен достаточно простой способ представления знаний в узле РБСС в виде нечетких продукций. Так как задание функций принадлежности нечетких лингвистических переменных, извлечения правил из данных представляет достаточно длительный процесс, то использование обучающей выборки, отражающей мнение эксперта о процессе измерения и поведения, может значительно его ускорить.

Ближайшей целью разработчиков является использование, помимо нечетких сенсоров, нейро-нечетких сетей (вложенных в один узел или распределенных по РБСС), алгоритмов для управления адаптацией и обучением нечетких сенсоров. Это существенно повысит эффективность РБСС в решении для таких задач, как слежение за стационарными и мобильными объектами, мониторинг внешней среды. Описанный подход реализован в форме программного продукта. Он написан на языке программирования диалекте С, как набор взаимодействующих задач и процессов. Его дополнительные инструменты представлены в форме Java-приложений и интерфейсов для shell-скриптов. Операционная система содержит встроенные интерфейсы, модули и специфические настройки, которые позволяют создавать программу как набор модулей, реализующих заданные функциональности и обеспечивают интерфейс к стандартным аппаратным средствам ввода, вывода и датчикам.

Конфликт интересов. Процесс написания и содержание статьи не дают оснований для постановки вопроса о конфликте интересов.

Список источников

1. Виноградов Г.П. Расширение функциональности узлов в беспроводных сенсорных сетях / Г.П. Виноградов // В сборнике: Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2023). Труды конференции. В 2-х томах. – Смоленск, 2023. – С. 42-54.
2. Иконостасова Л. Г. Интернет вещей (IoT) с поддержкой беспроводных сенсорных сетей. Проблемы безопасности и современные решения / Л.Г. Иконостасова // Актуальные исследования, 2023. – №25 (155). – Ч.1. – С. 25-28. – URL:[https://apni.ru/article/6575-internet-veshchey-iot-s-podderzhkoj-besprovod.](https://apni.ru/article/6575-internet-veshchey-iot-s-podderzhkoj-besprovodnykh-sensornykh-setey)
3. Mamuna M., Shaista H., Abdul R.J., et al. Applications of wireless sensor networks and Internet of Things frameworks in the industry revolution 4.0. A systematic literature review, 2022, no. 22(6), pp, 23-38, DOI:10.3390/s22062087.
4. Прокопчина С.В. Байесовские интеллектуальные измерения / С.В. Прокопчина. – М: ИД «Научная библиотека», 2021. – 580 с.
5. Ефименко, М.С. Беспроводные сенсорные сети / М.С. Ефименко, С.И., Клымов, Р.Б. Саткенов // Молодой ученый, 2018. – № 51 (237). – С. 40-42. – URL: <https://moluch.ru/archive/237/55115/>.
6. Виноградов Г.П. Алгоритмы управления процессами в реагирующих сенсорных сетях для задач защиты объектов / Г.П. Виноградов // Программные продукты и системы, 2022. – № 2. – С. 229-239.
7. Аверкин А.Н. Создание универсального интерфейса высокого уровня для “умного” узла беспроводной сенсорной сети / А.Н. Аверкин, Г.К. Лавров // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – Дубна, 2015. – №2. – С. 11–33. – URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/455>.
8. Виноградов Г.П. Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах / Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2021. – № 1. – С. 19–30.
9. Демидова Л.А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л.А. Демидова, В.В. Кираковский, А.Н. Пылькин. – М.: Горячая линия –Телеком, 2021. – 284 с.
10. Ahmed Burhan Mohammed, Lamia Chaari Fourati, Ahmed M. Fakhrudeen Comprehensive systematic review of intelligent approaches in UAV-based intrusion detection, blockchain, and network security. Computer networks, 2024, vol. 239, pp. 1-18, DOI:10.1016/j.comnet.2023.110140.
11. Федунев Б.Я. Решение задач по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем тактического уровня на этапах выполнения миссии подвижным объектом / Б.Я. Федунев // Известия РАН. Теория и системы управления, 2023. – № 1. – С. 137-147.
12. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A. Patterns in smart wireless sensor network nodes. International scientific conference “Information technologies for industry” (ITI’22). Lecture notes in networks and systems, Springer nature Switzerland AG, 2022, pp. 73–82.
13. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федунев. – М: Горячая линия Телеком, 2012. – 284 с.
14. Huang Z., Tang J., Shan G., et al. An efficient passenger-hunting recommendation framework with multi-task deep learning. IEEE Internet of Things journal, 2021, no. 2, pp, 99-115, DOI:10.1109/IJOT.2019.2901759.
15. Chen Z., Zhang Y., Wu C., Ran B. Understanding individualization driving states via latent Dirichlet allocation model. IEEE Intelligent transportation systems magazine, 2019, no. 11(2), pp. 41-53, DOI:10.1109/IMITS.2019.2903525.

16. Chengfeng Long, Xingxin Liu, Yakun Yang, et al. A data fusion method in wireless sensor network based on belief structure. EURASIP Journal on wireless communications and networking. 2021, no. 86, DOI:10.1186/s13638-021-01916-4.
17. Yeong D. Velasco-Hernandez G., Barry J., et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles. A Review, Sensors, 2021, no. 21(6), pp. 21-40, DOI:10.3390/s21062140.
18. Khalid W., Sattar A, Qureshi M., et al. A smart wireless sensor network node for fire Turkish journal of electrical engineering & computer science, 2019, no. 27, pp. 2541-2556, DOI:10.3906/elk-1812-81.
19. Детков А.Н. Оптимальное комплексирование измерителей при сопровождении маневрирующего объекта в статистически неопределенных ситуациях / А.Н. Детков // Известия РАН. Теория и системы управления, 2023. – № 1. – С. 28-43.
20. Wang Zh., Shen H., Zhou Zh. Improved DV-Hop model based on the application of variable. Ad Hoc Networks, 2024, vol. 154, pp. 1-10, DOI:10.1016/j.adhoc.2023.103368.
21. Ma Y. et al. Path planning for searching submarine with cooperative coverage of fixed-wing UAVs cluster in complex boundary sea area. IEEE Sensors, 2023, no. 24, vol. 23, pp. 30070-30083.

Виноградов Геннадий Павлович. Профессор Тверского государственного технического университета, заведующий лабораторией НИИ Центрпрограммсистем, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, член Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы. AuthorID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID: 0000-0001-5757-2753, Scopus AuthorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru, 170024, Россия, г. Тверь, ул. Республиканская, д.11, кв. 130.

UDC 004.23, 004.72

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.005

Intelligent node management system in responsive wireless sensor networks

Gennady P. Vinogradov

Research Institute of Centerprogramssystems,
Russia, Tver, wgp272ng@mail.ru

Abstract. Relevance. Wireless sensor networks (BSN) due to such characteristics as low energy consumption by nodes, low cost, self-organization, distribution and small size, the ability to determine the location of events have been applied in various fields. The increase in the amount of information transmitted to the BSS has created a number of problems that have become the focus of research in the field of wireless sensor networks. They are aimed at finding ways to expand the functionality of network nodes, especially when used in environments characterized by uncertainty. The main ones are: the network node must be capable of pre-processing information, including clustering, aggregation and merging of heterogeneous data, studying the situation and making decisions, both independently and as part of a group, taking into account the data received from other network nodes. In addition, the node management system must perform distributed processing of complex requests within the network and routing with optimized energy consumption. The implementation of these requirements is possible by improving the intellectual component of the management system of both the network as a whole and an individual node in particular. The purpose of the work. Development of methods that extend the functionality of a wireless sensor network node control system based on fuzzy logic inference and pattern theory. Main results: Due to the complexity of structuring and mathematically describing the behavior of the environment in the node's control area, it is proposed to use effective patterns of response to changes in its state. For this purpose, linguistic variables and fuzzy production rules are introduced in information models of the environment. This approach made it possible to ensure a relevant correlation of the coordinate vector of the situation with a particular response pattern and reduce the amount of calculations. The rules contain references to primary data processing tasks and response procedures by means of an autonomous network node. It is proposed to use meta-guidelines to update the rule base. Meta-guidelines define the parameters of membership functions and the rules of inference when calculating attribute values. This made it possible to supplement data transfer with the transfer of knowledge required for the necessary configuration of the parameters of the algorithms of local nodes. With this approach, the network node has knowledge about itself and the environment, and becomes capable of independent decision-making as part of

a group. To increase the robustness of data processing algorithms in nodes, it is proposed to use the concept of a "typical situation". As an example, the paper shows the use of the proposed approach in the tasks of integrating data from several sensors of a node and detecting an intrusion object.

Keywords: model, fuzzy logic, pattern, wireless network, sensor

References

1. Vinogradov G.P. Rasshireniye funktsional'nosti uzlov v besprovodnykh sensorykh setyakh [Expanding the functionality of nodes in wireless sensor networks]. V sbornike: Dvadsat' pervaya Natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiyem (KII-2023). Trudy konferentsii. V 2-kh tomakh [In the collection: The Twenty-first national conference on artificial intelligence with international participation (CII-2023). Proceedings of the conference. In 2 volumes]. Smolensk, 2023, pp. 42-54.
2. Iconostasova L. G. Internet veshchey (IoT) s podderzhkoy besprovodnykh sensorykh setey. Problemy bezopasnosti i sovremennyye resheniya [Internet of Things (IoT) with support for wireless sensor networks. Security problems and modern solutions]. Aktual'nyye issledovaniya [Current research], 2023, no. 25 (155), Part I, pp. 25-28, available at: <https://apni.ru/article/6575-internet-veshchey-iot-s-podderzhkoj-besprovod>.
3. Mamuna M., Shaista H., Abdul R.J., et al. Applications of wireless sensor networks and Internet of Things frameworks in the industry revolution 4.0. A systematic literature review, 2022, no. 22(6), pp. 23-38, DOI:10.3390/s22062087.
4. Prokopchina S.V. Bayesovskiy intellektual'nyye izmereniya [Bayesian intellectual measurements]. M: ID "Nauchnaya biblioteka" [Moscow: Publishing house "Scientific Library"], 2021, 580 p.
5. Efimenko M.S., Klymiv S.I. Satkenov R.B. Besprovodnyye sensoryye seti [Wireless sensor]. Molodoy uchenyy [Young Scientist], 2018, no. 51 (237), pp. 40-42, available at: <https://moluch.ru/archive/237/55115/>.
6. Vinogradov G.P. Algoritmy upravleniya protsessami v reagiruyushchikh sensorykh setyakh dlya zadach zashchity ob"yektov [Process control algorithms in responsive sensor networks for object protection tasks]. Programmnyye produkty i sistemy [Software products and systems], 2022. – No. 2. – pp. 229-239.
7. Averkin A.N., Lavrov G.K. Sozdaniye universal'nogo interfeysa vysokogo urovnya dlya "umnogo" uzla besprovodnoy sensornoy seti [Creation of a universal high-level interface for a smart node of a wireless sensor network]. Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii: setevoye nauchnoye izdaniye, Dubna [System analysis in science and education: online scientific publication, Dubna], 2015, no. 2, pp. 11-33, available at: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/455>.
8. Vinogradov G.P., Yemtsev A.S., Fedotov I.S. Besprovodnyye sensoryye seti v zashchishchayemykh zonakh [Wireless sensor networks in protected areas]. Izvestiya YUFU, Tekhnicheskiye nauki [Bulletin of SFedU, Technical sciences], 2021, no. 1, pp. 19-30.
9. Demidova L.A., Kirakovsky V.V., Pylkin A.N. Prinyatiye resheniy v usloviyakh neopredelennosti [Decision-making in conditions of uncertainty]. M: Goryachaya liniya –Telekom [Moscow: Hotline – Telecom], 2021, 284 p.
10. Ahmed Burhan Mohammed, Lamia Chaari Fourati, Ahmed M. Fakhrudeen Comprehensive systematic review of intelligent approaches in UAV-based intrusion detection, blockchain, and network security. Computer networks, 2024, vol. 239, pp. 1-18, DOI:10.1016/j.comnet.2023.110140.
11. Fedunov B.Ya. Resheniye zadach po pretседentu v bazakh znaniy bortovykh intellektual'nykh sistem takticheskogo urovnya na etapakh vypolneniya missii podvizhnym ob"yektom [Solving problems based on precedent in the knowledge bases of onboard intelligent tactical-level systems at the stages of mission fulfillment by a mobile object]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Bulletin RAS. Theory and control systems], 2023, no. 1, pp. 137-147.
12. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A. Patterns in smart wireless sensor network nodes. International scientific conference "Information technologies for industry" (ITI'22). Lecture notes in networks and systems, Springer nature Switzerland AG, 2022, pp. 73–82.
13. Borisov V. V., Kruglov V.V., Fedunov A.S. Nechetkiye modeli i seti [Fuzzy models and networks]. M: Goryachaya liniya –Telekom [Moscow: Hotline – Telecom], 2012, 284 p.
14. Huang Z., Tang J., Shan G., et al. An efficient passenger-hunting recommendation framework with multi-task deep learning. IEEE Internet of Things journal, 2021, no. 2, pp. 99-115, DOI:10.1109/JIOT.2019.2901759.
15. Chen Z., Zhang Y., Wu C., Ran B. Understanding individualization driving states via latent Dirichlet allocation model. IEEE Intelligent transportation systems magazine, 2019, no. 11(2), pp. 41-53, DOI:10.1109/MITS.2019.2903525.
16. Chengfeng Long, Xingxin Liu, Yakun Yang, et al. A data fusion method in wireless sensor network based on belief structure. EURASIP Journal on wireless communications and networking. 2021, no. 86, DOI:10.1186/s13638-021-01916-4.
17. Yeong D. Velasco-Hernandez G., Barry J., et al. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles. A Review, Sensors, 2021, no. 21(6), pp. 21-40, DOI:10.3390/s21062140.

18. Khalid W., Sattar A, Qureshi M., et al. A smart wireless sensor network node for fire Turkish journal of electrical engineering & computer science, 2019, no. 27, pp. 2541-2556, DOI:10.3906/elk-1812-81.
19. Detkov A.N. Optimal'noye kompleksirovaniye izmeriteley pri soprovozhdenii manevriruyushchego ob"yekta v statisticheski neopredelennykh situatsiyakh [Optimal integration of measuring instruments when accompanying a maneuvering object in statistically uncertain situations]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Bulletin RAS. Theory and control systems], 2023, no. 1, pp. 28-43.
20. Wang Zh., Shen H., Zhou Zh. Improved DV-Hop model based on the application of variable. Ad Hoc Networks, 2024, vol. 154, pp. 1-10, DOI:10.1016/j.adhoc.2023.103368.
21. Ma Y. et al. Path planning for searching submarine with cooperative coverage of fixed-wing UAVs cluster in complex boundary sea area. IEEE Sensors, 2023, no. 24, vol. 23, pp. 30070-30083.

Vinogradov Gennady Pavlovich. Professor of Tver state technical university, head of the laboratory of the Research Institute of Centerprogram Systems, member of the Russian association of artificial intelligence, member of the Russian association of fuzzy systems and soft computing. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems, AuthorID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID: 0000-0001-5757-2753, Scopus AuthorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru, 170024, Russia, Tver, Republikanskaya str., 11, sq. 130.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 13.02.2025; принята к публикации 05.03.2025.

The article was submitted 11/18/2024; approved after reviewing 02/13/2025; accepted for publication 03/05/2025.

Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

УДК 621.311

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.006

Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта

Крюков Андрей Васильевич^{1,2}, Овечкин Илья Сергеевич¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, *and_kryukov@mail.ru*

Аннотация. Цель представленных в статье исследований состояла в разработке цифровых моделей систем тягового электроснабжения (СТЭ), позволяющих адекватно определять режимы однофазных замыканий (ОЗЗ) на землю в линиях электропередачи (ЛЭП) 6-10 кВ, расположенных в зонах повышенных электромагнитных влияний тяговых сетей. Для их реализации применялся программный продукт Fazonord, версия 5.3.3.0-2024, дающий возможность рассчитывать режимы ЛЭП при различных способах соединения нейтралей трансформаторов с землей: изолированная нейтраль, а также заземленная через резисторы с малым и значительным сопротивлением. Моделирование ОЗЗ осуществлялось в программном комплексе Fazonord, версия 5.3.3.0-2024, для СТЭ, включающей следующие элементы: три линии электропередачи (ЛЭП) 110 кВ, две подстанции с трансформаторами 40000 кВ·А, тяговую сеть 25 кВ с двумя контактными подвесками, четыре рельсовые нити и линию 10 кВ, смонтированную на опорах тяговой сети с полевой стороны. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3192 т в нечетном направлении и такого же числа составов массой 4192 т – в четном. Представленные в статье компьютерные модели дают возможность адекватно определять режимы однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта. Методика применима для ЛЭП и тяговых сетей любой конструкции и может использоваться на практике для настройки устройств защиты от ОЗЗ, создании средств их идентификации и локализации, а также при выборе наиболее эффективного типа заземления нейтрали.

Ключевые слова: технологические ЛЭП железнодорожного транспорта, способы заземления нейтралей, режимы однофазных замыканий, компьютерные модели

Цитирование: Крюков А.В. Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта / А.В. Крюков, И.С. Овечкин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 53-67. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.006.

Введение. В электрических сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью часто возникают однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [1]. Относительно малые токи ОЗЗ затрудняют идентификацию и локализацию этих повреждений. При большой длительности они могут переходить в двойные замыкания с протеканием значительных токов. Для решения проблемы ОЗЗ предлагаются другие способы заземления нейтралей трансформаторов: резистивные или через дугогасящий реактор [2].

Изучению процессов ОЗЗ посвящено большое число работ, часть из которых представлена в списке использованной литературы. Так, например, в [3, 4] описаны методы защиты от ОЗЗ. Анализ работы автоматических регуляторов катушек Петерсона, установленных в сетях 6-35 кВ с нестабильной проводимостью изоляции относительно земли, выполнен в [5]. Особенности установившихся режимов кабелей при различных заземлениях нейтрали и однофазных замыканиях на землю описаны в [6]. Подходы к ограничению перенапряжений при ОЗЗ проанализированы в [7]. Интеллектуальная система компенсации тока однофазного замыкания на землю представлена в [8]. Результаты экспериментальных исследований и расчетов ОЗЗ при различных режимах нейтралей описаны в [9]. Возможность использования комбинированной компенсационной катушки – резистора – рассмотрена в [10].

Методы заземления нейтрали силового трансформатора описаны в [11]. Анализ переходных процессов при ОЗЗ в сети 20 кВ проведен в [12]. Защиты от ОЗЗ рассмотрены в [13]. Способ обнаружения ОЗЗ в линии, обеспечивающей выдачу мощности ветровой электростанции и основанный на использовании критерия переходного фазного тока, предложен в [14]. Модель прерывистого дугового ОЗЗ представлена в [15]. Результаты исследования метода определения места ОЗЗ в резонансно-заземленной сети приведены в [16]. Способы обнаружения ОЗЗ методом локации предложены в [17, 18]. Новый вейвлет-пакетный метод идентификации линии с ОЗЗ описан в [19]. Вопросы математического моделирования режимов ОЗЗ на основе системы MatLab рассмотрены в [20-22]. В [23] представлен обзор способов локализации повреждений в сетях среднего напряжения с помощью глубокого обучения. Задача идентификации ОЗЗ на основе искусственных нейронных сетей решена в [24-26]. В [27] при поиске ОЗЗ в сетях с резонансным заземлением предлагается применять кластеризацию признаков и разложения по сингулярным значениям. Для выявления аварийного фидера в [28, 29] используются анализ установившихся и переходных параметров и преобразование Фурье. В [30-32] показано, что диагностирование неисправностей распределительных сетей можно эффективно осуществлять на основе вейвлет-коэффициентов.

Анализ перечисленных публикаций показывает, что в них рассмотрены важные аспекты ОЗЗ, однако вопросы моделирования таких режимов в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта, находящихся в зонах значительного электромагнитного влияния тяговых сетей, изучены недостаточно [33], поэтому возникает необходимость дополнительных исследований, которые на современном этапе должны проводиться на основе цифровых технологий. Для их реализации можно эффективно использовать методы, обеспечивающие адекватное моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) на основе фазных координат, реализованные в программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC [34, 35], характеристики которого приведены на рис. 1.

Основное назначение	Моделирование нормальных, аварийных, неполнофазных, сложносимметричных, несинусоидальных и предельных режимов ЭЭС и СЭЖД, включающих сегменты переменного и постоянного тока
Методы и алгоритмы	Определение режимов ЭЭС и СЭЖД на основе фазных координат и решетчатых схем замещения с полнографовой топологией
Моделируемые элементы ЭЭС и СЭЖД	Многопроводные линии электропередачи, тяговые сети, трансформаторы и автотрансформаторы различной конструкции, асинхронные двигатели, выпрямители и инверторы, активные элементы smart grid: управляемые источники реактивной мощности, кондиционеры гармоник, симметрирующие устройства
Дополнительные задачи	Параметрическая идентификация ЛЭП, трансформаторов и тяговых сетей; определение нагревов проводов и трансформаторов; моделирование режимов плавки гололеда; расчеты напряженностей электромагнитных полей; вычисление наведенных напряжений на смежных ЛЭП и трубопроводах

Рис. 1. Характеристики промышленного программного комплекса Fazonord AC-DC

Рассматриваемая работа продолжает исследования, описанные в [33], и направлена на решение задач моделирования режимов ОЗЗ с учетом способов заземления нейтрали трансформаторов.

1. Изолированная нейтраль. Определение параметров ОЗЗ осуществлялось в программном комплексе Fazonord AC-DC – версия 5.3.4.11-2024 для системы

электроснабжения (рис. 2) участка железной дороги на основной частоте и на частотах высших гармоник.

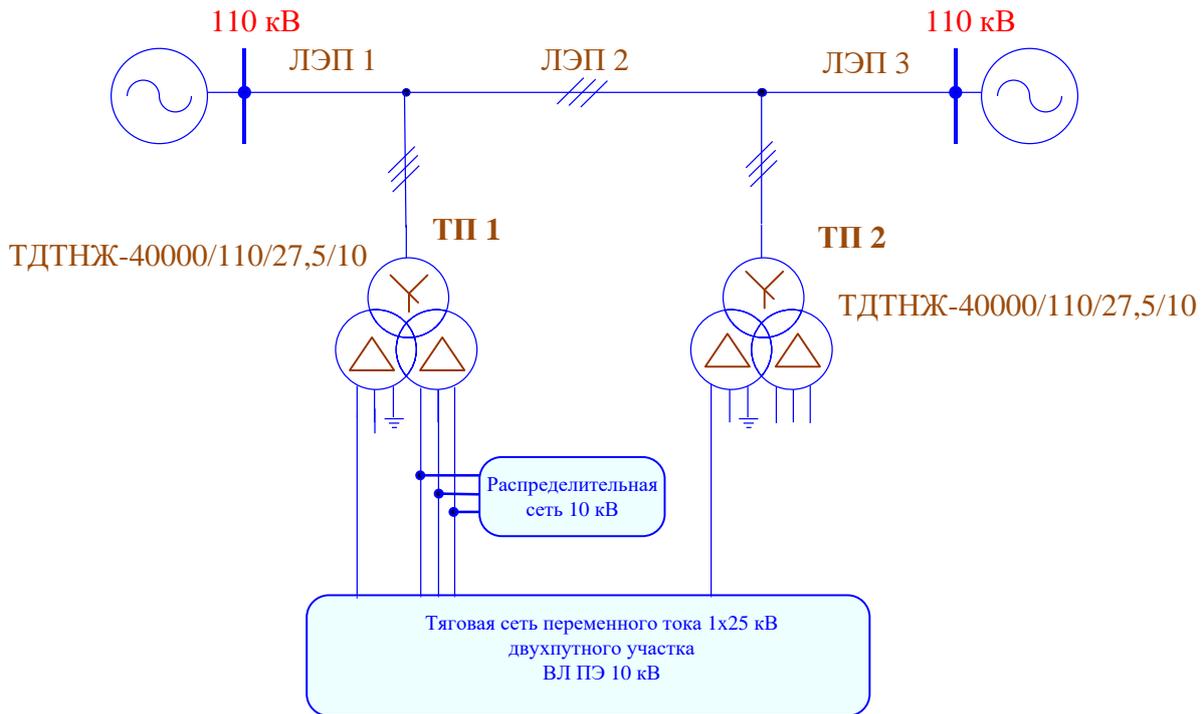


Рис. 2. Схема системы электроснабжения

В модели представлены следующие элементы сети: питающие ЛЭП 110 кВ; трансформаторы ТДТНЖ-40000-110/27,5; участок тяговой сети (ТС) протяженностью 50 км с двумя контактными подвесками, четыре рельсовые нити и линия продольного электроснабжения (ВЛ ПЭ) 10 кВ, смонтированная на опорах ТС с полевой стороны. Поперечное сечение системы токоведущих частей показано на рис. 3. Тяговые нагрузки создавались движением двух поездов массой 3192 т в нечетном направлении и составов такого же числа весом 4192 т – в четном.



Рис. 3. Расположение токоведущих частей

Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 4–8. Исходный, доаварийный режим представлен на рис. 4, на котором приведены графики зависимостей от времени t следующих параметров: напряжений основной частоты $U_1 = U_1(t)$, суммарных коэффициентов высших гармоник (ВГ) $k_U = k_U(t)$, эффективных величин с учетом ВГ $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$. На рис. 4г показаны графики, иллюстрирующие сравнение $U_1 = U_1(t)$ и $U_\Sigma = U_\Sigma(t)$.

Напряжения фиксировались в точке, отвечающей расстоянию в 10 км от подстанции ТП 1. Полученные результаты показали, что из-за влияния тяговой сети (ТС) наблюдаются колебания фазных напряжений основной частоты; при этом по фазе А коэффициент вариации достигал семи процентов, а размах равнялся 1670 В.

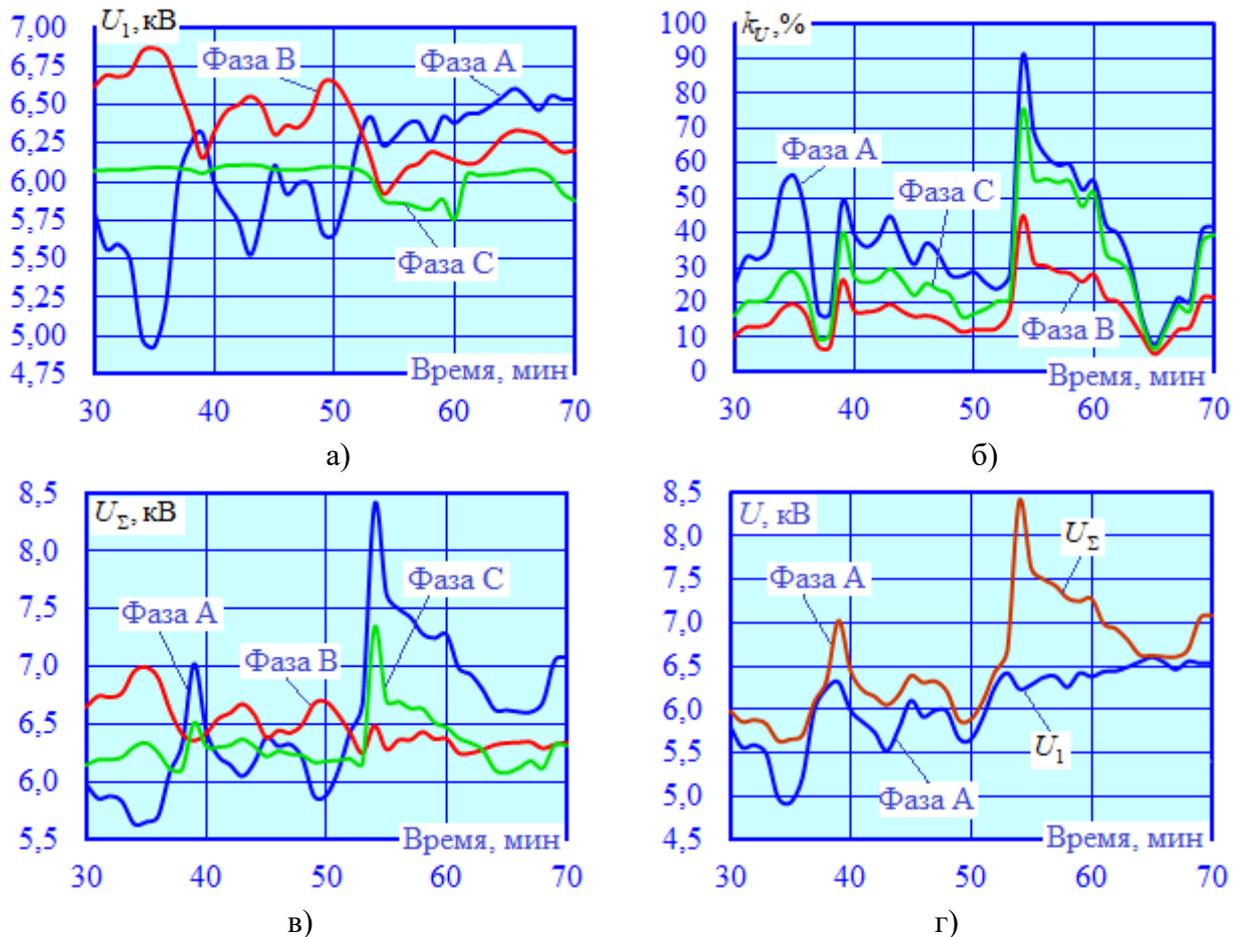


Рис. 4. Исходный, доаварийный режим: напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г):

$$U_\Sigma = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100}\right)^2}$$

Возникла существенная несимметрия напряжений U_Σ фаз линии относительно земли (рис. 4а), которая приводила к различию токов I_Σ при ОЗЗ разных фаз. Электровозы вызвали значительную несинусоидальность в ТС. За счет этого имели место заметные гармонические искажения U_Σ ВЛ СЦБ: максимум коэффициента k_U по фазе А достигал 92 %, а по фазам В и С – 45 и 77 % соответственно. На рис. 5 представлены результаты моделирования режимов ОЗЗ фазы А в точке, находящейся на расстоянии 10 км от подстанции ТП1. Напряжения неповрежденных фаз увеличивались до линейных значений. Потенциал фазы В в точке ОЗЗ снижался до нуля. Максимальные величины коэффициентов k_U фаз А и С уменьшались до 41 % и 49 % соответственно. На рис. 6 показан характер изменения токов ОЗЗ. На рис. 7 представлены формы кривых U_Σ и I_Σ при ОЗЗ.

Коэффициент гармоник тока ОЗЗ в некоторые моменты времени достигал сотен процентов, что приводило к заметным отличиям формы его кривой от синусоиды (рис. 7). В спектральном составе тока ОЗЗ (рис. 8) наблюдался значительный вклад таких ВГ, как 3, 5, 7, 13 и 15. Их величины лежали в диапазоне 28...30 % от основной. Для остальных гармоник он составлял 5 ...12 %.

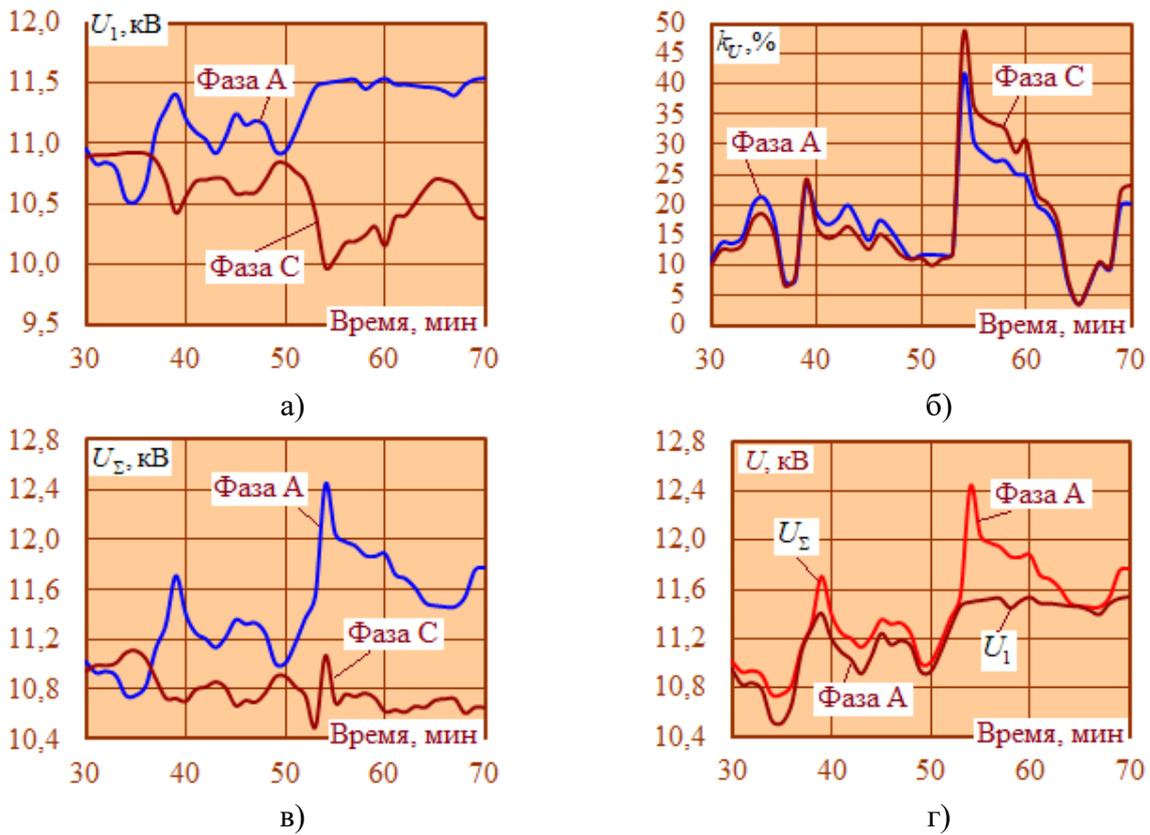


Рис. 5. Режим ОЗЗ. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г)

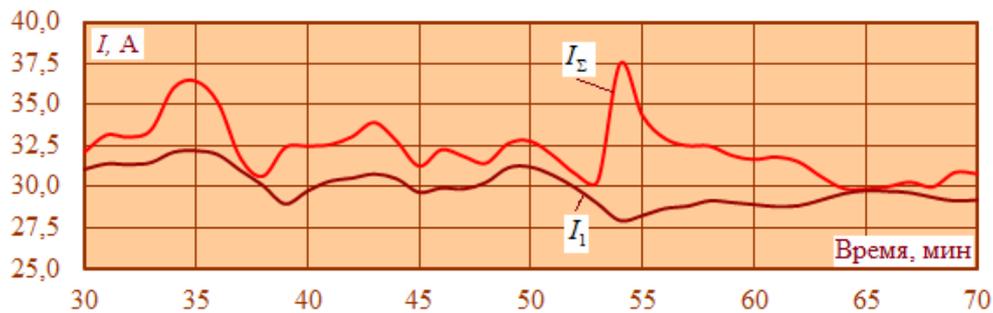
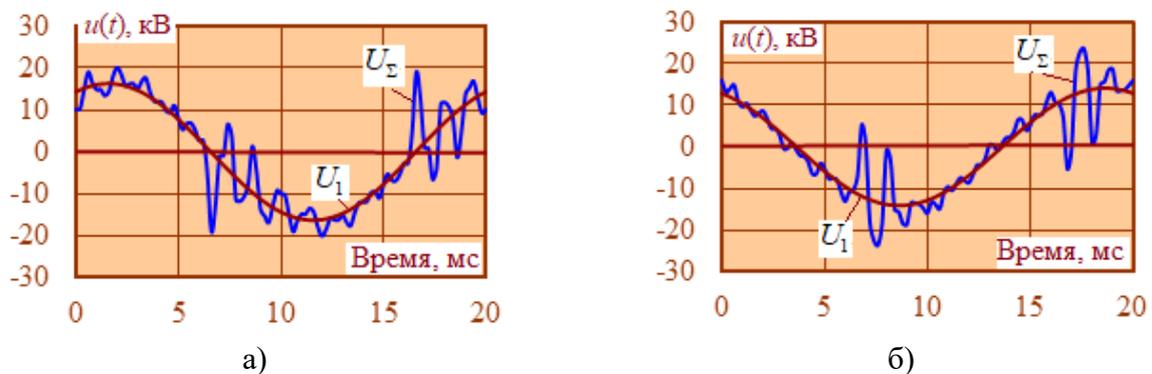


Рис. 6. Токи ОЗЗ: $I_\Sigma = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}$



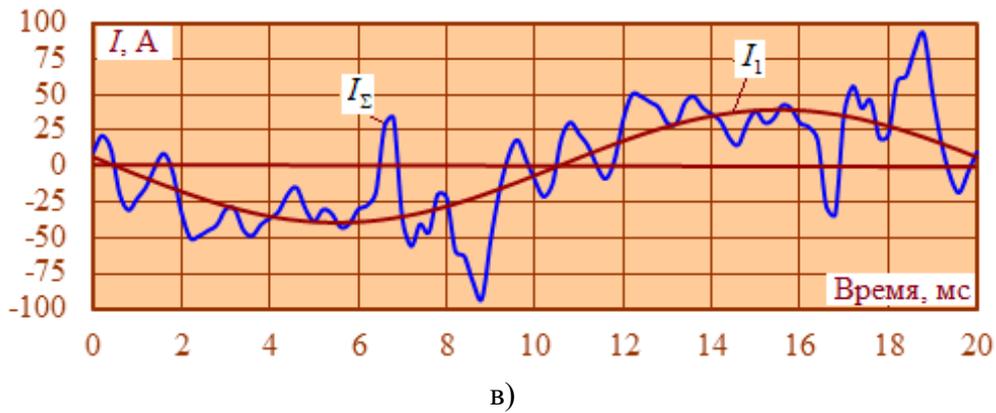


Рис. 7. Формы кривых напряжений неповрежденных фаз А (а) и С (б) в месте замыкания, а также токов ОЗЗ (в) на 54-й минуте моделирования

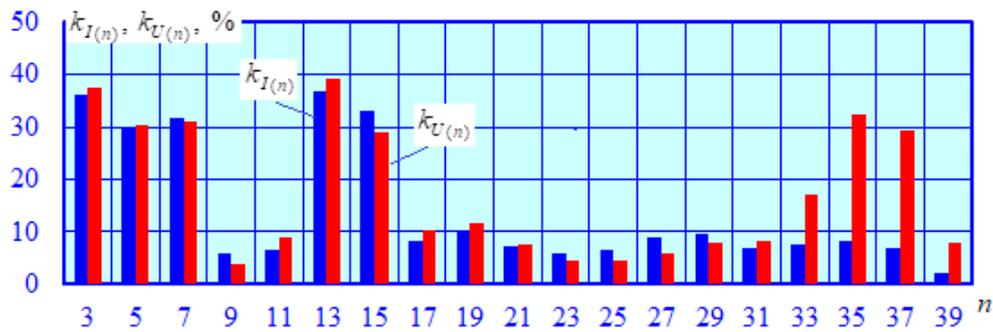


Рис. 8. Спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения

2. Заземление нейтрали через низкоомное сопротивление. Такой способ используется в случаях, когда ОЗЗ необходимо селективно отключить в течение минимального интервала времени [9]. Для этого ток должен иметь достаточную величину для срабатывания релейной защиты (РЗ). Достоинства низкоомного заземления нейтрали состоят в следующем:

- повышается надежность работы РЗ;
- обеспечивается быстрое отключение поврежденного участка;
- в 1,5...2 раза снижаются уровни перенапряжений и уменьшается время их воздействия до нескольких секунд;
- за счет исключения возможности феррорезонансов возрастает надежность работы измерительных трансформаторов;
- снижается вероятность поражения персонала шаговыми напряжениями.

При наличии на районной обмотке схемы соединений «треугольник» для заземления нейтрали используется силовой фильтр нулевой последовательности (нейтраллер) типа ФМЗО (рис. 9), включающий следующие элементы:

- трансформатор вывода нейтрали с сухой изоляцией и соединением обмоток в зигзаг с выведенным нулем;
- высоковольтный резистор, рассчитанный на 6 или 10 кВ;
- трансформатор тока.

ФМЗО компактно по габаритам и может монтироваться в ячейку комплектного распределительного устройства.

Величина низкоомного сопротивления R_N была принята равной 10 Ом. Результаты моделирования представлены на рис. 10 – 13.

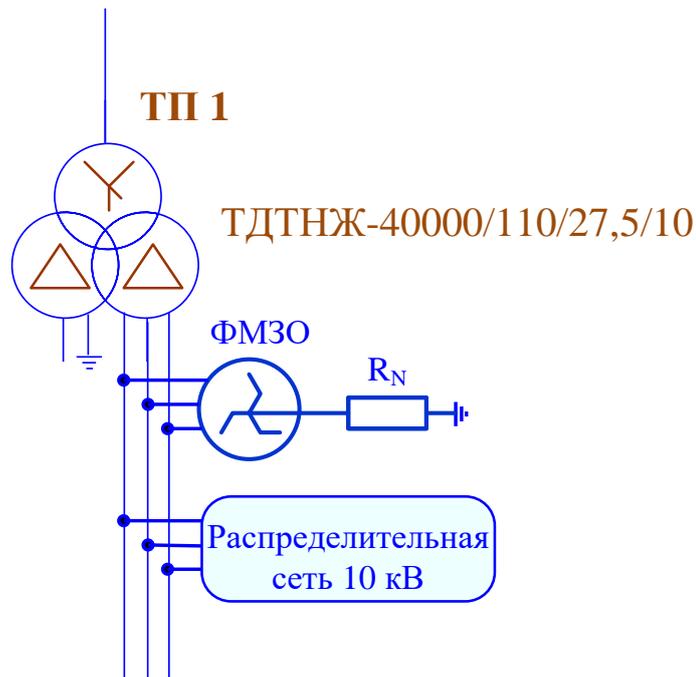


Рис. 9. Измененная часть схемы системы электроснабжения

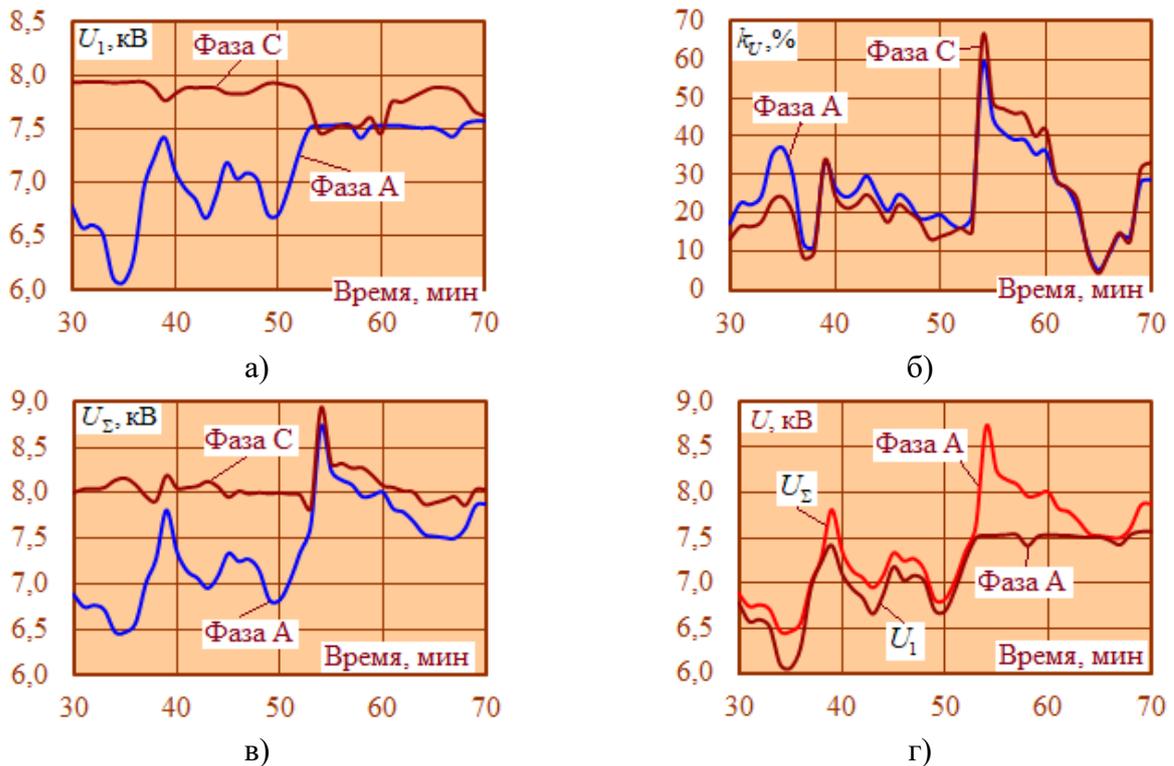


Рис. 10. Режим ОЗЗ. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_Σ (г)

Анализ рис. 10 позволяет заключить, что напряжение основной частоты увеличилось до значений, достигающих 7,9 кВ. По сравнению с изолированной нейтралью коэффициенты гармоник для фаз А и С возросли на 20 и 15 % соответственно. Максимальное значение эффективного напряжения уменьшилось с 12 кВ до 9 кВ.

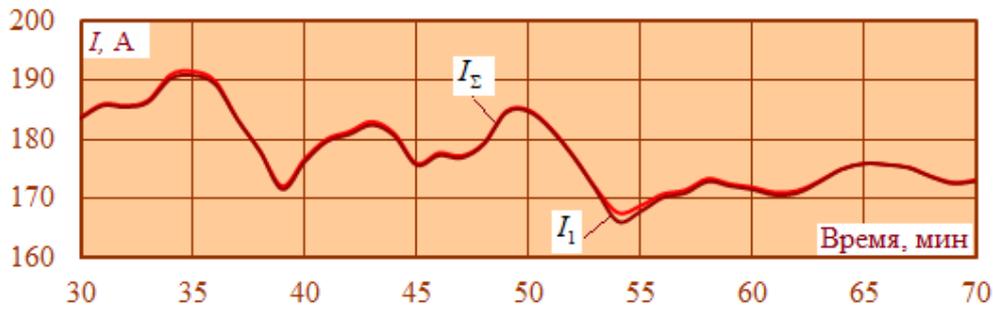


Рис. 11. Токи ОЗЗ: $I_{\Sigma} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100}\right)^2}$

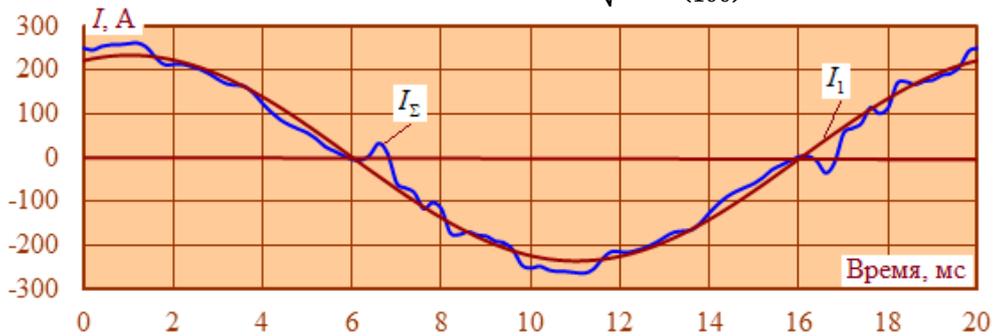


Рис. 12. Формы токов ОЗЗ (в) на 54-й минуте моделирования

Из анализа рис. 12 можно заключить, что степень искажения формы тока ОЗЗ существенно снизилась по сравнению с режимом, когда нейтраль ВЛ ПЭ была изолирована.

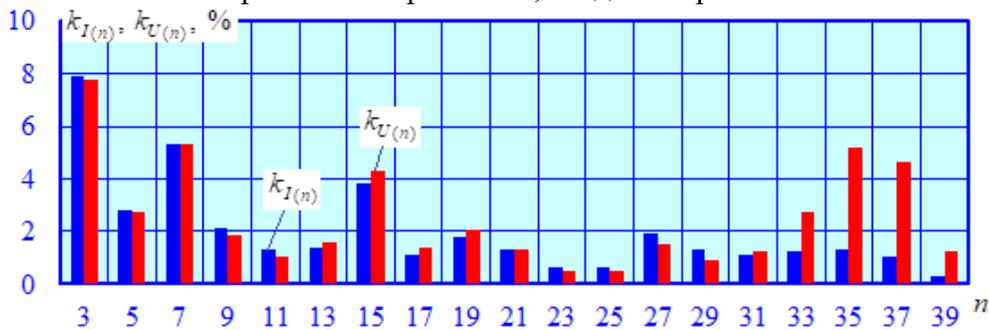


Рис. 13. Спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения

Величины $k_{U(n)}$ по сравнению с режимом, когда нейтраль изолирована, существенно уменьшились (рис. 13). Для гармоник под номерами 3, 7 и 15 коэффициенты $k_{I(n)}$ лежали в диапазоне 2,5...5,6 % от основной.

3. Заземление нейтрали через высокоомное сопротивление. Такой способ применяется в тех случаях, когда необходима длительная работа сети в режиме ОЗЗ с целью ограничения времени перерывов в электроснабжении. Данный подход характеризуется снижением уровня перенапряжений до допустимых значений и возможностью организации защиты от ОЗЗ с действием на сигнал.

К недостаткам этого режима нейтрали можно отнести следующие факторы:

- при металлическом ОЗЗ напряжение на неповрежденных фазах повышается до линейного, что требует усиления фазной изоляции со значительными затратами в кабельных сетях;
- при длительных ОЗЗ увеличивается вероятность их перехода в двухфазные и трехфазные замыкания;
- повышается опасность поражения людей и животных шаговым напряжением;

– определение поврежденного присоединения производится по активной составляющей тока ОЗЗ, которая имеет достаточно малую величину, что ведет к усложнению и удорожанию релейной защиты.

Моделирование проведено при $R_N=1100$ Ом. Результаты приведены на рис. 14 – 17.

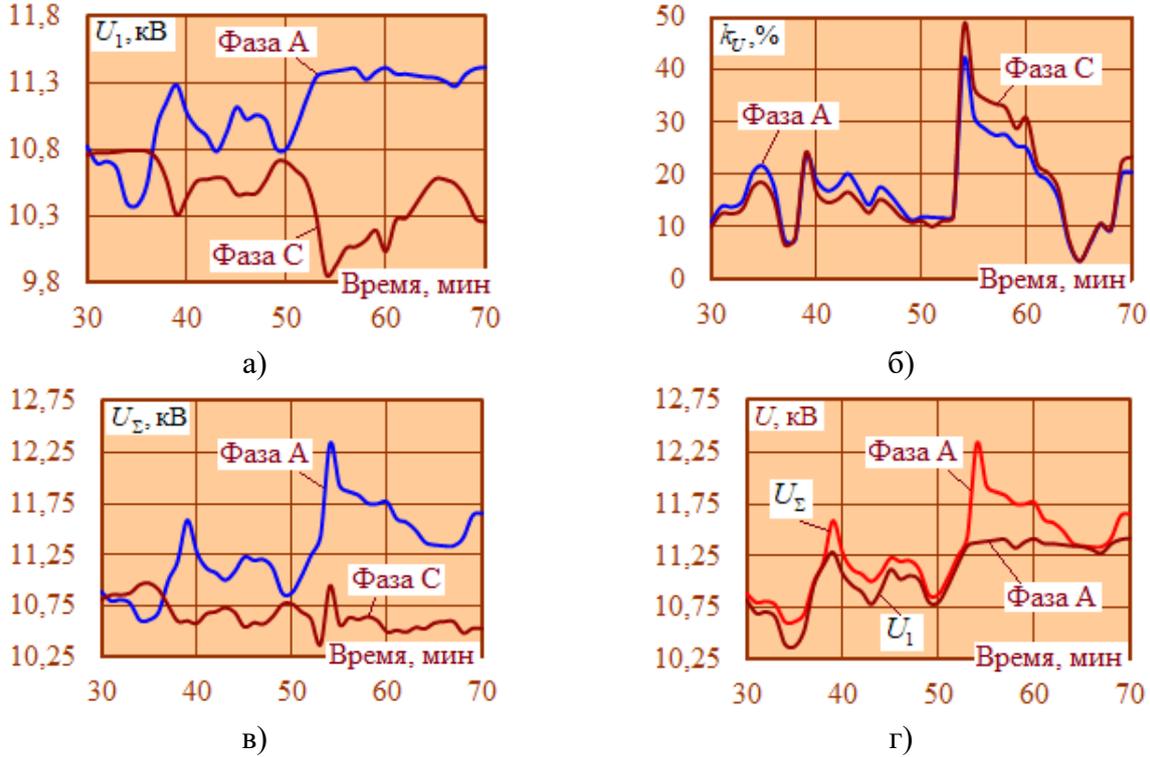


Рис. 14. Режим ОЗЗ. Напряжения основной частоты (а), коэффициенты гармоник (б), эффективные напряжения с учетом ВГ (в) и сравнение U_1 и U_{Σ} (г)

Напряжение основной частоты достигало 11,4 кВ, что близко к результатам, полученным при изолированной нейтрали. По сравнению с низкоомным заземлением этот параметр увеличивался. Коэффициенты $k_{U(n)}$ остаются такими же, как при $R_N = \infty$.

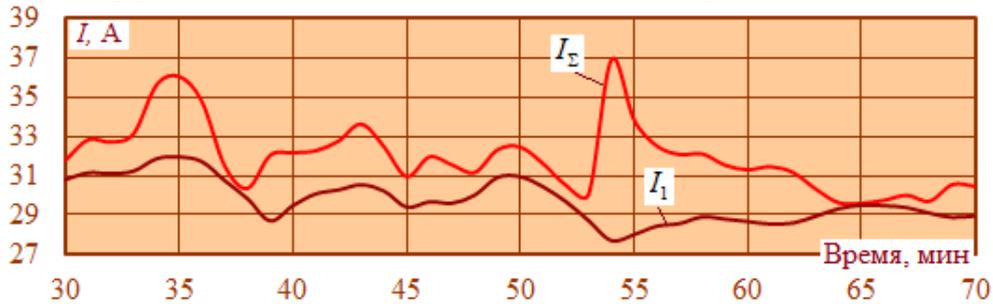


Рис. 15. Токи ОЗЗ

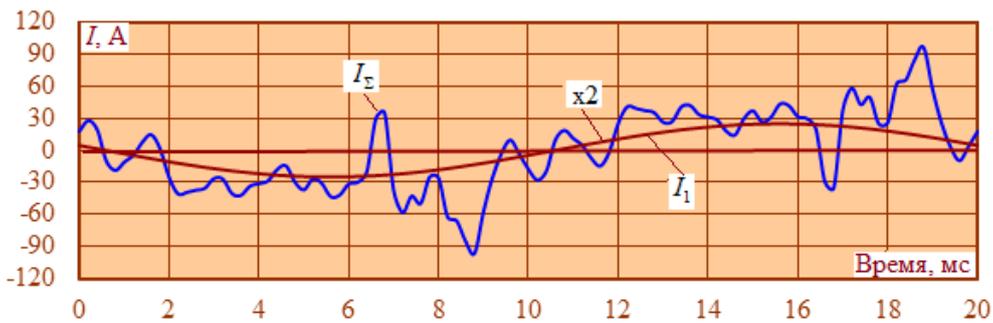


Рис. 16. Формы токов ОЗЗ на 54-й минуте моделирования

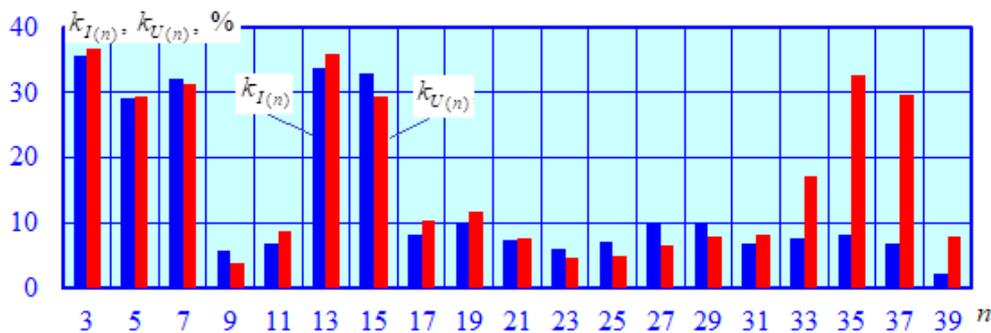


Рис. 17. Спектральный состав тока ОЗЗ в месте повреждения

По сравнению с изолированной нейтралью спектральный состав тока ОЗЗ (рис. 16) не изменился.

Заключение. Представленные в статье компьютерные модели, реализованные в программном комплексе Fazonord AC-DC, дают возможность адекватно определять режимы однофазных замыканий на землю в ВЛ ПЭ 10 кВ при разных способах заземления нейтрали. Они позволяют корректно оценить электромагнитное влияние контактной сети на ВЛ ПЭ с учетом высших гармоник. Методика является универсальной и применима для ЛЭП и ТС любой конструкции.

Кроме расчетов режимов ОЗЗ, представленные в статье разработки могут использоваться на практике для настройки устройств защиты от этих видов повреждений, а также при создании методов и средств идентификации ОЗЗ, определении мест их дислокации и выборе наиболее эффективного способа заземления нейтрали.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока».

Список источников

1. Кузьмин С.В. Однофазные замыкания на землю в сетях 6-10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков и др. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2020. – № 1. – С. 113-123.
2. Шалин А.И. Анализ характеристик направленных защит от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / А.И. Шалин, Е.Н. Политов // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Томск, 2002. – Т. 2. – С. 35–39.
3. Шуин В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков М.: НТФ Энергопрогресс, 2001. – 104 с.
4. Кузьмин С.В. Однофазные замыкания на землю в сетях 6-10 кВ и электротравматизм на угольных разрезах / С.В. Кузьмин, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков и др. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 2020. – № 1. – С. 113-123.
5. Евдокунин Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А. Корепанов // Электричество, 1998. – №12. – С. 8-23.
6. Yunusov E.M., Kuznetsov A.A., Kuchumov L.A., et al. Analysis of the operation of automatic regulators of peterson coil installed in 6-35 Kv networks with unstable capacitive insulation conductivity to ground. 2021 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, 2021, Publisher: IEEE, DOI:10.1109/EIConRus51938.2021.9396087.
7. Bosneaga V., Suslov V., Stratan I., et al. The peculiarities of the steady state modes of medium voltage cables grid at various neutral grounding and single-phase to ground failure. 2022 International Conference and exposition on electrical and power engineering (EPE). IEEE, 2022, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959817.
8. Shuin V.A., Dobryagina O.A., Shadrikova T.Yu. About approach to solution of problem of protection against Earth faults in 6-10 kV cable networks with different neutral grounding modes. 2019 2nd International youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RPA). IEEE, 2019, DOI:10.1109/RPA47751.2019.8958328.

9. Kuzmin A. Development of the intelligent single phase-to-ground-fault current compensation system for 6–35 kV networks. 2016 11th International forum on strategic technology (IFOST). IEEE, 2016, DOI:10.1109/IFOST.2016.7884244.
10. Shirkovets A., Vasilyeva A., Telegin. A. Experimental investigations and calculations in 6–35 kV networks with various neutral conditions. Proceedings of the 2010 electric power quality and supply reliability conference, IEEE, 2010, DOI:10.1109/PQ.2010.5549997.
11. Dobrea I. The opportunity to treat the neutral through the resistor or combined compensation coil – resistor. International conference on electromechanical and energy systems (SIELMEN), IEEE, 2019, DOI:10.1109/SIELMEN.2019.8905891.
12. Helać V., Smaka S., Grebović S., et al. Power transformer neutral point grounding methods: analysis of fault characteristics. Innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe), IEEE, 2022, DOI:10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960344.
13. Zhou Y., Zhao X., Cui X., et al. Transient analysis and simulation of a single-phase grounding fault in 20kV small resistance grounding system. IEEE 3rd International electrical and energy conference (CIEEC), IEEE, 2019, DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019409.
14. El-Sherif N. Ground-fault protection: all you need to know. IEEE Transactions on industry applications, IEEE. 2017, vol. 53, iss. 6, DOI: 10.1109/TIA.2017.2746558.
15. Zhang B.H.; Guo D.Y.; Huang R.M.; Wu W.M. Single-phase-to-ground fault detection in wind farm collector line using transient phase current criterion. 2013 IEEE International conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), IEEE, 2013, DOI:10.1109/TENCON.2013.6718460.
16. Dekhtiar S., Filippenko E., Chusovitn P., et al. Intermittent arc fault model for distribution network. 2023 Belarusian-Ural-Siberian smart energy conference (BUSSEC), IEEE, 2023., DOI: 10.1109/BUSSEC59406.2023.10296457
17. Qi Zheng, Zheng Zhao, Yang Yihan. Study on method of single-phase-to-earth fault section location in neutral point resonant grounded system. 2010 5th International conference on critical infrastructure (CRIS), IEEE, 2010, DOI:10.1109/CRIS.2010.5617537.
18. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A. Model and experimental detection of single phase-to-earth faults of overhead conductors in 6–10 Kv distribution circuits by a location method. 2020 International Ural conference on electrical power engineering (UralCon), IEEE, 2020, DOI:1109/UralCon49858.2020.9216267.
19. Leng Hua, Tang Haiguo, Gong Hanyang, Zhang Zhidan. A new method to locate single-phase-earth fault in neutral ineffectively grounded systems. 2017 10th International conference on intelligent computation technology and automation (ICICTA). IEEE, 2017, DOI:10.1109/ICICTA.2017.46.
20. Утегулов Б.Б. Математическое моделирование устройства автоматического определения тока однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-10 кВ / Б.Б. Утегулов, А.М. Шинтемиров // Наука и техника Казахстана, 2003. – № 2. – С. 174-181.
21. Андреев А.А. Моделирование переходного процесса в распределительной сети 10 КВ при однофазном замыкании на землю / А. А. Андреев // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 5-12.
22. Сорокин А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью / А. Сорокин, В.А. Шабанов // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 52-62.
23. Alsumaidae Y.A.M., Yaw C.T., Koh S.P. et al. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. Energies, 2022, vol. 15, iss. 18, DOI: 10.3390/en15186762.
24. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach. Journal of engineering research, 2021, DOI:10.36909/jer.13627.
25. Guo M.F., Zeng X.D., Chen D.Yu. et al. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems. IEEE Sensors journal, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 1291-1300, DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
26. Ying D., Qingzhu S., Yadong L. et al. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems. 2018 Condition monitoring and diagnosis (CMD), Perth, 2018, DOI:10.1109/CMD.2018.8535600.
27. Guo M.F., Yang N.C. Features-clustering-based ground fault detection using singular value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. International journal of electrical power & energy systems. 2017, vol. 93, pp. 97-108, DOI:10.1016/j.ijepes.2017.05.014.

28. Xiaowei W., Xiangxiang W., Dechang Y. et al. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks. *International journal of electrical power & energy systems*, 2020, vol. 114, DOI:10.1016/j.ijepes.2019.105391.
29. Wei K., Zhang J., He Y. et al. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 18, DOI:10.3390/en13184724.
30. Rui L., Nanhua Y., Ming G. et al. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy. 2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC). Chongqing, 2017. P. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
31. Costa F.B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on power delivery*, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 140-153, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
32. Gong Jing, Luan Ru. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison. 2009 International conference on electrical machines and systems, IEEE, 2009, DOI:10.1109/ICEMS.2009.5382649.
33. Крюков А.В. Моделирование режимов однофазных замыканий на землю в линиях 6-10 кВ с учетом повышенных электромагнитных влияний / А.В. Крюков, А.В. Черепанов, И.А. Любченко // *Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации*, 2022. – № 1. – С. 14-23.
34. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 2005. – 273 с.
35. Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.

Крюков Андрей Васильевич. Доктор технических наук, профессор, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Author ID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790, and_kryukov@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Овечкин Илья Сергеевич. Аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения. Author ID: 1147730, SPIN: 8011-0164, ORCID: 0009-0006-4639-1504, iliaov2015@mail.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

UDC 621.311

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.006

Modeling modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport

Andrey V. Kryukov^{1,2}, Ilya S. Ovechkin²

¹Irkutsk state transport university,

Russia, Irkutsk

²Irkutsk national research technical university,

Russia, Irkutsk, and_kryukov@mail.ru

Abstract. The purpose of the research presented in the article was to develop digital models of traction power supply systems that make it possible to adequately determine the modes of single-phase ground faults in 6-10 kV power lines located in areas of increased electromagnetic influences of traction networks. For their implementation, the Fazonord software product, version 5.3.3.0-2024, was used, which makes it possible to determine power transmission line modes for various methods of connecting transformer neutrals to the ground: isolated neutral, as well as grounding through resistors with low and significant resistance. Simulation of single-phase faults was carried out in the Fazonord software package, version 5.3.3.0-2024, for a system including the following elements: three 110 kV power lines, two substations with 40,000 kV·A transformers, a 25 kV traction network with two contact pendants, four rail threads and a 10 kV line mounted on contact network supports on the

field side. Traction loads were created by the movement of two trains weighing 3192 tons in an odd direction and the same number of trains weighing 4192 tons in an even direction. The methodology presented in the article and the computer models developed on its basis make it possible to adequately determine the modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport. The technique is applicable to power lines and traction networks of any design and can be used in practice to determine single-phase fault modes, configure protection devices against these types of damage, create means of their identification and localization, and select the most effective method of neutral grounding.

Keywords: technological power lines of railway transport, methods of grounding neutrals, single-phase fault modes, computer models

References

1. Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A. et al. Odnofaznyye zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV i elektrotravmatizm na ugol'nykh razrezakh [Single-phase ground faults in 6-10 kV networks and electrical injuries in coal mines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of higher educational institutions. Mining magazine], 2020, no. 1. pp. 113-123.
2. Shalin A. I., Politov E.N. Analiz kharakteristik napravlennykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v setyakh 6–35 kV [Analysis of the characteristics of directional protection against ground faults in 6–35 kV networks]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost'. Tomsk* [Energy: ecology, reliability, safety. Tomsk], 2002. vol. 2, pp. 35-39
3. Shuin V.A., Gusenkov A.V. Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Protection against ground faults in 6–10 kV electrical networks]. M.: NTF Energoprogress, 2001, 104 p.
4. Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A. et al. Odnofaznyye zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV i elektrotravmatizm na ugol'nykh razrezakh [Single-phase ground faults in 6-10 kV networks and electrical injuries in coal mines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of higher educational institutions. Mining magazine], 2020, no. 1, pp. 113-123.
5. Evdokunin G.A., Gudilin S.V., Korepanov A.A. Odnofaznyye zamykaniya na zemlyu v setyakh 6-10 kV i elektrotravmatizm na ugol'nykh razrezakh [Choice of neutral grounding method in 6-10 kV networks]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1998, no. 12. pp. 8-23.
6. Yunusov E.M., Kuznetsov A.A., Kuchumov L.A, et al. Analysis of the operation of automatic regulators of peterson coil installed in 6-35 Kv networks with unstable capacitive insulation conductivity to ground. 2021 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, 2021, Publisher: IEEE, DOI:10.1109/EIConRus51938.2021.9396087.
7. Bosneaga V., Suslov V., Stratan I., et al. The peculiarities of the steady state modes of medium voltage cables grid at various neutral grounding and single-phase to ground failure. 2022 International Conference and exposition on electrical and power engineering (EPE). IEEE, 2022, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959817.
8. Shuin V.A., Dobryagina O.A., Shadrikova T.Yu. About approach to solution of problem of protection against Earth faults in 6-10 kV cable networks with different neutral grounding modes. 2019 2nd International youth scientific and technical conference on relay protection and automation (RPA). IEEE, 2019, DOI:10.1109/RPA47751.2019.8958328.
9. Kuzmin A. Development of the intelligent single phase-to-ground-fault current compensation system for 6–35 kV networks. 2016 11th International forum on strategic technology (IFOST). IEEE, 2016, DOI:10.1109/IFOST.2016.7884244.
10. Shirkovets A., Vasilyeva A., Telegin. A. Experimental investigations and calculations in 6–35 kV networks with various neutral conditions. Proceedings of the 2010 electric power quality and supply reliability conference, IEEE, 2010, DOI:10.1109/PQ.2010.5549997.
11. Dobra I. The opportunity to treat the neutral through the resistor or combined compensation coil – resistor. International conference on electromechanical and energy systems (SIELMEN), IEEE, 2019, DOI:10.1109/SIELMEN.2019.8905891.
12. Helać V., Smaka S., Grebović S., et al. Power transformer neutral point grounding methods: analysis of fault characteristics. Innovative smart grid technologies conference Europe (ISGT-Europe), IEEE, 2022, DOI:10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960344.
13. Zhou Y., Zhao X., Cui X., et al. Transient analysis and simulation of a single-phase grounding fault in 20kV small resistance grounding system. IEEE 3rd International electrical and energy conference (CIEEC), IEEE, 2019, DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019409.
14. El-Sherif N. Ground-fault protection: all you need to know. IEEE Transactions on industry applications, IEEE. 2017, vol. 53, iss. 6, DOI: 10.1109/TIA.2017.2746558.

15. Zhang B.H.; Guo D.Y.; Huang R.M.; Wu W.M. Single-phase-to-ground fault detection in wind farm collector line using transient phase current criterion. 2013 IEEE International conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), IEEE, 2013, DOI:10.1109/TENCON.2013.6718460.
16. Dekhtiar S., Filippenko E., Chusovitin P., et al. Intermittent arc fault model for distribution network. 2023 Belarusian-Ural-Siberian smart energy conference (BUSSEC), IEEE, 2023., DOI: 10.1109/BUSSEC59406.2023.10296457
17. Qi Zheng, Zheng Zhao, Yang Yihan. Study on method of single-phase-to-earth fault section location in neutral point resonant grounded system. 2010 5th International conference on critical infrastructure (CRIS), IEEE, 2010, DOI:10.1109/CRIS.2010.5617537.
18. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A. Model and experimental detection of single phase-to-earth faults of overhead conductors in 6–10 Kv distribution circuits by a location method. 2020 International Ural conference on electrical power engineering (UralCon), IEEE, 2020, DOI:1109/UralCon49858.2020.9216267.
19. Leng Hua, Tang Haiguo, Gong Hanyang, Zhang Zhidan. A new method to locate single-phase-earth fault in neutral ineffectively grounded systems. 2017 10th International conference on intelligent computation technology and automation (ICICTA). IEEE, 2017, DOI:10.1109/ICICTA.2017.46.
20. Utegulov B.B., Shintemirov A.M. Matematicheskoye modelirovaniye ustroystva avtomaticheskogo opredeleniya toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6-10 kV [Mathematical modeling of a device for automatically determining the current of a single-phase earth fault in electrical networks of 6-10 kV]. Nauka i tekhnika Kazakhstana [Science and technology of Kazakhstan], 2003, no. 2, pp. 174-181.
21. Andreev A.A. Modelirovaniye perekhodnogo protsessa v raspredelitel'noy seti 10 KV pri odnofaznom zamykanii na zemlyu [Modeling of the transient process in a 10 KV distribution network with a single-phase earth fault]. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy [Electrotechnical and information complexes and systems], 2022, vol. 18, no. 2, pp. 5-12.
22. Sorokin A., Shabanov V.A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Algorithm for determining the damaged phase in single-phase earth fault in networks with isolated neutral]. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy [Electrotechnical and information complexes and systems], 2022, vol. 18, no. 2, pp. 52-62.
23. Alsumaidae Y.A.M., Yaw C.T., Koh S.P. et al. Review of Medium-voltage switchgear fault detection in a condition-based monitoring system by using deep learning. Energies, 2022, vol. 15, iss. 18, DOI: 10.3390/en15186762.
24. Ahmadi A., Aghajari E., Zangeneh M. Earth fault detection in distributed power systems on the basis of artificial neural networks approach. Journal of engineering research, 2021, DOI:10.36909/jer.13627.
25. Guo M.F., Zeng X.D., Chen D.Yu. et al. Deep-learning-based ground fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems. IEEE Sensors journal, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 1291-1300, DOI: 10.1109/JSEN.2017.2776238.
26. Ying D., Qingzhu S., Yadong L. et al. Detection of single line-to-ground fault using convolutional neural network and task decomposition framework in distribution systems. 2018 Condition monitoring and diagnosis (CMD), Perth, 2018, DOI:10.1109/CMD.2018.8535600.
27. Guo M.F., Yang N.C. Features-clustering-based ground fault detection using singular value decomposition and fuzzy c-means in resonant grounding distribution systems. International journal of electrical power & energy systems. 2017, vol. 93, pp. 97-108, DOI:10.1016/j.ijepes.2017.05.014.
28. Xiaowei W., Xiangxiang W., Dechang Y. et al. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks. International journal of electrical power & energy systems, 2020, vol. 114, DOI:10.1016/j.ijepes.2019.105391.
29. Wei K., Zhang J., He Y. et al. Faulty feeder detection method based on VMD–FFT and Pearson correlation coefficient of non-power frequency component in resonant grounded systems. Energies, 2020, vol. 13, iss. 18, DOI:10.3390/en13184724.
30. Rui L., Nanhua Y., Ming G. et al. Fault diagnosis algorithm for distribution line based on wavelet singular entropy and wavelet energy entropy. 2017 IEEE 2nd advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC). Chongqing, 2017. P. 2395–2398. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054451.
31. Costa F.B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. IEEE Transactions on power delivery, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 140-153, DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272.
32. Gong Jing, Luan Ru. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison. 2009 International conference on electrical machines and systems, IEEE, 2009, DOI:10.1109/ICEMS.2009.5382649.
33. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Lyubchenko I.A. Modelirovaniye rezhimov odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v liniyakh 6-10 kV s uchedom povyshennykh elektromagnitnykh vliyaniy [Modeling of single-phase earth fault

- modes in 6-10 kV lines taking into account increased electromagnetic influences]. *Operativnoye upravleniye v elektroenergetike: podgotovka personala i podderzhaniye yego kvalifikatsii* [Operational management in the electric power industry: personnel training and maintenance of their qualifications], 2022, no. 1, pp. 14-23.
34. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh system* [Complex symmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta [Irkutsk: Publishing house of Irkutsk University], 2005. 273 p.
35. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat* [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]. Moskva: Direkt-Media [Moscow: Direct-Media], 2023. 156 p.

Kryukov Andrey Vasilievich. *Doctor of technical sciences, professor, professor of the Irkutsk state transport university; professor of Irkutsk national research technical university. AuthorID: 238950, SPIN: 7500-5781, ORCID: 0000-0001-6543-1790, and_kryukov@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.*

Ovechkin Ilya Sergeevich. *Postgraduate student at Irkutsk state transport university. AuthorID: 1147730. SPIN: 8011-0164, ORCID: 0009-0006-4639-1504, iliaov2015@mail.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.*

Статья поступила в редакцию 12.03.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 03/12/2024; approved after reviewing 11/27/2024; accepted for publication 02/11/2025.

Методы анализа и обеспечения показателей качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции

Алексеев Александр Владимирович, Новицкий Николай Николаевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, Иркутск, alexeev@isem.irk.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема расчета качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции. Проведенный обзор работ по моделированию качества воды в системах водоснабжения показал, что существует большое число факторов, влияющих на качество воды в системах водоснабжения. Наиболее широкое распространение на практике получило обеззараживание воды хлором. На концентрацию хлора в воде накладываются двусторонние ограничения, и эксплуатационные организации обязаны поддерживать требуемую концентрацию хлора до крана каждого потребителя. В процессе транспортировки воды концентрация хлора снижается из-за взаимодействия с материалом труб и растворенными веществами. Таким образом, одним из основных показателей качества воды может являться ее возраст. Существующие модели расчета возраста воды не позволяют рассчитать возраст воды в системах водоснабжения при наличии контуров замкнутой циркуляции. Предложен топологический алгоритм расчета возраста воды в сетях с контурами замкнутой циркуляции. Программная реализация алгоритма интегрирована в информационно-вычислительный комплекс «АНГАРА-ВС» и апробирована на условных и реальных примерах СВС. Программная реализация алгоритма показала высокую вычислительную эффективность и может быть применена на практике при анализе режимов систем водоснабжения. Показано, что существуют всего несколько способов управления качеством воды в системах водоснабжения. Предложен новый подход к управлению качеством воды, основанный на создании контуров замкнутой циркуляции. Данный подход требует минимальных капитальных и эксплуатационных расходов по сравнению с другими известными способами. Представленный подход носит универсальный характер и может быть применен для расчета различных параметров качества транспортируемой среды в любых трубопроводных системах.

Ключевые слова: система водоснабжения, качество воды, возраст воды, хлорирование воды, управление качеством воды, контур замкнутой циркуляции

Цитирование: Алексеев А.В. Методы анализа и обеспечения показателей качества воды в водопроводных сетях с контурами замкнутой циркуляции / А.В. Алексеев, Н.Н. Новицкий // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 68-79. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.007.

Введение. Качество воды в системах водоснабжения городов имеет первостепенное значение, так как от него напрямую зависит здоровье жителей. К сожалению, несмотря на все предпринимаемые усилия, качество воды в источниках, используемых для водоснабжения, продолжает снижаться. На сегодняшний день в мире более 3 млрд. человек не имеют доступа к чистой питьевой воде. Практически все источники подвергаются антропогенному и техногенному воздействию разной интенсивности. Проблема качества питьевой воды актуальна как в глобальном масштабе, так и в рамках отдельно взятого региона или населенного пункта.

Качество воды в системах водоснабжения (СВС) определяется составом и количеством примесей в ней. Можно выделить две категории примесей, влияющих на качество воды у потребителей: 1) изменяющиеся в процессе транспорта; 2) постоянные, т.е. концентрация которых в воде сохраняется в процессе транспортировки и зависит от качества воды на источнике. Повлиять на вторую категорию можно исключительно с помощью очистки воды на источнике. Наибольший интерес представляет первая категория, поскольку концентрация примесей этой категории зависит от потокораспределения.

Очистку питьевой воды до требуемых показателей (в РФ для питьевой воды нормируется содержание свыше 1500 веществ) осуществляют, как правило, на источнике водоснабжения.

В зависимости от типа загрязнения прибегают к химической, механической, физико-механической, ультрафиолетовой и др. видам очистки и их комбинациям. При этом вода достигает требуемых показателей по мутности, запаху, привкусу, содержанию солей и газов. Отдельно выделяют процесс обеззараживания воды, т.е. уничтожение имеющихся в воде бактерий и микробов. Для этого используется обеззараживание воды ультрафиолетом и хлором. В отличие от химических соединений, концентрация бактерий и микробов в процессе транспорта может изменяться вследствие их размножения. На сегодняшний день в мире в более чем 99% СВС для снижения концентрации бактерий используют хлорирование.

Хлор применяется для обеззараживания воды уже более 200 лет. Впервые в 1895 году в Нью-Йорке начали хлорировать водопроводную воду. Согласно нормативным требованиям, концентрация хлора в воде для ее обеззараживания должна находиться в диапазоне 0,7-3 мг/л в зависимости от типа источника (подземный или поверхностный). В тоже время остаточная доза хлора у потребителя принимается равной 0,3-0,5 мг/л (согласно СанПиН 2.1.4.1074-01) и водоснабжающая организация должна обеспечить качество воды до каждого крана, а не только в точке подачи воды в сеть. Низкая концентрация хлора ведет к росту бактерий в СВС. Повышение концентрации хлора ведет к образованию тригалометанов [1], что негативно влияет как на здоровье людей, так и ускоряет процесс коррозии металлических труб [22]. Таким образом, на практике одним из главных параметров, характеризующим качество воды в СВС, является концентрация остаточного хлора. Концентрация остаточного хлора, в свою очередь, зависит от ряда характеристик сети, главной из которых является время транспорта воды. При наличии в сети контуров замкнутой циркуляции (КЗЦ) определить возраст воды общепринятыми методами становится невозможно. Вопросам определения возраста воды в СВС с КЗЦ посвящена данная работа.

1. Имеющиеся модели расчета и управления качеством. Работы по созданию моделей оценки качества воды в системах водоснабжения (СВС) ведутся уже более 30 лет. Достаточно полный обзор исследований по контролю и управлению качеством воды в СВС приведен в [3]. На сегодняшний день существует значительное количество технологий очистки воды и контроля роста бактерий [4, 5]. Для подавления роста болезнетворных бактерий, как правило, применяется дезинфицирование воды хлором [2], как один из наиболее дешевых, эффективных и доступных (для производства, хранения и транспортировки) методов, поскольку растворимый в воде хлор продолжает препятствовать росту бактерий, в отличие, например, от ультрафиолетового обеззараживания, эффективного лишь в месте потребления воды.

Одним из первых алгоритм распространения хлора в системах водоснабжения предложил Лоу [6] (совместная модель гидравлики и качества воды в СВС). Алгоритм прогноза качества воды в СВС рассмотрен в [7]. Алгоритм расчета времени транспорта воды в СВС с установившимся режимом представлен в [8].

При транспортировке воды к потребителям концентрация хлора СВС снижается, из-за взаимодействия со стенками труб и распада хлора [9-13], вследствие взаимодействия с растворенными в воде веществами (азот, сульфаты, железо, органика и т.д.) [14]. Эти два процесса принято рассматривать независимо друг от друга. Значительная часть исследований посвящена оценке скорости распада хлора в зависимости количества органических соединений в воде, начальной концентрации хлора [15], температуры [16], возраста воды [17], материала [12], диаметра и возраста труб [18-20], скорости течения [21,22], наличия станций хлорирования [23,24] и др. В работе [25] показано, что динамика режимов также оказывает заметное влияние на качество воды. Методология оценки остаточной концентрации хлора для систем водоснабжения с прерывистой подачей воды предложена в [26]. Развитие и широкое

распространение модели расчета качества воды в EPANET [27] повлияло на стандарты оценки качества воды СВС и позволило эксплуатационным предприятиям точнее оценить качество воды в своих системах. История развития модели качества воды, используемой в EPANET, приведена в [27]. В работе [28] приведено сравнение моделей распада хлора 1 и 2 порядка в пакете EPANET MSX.

Для управления качеством воды за счет сокращения времени транспорта воды предложены алгоритмы закрытия задвижек на сети [29]. В работе [30] предложено использование эволюционного алгоритма для отключения участков сети с целью снижения времени транспорта (фактически создание из кольцевой сети древовидной). В работе [31] предложены алгоритмы планирования совместной работы насосных и станций хлорирования для поддержания максимально высокой концентрации хлора в СВС. В [32] рассмотрена задача минимизации инъекций хлора в определенных точках сети для поддержания его требуемого уровня. Показано, что в таком случае удастся снизить количество используемого хлора, по сравнению с хлорированием воды только на источнике. В работе [33] для древовидной сети решена задача определения мест установки станций хлорирования и величины необходимых доз хлора для поддержания оптимального уровня остаточного хлора в сети.

Алгоритм динамического моделирования качества воды для отслеживания растворенных веществ в водораспределительных сетях представлен в [34]. В работе [35] проведено сравнение нескольких известных вычислительных методов расчета качества воды (основанных на методах Эйлера и Лагранжа) и сделаны выводы об их эффективности.

Проведенный обзор показал, что основная часть работ направлена на изучение факторов, влияющих на скорость распада хлора в СВС. В общем виде скорость распада хлора в трубопроводе может быть представлена уравнением первого порядка (1) или второго порядка (2) [36].

$$C(t) = C_0 e^{-Kt}, \quad (1)$$

$$C(t) = C_0 e^{-\left(\frac{b}{1+bKc_0}\right)t}, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация хлора, K – скорость химической реакции, которая определяется совокупностью факторов, представленных далее, t – возраст воды. Условный график зависимости концентрации хлора в воде от времени приведен на рисунке 1.

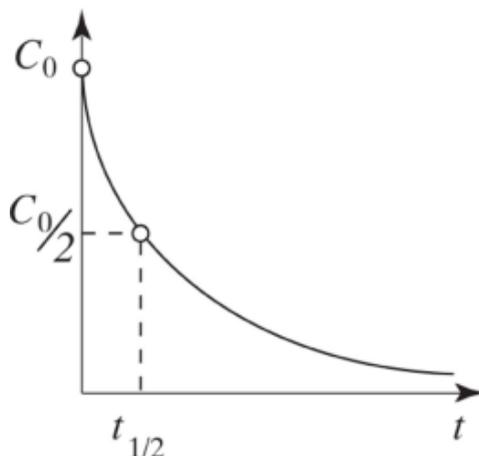


Рис. 1. Изменение концентрации хлора во времени в трубопроводе

Факторы, приводящие к снижению концентрации хлора в СВС:

- Увеличение количества органических примесей.
- Уменьшение начальной концентрации хлора.

- Увеличение температуры воды.
- Уменьшение диаметра труб.
- Увеличение возраста труб.
- Увеличение скорости течения.
- Применение металлических труб.
- Наличие нестационарных гидравлических режимов.
- Наличие резервуаров.

Обзор литературы по моделированию качества воды в СВС показал:

1. Широко исследованы модели анализа качества воды в зависимости от различных факторов. Фактически, ключевым параметром, отражающим общее качество воды в СВС, может являться возраст воды.
2. Поставленные задачи решаются преимущественно топологическими алгоритмами, которые напрямую не применимы при наличии КЗЦ. Варианты расчетов сетей с КЗЦ не рассматриваются.
3. Для обеспечения требуемого качества воды в СВС применяются различные инженерные приемы: изменение начальной концентрации хлора, оптимальная расстановка станций хлорирования, секционирование сети или повышение давления на насосных станциях с целью повышения расходов и т.д.
4. Отсутствуют регулярные методы управления качеством воды в СВС.

1. Расчет возраста воды в сетях с КЗЦ. В данной работе за основу взят подход к управлению качеством потоков в сетях с КЗЦ, описанный в [37]. Как видно из уравнений 1 и 2, скорость распада хлора напрямую зависит от времени транспорта или, иными словами, возраста воды. Таким образом, для расчета концентрации хлора необходимо знать как возраст воды в каждом узле, так и скорость распада хлора на каждом участке сети.

В общем случае для определения возраста воды необходимо провести расчет потокораспределения [38] (для определения расходов на участках) и принять предположение, что в узлах сети происходит полное смешение потоков. Тогда для узла схода потоков (рисунок 2) возраст исходящего потока может быть вычислен по формуле (3), а время транспорта воды по участку определяется скоростью воды (формула 4).

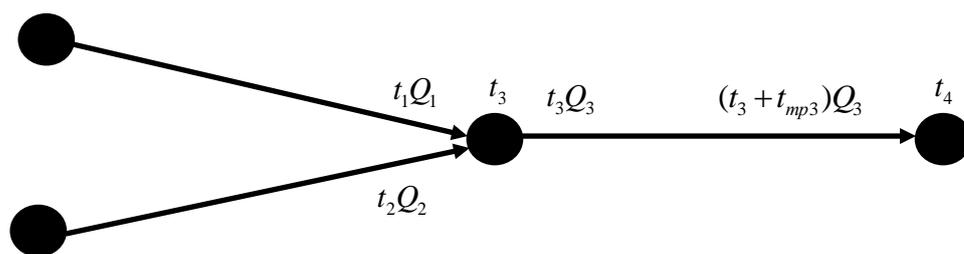


Рис. 2. Фрагмент сети со сходом потоков разных возрастов

$$t_3 = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (3)$$

$$t_{mp3} = \frac{l}{v}, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – возраст входящих в узел потоков воды, t_3 – возраст исходящего из узла потока, Q_1, Q_2 – расход входящих в узел потоков, $Q_3 = Q_1 + Q_2$ – расход потоков, исходящих из узла, t_{mp3} – время транспорта по трубопроводному участку №3 (с), l – длина участка (м), v – скорость воды на данном участке (м/с).

Если в сети есть КЗЦ, то вычислить возраст воды по формуле (3) не представляется возможным. Наличие КЗЦ в реальных СВС – достаточно частое явление. При этом некоторое количество воды постоянно циркулирует внутри сети (рисунок 3). Как правило, такие контуры образуются вследствие работы насосных станций (НС), и связывают выход НС с ее входом. При этом сотрудники эксплуатационных организаций, как правило, знают о наличии таких контуров, но в каждом конкретном случае находятся веские причины для их поддержания (обеспечение необходимого давления в узлах, исключение замерзания трубопровода и т.д.). При наличии КЗЦ в сети не удастся определить возраст воды в узлах контура с помощью уравнения (3), поскольку неизвестен возраст одного из входящих в узел потоков.

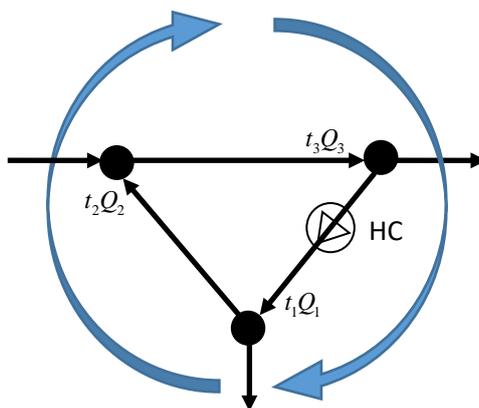


Рис. 3. Пример контура замкнутой циркуляции

На основе модели [37] реализован итеративный топологический алгоритм расчета возраста воды в сетях с КЗЦ:

1. Строится граф сети, задаются необходимые исходные данные и решается задача расчета потокораспределения для получения расходов воды на участках (ветвях графа).
2. Известными алгоритмами теории графов (например, поиск в глубину, алгоритм Флойда, алгоритм Брента) находится КЗЦ.
3. В КЗЦ находятся хорды – участки с минимальным расходом. Расход на хорде представляет собой циркуляционный расход в КЗЦ.
4. Определяются узлы схода потоков – конечные узлы хорд.
5. Для каждой хорды назначается некоторый начальный возраст воды (например, 0 или время прохождения потоком хорды).
6. Проводится расчет возраста воды в КЗЦ.
7. По результатам расчета назначается новый возраст в узлах схода потоков КЗЦ.
8. Повторять п. 5-6 до достижения требуемой точности расчета.

На каждой итерации алгоритма вычисляется невязка в узлах схода потоков КЗЦ по формуле (5).

$$\delta = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 - Q_3 t_3. \quad (5)$$

2. Примеры расчета возраста воды в сетях с КЗЦ. Представленный алгоритм был реализован в виде программного модуля и подключен к разработанному и развиваемому в ИСЭМ СО РАН ИВК «АНГАРА-ВС» [39, 40]. На рисунке 4 представлены тестовые расчетные схемы с одним (рисунок 4.а) и двумя (рисунок 4.б) КЗЦ (схемы отличаются длинами участков и располагаемым напором на насосной станции). На схемах выделены узлы, входящие в КЗЦ и хорды. Изменение возраста воды в узлах схода потоков в процессе работы алгоритма для приведенных сетей представлены на рисунке 4 (в-г). Для сетей с 1 КЗЦ алгоритму достаточно 3-4 итераций, чтобы оценить возраст воды. Сеть с двумя контурами требует порядка 6 итераций, т.е. с ростом числа контуров число итераций возрастает.

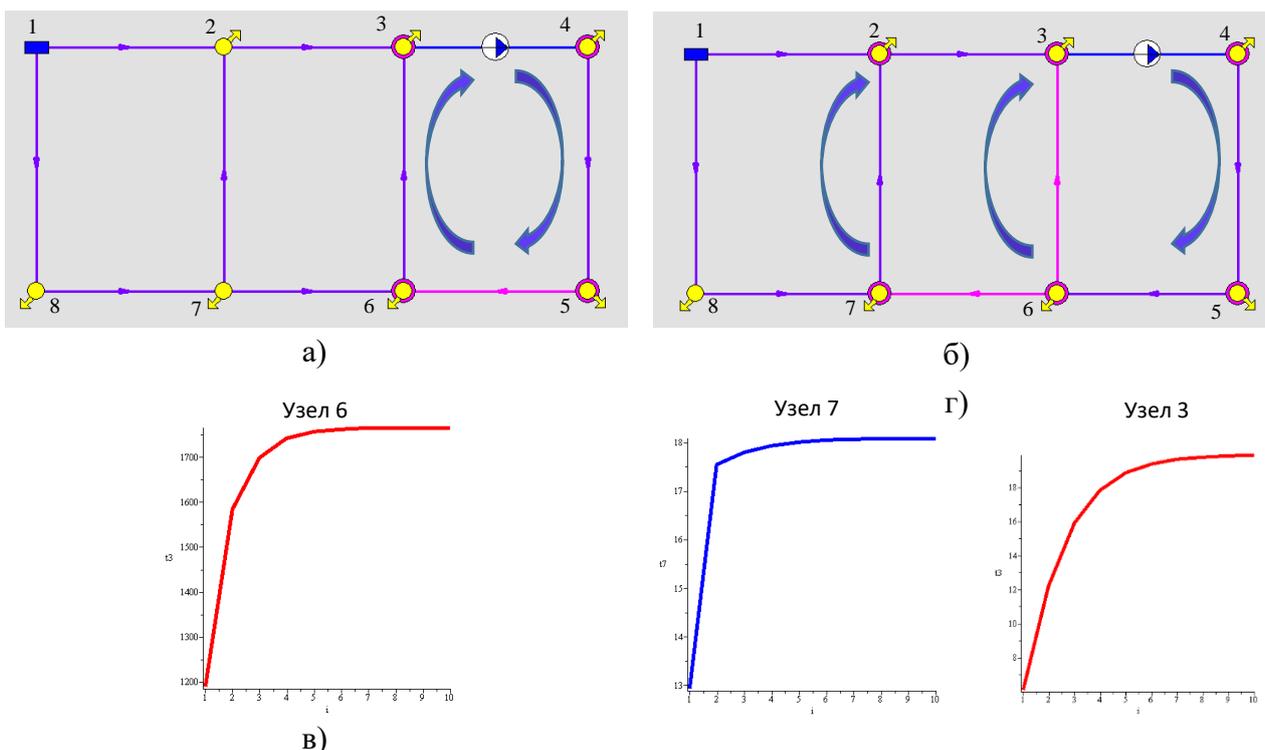


Рис. 4. Расчетная схема с одним КЗЦ (а); расчетная схема с двумя КЗЦ (б); изменение возраста в узлах схода потоков в зависимости от итерации алгоритма (в, г)

Как уже упоминалось ранее, одной из причин разработки представленного выше алгоритма являлся тот факт, что реальные СВС часто имеют КЗК. Вследствие этого оценка возраста и качества воды для таких систем вызывает затруднения. На рисунке 5 приведена реальная расчетная схема водоснабжения города, содержащая несколько КЗЦ и порядка 45 000 узлов сети. Расчет возраста воды во всех узлах данной схемы занимает менее 1 сек. Таким образом, можно констатировать, что использование предложенного алгоритма расчета возраста воды даже для сетей большой размерности не представляет вычислительных трудностей и может быть применено на практике эксплуатации СВС.



Рис. 5. Расчетная схема СВС города

Анализ результатов показал, что возраст воды у потребителей существенно различается. Наиболее близкие к источнику потребители имеют возраст в несколько часов. В то же время в сети имеются потребители (несколько десятков), возраст воды у которых достигает 30 суток. Подробный анализ схем присоединения таких потребителей позволил выявить основные причины отклонений в возрасте воды:

1. Подключение потребителей с малой нагрузкой к тупиковым сетям большого диаметра, которые остались от ликвидированных промышленных предприятий.
2. Подключение потребителей к СВС с учетом требований пожарного надзора. Часто расчетная нагрузка на пожаротушение превышает среднюю нагрузку водопотребления в 50-100 раз, а диаметр подводящего трубопровода подбирается с учетом противопожарной нагрузки.
 - 2.1. Аналогично п.2. в частном секторе с малой нагрузкой водопотребления устанавливаются пожарные гидранты, до которых прокладываются сети большого диаметра (рисунок 6.а) (Красным цветом отмечены потребители с получающие воду с возрастом свыше 3 суток).
 - 2.2. Аналогично п.2. Кроме того, что подключение новых потребителей осуществляется от двух колодцев двумя нитками трубопроводами (рисунок 6.б).

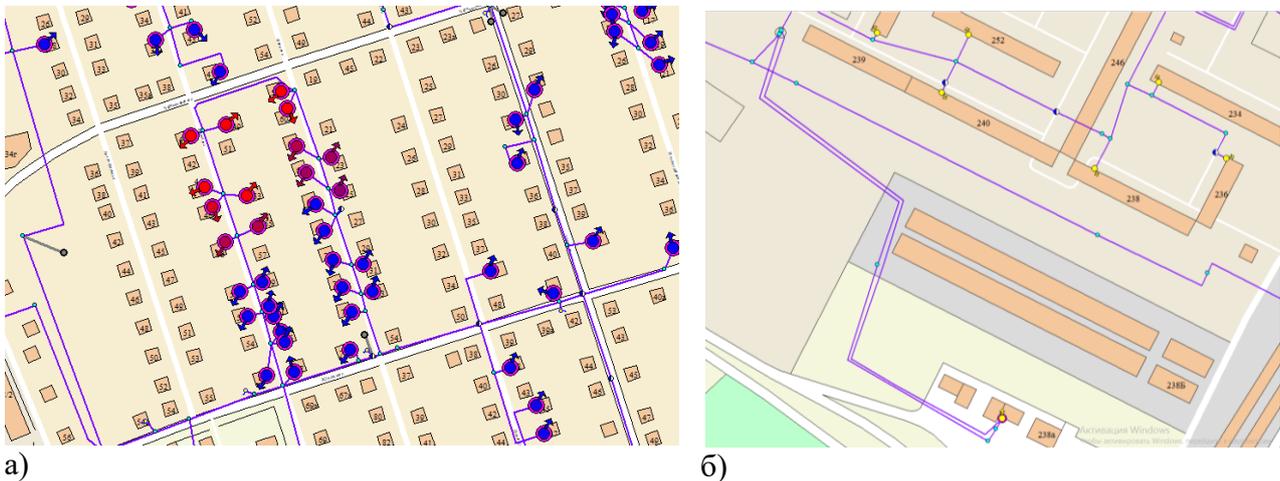


Рис. 6. Типичные схемы размещения потребителей с нарушением качества воды: а) в конце длинных улиц; б) при двухтрубной схеме подключения

Нормализация возраста и качества воды в каждом случае решается индивидуально. Там, где это допустимо, возможна перекладка трубы меньшего диаметра либо установка станции хлорирования на вводе в микрорайон/квартал (хотя это требует значительных финансовых и организационных затрат).

3. Циркуляция как способ управления качеством воды в СВС. Как уже упоминалось, на практике существуют всего несколько способов решить проблему качества воды у отдельных потребителей, но часто все эти способы оказываются неприменимы или слишком дороги. Ещё одним способом управления качеством воды в СВС является создание циркуляционного расхода воды в сети (по принципу циркуляции воды в системах теплоснабжения). Этот способ, с одной стороны, требует дополнительных эксплуатационных затрат (на насосных станциях), но с другой, позволяет понизить возраст воды, тем самым обеспечив требуемое качество. Таким образом, ставится двухкритериальная оптимизационная задача минимизации эксплуатационных затрат и повышения уровня качества воды. Причем по сравнению с установкой станций хлорирования установка циркуляционного насоса обходится на несколько порядков дешевле и не требует согласований с надзорными органами.

Энергопотребление циркуляционного насоса незначительное, т.к. для обеспечения циркуляционного расхода обычно достаточно напора в несколько метров водяного столба.

Подобный подход может быть применим к отдельным частям сети (как правило, это тупиковые потребители или группы потребителей, находящиеся на границе СВС).

Для приведенной на рисунке 5 схемы были проведены расчеты по нормализации возраста воды путем создания КЗЦ. Для фрагмента схемы (рисунок 6.а) увеличение скорости воды с 0,0017 м/с до 0,2 м/с позволило сократить возраст воды на данном участке с 6 суток до полутора часов, при этом мощность циркуляционного насоса не превысит 1 кВт. Более того, может быть рассмотрен сценарий включения циркуляционного насоса 1-2 раза в сутки для обновления воды в данном участке трубопроводе, что еще больше снизит эксплуатационные затраты.

Для схемы (рисунок 7.б) создание КЗЦ позволит увеличить скорость воды с 0,002 м/с до 0,2 м/с, что снизит возраст воды с 60 часов до 40 минут. При этом затраты электроэнергии на поддержание данного циркуляционного расхода будут минимальными (не более 20 кВт ч/сут).

Заключение.

1. Проведенный анализ литературы по расчету качества воды в СВС показал, что ключевым параметром, оценивающим качество воды, может считаться её возраст.
2. Предложен алгоритм расчета возраста воды в водопроводных сетях с КЗЦ. Программная реализация алгоритма показала достаточную вычислительную эффективность на условных и реальных схемах СВС.
3. Предложен новый способ управления качеством воды в СВС, основанный на создании циркуляционных расходов. Выявлены типичные ситуации, когда использование КЗЦ позволяет снизить возраст воды. Апробация на реальном примере СВС показала перспективность предлагаемого подхода, где с помощью создания КЗЦ удалось повысить качество воды у конечных потребителей (снизить возраст воды).
4. Представленный алгоритм носит универсальный характер и может быть применен для расчета различных параметров качества (или состава) транспортируемой среды в любых трубопроводных сетях (водо-, тепло-, нефте-, газоснабжения, технологические трубопроводы и др.).

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИСЭМ СО РАН (№ FWEU-2021-0002, рег. № АААА-А21-121012090012-1) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2025 годы.

Список источников

1. Chadik P., Chowdhury Z. Developing models for predicting trihalomethane formation potential and kinetics. . Journal AWWA, 1987, vol. 79, no.7, pp. 89-97, 1987, DOI:10.1002/j.1551-8833.1987.tb02878.x.
2. Masters S., Wang H., Pruden A., Edwards M.A. Redox gradients in distribution systems influence water quality, corrosion, and microbial ecology. Water Research, 2015, no. 68, pp. 140-149, DOI:10.1016/j.watres.2014.09.048.
3. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. Environmental modelling & software, 2017, vol. 93, pp. 209-254, DOI:10.1016/j.envsoft.2017.02.009.
4. Liu G., Lut M.C., Verberk J.Q.J.C., Van Dijk J.C. A comparison of additional treatment processes to limit particle accumulation and microbial growth during drinking water distribution. Water research, 2013, vol. 47(87), 2719-2728, DOI:10.1016/j.watres.2013.02.035.
5. Aisopou A., Stoianov I. N. J.D. Graham In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: A quantitative assessment. Water research, 2012, no. 46, pp. 235-246m DOI:10.1016/j.watres.2011.10.058.
6. Liou C.P., Kroon J.R. Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks. Journal AWWA, 1987, vol. 79, no. 11, pp. 54-58.
7. Clark R., Males R. Simulating cost and quality in water distribution. Journal of water resources planning and management, vol. 111, iss. 4, pp.454-466, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1985)111:4(454).

8. Males R., Clark R., Wehrman P., Gates W. Algorithm for mixing problems in water systems. *Journal of hydraulic engineering*, 1985, no. 111(2), pp. 206-219, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:2(206).
9. Hallam N.B, West J.R, Forster C.F, et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water research*, 2002, vol. 36, iss.14, pp. 3479-3488, DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00056-8.
10. Clark R.M., Goodrich J.A., Wymer L.J. Effect of the Distribution System on Drinking Water Quality. *Journal of water supply: research and technology – AQUA*, 1993, 42(1), pp. 30-38.
11. Grayman W., Clark R., Males R. Modeling distribution -system water quality: dynamic approach. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, no.3, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(295).
12. Clark R., Yang J., Impellitteri C., et al. Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies. *American water works association*, 2010, vol. 102, no. 5, pp. 144-156, DOI:10.2307/41314138.
13. Vasconcelos J., Rossman L., Grayman W., et al. Kinetics of chlorine decay. *American water works association*, 1997, vol. 89, pp. 54-65, DOI:10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x.
14. Vasconcelos J.J., Boulos P.F., Grayman W. M., et al. Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems. *AWWA Research Foundation*, Denver, 1996.
15. Wang Y., Zhu G., Yang Z. Analysis of water quality characteristic for water distribution systems. *Journal of water reuse and desalination*, 2018, DOI:10.2166/wrd.2018.045.
16. Hua F., West J. Barker R., Forster C. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water resource*, 1999, vol. 33, iss. 12, pp. 2735-2746, DOI:10.1016/S0043-1354(98)00519-3.
17. Effects of water age on distribution system water quality. *AWWA with assistance from economic and engineering services, Inc*, 2002.
18. Al-Jasser A.O. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water research*, 2007, vol. 41, iss. 2, pp. 387-396, DOI:10.1016/j.watres.2006.08.032.
19. McGrath J., Maleki M., Bouchard C., et al. Bulk and pipe wall chlorine degradation kinetics in three water distribution systems. *Urban water jornal*, 2021, DOI:10.1080/1573062X.2021.1893368.
20. Clark R., Haught R. Characterizing pipe wall demand: implications for water quality modeling. *Journal of water resources planning and management*, 2005, vol. 131, pp. 208-217, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(208).
21. Clark R. Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies. *Frontiers of earth science*, 2011, no. 5(4), pp. 334-340, DOI:10.1002/j.1551-8833.2010.tb10117.x.
22. Clark R., Grayman W. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of environmental engineering*, 1994, vol. 120, pp. 803-820, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(803)
23. Fisher I., Kastl G., Sathasivan A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water research*, 2011, vol. 45, iss. 16, pp. 4896-4908, DOI:10.1016/j.watres.2011.06.032.
24. Boccellia D., Tryby M., Uberc J., Summersd R. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. *Water research*, 2003, vol .37, iss. 11, pp. 2654-2666, DOI:10.1016/S0043-1354(03)00067-8.
25. Males R., Grayman W., Clark R. Modeling Water Quality in distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, pp. 197-209, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(197).
26. Goyal R., Patel H. Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply. *Applications of water science*, 2015, vol. 5:3, pp. 311-319, DOI:10.1007/s13201-014-0193-7.
27. Clark R. The USEPA's distribution system water quality modeling program: a historical perspective. *Water and environment journal*, 2015, vol 29, DOI:10.1111/wej.12132.
28. Monteiroa L. Figueiredoa D., Diasc S., et al. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX .12th International conference on computing and control for the water industry, CCWI 2013.
29. Quintiliani C., Marquez-Calvo O., Alfonso L., et al. Multiobjective valve management optimization formulations for water quality enhancement in water distribution networks. *Journal of water resource and planning.*, 2019, vol. 145(12), 04019061, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001133.
30. Prasad D., Walters G.A. Minimizing residence times by rerouting flows to improve water quality in distribution networks. *Engineering optimization*, 2006, 38:8, pp. 923-939, DOI:10.1080/03052150600833036.
31. Ostfeld A., Salomons E. Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems. *Engineering optimization*, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 337-352, DOI:10.1080/03052150500478007.
32. Boccelli D., Tryby M., Uber J. et al. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1998, vol. 124, iss. 2, pp. 99-111, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:2(99).
33. Lee S., Lee H., Yoo D., et al. A comparative study on a hydraulic and water-quality analysis method for determining rechlorination injection points for a water-supply network. *Water*, 2019, 11, 697, DOI:10.3390/w11040697.

34. Rossman L., Boulos P., Airman T. Discrete volume-element method or network water-quality models. *Journal of water resources planning and management*, 1993, vol. 119, iss. 5, pp. 505-517, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:5(505).
35. Rossman L., Boulos P. Numerical methods for modeling water quality in Distribution systems: a comparison. *Journal of water resources planning and management*, 1996, vol. 122, pp. 137-146, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(137).
36. Tiruneh A., Debessai T., Bwembya G., Nkambule S. A mathematical model for variable chlorine decay rates in water distribution systems. *Modelling and simulation in engineering*, 2019, pp. 1-11, DOI:10.1155/2019/5863905.
37. Novitsky N. Mathematical models and methods for analyzing flow properties in hydraulic circuits with closed circulation circuits. *E3S Web of conferences*, 2020, 219, 01004, DOI:10.1051/e3sconf/202021901004.
38. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей. / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985.– 280 с.
39. Новицкий Н.Н. Информационно-вычислительный комплекс “АНГАРА-ВС” для моделирования крупных систем водоснабжения / Н.Н. Новицкий, А.В. Алексеев, С.Ю. Барина // Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции “Информационные и математические технологии в науке и управлении”. Иркутск Россия. 01-10 июля 2011. – С.192-200.
40. Alexeev A., Novitsky N. The information and computing complex “ANGARA-WS” for end-to-end modeling of water supply systems when developing development schemes, scheduling modes, and dispatching management. *MATEC Web of conferences: electronic edition, Irkutsk. Irkutsk: EDP Sciences*, 2018, vol. 212, p. 06001, DOI 10.1051/matecconf/201821206001.

Алексеев Александр Владимирович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основные направления исследований связаны с моделированием различных типов трубопроводных систем, расчетом допустимых и оптимальных режимов, диспетчерским управлением, созданием электронных моделей и цифровых двойников трубопроводных систем. AuthorID: 187815, SPIN: 3216-1458, ORCID: 0000-0002-7596-6761, alexeev@isem.irk.ru, Россия, г.Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Новицкий Николай Николаевич. Доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией трубопроводных и гидравлических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Основные направления исследований связаны с теорией гидравлических цепей, теорией и методами анализа, управления, оптимизации и идентификации трубопроводных систем, математическим и компьютерным моделированием, информационно-вычислительными технологиями. AuthorID: 9693, SPIN: 9551-6666, ORCID: 0000-0002-4032-89401, ripenet@isem.irk.ru, Россия, г.Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 519.6:628.14

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.007

Methods of analysis and provision of water quality indicators in water supply systems with closed circulation loops

Aleksandr V. Alekseev, Nikolay N. Novitsky

Melentiev energy systems institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, alexeev@isem.irk.ru

Abstract. The article considers the problem of calculating the quality of water in water supply systems with closed circulation loops. The conducted review of works on modeling water quality in water supply systems showed that there are many factors affecting the water quality in water supply systems. The most widespread in practice is water disinfection with chlorine. Bilateral restrictions are imposed on the concentration of chlorine in water, and operating organizations are obliged to maintain the required concentration of chlorine to the tap of each consumer. In the process of transporting water, the concentration of chlorine decreases due to interaction with the pipe material and dissolved substances. Thus, one of the main indicators of water quality can be its age. Existing models for calculating the water age do not allow calculating the age of water in water supply systems in the presence of closed circulation loops. A topological algorithm for calculating the age of water in networks with closed circulation loops is proposed. The software implementation of the algorithm is integrated into the “ANGARA-VS” information and computing complex and tested on conditional and real examples of water supply systems. The software implementation of the algorithm has shown high computational efficiency and can be applied in practice when analyzing the modes of water supply systems. It is shown that there are only a few ways to manage water quality in water supply systems. A new approach to water quality management based on the creation of closed circulation circuits is proposed. This approach requires minimal capital and operating costs compared to

other known methods. The presented approach is universal and can be used to calculate various quality parameters of the transported medium in any pipeline systems.

Keywords: water supply system, water quality, water age, water chlorination, water quality management, closed loop circulation

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (№ FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030.

References

1. Chadik P., Chowdhury Z. Developing models for predicting trihalomethane formation potential and kinetics. *Journal AWWA*, 1987, vol. 79, no.7, pp. 89-97, 1987, DOI:10.1002/j.1551-8833.1987.tb02878.x.
2. Masters S., Wang H., Pruden A., Edwards M.A. Redox gradients in distribution systems influence water quality, corrosion, and microbial ecology. *Water Research*, 2015, no. 68, pp. 140-149, DOI:10.1016/j.watres.2014.09.048.
3. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental modelling & software*, 2017, vol. 93, pp. 209-254, DOI:10.1016/j.envsoft.2017.02.009.
4. Liu G., Lut M.C., Verberk J.Q.J.C., Van Dijk J.C. A comparison of additional treatment processes to limit particle accumulation and microbial growth during drinking water distribution. *Water research*, 2013, vol. 47(87), 2719-2728, DOI:10.1016/j.watres.2013.02.035.
5. Aisopou A., Stoianov I. N. J.D. Graham In-pipe water quality monitoring in water supply systems under steady and unsteady state flow conditions: A quantitative assessment. *Water research*, 2012, no. 46, pp. 235-246m DOI:10.1016/j.watres.2011.10.058.
6. Liou C.P., Kroon J.R. Modeling the propagation of waterborne substances in distribution networks. *Journal AWWA*, 1987, vol. 79, no. 11, pp. 54-58.
7. Clark R., Males R. Simulating cost and quality in water distribution. *Journal of water resources planning and management*, vol. 111, iss. 4, pp.454-466, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1985)111:4(454).
8. Males R., Clark R., Wehrman P., Gates W. Algorithm for mixing problems in water systems. *Journal of hydraulic engineering*, 1985, no. 111(2), pp. 206-219, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:2(206).
9. Hallam N.B, West J.R, Forster C.F, et al. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water research*, 2002, vol. 36, iss.14, pp. 3479-3488, DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00056-8.
10. Clark R.M., Goodrich J.A., Wymer L.J. Effect of the Distribution System on Drinking Water Quality. *Journal of water supply: research and technology – AQUA*, 1993, 42(1), pp. 30-38.
11. Grayman W., Clark R., Males R. Modeling distribution -system water quality: dynamic approach. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, no.3, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:3(295).
12. Clark R., Yang J., Impellitteri C., et al. Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies. *American water works association*, 2010, vol. 102, no. 5, pp. 144-156, DOI:10.2307/41314138.
13. Vasconcelos J., Rossman L., Grayman W., et al. Kinetics of chlorine decay. *American water works association*, 1997, vol. 89, pp. 54-65, DOI:10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x.
14. Vasconcelos J.J., Boulos P.F., Grayman W. M., et al. Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems. *AWWA Research Foundation*, Denver, 1996.
15. Wang Y., Zhu G., Yang Z. Analysis of water quality characteristic for water distribution systems. *Journal of water reuse and desalination*, 2018, DOI:10.2166/wrd.2018.045.
16. Hua F., West J. Barker R., Forster C. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water resource*, 1999, vol. 33, iss. 12, pp. 2735-2746, DOI:10.1016/S0043-1354(98)00519-3.
17. Effects of water age on distribution system water quality. *AWWA with assistance from economic and engineering services, Inc*, 2002.
18. Al-Jasser A.O. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water research*, 2007, vol. 41, iss. 2, pp. 387-396, DOI:10.1016/j.watres.2006.08.032.
19. McGrath J., Maleki M., Bouchard C., et al. Bulk and pipe wall chlorine degradation kinetics in three water distribution systems. *Urban water journal*, 2021, DOI:10.1080/1573062X.2021.1893368.
20. Clark R., Haught R. Characterizing pipe wall demand: implications for water quality modeling. *Journal of water resources planning and management*, 2005, vol. 131, pp. 208-217, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(208).
21. Clark R. Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies. *Frontiers of earth science*, 2011, no. 5(4), pp. 334-340, DOI:10.1002/j.1551-8833.2010.tb10117.x.
22. Clark R., Grayman W. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of environmental engineering*, 1994, vol. 120, pp. 803-820, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(803)
23. Fisher I., Kastl G., Sathasivan A. Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water research*, 2011, vol. 45, iss. 16, pp. 4896-4908, DOI:10.1016/j.watres.2011.06.032.

24. Boccellia D., Trybyb M., Uberc J., Summersd R. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. *Water research*, 2003, vol .37, iss. 11, pp. 2654-2666, DOI:10.1016/S0043-1354(03)00067-8.
25. Males R., Grayman W., Clark R. Modeling Water Quality in distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1988, vol. 114, pp. 197-209, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(197).
26. Goyal R., Patel H. Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply. *Applications of water science*, 2015, vol. 5:3, pp. 311-319, DOI:10.1007/s13201-014-0193-7.
27. Clark R. The USEPA's distribution system water quality modeling program: a historical perspective. *Water and environment journal*, 2015, vol 29, DOI:10.1111/wej.12132.
28. Monteiroa L. Figueiredoa D., Diasc S., et al. Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX .12th International conference on computing and control for the water industry, CCWI 2013.
29. Quintiliani C., Marquez-Calvo O., Alfonso L., et al. Multiobjective valve management optimization formulations for water quality enhancement in water distribution networks. *Journal of water resource and planning.*, 2019, vol. 145(12), 04019061, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001133.
30. Prasad D., Walters G.A. Minimizing residence times by rerouting flows to improve water quality in distribution networks. *Engineering optimization*, 2006, 38:8, pp. 923-939, DOI:10.1080/03052150600833036.
31. Ostfeld A., Salomons E. Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems. *Engineering optimization*, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 337-352, DOI:10.1080/03052150500478007.
32. Boccelli D., Tryby M., Uber J. et al. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 1998, vol. 124, iss. 2, pp. 99-111, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:2(99).
33. Lee S., Lee H., Yoo D., et al. A comparative study on a hydraulic and water-quality analysis method for determining rechlorination injection points for a water-supply network. *Water*, 2019, 11, 697, DOI:10.3390/w11040697.
34. Rossman L., Boulos P., Airman T. Discrete volume-element method or network water-quality models. *Journal of water resources planning and management*, 1993, vol. 119, iss. 5, pp. 505-517, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:5(505).
35. Rossman L., Boulos P. Numerical methods for modeling water quality in Distribution systems: a comparison. *Journal of water resources planning and management*, 1996, vol. 122, pp. 137-146, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(137).
36. Tiruneh A., Debessai T., Bwembya G., Nkambule S. A mathematical model for variable chlorine decay rates in water distribution systems. *Modelling and simulation in engineering*, 2019, pp. 1-11, DOI:10.1155/2019/5863905.
37. Novitsky N. Mathematical models and methods for analyzing flow properties in hydraulic circuits with closed circulation circuits. *E3S Web of conferences*, 2020, 219, 01004, DOI:10.1051/e3sconf/202021901004.
38. Merenkov A.P., Haselev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskih tsepei [Hydraulic circuit's theory]*. Moscow, Nauka, 1985, 280 p.
39. Novitsky N.N., Alekseev A.V., Barinova S.Yu. *Informatsionno-vichislitel'nyy kompleks "ANGARA-WS" dlya modelirovaniya krupnih system vodosnabzheniya [Information and computing complex "ANGARA_WS" for large water supply systems modelling]*. Trudy XVI Baykal'skoy Vserossiyskoy konferentsii "Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii". Irkutsk Rossiya. 01-10 iyulya 2011. [Proceedings of the XVI Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical technologies in science and management". Irkutsk, Russia. July 01-10.], pp. 192-200.
40. Alexeev A., Novitsky N. The information and computing complex "ANGARA-WS" for end-to-end modeling of water supply systems when developing development schemes, scheduling modes, and dispatching management. *MATEC Web of conferences: electronic edition*, Irkutsk. Irkutsk: EDP Sciences, 2018, vol. 212, p. 06001, DOI 10.1051/mateconf/201821206001.

Alekseev Aleksandr Vladimirovich. *Candidate of technical sciences, senior researcher of the Laboratory of pipeline and hydraulic systems of the Melentyev energy systems institute SB RAS. The main areas of research are related to modeling various types of pipeline systems, calculating permissible and optimal modes, dispatching control, creating electronic models and digital twins of pipeline systems. AuthorID: 187815, SPIN: 3216-1458, ORCID: 0000-0002-7596-6761, alexeev@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 130.*

Novitsky Nikolay Nikolaevich. *Doctor of engineering sciences, chief researcher, head of the Laboratory of pipeline and hydraulic systems of the Melentyev energy systems institute SB RAS. The main areas of research are related to the theory of hydraulic circuits, the theory and methods of analysis, control, optimization and identification of pipeline systems, mathematical and computer modeling, information and computing technologies. AuthorID: 9693, SPIN: 9551-6666, ORCID: 0000-0002-4032-89401, pipenet@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 130.*

Статья поступила в редакцию 12.02.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2025; принята к публикации 27.02.2025.

The article was submitted 02/12/2025; approved after reviewing 02/19/2025; accepted for publication 02/27/2025.

УДК 004.94:633/.635

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.008

Алгоритм параметрического моделирования производства аграрной продукции с учетом предшественников

Иваньо Ярослав Михайлович, Полковская Марина Николаевна,
Сеницын Максим Николаевич

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, *iytex@rambler.ru*

Аннотация. В статье приведена параметрическая модель оптимизации производства растениеводческой продукции с учетом многоуровневых трендов урожайности сельскохозяйственных культур и разных предшественников. Предложен алгоритм решения параметрической задачи, апробированный на данных о производстве растениеводческой продукции муниципального района и сельскохозяйственной организации. Применение разработанной модели позволяет оценивать перспективу производственной деятельности предприятий при усредненных, благоприятных и неблагоприятных условиях с разным сочетанием предшественников.

Ключевые слова: алгоритм, параметрическая модель, многоуровневое моделирование, аграрное производство

Цитирование: Иваньо Я.М. Алгоритм параметрического моделирования производства аграрной продукции с учетом предшественников / Я.М. Иваньо, М.Н. Полковская, М.Н. Сеницын // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – №1(37). – С. 80-91. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.008.

Введение. Производство продукции растениеводческой отрасли в Иркутской области подвержено значительному влиянию метеорологических, агротехнических, экономических, социальных факторов. При этом в регионе выделяются сельскохозяйственные товаропроизводители и муниципальные районы со стабильным производством. Поэтому актуальным является применение при оптимизации производства растениеводческой продукции задач параметрического программирования, которые позволяют оценить возможный экономический эффект деятельности предприятия с учетом тенденций ее показателей [1-4].

Особый интерес для моделирования производства аграрной продукции, а также ее переработки и сбыта представляют разные виды параметрических моделей [5-8]. При этом подобные модели затрагивают разные уровни деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей: организации, муниципальные образования, агроклиматические территории.

Математические модели могут описывать сложные системы взаимодействия технических, технологических, экономических, климатических и экологических факторов, многие из которых являются неопределенными [8-10]. Для эффективного решения задач оптимизации получения, переработки и сбыта растениеводческой продукции необходимы создание и использование специализированного программного обеспечения. Программные комплексы моделирования производства сельскохозяйственной продукции могут включать в себя следующие математические модели: планирования структуры посевов с учетом предшественников и неопределенности характеристик; планирования производства растениеводческой продукции в различных условиях ведения сельского хозяйства; планирования производства и реализации продукции с учетом предшественников и сезонности цен [5-7, 11, 12, 13]. При этом в зависимости от неопределенности характеристик для решения различных задач применимы модели параметрического, стохастического программирования и их сочетание.

В приведенном исследовании для получения плана производства на среднесрочную многолетнюю перспективу определены две стадии моделирования. Вначале определяется некоторое множество оптимальных решений в зависимости от предшественников и условий аграрного производства на среднесрочную перспективу. Затем формируется производственный план из полученных вариантов оптимальных решений на первой стадии. При этом следующая стадия предполагает корректировку плана в зависимости от полученных результатов хозяйства или сельскохозяйственных товаропроизводителей муниципального района.

Целью исследования является разработка модели и алгоритма планирования производства растениеводческой продукции на основе задачи параметрического программирования с учетом многоуровневых прогнозов характеристик, входящих в оптимизационную модель, и влияния предшественников на урожайность сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. При выборе моделей прогнозирования использованы результаты научных исследований различных авторов, посвященные моделированию характеристик, описывающих аграрное производство. В статье использованы трендовые модели, описывающие разные иерархические структуры временного ряда характеристики – все уровни, локальные минимумы и максимумы [6].

Методика выделения локальных минимумов и максимумов из многолетних временных рядов приведена в работе [14]. Она использована для описания тенденций, характеризующих усредненные, благоприятные и неблагоприятные условия производства. Тренд всего временного ряда характеризует некоторые усредненные условия, а тренды последовательностей локальных максимумов и минимумов – благоприятные и неблагоприятные ситуации. Для построения многоуровневых трендов использован корреляционно-регрессионный анализ для определения наиболее качественных по статистическим критериям функций. На основании опыта моделирования трендов в качестве функций чаще для задач, связанных с аграрным производством, применимы линейные, степенные, экспоненциальные и логистические выражения [13].

В основу предложенного алгоритма положены модели планирования производства аграрной продукции, приведенные в работах [6, 8]. Применение предлагаемых параметрических моделей с учетом времени позволяет осуществлять планирование на определенную многолетнюю перспективу [6]. Вместе с тем они только частично снимают неопределенность ввиду сильного влияния на производство экстремальных климатических событий, поэтому их можно использовать, прежде всего, для планирования деятельности устойчиво развивающихся сельскохозяйственных организаций.

Учет предшественников влияет на урожайность последующих посевов сельскохозяйственных культур. Большое количество их сочетаний предполагает выбор наилучших решений. При этом на этот выбор влияют возможности сельскохозяйственного товаропроизводителя: технологии, технические средства, климатические условия, квалификация трудовых ресурсов.

Таким образом, в работе сделана попытка сформулировать и решить задачу планирования производства растениеводческой продукции на основе многоуровневой задачи параметрического программирования с учетом разного сочетания предшественников. Алгоритм параметрического моделирования производства растениеводческой продукции реализован для одного из хозяйств Черемховского района и для самого муниципального образования.

В качестве исходной информации взяты официальные статистические данные об урожайности сельскохозяйственных культур за 1996-2023 гг. по Черемховскому району. При решении задачи параметрического программирования использованы данные бухгалтерской отчетности ООО «Новогромовское».

Алгоритм параметрической оптимизации производства растениеводческой продукции. Алгоритм включает в себя две стадии (рис. 1), первая из которых состоит из семи операций.



Рис. 1. Алгоритм многоуровневой параметрической оптимизации производства растениеводческой продукции с учетом предшественников

На первой стадии определяются целевая функция и ограничения модели. В качестве целевой функции использован максимальный доход. Вторая операция связана с оценкой значимых многоуровневых трендов в многолетних рядах коэффициентов, входящих в левую часть ограничений. На третьем шаге определяются стохастические ряды и оцениваются вероятности усредненных уровней всего ряда и локальных экстремумов. На четвертом шаге на основании полученных многоуровневых трендов осуществляется прогнозирование производственно-экономических характеристик. При этом в частном случае некоторые характеристики принимаются в качестве усредненных [7]. Следующая операция позволяет оценивать влияние предшественников на урожайность сельскохозяйственных культур, осуществляется корректировка значений прогнозов в зависимости от схемы севооборота.

После получения прогнозных значений и оценки влияния предшественников формулируются варианты входных данных. Седьмой операцией является определение оптимальных решений параметрической задачи с учетом прогнозов для усредненных, благоприятных и неблагоприятных условий и влияния различных сочетаний предшественников. На второй стадии осуществляется выбор наилучшего оптимального решения из результатов решения параметрической задачи для планирования производства продукции на среднесрочную перспективу.

Реализация алгоритма параметрической оптимизации производства растениеводческой продукции. В качестве объектов исследования согласно алгоритму, приведенному на рисунке 1, взяты Черемховский район и ООО «Новогромовское». Выбор обусловлен тем, что сельскохозяйственное производство в районе является стабильным, что обусловлено, в том числе, наличием крупных сельскохозяйственных товаропроизводителей, использующих современные технологии производства.

На первой стадии сформулирована параметрическая оптимизационная модель, параметром которой является время t (годы). Целевая функция модели направлена на максимизацию дохода

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} d_{is}^{hk} y(t)_{is}^{hk} x_{is}^{hk} \rightarrow \max (i \in I, s \in S, h \in H, k \in K), \quad (1)$$

при условиях:

ограниченности производственных ресурсов

$$\sum_{s \in S} v(t)_{is}^{hk} x_{is}^{hk} \leq V_{li} \quad (l \in L), \quad (2)$$

ограниченности размера растениеводческой отрасли

$$\underline{n} \leq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} (1 + \eta_s^{hk}) x_{is} \leq \bar{n}, \quad (3)$$

производства конечной продукции не ниже заданного объема

$$\sum_{i \in I} y(t)_{is}^{hk} x_{is}^{hk} \geq Y_s, \quad (4)$$

ограниченности вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{s \in S} w_{mis}^{hk} x_{is}^{hk} \leq W_{mi}, \quad (5)$$

неотрицательности переменных

$$x_{is}^{hk} \geq 0. \quad (6)$$

В (1)-(6):

d_{is}^{hk} – цена реализации s -культуры i -поля (руб./ц);

$y(t)_{is}^{hk}$ – выход продукции с единицы площади s -культуры i -поля (ц/га), зависящий от параметра t , изменяющегося от α до β ;

x_{is}^{hk} – искомая площадь возделывания s -культуры на i -поле (га);

$v(t)_{is}^{hk}$ – расход l -ресурса на единицу площади s -культуры i -поля (чел.-ч/га, руб./га),

связанный с параметром t ;

V_{li} – наличие ресурса l -вида для i -поля;

Y_s – гарантированный (минимальный) объем производства продукции s -культуры (ц);

\bar{n} , \underline{n} – максимально и минимально возможная площадь возделывания культур (га);

η_s^{hk} – коэффициент, учитывающий площадь посевов семян s -культуры;

w_{mis}^{hk} – расход m -удобрения (средства защиты растений) на единицу площади i -поля s -культуры (ц/га);

W_{mi} – наличие удобрения m -вида i -поля (ц),

I – количество полей,

S – число видов культур,

h – вариант сочетания предшественников,

k – уровень тренда,

H – количество вариантов сочетания предшественников,

K – число уровней, равное трем.

Помимо оптимизации площадей посевов при решении задачи (1)-(6) рассчитываются объемы произведенной продукции:

$$z_{is}^{hk} = y(t)_{is}^{hk} \cdot x_{is}^{hk}. \quad (7)$$

На следующей стадии для выделенных из многолетнего временного ряда производственно-экономических характеристик последовательностей верхних (локальные максимумы) и нижних (локальные минимумы) уровней строятся тренды. При этом в качестве функций, характеризующих динамику исследуемых показателей, могут применяться линейные и нелинейные (асимптотические, логистические, степенные, линейные, экспоненциальные) выражения. Одной из характеристик, обладающих динамико-стохастическими свойствами, является урожайность сельскохозяйственных культур.

Модель (1)-(7) может быть использована для оптимизации производства растениеводческой продукции для сельскохозяйственных организаций и муниципальных районов. В качестве примера реализации алгоритма оптимизации производства растениеводческой продукции, как отмечалось ранее, рассмотрена деятельность сельскохозяйственных товаропроизводителей в Черемховском районе и предприятия ООО «Новогромовское». Характеристикой модели, зависящей от параметра t , является урожайность некоторых сельскохозяйственных культур. Остальные характеристики, модели представляют собой усредненные значения.

В таблице 1 приведены тренды, усредненные значения рядов урожайности, их локальных минимумов и максимумов, статистические критерии для многолетних рядов урожайности сельскохозяйственных культур в рассматриваемом районе за 1996-2023 гг. и прогнозы для разных уровней ряда.

Таблица 1. Характеристики трендов всего ряда, локальных минимумов и максимумов урожайности сельскохозяйственных культур в Черемховском районе за 1996-2023 гг. и прогностические значения

Культура	Уравнение	R^2	F -критерий Фишера	t -статистика Стьюдента	Прогноз, ц/га		
					2024	2025	2026
Все уровни ряда							
Пшеница	$y=31,1/(1+e^{-0,0776t})$	0,62	43,8	-6,62	28,0	28,2	28,4
Ячмень	$y=11,1t^{0,275}$	0,64	46,8	-6,84	31,0	31,1	31,1
Овес	$y=13,7+0,51t$	0,56	33,2	-7,13	28,5	29,1	29,6
Картофель	средние значения				159,4	159,4	159,4
Свекла	средние значения				225,9	225,9	225,9
Морковь	$y=135,6+7,63t$	0,67	51,5	-5,88	356,8	364,5	372,1

Последовательность локальных максимумов							
Пшеница	$y=31,1/(1+e^{-0,13t})$	0,68	12,97	-3,60	30,3	30,4	30,5
Ячмень	$y=12,3t^{0,286}$	0,81	17,26	-4,15	32,2	32,5	32,8
Овес	$y=16,91+0,51t$	0,75	17,77	-3,53	31,6	32,1	32,6
Картофель	средние значения				172,4	172,4	172,4
Свекла	средние значения				269,2	269,2	269,2
Морковь	$y=171,9+6,58t$	0,66	9,48	-2,84	362,6	369,2	375,8
Последовательность локальных минимумов							
Пшеница	$y=23,4/(1+e^{-0,151t})$	0,73	13,23	-3,64	23,0	23,0	23,1
Ячмень	$y=10,9t^{0,226}$	0,52	8,62	-2,94	23,2	23,4	23,6
Овес	$y=9,51+0,53t$	0,73	19,29	-3,62	24,8	25,3	25,9
Картофель	средние значения				150,0	150,0	150,0
Свекла	средние значения				212,3	212,3	212,3
Морковь	$y=96,4+7,41t$	0,89	40,73	-4,33	311,3	318,7	326,1

Следует отметить, что для рядов картофеля и свеклы значимых трендов не найдено, поэтому при решении задачи оптимизации использованы средние значения всего ряда, локальных минимумов и максимумов.

Для определения влияния на урожайность сельскохозяйственных культур предшественников необходимо сформировать схемы севооборотов. При этом рассматривались три варианта севооборота. Оценка влияния предшественников на урожайность сельскохозяйственных культур осуществляется с помощью экспертных оценок или справочной литературы. В качестве экспертов привлекались специалисты-агрономы. Влияние предшественников на урожайность оценивалось с помощью коэффициентов.

После получения схем севооборота и прогнозов (табл. 1) решена параметрическая оптимизационная задача (1)-(7), параметром которой является время t . При этом оптимизирован доход от производства зерновых (пшеница, ячмень, овес), картофеля и овощей (свеклы, моркови). Задача решалась с учетом влияния на урожайность предшественников.

В таблице 2 приведены результаты решения параметрической задачи с учетом влияния на урожайность предшественников и прогноза на 2024, 2026 гг. Для уменьшения громоздкости таблицы 2 прогностические данные за 2025 год не приведены.

Таблица 2. Результаты решения параметрической задачи с учетом различных вариантов севооборота и прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур для Черемховского района Иркутской области

Год	Объемы произведенной продукции, т						Целевая функция, млн руб.
	Пшеница, z_1 [т]	Ячмень, z_2 [т]	Овес, z_3 [т]	Картофель, z_4 [т]	Свекла, z_5 [т]	Морковь, z_6 [т]	
Прогноз урожайности по всем значениям многолетнего ряда							
Первый вариант севооборота							
2024	68033,6	58753,4	20364,5	21763,1	367,5	640,6	975,0
2026	71765,1	61419,2	21949,3	22642,3	382,3	695,0	1024,7
Второй вариант севооборота							
2024	61848,7	53412,1	18513,2	19784,6	334,1	582,4	886,4
2026	65241,0	55835,7	19953,9	20583,9	347,6	631,8	931,6

Третий вариант севооборота							
2024	55663,9	48070,9	16661,9	17806,2	300,6	524,1	797,7
2026	58716,9	50252,1	17958,5	18525,5	312,8	568,6	838,4
Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных максимумов							
Первый вариант севооборота							
2024	73522,7	61060,1	22554,6	23542,2	437,9	651,0	1046,0
2026	76941,0	64751,1	24218,5	24493,4	455,6	701,9	1099,9
Второй вариант севооборота							
2024	66838,8	55509,2	20504,2	21402,0	398,1	591,8	950,9
2026	69946,4	58864,6	22016,8	22266,6	414,2	638,1	999,9
Третий вариант севооборота							
2024	60154,9	49958,2	18453,7	19261,8	358,2	532,6	855,8
2026	62951,7	52978,2	19815,2	20040,0	372,8	574,3	899,9
Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных минимумов							
Первый вариант севооборота							
2024	55735,5	44055,8	17707,8	20479,4	345,4	558,8	815,2
2026	58325,9	46557,5	19207,1	21306,7	359,4	609,0	857,1
Второй вариант севооборота							
2024	50668,7	40050,7	16098,0	18617,6	314,0	508,0	741,1
2026	53023,6	42325,0	17461,0	19369,8	326,7	553,7	779,2
Третий вариант севооборота							
2024	45601,8	36045,6	14488,2	16755,8	282,6	457,2	667,0
2026	47721,2	38092,5	15714,9	17432,8	294,0	498,3	701,7

Полученные результаты характеризуют объем продукции, который можно произвести при различных условиях, и возможный доход, согласно прогнозам значений верхнего уровня исходного ряда, характеризующего благоприятные ситуации, и нижнего уровня ряда, описывающего неблагоприятные условия производства.

При этом потеря дохода при неблагоприятных условиях относительно усредненных условий составляет около 20 %. Увеличение этой характеристики при благоприятных условиях – более 7 %.

Следует отметить, что использование севооборота и подбор хороших предшественников сельскохозяйственных культур позволяет увеличить доход примерно на 10%.

Таким образом, из трех вариантов предшественников наилучшим является тот, который связан с первым вариантом севооборота по произведенной продукции и доходам.

Вместе с тем сельскохозяйственные товаропроизводители не всегда имеют возможность соблюдать схему севооборота ввиду ограниченности финансовых и материальных ресурсов. Поэтому различные варианты сочетания позволяют выбирать наиболее приемлемый из них для управления процессом получения необходимых объемов продукции.

Помимо исследования потенциала развития растениеводства в Черемховском районе задача (1) - (7) решена для ООО «Новогромовское», расположенного в этом районе. При решении задачи значения урожайности пшеницы, ячменя и овса спрогнозированы, а однолетних трав на зеленый корм и многолетних трав на сено усреднены ввиду отсутствия во временных рядах значимых трендов (табл. 3).

Таблица 3. Результаты решения параметрической задачи с учетом различных вариантов севооборота и прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур для ООО «Новогромовское» Черемховского района Иркутской области

Год	Объемы произведенной продукции, т					
	Пшеница, z_1 [т]	Ячмень, z_2 [т]	Овес, z_3 [т]	Однолетние травы на зеленый корм, z_4 [т]	Многолетние травы на сено, z_5 [т]	Целевая функция, тыс. руб.
Прогноз урожайности по всем значениям многолетнего ряда						
Первый вариант севооборота						
2024	2776,7	1704,2	314,0	17631,5	177,1	39509,6
2026	2929,0	1781,5	338,4	18343,8	184,2	41105,8
Второй вариант севооборота						
2024	2524,3	1549,3	285,4	16028,7	161,0	35917,9
2026	2662,7	1619,6	307,6	16676,2	167,5	37368,9
Третий вариант севооборота						
2024	2271,8	1394,3	256,9	14425,8	144,9	32326,1
2026	2396,5	1457,6	276,9	15008,6	150,7	33632,0
Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных максимумов						
Первый вариант севооборота						
2024	3000,7	1771,1	347,7	20149,3	211,3	43423,1
2026	3140,2	1878,2	373,4	20963,4	219,8	45177,4
Второй вариант севооборота						
2024	2727,9	1610,1	316,1	18317,6	192,1	39475,5
2026	2854,8	1707,4	339,4	19057,6	199,9	41070,3
Третий вариант севооборота						
2024	2455,2	1449,1	284,5	16485,8	172,9	35528,0
2026	2569,3	1536,7	305,5	17151,8	179,9	36963,3
Прогноз урожайности по всем значениям последовательности локальных минимумов						
Первый вариант севооборота						
2024	2274,8	1277,9	273,0	14480,6	150,1	31966,0
2026	2380,5	1350,4	296,1	15065,6	156,1	33257,5
Второй вариант севооборота						
2024	2068,0	1161,7	248,2	13164,1	136,4	29060,0
2026	2164,1	1227,7	269,2	13696,0	141,9	30234,1
Третий вариант севооборота						
2024	1861,2	1045,5	223,4	11847,7	122,8	26154,0
2026	1947,7	1104,9	242,3	12326,4	127,7	27210,7

Согласно расчетам, приведенным в таблице 3, потеря дохода при низкой урожайности составляет около 24% относительно средних значений. При благоприятных условиях увеличение дохода по сравнению с усредненными условиями составит около 10%.

Для рассматриваемого хозяйства наилучшим результатов для разных условий производства является первый вариант севооборота.

Приведенные расчеты позволяют сельскохозяйственному товаропроизводителю оценивать доход при благоприятных и неблагоприятных условиях. Поскольку в примере осуществлялся прогноз урожайности, полученные результаты отражают увеличение дохода за

счет ее повышения, которое возможно при использовании оптимальных севооборотов, использовании высокоурожайных районированных сортов, качественной обработке почвы, внесении необходимого количества удобрений и средств защиты растений. Низкий доход отражает неблагоприятные условия, влияние которых на рентабельность предприятия может быть уменьшено, например, с помощью диверсификации производства.

Основные результаты и обсуждение. Планирование производства растениеводческой продукции является сложной задачей, поскольку требует прямого или косвенного учета влияния множества факторов. К ним можно отнести: разнообразие природно-климатических, почвенно-биологических, агроландшафтных и организационно-экономических условий [15]; вариацию основных агротехнологических параметров; отсутствие общепринятых нормативов для точного определения уровня урожайности; необходимость учета неблагоприятных событий и пр. [6-8]. Моделирование таких ситуаций и их влияния на производственные процессы позволяет определить стратегию деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя, направленную на повышение прибыли. Для решения этой задачи используются различные подходы, например, применение многоуровневого параметрического программирования, позволяющего планировать объёмы производства с учетом максимизации прибыли или дохода. При этом предлагается учитывать прогнозные значения производственно-экономических показателей и влияние на урожайность сельскохозяйственных культур предшественников. Авторами предложен и реализован алгоритм параметрической оптимизации производства растениеводческой продукции, разделенный на две стадии. В качестве параметра оптимизационной модели предлагается использовать время. При этом для прогнозирования производственно-экономических показателей рекомендуется применять многоуровневые тренды, позволяющие осуществлять прогноз по значениям всего многолетнего ряда, его локальных минимумов и максимумов. С помощью алгоритма реализована многоуровневая параметрическая модель планирования структуры посевов с учетом влияния на урожайность предшественников и прогнозов для разных условий деятельности сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Заключение. Предложенный алгоритм апробирован на данных о производстве растениеводческой продукции в Черемховском районе и в ООО «Новогромовское» для трех вариантов севооборота. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур осуществлялось с помощью многоуровневых трендов, построенных для всех значений исходного ряда, а также выделенных последовательностей локальных минимумов и максимумов. Алгоритм может применяться на уровне сельскохозяйственных предприятий, муниципальных и агроландшафтных районов. Для реализации приведенного алгоритма с использованием результатов моделирования производства аграрной продукции предлагается создание программного комплекса с интерфейсом системы на основе интегрированной среды разработки Embarcadero Verlin 10.1. Хранение данных предполагается осуществлять с помощью СУБД PostgreSQL. Для выгрузки результатов работы статистической обработки данных, формирования отчетов и графического материала применимо приложение MS Excel. Решение задач линейного программирования осуществимо с помощью программного продукта lp_solve.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-21-00502.

Список источников

1. Буховец А.Г. Прогнозирование урожайности зерновых культур с помощью динамической модели нормализованного относительного индекса растительности, учитывающей физиологические особенности развития сельскохозяйственных растений / А.Г. Буховец, М.В. Кучеренко, Е.А. Семин // Вестник Воронежского ГАУ, 2021 – № 3 (70). – С. 93-104.

2. Касимова Т.М. Экономико-математическое моделирование и прогнозирование развития регионального агропромышленного комплекса: монография / Т.М. Касимова. – Махачкала: ДГУ, 2017. – 136 с.
3. Обыденнов А.Ю. Параметрическое управление поведением хозяйствующих субъектов в условиях ограниченной рациональности / А.Ю. Обыденнов // Эффективное антикризисное управление, 2017. – № 3(102). – С. 58-67.
4. Рудой Е.В. Прогнозирование научно-технологического развития отрасли растениеводства / Е.В. Рудой // Участие аграрных вузов в научно-техническом обеспечении развития сельского хозяйства: Материалы Всероссийского семинара совещания проректоров по научной работе вузов Минсельхоза России, Курск, 26–29 июня 2018 года. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова, 2018. – С. 48-55.
5. Гордеев А.С. Оптимизация в сельскохозяйственных технологиях / А.С. Гордеев, Б.С. Мишин, Н.П. Гордеева. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 260 с.
6. Барсукова М.Н. Об одной модели оптимизации производства аграрной продукции в благоприятных и неблагоприятных внешних условиях / М.Н. Барсукова, Я.М. Иванько, С.А. Петрова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 3 (19). – С. 73-85
7. Иванько Я.М. Многоэтапные модели математического программирования и их приложения в сельском хозяйстве / Я.М. Иванько, М.Н. Полковская, М.Н. Сеницын // System analysis and mathematical modeling, 2024. – Т. 6. – № 1. – С. 47-59. – DOI:10.17150/2713-1734.2024.6(1).47-59.
8. Математические и цифровые технологии оптимизации производства продовольственной продукции. Монография / Я.М. Иванько и др.; под ред. Я.М. Иванько. – Молодежный: Изд-во Иркутский ГАУ, 2021. – 219 с.
9. Антонова Н.Н. Алгоритм решения двухэтапной минимаксной задачи с линейными ограничениями / Н.Н. Антонова, Л.М. Шевчук // Приближенные методы анализа и их приложения. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1990. – С. 5-10.
10. Зоркальцев В.И. Равновесные модели в экономике и энергетике / В.И. Зоркальцев, О.В. Хамисов // Новосибирск: Наука, 2006. – 221 с.
11. Зайцев А.М. Теоретические основы полевых севооборотов и методология их проектирования в агроландшафтных системах земледелия / А.М. Зайцев, В.И. Солодун // Монография. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2016. – 256 с.
12. Суворова М.А. Исследование многоэтапных стохастических задач принятия решений: дисс. канд. физ. - мат. наук. – СПб, 2004. – 108 с.
13. Бендик Н.В. Математическое и алгоритмическое обеспечение программного комплекса «Многоуровневые модели прогнозирования и планирования аграрного производства» / Н.В. Бендик, Я.М. Иванько, В.В. Цыренжапова // Комплексное развитие территорий в условиях цифровой трансформации: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ, Иркутск, 13–14 марта 2024 года. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2024. – С. 28-34.
14. Дружинин И.П. Динамика многолетних колебаний речного стока. / И.П. Дружинин, В.Р. Смага, А.Н. Шевнин. – М.: Наука, 1991. – 176 с.
15. Тюпаков К.Э. Особенности эффективного формирования и воспроизводства технико-технологической базы растениеводства: монография / К.Э. Тюпаков. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 274 с.

Иванько Ярослав Михайлович. Доктор технических наук, профессор, проректор по цифровой трансформации, профессор кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского. Основные научные интересы: математическое моделирование разных аспектов получения продовольственной продукции с учетом климатических, техногенных и биологических рисков. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru. 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

Полковская Марина Николаевна. Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, ORCID: 0000-0002-9646-1818, SPIN: 4833- 9212, polk_mn@mail.ru, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

Сеницын Максим Николаевич. Аспирант кафедры информатики и математического моделирования, институт экономики, управления и прикладной информатики Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, SPIN: 8214-2809, AuthorID: 1135605, maks.sinitsyn.94@mail.ru, 664038, Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный.

The algorithm of parametric modeling of agricultural production, taking into account the predecessors

Yaroslav M. Ivanyo, Marina N. Polkovskaya, Maxim N. Sinitsyn

Irkutsk state agricultural university named after A.A. Ezhevsky,

Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny settlement, *iy mex@rambler.ru*

Abstract. The article presents a parametric model for optimizing the production of crop products taking into account multi-level trends in crop yields and different predecessors. An algorithm for solving a parametric problem is proposed, which is tested on data on the production of crop products of a municipal district and an agricultural organization. The application of the developed model allows us to assess the prospects of production activities of enterprises under average, favorable and unfavorable conditions with different combinations of predecessors.

Keywords: algorithm, parametric model, multilevel modeling, agricultural production

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 24-21-00502.

References

1. Bukhovets A.G., Kucherenko M.V., Semin E A. Prognozirovaniye urozhaynosti zernovykh kul'tur s pomoshch'yu dinamicheskoy modeli normalizovannogo otnositel'nogo indeksa rastitel'nosti, uchityvayushchey fiziologicheskoye osobennosti razvitiya sel'skokhozyaystvennykh rasteniy [Forecasting the yield of grain crops using a dynamic model of the normalized relative vegetation index, taking into account the physiological characteristics of the development of agricultural plants]. Vestnik Voronezhskogo GAU [Bulletin of the Voronezh state agrarian university], 2021, no. 3 (70), pp. 93-104.
2. Kasimova T.M. Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye i prognozirovaniye razvitiya regional'nogo agropromyshlennogo kompleksa [Economic and mathematical modeling and forecasting the development of the regional agro-industrial complex]. Makhachkala, DSU, 2017, 136 p.
3. Obydenov A.Yu. Parametricheskoye upravleniye povedeniyem khozyaystvuyushchikh sub'yektov v usloviyakh ogranichennoy ratsional'nosti [Parametric control of the behavior of economic entities in conditions of limited rationality]. Effektivnoye antikrizisnoye upravleniye [Effective anti-crisis management], 2017, no. 3(102), pp. 58-67.
4. Rudoy Ye.V. Prognozirovaniye nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya otrasli rasteniyevodstva [Forecasting the scientific and technological development of the crop production industry]. Uchastiye agrarnykh vuzov v nauchno-tekhnicheskoye obespecheniye razvitiya sel'skogo khozyaystva: Materialy Vserossiyskogo seminarov soveshchaniya prorektorov po nauchnoy rabote vuzov Minsel'khoza Rossii [Participation of agricultural universities in scientific and technical support for the development of agriculture: Proceedings of the All-Russian seminar of the meeting of vice-rectors for scientific work of universities of the Ministry of Agriculture of Russia]. Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya im. professora I.I. Ivanova [Kursk: Kursk state agricultural academy named after Professor I.I. Ivanov], 2018, pp. 48-55.
5. Gordeyev A.S., Mishin B.S., Gordeyeva N.P. Optimizatsiya v sel'skokhozyaystvennykh tekhnologiyakh [Optimization in agricultural technologies]. St. Petersburg, Lan, 2024, 260 p.
6. Barsukova M.N., Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Ob odnoy modeli optimizatsii proizvodstva agrarnoy produktsii v blagopriyatnykh i neblagopriyatnykh vneshnikh usloviyakh [On one model of optimization of agricultural production in favorable and unfavorable external conditions]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 3 (19), pp. 73-85.
7. Ivanyo Ya.M., Polkovskaya M.N., Sinitsyn M.N. Mnogoetapnyye modeli matematicheskogo programmirovaniya i ikh prilozheniya v sel'skom khozyaystve [Multi-stage models of mathematical programming and their applications in agriculture]. System analysis and mathematical modeling [System analysis and mathematical modeling], 2024, vol. 6, no. 1, pp. 47-59, DOI:10.17150/2713-1734.2024.6(1).47-59.
8. Matematicheskiye i tsifrovyye tekhnologii optimizatsii proizvodstva prodovol'stvennoy produktsii [Mathematical and digital technologies for optimizing food production]. Ivanyo Ya.M. et al.; edited by Ivanyo Ya.M. Molodezhny, Molodezhnyy: Izd-vo Irkutskiy GAU [Irkutsk state agrarian university publishing house], 2021, 219 p.

9. Antonova N.N., Shevchuk L.M. Algoritm resheniya dvukhetapnoy minimaksnoy zadachi s lineynymi ogranicheniyami [Algorithm for solving a two-stage minimax problem with linear constraints]. Ariblizhennyye metody analiza i ikh prilozheniya. Irkutsk: SEI SO AN SSSR [Approximate methods of analysis and their applications. Irkutsk: SEI SB RAS USSR], 1990, pp. 5-10.
10. Zorkal'tsev V.I., Khamisov O.V. Ravnovesnyye modeli v ekonomike i energetike [Equilibrium models in economics and energy]. Novosibirsk, Nauka, 2006, 221 p.
11. Zaytsev A.M., Solodun V.I. Teoreticheskiye osnovy polevykh sevooborotov i metodologiya ikh proyektirovaniya v agrolandshaftnykh sistemakh zemledeliya [Theoretical foundations of field crop rotations and methodology of their design in agro-landscape farming systems]. Irkutsk, LLC "Megaprint", 2016, 256 p.
12. Suvorova M.A. Issledovaniye mnogoetapnykh stokhasticheskikh zadach prinyatiya resheniy: dissertatsiya kand. fiz. - mat. nauk [Study of multi-stage stochastic decision-making problems: dissertation of candidate of physical and mathematical sciences], St. Petersburg, 2004, 108 p.
13. Bendik N.V., Ivanyo Ya.M., Tsyrenzhapova V.V. Matematicheskoye i algoritmicheskoye obespecheniye programmnoy kompleksa "Mnogourovnevnyye modeli prognozirovaniya i planirovaniya agrarnogo proizvodstva" [Mathematical and algorithmic support of the software package "Multi-level models of forecasting and planning of agricultural production"]. Kompleksnoye razvitiye territoriy v usloviyakh tsifrovoy transformatsii : Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu FGBOU VO Irkutskiy GAU [Integrated development of territories in the context of digital transformation: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Irkutsk state agrarian university]. Molodezhnyy: Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. A.A. Ezhevskogo, 2024, pp. 28-34.
14. Druzhinin I.P., Smaga V.R., Shevchin A.N. Dinamika mnogoletnikh kolebaniy rechnogo stoka [Dynamics of long-term fluctuations in river runoff]. Moscow, Nauka, 1991, 176 p.
15. Tyupakov K.E. Osobennosti effektivnogo formirovaniya i vosproizvodstva tekhniko-tekhnologicheskoy bazy rasteniyevodstva [Features of effective formation and reproduction of the technical and technological base of plant growing]. Krasnodar, KubGAU, 2016, 274 p.

Ivanyo Yaroslav Mikhailovich. Doctor of technical sciences, professor. Position: vice-rector for Digital transformation, professor of the Department of informatics and mathematical modeling, Irkutsk state agricultural university named after A.A. Ezhevsky. Main scientific interests: mathematical modeling of various aspects of obtaining food products, taking into account climatic, technogenic and biological risks. AuthorID: 106394, SPIN: 9654-8057, ORCID: 0000-0003-4118-7185, iasa_econ@rambler.ru, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny.

Marina Nikolaevna Polkovskaya. Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of informatics and mathematical modeling Irkutsk state agricultural university named after A.A. Ezhevsky, AuthorID: 712959, SPIN: 4833-9212, ORCID: 0000-0002-9646-1818, polk_mn@mail.ru, Russia, Irkutsk Region, Irkutsk region, Molodezhny.

Sinitsyn Maxim Nikolaevich. Postgraduate student of the Department of informatics and mathematical modeling, institute of economics, Management and applied informatics. Irkutsk state agricultural university named after A.A. Ezhevsky. SPIN: 8214-2809, AuthorID: 1135605, maks.sinitsyn.94@mail.ru, 664038, Russia, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 09/02/2024; approved after reviewing 11/22/2024; accepted for publication 02/11/2025.

УДК 658.51

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.009

Метод моделирования конечных автоматов технологических процессов с применением языка SQL

Холопов Владимир Анатольевич, Клягин Марк Михайлович,
Огорельцев Роман Маркович

МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, Москва, *mmklyagin@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается применение языка SQL для моделирования конечных автоматов в управлении технологическими процессами. Конечные автоматы, как математическая модель, широко используются для автоматизации последовательных операций и управления сложными системами. Здесь предложен подход, при котором реляционная модель данных служит основой для реализации конечного автомата, а язык SQL используется для описания логики переходов между состояниями с помощью таблиц и триггеров. В статье обсуждается процесс проектирования таблиц состояний и переходов, где для каждого состояния фиксируются атрибуты, такие, как временная метка и статус, а переходы описываются условиями и событиями, инициирующими смену состояний. Триггеры, созданные в системе управления базами данных MySQL, автоматизируют логику работы, обеспечивая переходы между состояниями при выполнении заданных условий, что позволяет реализовать модель без необходимости в дополнительных внешних программных средствах. Предложенное решение является гибким и масштабируемым, что упрощает добавление новых состояний и переходов, а также адаптацию системы к изменяющимся требованиям. Применение SQL и реляционной модели также позволяет интегрировать полученную систему с другими аналитическими инструментами, обеспечивая сбор и анализ данных для оптимизации производственных процессов. Такой подход, построенный на SQL и реляционной базе данных, делает систему управления технологическим процессом более эффективной, простой в сопровождении и удобной для последующего анализа, что особенно актуально в условиях современных автоматизированных производств.

Ключевые слова: конечный автомат, технологический процесс, реляционная модель данных, состояние конечного автомата, моделирование конечных автоматов

Цитирование: Холопов В.А. Метод моделирования конечных автоматов технологических процессов с применением языка SQL / В.А. Холопов, М.М. Клягин, Р.М. Огорельцев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 92-103. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.009.

Введение. Конечные автоматы – это математическая модель, представляющая систему, которая может находиться в одном из конечного числа состояний и переходить из одного состояния в другое в зависимости от внешних событий или условий [1]. В технологических процессах конечные автоматы находят широкое применение благодаря своей способности моделировать последовательности операций, автоматизировать управление оборудованием и обеспечивать надежный контроль над состояниями системы.

Конечные автоматы активно используются в различных областях промышленности и производства для управления автоматизированными процессами. Они позволяют формализовать и автоматизировать сложные последовательности действий, обеспечивая точное выполнение технологических операций. Например, в сборочных линиях конечные автоматы могут управлять последовательностью операций по сборке деталей, контролируя этапы подачи компонентов, закрепления, проверки качества и последующей транспортировки готового изделия [2].

В робототехнике конечные автоматы применяются для управления движением роботов и манипуляторов. Например, робот-манипулятор может последовательно выполнять команды, такие, как захват детали, перемещение по заданной траектории и размещение на нужной позиции [3]. Каждое из этих действий можно рассматривать как состояние конечного

автомата, а переходы между состояниями будут определяться датчиками или другими событиями, поступающими от системы управления.

Применение реляционной модели данных, представленной в виде таблиц, для моделирования конечного автомата обладает значительными преимуществами. Реляционная модель базируется на структуре, которая идеально подходит для представления состояний и переходов (рис.1):

- таблица состояний может содержать информацию о каждом состоянии автомата, включая его идентификатор, описание, временную метку и текущий статус (активное или неактивное состояние);
- таблица переходов может представлять переходы между состояниями, храня информацию о начальном и конечном состоянии каждого перехода, а также условиях, при которых переход осуществляется.

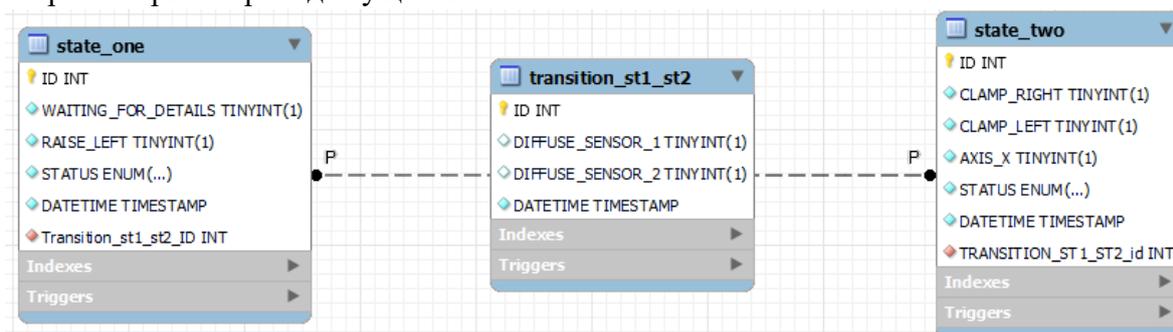


Рис. 1. Табличное представление состояний и переходов конечного автомата

Запросы SQL позволяют легко получать информацию о текущем состоянии системы, истории переходов и условиях, которые привели к этим изменениям. Триггеры и хранимые процедуры могут использоваться для автоматизации переходов между состояниями на основе событий, поступающих в базу данных. Это позволяет настроить логику переходов, управляя процессами в реальном времени. Добавление новых состояний и переходов осуществляется путем простого обновления или добавления новых записей в соответствующие таблицы. Это упрощает модификацию системы при изменении требований или добавлении новых этапов процесса [4, 5]. Расширение функциональности достигается за счет добавления новых атрибутов в таблицы состояний и переходов, что позволяет хранить дополнительную информацию (например, временные метки, параметры оборудования или результаты проверки) [6]. Реляционная модель обеспечивает строгую ссылочную целостность данных (использование внешних ключей), которая позволяет гарантировать корректные связи между состояниями и переходами [7]. Например, можно спроектировать модель так, чтобы переходы всегда ссылались на существующие состояния.

Актуальность применения реляционной модели для моделирования конечных автоматов обусловлена растущими требованиями к автоматизации и интеллектуальному управлению технологическими процессами в различных отраслях промышленности [8]. Конечные автоматы предоставляют естественную модель для описания и автоматизации таких процессов, а использование реляционной модели данных в сочетании с SQL делает эту модель доступной, масштабируемой и совместимой с существующими инфраструктурами. Более того, SQL как язык универсален, широко поддерживается, а реляционные базы данных уже распространены в промышленных системах. Таким образом, применение SQL для моделирования конечных автоматов не только упрощает интеграцию с уже имеющимися системами, но и позволяет разработчикам и инженерам легко настраивать и модифицировать логику автоматизации.

1. Описание технологического процесса и модели конечного автомата. В рамках рассматриваемого технологического процесса осуществляются две основные операции – фрезерование и сборка изделия. Процесс начинается с подачи заготовок на два фрезерных станка, где они обрабатываются для получения деталей двух типов: «крышка» и «основание». Из этих деталей формируется готовое изделие на следующем этапе процесса – этапе сборки [9].

Для выполнения операций задействованы следующие исполнительные механизмы:

- конвейерные ленты – транспортируют заготовки и готовые изделия между различными участками процесса;
- два роботизированных технологических комплекса (РТК);
- фрезерный станок для обработки заготовок (компонент РТК);
- манипулятор для перемещения деталей и их закрепления (компонент РТК);
- пульт управления (ПУ), оснащенный цифровым дисплеем и кнопками «Пуск» и «Стоп» (компонент РТК);
- позиционеры, фиксирующие детали в нужной позиции для сборки;
- двухосевой манипулятор, отвечающий за перемещение и закрепление крышки на основании (рис. 2).

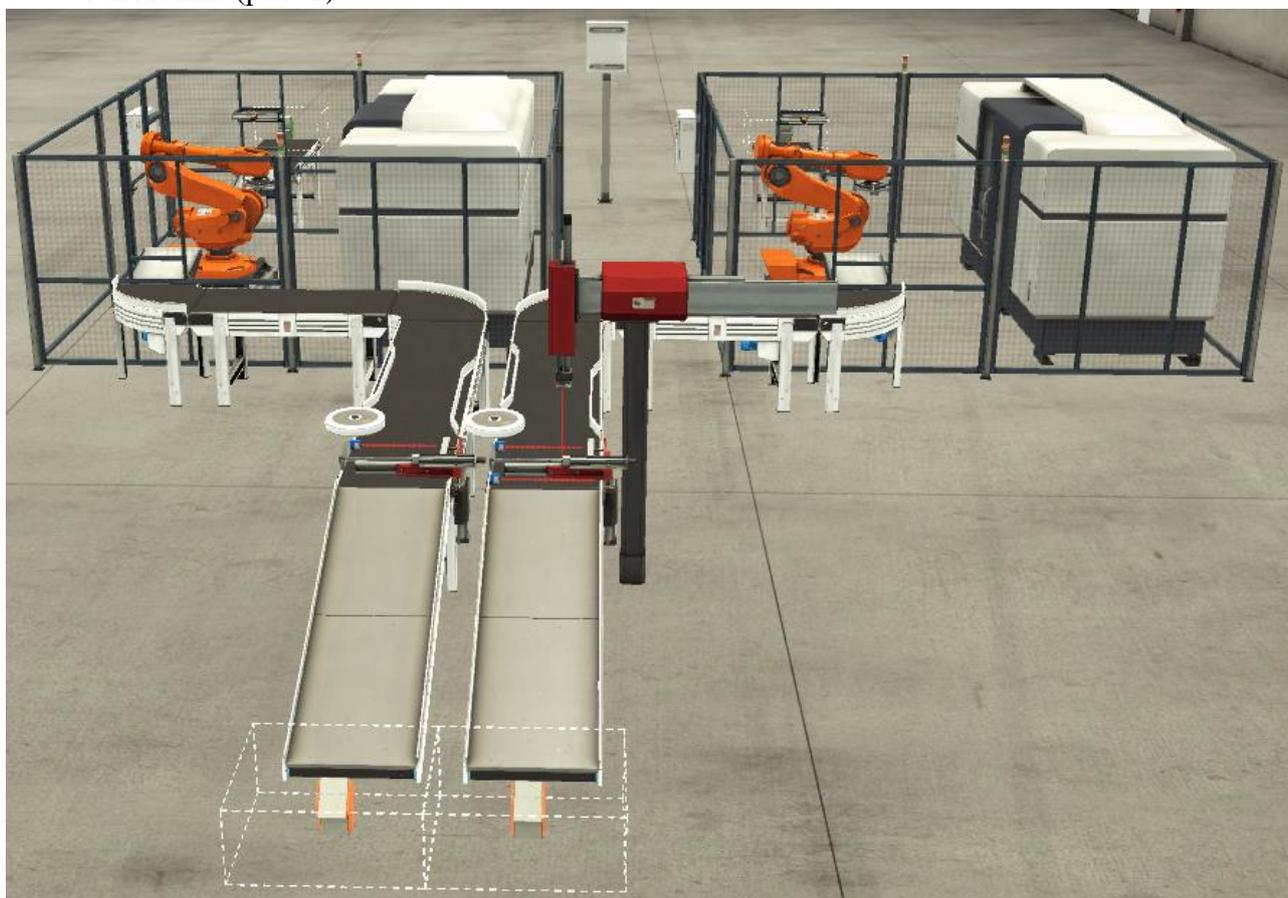


Рис. 2. Общий вид рассматриваемого технологического процесса сборки

Для контроля технологического процесса установлены три оптических датчика, которые используются для:

- контроля положения деталей на конвейерах;
- отслеживания состояния сборочной области;
- проверки завершенности операций на разных этапах (рис. 2).

Для управления технологическим процессом используется пульт управления оператора, который инициирует запуск или остановку всего производства, а также осуществляет контроль над его текущим состоянием. Управление можно разделить на два уровня. Управляющий алгоритм для всей системы – определяет общее поведение производства и отвечает за обработку сигналов с ПУ:

- кнопка «Старт» – при запуске системы производится передача сигнала о старте на все устройства; производство должно обеспечить выпуск 20 сборочных единиц; в случае ошибки процесс автоматически останавливается для устранения сбоев;
- кнопка «Стоп» – при получении сигнала остановки с кнопки все устройства и механизмы (конвейеры, РТК и блок управления сборкой) получают команду на остановку.

Алгоритм управления сборкой – низкоуровневый процесс, непосредственно выполняющий операции сборки. Этот алгоритм подчинен управляющему алгоритму всей системы, что позволяет координировать его действия на каждом этапе.

Алгоритм управления сборкой включает следующие этапы:

- ожидание поступления деталей в сборочную область – детали перемещаются на соответствующие позиции на конвейерах;
- фиксация деталей – позиционеры закрепляют детали в сборочной области;
- перемещение и закрепление крышки – двухосевой манипулятор переносит крышку на основание, находящееся на другой стороне сборочной области;
- удаление готового изделия – готовая сборочная единица удаляется с области сборки с помощью конвейеров;
- подготовка к следующему циклу – система возвращается в исходное состояние и готова к повторению цикла [9].

Алгоритм управления процессом сборки с разграничением состояний конечного автомата представлен на рисунке 3.

Операции в конечном автомате объединяются в состояния на основе логической завершенности или целостности этапов технологического процесса. В одном состоянии могут объединяться операции, которые выполняются последовательно без необходимости проверки промежуточных условий, то есть одна операция сразу следует за другой, пока не будет достигнут конечный результат этого состояния.

Операции, объединенные в одно состояние, выполняются до тех пор, пока не наступит событие, инициирующее переход в следующее состояние. Таким образом, состояние может включать несколько действий, которые не требуют внешнего вмешательства до завершения.

Состояния рассматриваемой системы выделены по наборам состояний, задействованных в процессе сборки управляющих сигналов, переходы описаны в условных блоках. Важно отметить, что не показано состояние q_0 по причине того, что спроектированный автомат является автоматом одного из режимов работы. Можно считать, что для данного автомата q_0 является состоянием готовности к началу работы всей установки, которое остаётся за рамками рассматриваемого алгоритма.

Алгоритм, представленный на рис. 3, циклический, цикл является бесконечным, последовательность переходов и входные сигналы (алфавит конечного автомата) определены, начальным является состояние q_1 . Этот конечный автомат можно описать следующим образом (1):

$$A = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7\}, \delta, q_0, \{q_1\} \quad (1)$$

В начале описано конечное множество состояний, далее функция переходов (таблица 1), начальное состояние и множество допускающих состояний.

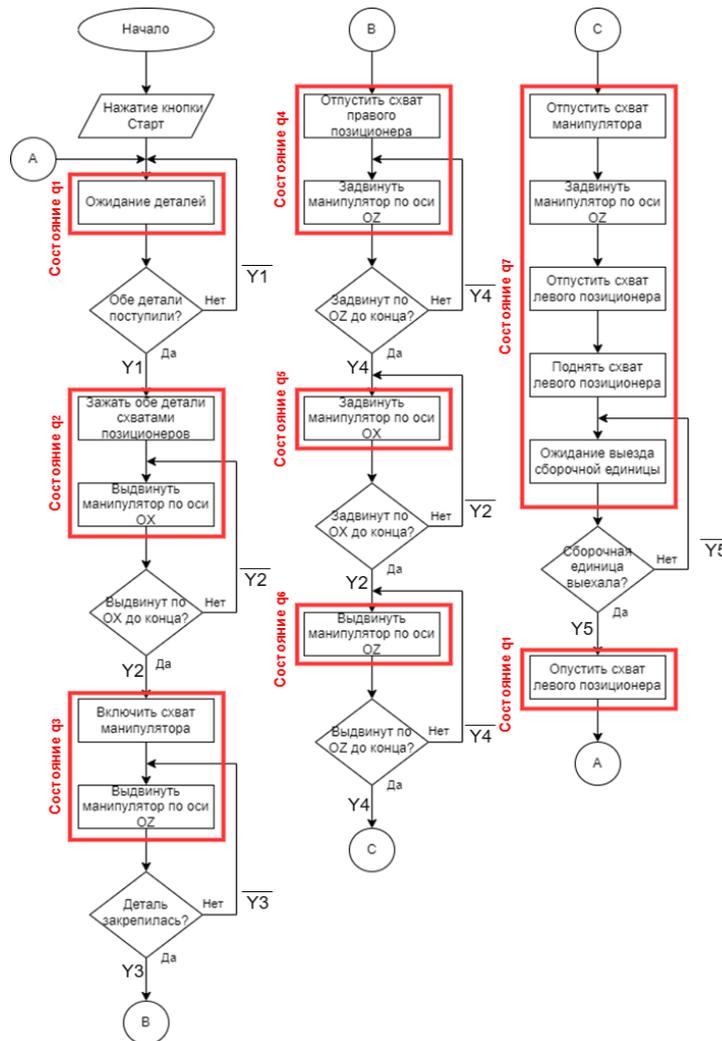


Рис. 3. Алгоритм управления процессом сборки с разграничением состояний конечного автомата

Таблица 1. Функция переходов конченного автомата

F\q	Состояние q ₁	Состояние q ₂	Состояние q ₃	Состояние q ₄	Состояние q ₅	Состояние q ₆	Состояние q ₇
y ₁	q ₂	—	—	—	—	—	—
!y ₁	q ₁	—	—	—	—	—	—
y ₂	—	q ₃	—	—	q ₆	—	—
!y ₂	—	q ₂	—	—	q ₅	—	—
y ₃	—	—	q ₄	—	—	—	—
!y ₃	—	—	q ₃	—	—	—	—
y ₄	—	—	—	q ₅	—	q ₇	—
!y ₄	—	—	—	q ₄	—	q ₆	—
y ₅	—	—	—	—	—	—	q ₁
!y ₅	—	—	—	—	—	—	q ₇

2. Табличное представление состояний конечного автомата. Состояния в конечном автомате представляют различные этапы технологического процесса, начиная с ожидания деталей и заканчивая завершением сборки. Для моделирования состояний создается таблица, которая фиксирует информацию о каждом состоянии, включая текущий статус и временную метку последнего изменения. Для определения логики переходов между состояниями создается таблица, которая фиксирует каждый возможный переход, его условия и временные метки.

При нажатии на кнопку «Старт» начальное состояние (q_1 , «Ожидание деталей») активируется, и система ожидает выполнения условий для перехода. Каждый переход происходит при выполнении соответствующих условий (например, поступление обеих деталей, выдвижение манипулятора), которые фиксируются в триггерах. При выполнении перехода текущее состояние деактивируется, а следующее активируется, что отражается в атрибуте status. Для отслеживания истории переходов данные записываются в соответствующую таблицу, что позволяет анализировать выполненные действия и контролировать корректность работы системы.

Для удобства восприятия была выполнена декомпозиция таблиц на каждое состояние и переход конечного автомата (рис. 4).

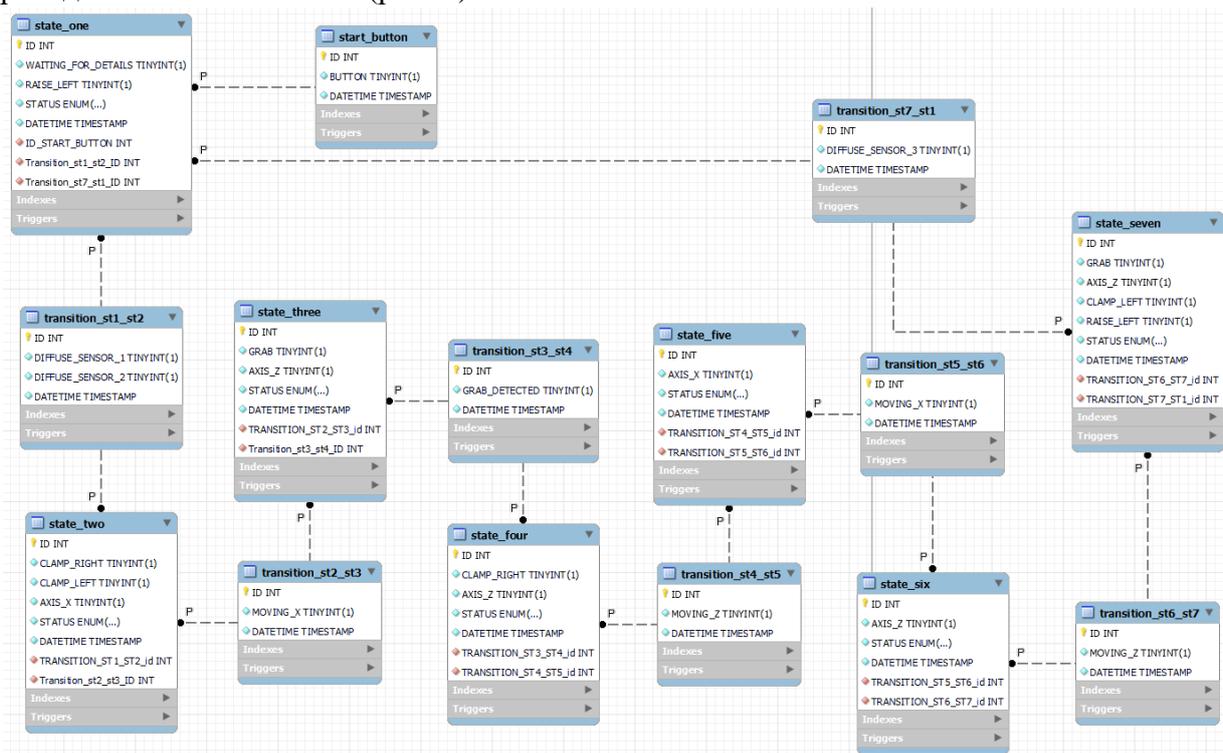


Рис. 4. Физическая реляционная модель состояний и переходов конечного автомата

Структура таблиц будет рассмотрена на примере состояния q_2 . Все состояния обладают обязательными атрибутами временной метки (datetime) и статуса (status), который может принимать значения «Active» или «Inactive». В соответствии с алгоритмом (рис. 3), в состоянии q_2 позиционеры фиксируют детали для точного позиционирования на конвейере, после чего манипулятор выдвигается по оси OX. Таким образом, в таблице необходимо учитывать информацию о положении захватов правого и левого позиционеров (clamp_right, clamp_left), а также положение манипулятора по оси OX (axis_x). Это состояние должно быть связано как с предыдущим, так и с последующим состояниями, поэтому в таблице содержатся внешние ключи, связывающие переходы из q_1 в q_2 и из q_2 в q_3 . (листинг 1).

Листинг 1. Создание таблицы для второго состояния конечного автомата

```
-- Второе состояние
CREATE TABLE State_Two (
  id int auto_increment,
  clamp_right tinyint(1),
  clamp_left tinyint(1),
  axis_x tinyint(1),
  status enum ('Active', 'Inactive') default 'Inactive',
  datetime timestamp,
  transition_st1_st2_id int,
```

```
transition_st2_st3_id int,  
primary key (id),  
foreign key (transition_st1_st2_id) references transition_st1_st2(id)  
on delete cascade  
on update cascade  
);  
ALTER TABLE State_Two  
add foreign key (transition_st2_st3_id) references transition_st2_st3(id)  
on delete cascade on update cascade;
```

Для объяснения структуры таблицы переходов рассмотрим переход из состояния q_2 в состояние q_3 (рис. 3). Каждый переход включает обязательный атрибут временной метки (datetime). Согласно алгоритму, переход в состояние q_3 возможен при подаче сигнала от датчика, подтверждающего полное выдвижение манипулятора по оси ОХ. В связи с этим в таблице добавляется атрибут, отражающий движение манипулятора по оси ОХ (moving_x) (листинг 2).

Листинг 2. Создание таблицы для перехода из второго состояния в третье

```
-- Переход из второго состояния в третье  
CREATE TABLE Transition_st2_st3 (  
id int auto_increment,  
moving_x tinyint(1),  
datetime timestamp,  
primary key (id)  
);
```

Логика функционирования конечного автомата реализуется с помощью триггеров, созданных в системе управления базами данных (СУБД) MySQL. Они могут автоматически реагировать на изменения в таблицах состояний и переходов, что позволяет создать автономную систему управления без необходимости дополнительного программирования на внешних языках [10]. Например, триггеры типа after update или after insert могут отслеживать изменения статусов состояний и, в зависимости от этого, выполнять соответствующие переходы. Это позволяет эффективно описать логику переходов, минимизируя вероятность ошибок и снижая нагрузку на оператора. Триггеры также помогают обеспечить целостность и согласованность данных. Переходы между состояниями могут быть настроены так, что они срабатывают только при выполнении определенных условий, что исключает возможность случайного или некорректного перехода. Таким образом, триггеры позволяют гарантировать, что система всегда находится в одном из допустимых состояний и выполняет переходы в строгом соответствии с заданной логикой.

В данном примере используется триггер типа after update, который управляет переходом из третьего состояния в четвертое. Этот триггер встроен в структуру таблицы и применяет ветвление с помощью конструкции if/else. Если третье состояние завершено успешно и датчик, контролирующий состояние схвата манипулятора, подает сигнал, атрибут status в состоянии q_4 устанавливается в значение «Active», а временная метка обновляется в соответствующей строке. В противном случае атрибут status принимает значение «Inactive». Таким образом, обеспечивается переход системы из состояния q_3 в q_4 (листинг 3).

Листинг 3. Создание триггера для описания логики перехода из состояния q_3 в q_4

```
CREATE TRIGGER `transition_st3_st4_AFTER_UPDATE` AFTER UPDATE ON  
`transition_st3_st4` FOR EACH ROW BEGIN  
IF (NEW.GRAB_DETECTED=1) THEN  
UPDATE State_four  
SET STATUS = 'Active',  
DATETIME = NOW()  
WHERE NEW.ID = TRANSITION_ST3_ST4_id;  
ELSE  
UPDATE State_four
```

```
SET STATUS = 'Inactive',  
DATETIME = NOW()  
WHERE NEW.ID = TRANSITION_ST3_ST4_id;  
END IF;  
END
```

Заключение. В статье рассмотрен метод применения языка SQL для моделирования конечных автоматов в контексте управления технологическими процессами. Конечные автоматы, являясь мощной математической моделью, позволяют формализовать и структурировать последовательности операций, обеспечивая надежное управление состояниями системы и переходами между ними. Использование реляционной модели данных для представления состояний и переходов между ними позволяет создать гибкую и прозрачную систему управления, способную к адаптации и масштабированию в зависимости от потребностей производства. Реализация конечного автомата с использованием SQL в СУБД обеспечивает не только структурированное хранение и обработку данных о текущих состояниях и переходах, но и интеграцию с реальными исполнительными механизмами и датчиками. SQL-команды и структуры, такие, как таблицы состояний и переходов, а также триггеры и хранимые процедуры, дают возможность моделировать сложные технологические процессы, автоматизировать их выполнение и минимизировать ошибки, вызванные человеческим фактором.

Применение триггеров в MySQL для автоматизации переходов между состояниями продемонстрировало, как можно эффективно реализовать логику переходов на уровне базы данных. Такой подход позволяет быстро реагировать на события, поступающие от датчиков и оборудования, обеспечивая непрерывность и последовательность выполнения операций. В статье рассмотрена структура триггеров для управления состояниями и переходами на примере технологического процесса сборки изделий, что иллюстрирует практическое применение теоретических основ конечных автоматов в автоматизированных системах управления. Кроме того, использование реляционной базы данных в качестве платформы для моделирования конечного автомата открывает возможности для интеграции системы управления с другими информационными и аналитическими системами [11, 12]. Данные о текущих и прошлых состояниях, переходах и ошибках могут использоваться для анализа производственных процессов, выявления узких мест и оптимизации работы оборудования [13]. Таким образом, реализация конечного автомата на SQL предоставляет не только инструменты для управления технологическим процессом, но и данные для его совершенствования.

Перспективы использования SQL для моделирования конечных автоматов включают расширение возможностей для поддержки более сложных процессов, автоматизацию обработки ошибок и создание интерфейсов для мониторинга и управления в реальном времени [14]. Применение SQL позволяет обеспечить простоту и стандартизацию системы управления, а также способствует интеграции с существующими производственными инфраструктурами. Таким образом, подход к моделированию конечных автоматов с использованием SQL является универсальным, надежным и масштабируемым решением для управления технологическими процессами. Это решение не только снижает издержки и повышает точность управления, но и позволяет адаптировать систему к новым условиям. Предлагаемый подход может стать основой для создания цифровых двойников производственных процессов [15], обеспечивая более высокий уровень контроля, эффективности и гибкости в условиях современной промышленности.

Список источников

1. Литвинов А.И. Конечный цифровой автомат Мили / А.И. Литвинов, С.О. Бучнев // Новые аспекты моделирования систем и процессов: Материалы Международной научно-практической конференции,

- Воронеж, 26 мая 2023 года / Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2023. – С. 540-544. – EDN:MROAPH.
2. Канахин В.С. Применение теории конечных автоматов при проектировании дискретных САУ цикловыми технологическими процессами в пищевой промышленности / В.С. Канахин, В.Н. Гудинов // ИТ. Наука. Креатив. Материалы I Международного форума: в 5-ти томах. Том 1. Автоматизация, мехатроника, информационные технологии, Омск, 14-16 мая 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательско-книготорговый центр Колос-с», 2024. – С. 191-199. – EDN:CIFYVI.
 3. Yan Y., Xu P., Yue J., Chen Z. Robust control: from continuous-state systems to finite state machines. IEEE Transactions on automation science and engineering, 2024, vol. 21, iss. 2, p. 2156-2163, DOI:10.1109/TASE.2024.3362975.
 4. Благовещенский И.Г. Анализ проблемы разработки и использования в кондитерской промышленности цифровых двойников / 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: Закрытое акционерное общество “Университетская книга”, 2023. – С. 148-154. – EDN:IUAWRL.
 5. Носенко А.С. Место цифровых двойников в цифровизации кондитерской промышленности / А.С. Носенко, В.Г. Благовещенский, И.Г. Благовещенский и др. // Роговские чтения. Секция «Автоматизация технологических процессов и производств»: сборник докладов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 30 ноября 2023 года. – Курск: Закрытое акционерное общество “Университетская книга”, 2023. – С. 368-374. – EDN:QHKIRK.
 6. Клягин М.М. Особенности проектирования баз данных производственных процессов / М.М. Клягин, И.Ю. Зайцев // Концепция устройства современного мира в эпоху цифры: сборник научных трудов по материалам Международного научного форума, Москва, 15 декабря 2023 года. – Москва: Алеф, 2023. – С. 93-102. – DOI:10.26118/1300.2023.63.84.006. – EDN:JAFRXO.
 7. Холопов В.А. Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса / В. А. Холопов, С. В. Антонов, Е. В. Курнасов, Е. Н. Каширская // Вестник машиностроения. – 2019. – № 9. – С. 37-43. – EDN:JAJ SJU.
 8. Холопов В.В. Информационно-управляющая система для управления технологическим процессом посредством цифрового двойника / В.А. Холопов, Е.Н. Каширская, Ф.В. Соклаков, А.Б. Сухатерин // Промышленные АСУ и контроллеры, 2020. – №8. – С. 46-50. – DOI:10.25791/asu.8.2020.1211. – EDN:RNQQPK.
 9. Огорельцев Р.М. Моделирование автоматизированных систем: Практикум: учебное пособие / Р.М. Огорельцев. – Москва: РТУ МИРЭА, 2023. – 86 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/331616> (дата обращения: 28.10.2024).
 10. Рыбанов А.А. Математическая модель динамики роста реляционной базы данных / А.А. Рыбанов, О.В. Свиридова, Филиппова Е.М. и др. // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки, 2020. – №4(271). – С. 53-59. – EDN:RZMHYF.
 11. Tao F., Zhang H., Liu A., et al. Digital twin in industry: state-of-the-art. IEEE Transactions of industrial informatics, 2019, vol. 15, iss. 4, p. 2405-2415, DOI:10.1109/TII.2018.2873186.
 12. Холопов В.А. Применение информационных технологий при решении задач мониторинга выполнения производственных процессов в концепции Индустрии 4.0 / В.А. Холопов, И.С. Гантц, С.В. Антонов // Промышленные АСУ и контроллеры, 2019. – № 4. – С. 49-58. – EDN:ZCUHZR.
 13. Каширская Е.Н. Построение производственных информационных систем моделирования технологических процессов на основе цифрового двойника / Е.Н. Каширская, В.А. Холопов // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2022. – № 11. – С. 518-524. – DOI:10.36652/0202-3350-2022-23-11-518-524. – EDN:EDHOVG.
 14. Антонов С.В. Функциональное моделирование системы мониторинга технологических процессов на основе концепции цифрового двойника / С.В. Антонов // Автоматизация. Современные технологии, 2023. – Т. 77. – № 8. – С. 345-351. – DOI:10.36652/0869-4931-2023-77-8-345-351. – EDN:WUQH VY.
 15. Rayhana R., Bai L., Xiao G., et al. Digital twin models: functions, challenges and industry applications. IEEE, 2024, vol. 8, p. 282-321, DOI:10.1109/JRFID.2024.3387996.

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, Holorov@gmail.com, 119454, Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

Клягин Марк Михайлович. Старший преподаватель кафедры промышленной информатики МИПЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией и управлением технологических процессов и производств в промышленности. AuthorID: 1098969, SPIN: 9615-9767, mmklyagin@gmail.com, 119454, Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

Огорельцев Роман Маркович. Ассистент кафедры промышленной информатики МИПЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией и управлением технологических процессов и производств в промышленности. AuthorID: 1247579, SPIN: 4579-5530. ogorelcev@mirea.ru, 119454, Россия, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

UDC 658.51

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.009

A Method for modeling Finite State Machines in technological processes using SQL

Vladimir A. Kholopov, Mark M. Klyagin, Roman M. Ogorelcev

MIREA – Russian technological university,
Russia, Moscow, mmklyagin@gmail.com

Abstract. This paper explores the application of SQL for modeling finite state machines in the management of technological processes. Finite state machines, as a mathematical model, are widely used for automating sequential operations and managing complex systems. Here, a method is proposed in which the relational data model serves as the foundation for implementing a finite state machine, and SQL is used to define the transition logic between states through tables and triggers. The article discusses the design of state and transition tables, where each state is characterized by attributes such as timestamp and status, and transitions are defined by conditions and events that trigger state changes. Triggers created in the MySQL database environment automate the system's logic, enabling state transitions when specified conditions are met, thereby implementing the model without the need for additional external software. The proposed solution is flexible and scalable, simplifying the addition of new states and transitions, as well as adapting the system to evolving requirements. The use of SQL and the relational model also facilitates integration with other analytical tools, enabling data collection and analysis for process optimization. This SQL-based approach to finite state machine modeling in a relational database makes the control system for technological processes more efficient, easy to maintain, and conducive to further analysis, which is particularly relevant in modern automated production environments.

Keywords: Finite State Machine, technological process, relational data model, Finite State Machine state, Finite State Machine modeling

References

1. Litvinov A.I., Buchnev S.O. Konechnyy tsifrovoy avtomat Mili [Mealy finite state digital machine]. Novyye aspekty modelirovaniya sistem i protsessov: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Voronezh, 26 maya 2023 goda, Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet im. G. F. Morozova [New aspects of system and process modeling: Proceedings of the International scientific and practical conference, Voronezh, May 26, 2023, Voronezh state forestry engineering university named after G.F. Morozov], 2023, p. 540-544, EDN:MROAPH.
2. Kanakhin V.S., Gudinov V.N. Primeneniye teorii konechnykh avtomatov pri proyektirovanii diskretnykh SAU tsiklovymi tekhnologicheskimi protsessami v pishchevoy promyshlennosti [Application of finite state theory in the design of cyclic control systems for technological processes in the food industry]. IT. Nauka. Kreativ. Materialy I Mezhdunarodnogo foruma: v 5-ti tomakh. Tom 1. Avtomatizatsiya, mekhatronika, informatsionnyye tekhnologii, Omsk, 14-16 maya 2024 goda, Moskva: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'sko-knigotorgovyy tsentr Kolos-s" [IT. Science. Creativity. Proceedings of the I International Forum: in 5 volumes. vol. 1. Automation, Mechatronics, Information Technologies, Omsk, May 14-16, 2024, Moscow: Publishing and Book Trading Center Kolos-s, LLC], 2024, p. 191-199, EDN:CIFYVI.

3. Yan Y., Xu P., Yue J., Chen Z. Robust control: from continuous-state systems to finite state machines. *IEEE Transactions on automation science and engineering*, 2024, vol. 21, iss. 2, p. 2156-2163, DOI:10.1109/TASE.2024.3362975.
4. Blagoveshchensky I.G., Blagoveshchensky V.G., Kholopov V.A., et al. Analiz problemy razrabotki i ispol'zovaniya v konditerskoy promyshlennosti tsifrovyykh dvoynikov [Analysis of the problem of digital twin development and use in the confectionery industry]. *Rogovskiye chteniya. Sektsiya "Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv": sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*, Moskva, 30 noyabrya 2023 goda, Kursk: Zakrytoye aktsionernoye obshchestvo "Universitetskaya kniga" [Rogovsky readings. Section "Automation of technological processes and production": collection of reports from the scientific and practical conference with international participation, Moscow, November 30, 2023, Kursk: Closed joint stock company "University Book"], 2023, p. 148-154, EDN:IUAWRL.
5. Nosenko A.S., Blagoveshchensky I.G., Blagoveshchensky V.G., et al. Mesto tsifrovyykh dvoynikov v tsifrovizatsii konditerskoy promyshlennosti [The Role of digital twins in the digitalization of the confectionery industry]. *Rogovskiye chteniya. Sektsiya "Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv": sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*, Moskva, 30 noyabrya 2023 goda. – Kursk: Zakrytoye aktsionernoye obshchestvo "Universitetskaya kniga" [Rogovsky readings. Section "Automation of technological processes and production": collection of reports from the scientific and practical conference with international participation, Moscow, November 30, 2023, Kursk: Closed joint stock company "University Book"], 2023, p. 368-374, EDN:QHKIRK.
6. Klyagin M.M., Zaitsev I.Yu. Osobennosti proyektirovaniya baz dannykh proizvodstvennykh protsessov [Features of database design for production processes]. *Kontseptsiya ustroystva sovremennogo mira v epokhu tsifry: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma*, Moskva, 15 dekabrya 2023 goda, Moskva: Alef [The concept of modern world design in the digital era: collection of scientific papers from the International scientific forum, Moscow, December 15, 2023, Moscow: Alef], 2023, p. 93-102, DOI:10.26118/1300.2023.63.84.006, EDN:JAFRXO.
7. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kurnasov E.V., Kashirskaya E.N. Razrabotka i primeneniye tsifrovogo dvoynika mashinostroitel'nogo tekhnologicheskogo protsessa [Development and application of a digital twin for machine-building technological processes]. *Vestnik mashinostroyeniya* [Mechanical engineering bulletin], 2019, no. 9, p. 37-43, EDN:JAJJSU.
8. Kholopov V.V., Kashirskaya E.N., Soklakov F.V., Sukhateryn A.B. Informatsionno-upravlyayushchaya sistema dlya upravleniya tekhnologicheskimi protsessom posredstvom tsifrovogo dvoynika [Information control system for technological process management using digital twin]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial ACS and controllers], 2020, no. 8, p. 46-50, DOI:10.25791/asu.8.2020.1211, EDN:RNQQPK..
9. Ogoreltsev R.M. Modelirovaniye avtomatizirovannykh sistem: Praktikum: uchebnoye posobiye [Modeling of automated systems: Workshop: tutorial]. Moskva: RTU MIREA [Moscow: RTU MIREA], 2023, 86 p., available at: <https://e.lanbook.com/book/331616> (accessed: 10/28/2024).
10. Rybanov A.A., Sviridova O.V., Filippova E.M., et al. Matematicheskaya model' dinamiki rosta relyatsionnoy bazy dannykh [Mathematical model of relational database growth dynamics]. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Yestestvenno-matematicheskiye i tekhnicheskkiye nauki* [Bulletin of adygea state university. Series 4: natural and technical sciences], 2020, no. 4(271), p. 53-59, EDN:RZMHYF.
11. Tao F., Zhang H., Liu A., et al. Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Transactions of industrial informatics*, 2019, vol. 15, iss. 4, p. 2405-2415, DOI:10.1109/TII.2018.2873186.
12. Kholopov V.A., Gantz I.S., Antonov S.V. Primeneniye informatsionnykh tekhnologiy pri reshenii zadach monitoringa vypolneniya proizvodstvennykh protsessov v kontseptsii Industrii 4.0 [The application of information technologies in monitoring production processes within industry 4.0]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial ACS and controllers], 2019, no. 4, p. 49-58, EDN:ZCUHZR.
13. Kashirskaya E.N., Kholopov V.A. Postroyeniye proizvodstvennykh informatsionnykh sistem modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov na osnove tsifrovogo dvoynika [Building Production information systems for technological process modeling based on digital twin]. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii* [Assembly in mechanical engineering, instrumentation], 2022, no. 11, p. 518-524, DOI:10.36652/0202-3350-2022-23-11-518-524, EDN:EDHOVG.
14. Antonov S.V. Funktsional'noye modelirovaniye sistemy monitoringa tekhnologicheskikh protsessov na osnove kontseptsii tsifrovogo dvoynika [Functional Modeling of a technological process monitoring system based on the digital twin concept]. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], 2023, vol. 77, no. 8, p. 345-351, DOI:10.36652/0869-4931-2023-77-8-345-351, EDN:WUQHVV.
15. Rayhana R., Bai L., Xiao G., et al. Digital twin models: functions, challenges and industry applications. *IEEE*, 2024, vol. 8, p. 282-321, DOI:10.1109/JRFID.2024.3387996.

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, Russia, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue.

Klyagin Mark Mikhailovich. 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: 1098969, SPIN: 9615-9767, mmklyagin@gmail.com, 119454, Russia, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue.

Ogorelcev Roman Markovich. Teacher 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: 1247579, SPIN: 4579-5530, ogorelcev@mirea.ru, 119454, Russia, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 04.02.2025; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 10/29/2024; approved after reviewing 02/04/2025; accepted for publication 02/11/2025.

Цифровая экономика и управление

УДК 004.41+004.89

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.010

Технология цифровизации управления безопасностью территорий

Ничепорчук Валерий Васильевич, Кобыжакова Светлана Владимировна

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, valera@icm.krasn.ru

Аннотация. Предложена структура информационных ресурсов для решения разноплановых задач оперативного и стратегического управления природно-техногенной безопасностью территорий. Определены процессы информационной поддержки управления с использованием онтологии. Показан эффект цифровой трансформации процессов принятия решений на основе интеллектуальной обработки данных комплексного мониторинга.

Ключевые слова: интеллектуальная поддержка управления, систематизация информационных ресурсов и процессов, цифровизация управления

Цитирование: Ничепорчук В.В. Технология цифровизации управления безопасностью территорий / В.В. Ничепорчук, С.В. Кобыжакова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1 (37). – С. 104-113. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.010.

Введение. Темпы автоматизации территориального управления, в отличие от бизнеса и производства, пока не соответствуют плановым показателям стратегии перехода к цифровой экономике [1]. Среди множества причин выделим излишнюю бюрократизацию процессов обработки данных, слабая формализация которых затрудняет применение современных технологий моделирования ситуаций, методов машинного обучения, прогнозирования результатов принятых решений. В отличие от управления техническими системами с детерминированными процессами, большинство решений на территориальном уровне принимается в условиях частичной неопределённости факторов и вероятностного характера ожидаемых результатов. Сохраняется дефицит данных комплексного мониторинга, недостаточно формализован учёт специфики человеческого фактора, его роли на разных этапах процесса информационной поддержки управления: сбора данных, их трансформации в решения; оценки эффекта управления, контроля качества решений [2].

Автоматизированные системы управления, как направление развития информатизации, развиваются с середины прошлого века. Передовые решения на основе экосистем работают в финансовой сфере [3]. Совершенствуются методы принятия решений по комплексному развитию территорий [4]. Машинное формирование решений при оперативном реагировании на чрезвычайные ситуации (ЧС) реализовано для некоторых видов стихийных бедствий и техногенных катастроф [5]. Управление большими системами в условиях дефицита времени на осмысление ситуации и сбор дополнительной информации, большой цены ошибочных решений, требует внедрения информационно-справочных и консультативных систем. Сервисы оценки динамики опасных факторов и последствий их реализации, оценки уязвимости защищаемых объектов, готовности сил и средств экстренного реагирования реализуются, как правило, для нескольких видов ситуаций на двух-трёх пилотных территориях [6, 7]. Не решена основная проблема – сбор и перманентная актуализация больших объёмов гетерогенных данных приемлемого качества [8]. По этой причине многие системы ситуационного моделирования имеют короткий жизненный цикл. Утрачивается детальность ранее собранных информационных ресурсов.

Информационная поддержка принятия стратегических решений, направленных на предупреждение ЧС, в настоящее время ограничивается статистической обработкой данных о событиях либо характеристиках территорий без комплексного рассмотрения

сложившейся ситуации и её прогнозных параметров. Дефицит размеченных данных затрудняет алгоритмизацию процессов формирования решений по управлению территориями. Как показывает практика применения интеллектуальных систем в медицине, энергетике, на транспорте, наличие структурированных информационных ресурсов повышает эффективность не только машинного формирования решений в условиях частичной неопределённости, но и качество функционирования отрасли в целом [9-12].

Трансформация бизнес-процессов государственного управления является определяющим фактором разработки и эксплуатации систем поддержки принятия решений. Сложность цифровизации территориального управления заключается в необходимости гармонизации нормативно-правовой базы, определяющей стандарты управления и требования к решениям, порядок принятия согласованных решений. Это характерно как при ликвидации масштабных ЧС, так и при формировании решений по защите территорий, реализуемых в длительной перспективе. Формализация описаний процессов и объектов позволяет достичь синергетического эффекта решения технических и организационных проблем, максимального использования преимуществ цифровизации управления.

В статье рассмотрена универсальная структура информационных ресурсов для информационной поддержки управления широким кругом задач обеспечения природно-техногенной безопасности территорий. Компактность представления сущностей упрощает реализацию независимых сервисов получения, обработки и представления данных, работающих по единой схеме. Использование паттернов представления данных и связанных с ними технологий обработки для разных задач управления позволяет системно реализовать управление мероприятиями стратегии повышения безопасности населения территорий [13]. Выполнена алгоритмизация процессов поддержки принятия решений с использованием организационной модели управления.

1. Ресурсы интеллектуальной системы. Для поддержки планирования и реализации оперативных и предупредительных мероприятий необходимо и достаточно информационных ресурсов, структура которых показана на рисунке 1. Согласно [14], задачи ситуационного управления требуют интеграции гетерогенных данных, получаемых из разных источников. Анализ однородной информации (например, только каталогов событий) не позволяет сформировать конкретные управленческие решения на основе оценок рисков. Усложнение предлагаемой структуры также нецелесообразно, поскольку смежные задачи управления, такие, как мониторинг обстановки, управление в режиме повышенной готовности при угрозе чрезвычайных ситуаций (ЧС) можно представить, как экземпляр структуры, без потерь информативности.

Общие части реестров объектов и событий показаны жёлтым фоном; белым – характеристики, изменяющиеся в зависимости от видов ситуаций и масштаба защищаемых объектов (здание, поселение, территория). Зелёный фон показывает сущности, на основе которых формируются управленческие решения. Пространственная привязка позволяет оперативно визуализировать результаты ситуационного и аналитического моделирования. Логическую целостность данных обеспечивают связи через первичные (РК) и вторичные (ФК) ключи. Знаком «+» отмечены показатели, на основе которых строятся аналитические модели. Содержание справочников (знак «-»), таких, как «Вид события», «Категория объекта», «Вид мероприятия» определено нормативно [15].

Атрибуты событий E позволяют проводить оценку и картографирование рисков традиционными методами [16]. В число неблагоприятных факторов включаются неуправляемые (сложные погодные условия), а также факторы, для устранения которых необходимо проведение предупредительных мероприятий PA : например, к условиям, осложняющим тушение пожаров, относят удалённость пожарных частей, водоисточников,

загромождение проездов, наличие взрывоопасных и легко воспламеняющихся материалов/веществ, степень осведомлённости людей о мерах пожарной безопасности и навыках поведения в ЧС.

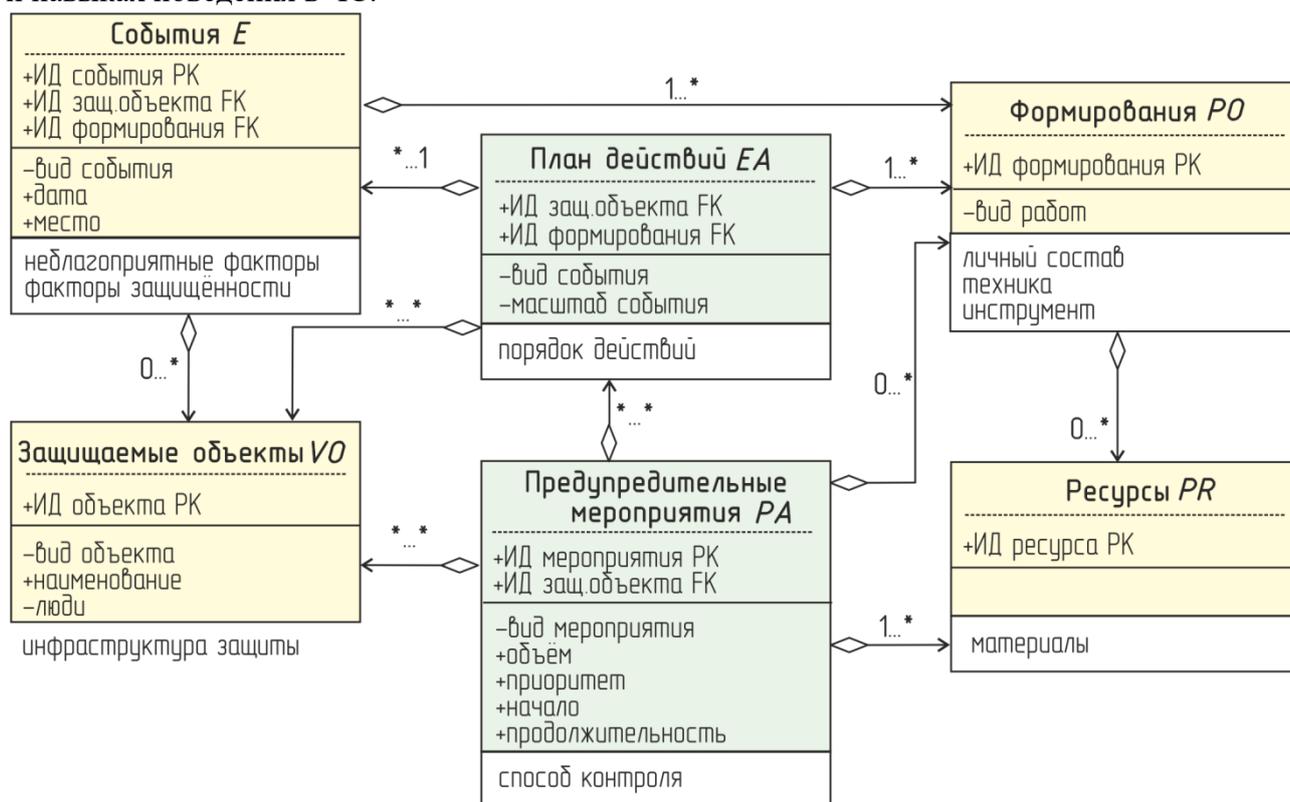


Рис. 1. Базовая структура информационных ресурсов

Реализация барьеров защиты в результате проведения предупредительных мероприятий позволяет более эффективно ликвидировать опасную ситуацию и её последствия, снизить потери. При этом не всегда корректно сопоставлять материальный ущерб и затраты на предупреждение в силу субъективности оценок, долгосрочных изменений внешних факторов, определяющих безопасность объектов и территорий.

Реестр защищаемых объектов *VO* содержит данные о населённых пунктах, СНТ¹, а также сведения о находящихся в них объектах надзора, потенциально опасных производствах, учреждениях с массовым пребыванием людей и т.п. В зависимости от положения в иерархии территориального управления лиц, принимающих решения, система предоставляет информацию разной степени детализации, но примерно одинакового объёма.

Реестр формирований *PO* содержит сведения обо всех формированиях, участвующих в реагировании на *E*, включая спасателей, профессиональных и добровольных пожарных, волонтёрах, а также подразделений министерств, ведомств, организаций. Это накладывает ограничение на ведение каталога событий – силы и средства могут выбираться из списка, а не регистрироваться одновременно с событиями *E*.

Данные о ресурсах *PR* включают расходные материалы, ГСМ, продукты, медикаменты, средства обеспечения жизнедеятельности пострадавших, использующиеся как в режиме ЧС, так и при проведении предупредительных мероприятий. Для контроля установленных нормативов в *PR* и *PO* используются справочники критериев, разработанные на основе нормативных документов.

План действий *EA* содержит описание прецедентов в виде продукций. Совместный анализ описания процессов в *EA* и *E* используется для устранения «нестыковок» и пробелов в

¹ Садовое некоммерческое товарищество

планировании оперативных мероприятий. Прецедентная база знаний описывает процессы ликвидации опасных факторов и последствий ЧС, организацию защиты и жизнеобеспечения населения в виде последовательности атомарных процессов, логически увязанных метриками. Это позволяет конструировать сценарии на основе типовых паттернов с использованием графического и текстового интерфейсов [17].

Результаты решения задач предупреждения отражены в таблице «Превентивные мероприятия» *РА*. Формирование базы реализованных и спланированных работ позволит использовать её в качестве обучающей выборки рекомендательных сервисов, для поиска по аналогам, а также как электронное пособие для лиц, принимающих решения.

Данные реестров имеют картографическую привязку, позволяющую строить карты распределения рисков и динамики ситуаций. Инструменты пространственного анализа могут использоваться для верификации распределения опасных факторов, определения зон ответственности формирований, оценки последствий ЧС для *ВО*. Для снижения трудозатрат на создание интеллектуальной системы территориального управления целесообразно развёртывание аналитических сервисов на базе геопортала.

2. Процессы формирования решений. Представление связей между сущностями в виде онтологии (рисунок 2) позволило спроектировать аналитические и ситуационные модели для формирования решений.

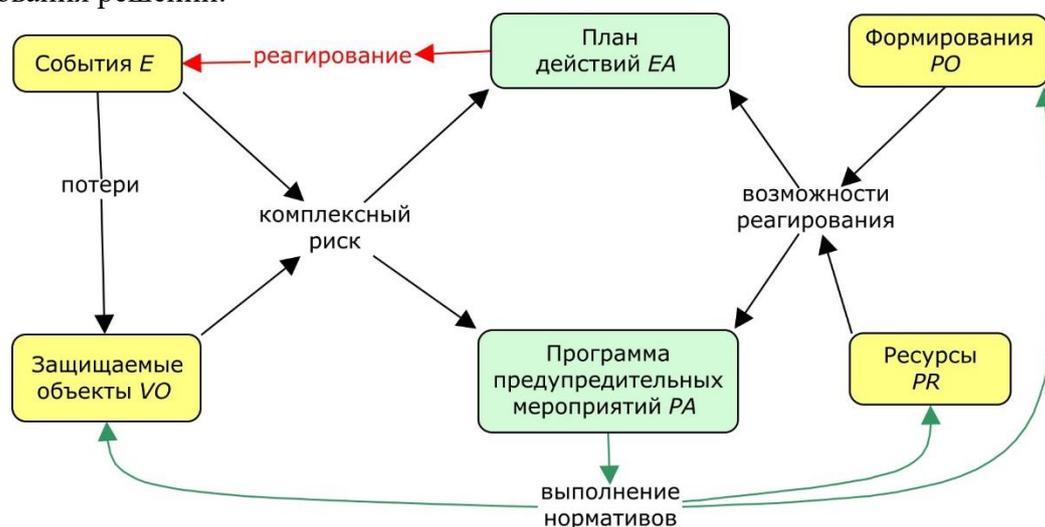


Рис. 2. Онтология связей структуры информационных ресурсов

Информационная поддержка оперативного и стратегического управления базируется на результатах оценок комплексных рисков и уровня готовности к ликвидации опасных ситуаций [18, 19]. Представление этих показателей в одномерной числовой шкале недостаточно для обоснования управленческих решений. При реализации в интеллектуальной системе такие оценки представляются в виде:

- условий реализации процессов реагирования *EA*. Масштабность, последовательность и длительность работ по ликвидации ситуаций, их последствий являются числовыми показателями, определяемым на основе прецедентов либо экспертно;
- списка критериев соответствия показателей норме для вычисления приоритетности предупредительных мероприятий *РА*. При отсутствии утверждённых нормативных значений они рассчитываются путём кластеризации имеющихся данных. Например, в паспортах сельских населённых пунктов (*ВО*) время реагирования на пожар составляет от 10 до 120 минут. Учитывая время горения деревянного дома, полагаем, что поселения с временем прибытия более 20 минут относятся к зоне неприемлемого риска. Караулы федеральной противопожарной службы локализуют очаги возгорания, а загоревшиеся

строения не подлежат восстановлению. Удалённость VO является критерием создания добровольных формирований PO , их оснащения первичными средствами пожаротушения. Наличие безводных зон в поселениях и садоводческих товариществах также считается триггером для PA .

Обоснование решений по проведению превентивных мероприятий применяется в отношении сущностей ($PA \rightarrow VO$; $PA \rightarrow PO$; $PA \rightarrow PR$) и реализуется с использованием ситуационного моделирования. Целесообразно применение обратного порядка проектирования процессов формирования решений: содержание управления определяет вид аналитических моделей, которые, в свою очередь, состоят из атомарных сущностей, получаемых из конкретных источников. Тем самым реализуется принцип компактности информации: «если отсутствуют или недостаточно полномочий и ресурсов для управления ситуацией, то информация игнорируется или к ней предоставляется доступ в фоновом режиме». Важным аспектом верификации машинных решений является экспертная оценка их качества применимости для ЛПР при отсутствии части исходных данных или низкой достоверности информации.

Систематизации информационных ресурсов посвящено множество научных исследований [20, 21]. Структура информационных систем для формирования отчётных документов определена нормативными документами [22, 23]. Смена целей – сбор только показателей, использующихся для формирования решений PA и EA – позволит избежать избыточности собираемых данных, уменьшит трудозатраты на их актуализацию, информационный обмен.

Формирование решений для оперативного управления ($EA \rightarrow E$) реализуется на основе ситуационного моделирования опасностей E , уязвимости VO и защищённости $PO+PR$. Детализация сценариев масштабных ситуаций требует построения разветвлённой семантической сети или других представлений, сложных для понимания ЛПР.

Важным аспектом создания баз знаний, детализации и корректировки планов действий является изменение форм оперативных донесений о реагировании на ЧС и опасные ситуации и статистической отчётности. Максимизация сходства описаний сценариев реагирования в планах действий и динамики реальных ситуаций позволяет снизить трудоёмкость формализации принятых решений в базах знаний и тиражирования уникального опыта, полученного в экстремальных условиях.

3. Реализация сценарного моделирования в экспертной системе. Формализованный сценарий ситуации содержит паттерны, описывающие место и вид ситуации, а также последствия, участников, задействованные ресурсы и последовательность действий в зависимости от масштаба события. В отличие от известной системы ЭПЛА-ПРО [24], переменные словаря экспертной системы формируются из сущностей E , VO , PO , PR . Связывание показателей с правилами «ЕСЛИ ... ТО ...» обеспечивает компактность представления информационных ресурсов, полноту их использования в виде процессов в EA или показателей в PA . Например, изменение оснащения противопожарных формирований требует корректировки тактики тушения и отражается в статистических показателях пожаров. Мероприятия по созданию новых водоисточников (гидрантов, ёмкостей, пирсов и прорубей для естественных водоёмов) также изменяют способ и время ликвидации загораний вследствие экономии времени на подвоз воды.

Для формирования решений путём логического вывода помимо «стандартных» типов переменных («Целое», «Действительное», «Строка», «Дата/Время») используются специализированные: «Список», «Один из списка», «Процедура», «Фрейм»; операции

с переменными: «Очистить», «Обработать», «Перейти», «Определить», «Разрешить ввод», «Установить значение», «Если», «Выполнить запрос», «Сформировать решение» и другие.

Паттерны сценариев состоят из слотов, описывающих свойства объектов и процессов. Спецификация слота включает переменную словаря и присоединённую процедуру в виде действий, выполнение которых зависит от значения слота. Например:

```
если [слот] (< / > / = / !=) [слот / значение] то [действие 1] иначе [действие 2];  
запросить данные у пользователя;  
очистить слот;  
обработать слот;  
выполнить [запрос к базам данных] и заполнить [слот];  
записать в [слот] [значение];  
сформировать текст решения [шаблон].
```

В процессе работы экспертная система заполняет слоты фрейма конкретными данными. Уточнение обстановки, включая информацию об особенностях ситуации и параметрах внешней среды, происходит через диалог с пользователем. Решения формируются последовательным выполнением процедур. Стандартизация действий в виде паттернов необходима для многократного использования в сценариях ситуаций различного вида. Например, эвакуация и жизнеобеспечение населения, восстановление коммуникаций проводятся по схожему алгоритму при паводках, авариях теплоснабжения, массовых пожарах и др.

Экспертная система используется для формирования решений при пожарах и взрывах на промышленных объектах, химических авариях, затоплениях территорий разного генезиса. Для полноценной замены бумажных планов действий необходима миграция сервисов и информационных ресурсов на открытые платформы распределённого доступа. Единообразие информации будет эквивалентно оперативному согласованию действий, поскольку доступ к сценариям ситуаций обеспечен и для руководителей территорий, и для реагирующих подразделений.

4. Результаты цифровой трансформации управления. Основной эффект цифровой трансформации с использованием предложенного подхода состоит в реализации полного цикла обработки данных: от получения системами мониторинга до принятия решений и контроля их реализации. Функции экспертов по обобщению информации, анализу статистики минимизируются как за счёт повышения доступности данных, автоматизации рутинных операций, так и введения требований о необходимости обратной связи (принятия решений по управлению) при получении информации. Это позволит снизить нагрузку с нижних уровней иерархии управления (объектовых формирований, органов местного самоуправления), увеличив степень их самостоятельности и автономности. Построение территориального управления со связующим звеном между уровнями «муниципалитет – субъект РФ – федеральные органы» в виде распределённых интеллектуальных систем приведёт к более эффективным решениям по достижению стратегических целей при ограниченных ресурсах.

Цифровая трансформация изменяет не только территориальное управление безопасностью, но и управление жизненным циклом программных систем. В быстро меняющихся внешних условиях, росте социальных, природных и техногенных рисков традиционные подходы к разработке и сопровождению систем через короткие госконтракты теряют актуальность. Технологии распределённых данных, конструирования систем с использованием библиотек сервисов позволяют оперативно внедрять интеллектуальные системы в разных регионах и ведомствах.

Реализация информационных ресурсов на основе вышперечисленных принципов требует трансформации всей системы информационного обеспечения управления. Изменение

форм отчётности, отказ от решения задач, не свойственных конкретному ведомству, является основой глубокой цифровизации управления. Опыт корпораций мирового уровня показал возможность выработки нетривиальных решений в кризисных ситуациях малыми группами экспертов, владеющих гибким инструментарием работы с большими данными. Алгоритмизация повседневной деятельности, стабильность структур данных и отчётных форм позволяет снизить требования к квалификации специалистов, принимающих решения. Интеграция новых методов территориального управления и интеллектуальных технологий позволит достичь приемлемого уровня безопасности всех территорий страны [13].

Заключение. Выполнено структурирование информационных ресурсов мультизадачной интеллектуальной системы поддержки территориального управления. Показана необходимость комплексного анализа характеристик объектов и событий для обоснования управленческих решений. Специфика предметной области ограничивает применение «классических» методов поддержки принятия решений с формированием нескольких альтернатив с последующим выбором оптимальной стратегии. Как показывает опыт реагирования на ЧС, для снятия неопределённостей ситуации достаточно небольшого числа продуктов. Дефицит исходной информации частично компенсируется статистическим анализом прецедентов. Реализация процессов цифровизации, в результате которых появятся большие объёмы формализованных данных и распределённые сервисы их полной обработки, позволит нивелировать современные вызовы обществу и цивилизации.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН программы фундаментальных исследований Российской Федерации (рег. FWES-2021-0004).

Список источников

1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FhJ4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения 09.01.2025).
2. Тасейко О.В. Мониторинг безопасности территорий / О.В. Тасейко., В.В. Ничепорчук., У.С. Постникова. – Красноярск, СибГУ им. Решетнёва, 2024. – 186 с.
3. Васильева Е.В. Методология исследования возможностей цифровых платформ и экосистем: опыт применения Platform Innovation Kit / Е.В. Васильева // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2023. – Т.19. –№1. – С. 24-35. – DOI:10.25559/SITITO.019.202301.024-035.
4. Дранко О.И. Управление развитием региона. Моделирование возможностей / О.И. Дранко, Д.А. Новиков, А.Н. Райков, И.В. Чернов. – М.: Ленард, 2023. – 452 с.
5. Рыбаков А.В. Технологии применения искусственного интеллекта для прогнозирования чрезвычайных ситуаций на урбанизированных территориях / А.В. Рыбаков., Е.В. Иванов. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения экологической безопасности, мониторинга окружающей среды и прогнозирования чрезвычайных ситуаций». – М., 2024. – С. 61-66.
6. Акимов В.А. Прогнозно-аналитические решения по природным, техногенным и биолого-социальным угрозам единой системы информационно-аналитического обеспечения безопасности среды жизнедеятельности и общественного порядка «Безопасный город» / В.А. Акимов, А.В. Мишурный, О.В. Якимюк и др. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. – 316 с.
7. Акимов В.А. Модели и методы прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера на урбанизированных территориях / В.А. Акимов, Е.В. Арефьева, И.Ю. Олтян, и др. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2024. – 132 с.
8. Коробко А.В. Технология информационно-аналитической поддержки принятия решений на основе федерализации разнородной информации в концепции многомерного представления данных: специальность 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»: автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук / Коробко Анна Владимировна; Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2024. – 39 с.
9. Переволоцкий В.С. Подход к автоматическому формированию баз знаний на основе онтологий / В.С. Переволоцкий, В.В. Грибова // Научный аспект, 2023. – Т. 2. – №2. – С. 213-221.
10. Кобринский Б.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: реперные точки / Б.А. Кобринский / Избранные научные труды XXIV Международной научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2021)», 2022. – С. 38-45.

11. Массель Л.В. Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем / Л.В. Массель, А.Г. Массель // *Онтология проектирования*, 2023. – Т. 13. – №1 (47). – С. 44-54.
12. Юрин А.Ю. Авиатехпом: состояние и перспективы / А.Ю. Юрин, Ю.В. Котлов. // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*, 2024. – № 1. – С. 146-156.
13. Указ Президента РФ от 16 октября 2019 г. № 501 «О Стратегии в области развития гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах на период до 2030 года» URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72771784/> (дата обращения 11.01.2025).
14. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков – М: МПСИ, 2005. – 584 с.
15. Приказ МЧС России от 5 июля 2021 г. № 429 «Об установлении критериев информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера» – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402707588/> (дата обращения 11.01.2025).
16. Олтян И.Ю. Оценка состояния защиты населения субъектов Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / И.Ю. Олтян, А.И. Коровин // *Технологии гражданской безопасности*, 2021. – Т. 18. – № 5. – С. 29-34. – EDN: EBQXIX.
17. Головин О.К., Технологии адаптивного планирования в системах поддержки принятия решений / О.К. Головин, А.С. Супрун. – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 88 с.
18. Ничепорчук В.В. Система аналитических показателей для стратегического контроля природно-техногенной безопасности территорий // В.В. Ничепорчук., Т.Г. Пенькова // *Проблемы анализа риска*, 2018. – Т.15. – №1. – С. 34-41.
19. Пенькова Т.Г. Комплексный анализ природно-техногенной безопасности территорий Красноярского края на основе методов интеллектуальной обработки данных / Т.Г. Пенькова, В.В. Ничепорчук // *Мониторинг. Наука и технологии*, 2016. – №2 (27). – С.64-71.
20. Шокин Ю.И. Кризисные базы данных для управления безопасностью территорий / Ю.И. Шокин, В.В. Москвичев., Л.Ф. Ноженкова, В.В. Ничепорчук // *Вычислительные технологии*, 2011. – Т.16. – № 6. – С. 115-126.
21. Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации. – URL: <http://www.gisa.ru/file/file780.doc> (дата обращения 13.01.2025).
22. Методические рекомендации по порядку разработки, проверки, оценки и корректировки электронных паспортов территорий (объектов), утв. от 15.07.2016 № 2-4-71-40, с изм. от 14.06.2017 № 2-4-71-28 и 29.12.2017 № 2-4-71-28. – URL: <https://bazanpa.ru/mchs-rossii-metodicheskie-rekomendatsii-ot15072016-h3487966/> (дата обращения 13.01.2025).
23. ГОСТ Р 22.3.22–2023. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. План действий по предупреждению и ликвидации ЧС на территории муниципального образования. Порядок разработки. Требования к содержанию и оформлению. – М: Стандартинформ, 2023. – 20 с.
24. Ноженкова Л.Ф. Технологии комплексной поддержки управления природно-техногенной безопасностью / Л.Ф. Ноженкова, В.В. Ничепорчук // *Вычислительные технологии*, 2023. – Т. 28. – № 4. – С. 109-121. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.009.

Ничепорчук Валерий Васильевич. Доктор технических наук, ИВМ СО РАН, старший научный сотрудник. Направления исследований: оценка рисков ЧС, построение систем поддержки принятия решений. Author ID: 155773; SPIN 7018-8279, ORCID 0000-0001-5365-1307, valera@icm.krasn.ru, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44.

Кобызжакова Светлана Владимировна. ИВМ СО РАН, аспирант. Направления исследований: методы управления пожарной безопасностью территорий. Author ID: 1018508, SPIN 6233-3073, svetkob84@mail.ru, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44.

UDC 004.41+004.89

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.010

Digitalization technology of territorial safety management

Valery V. Nicheporchuk, Svetlana V. Kobyzhakova

Institute of Computational Modeling SB RAS,

Russia, Krasnoyarsk, valera@icm.krasn.ru

Abstract. Solving the diverse tasks of operational and strategic management of natural and man-made safety of territories optimal using a new structure of information resources. The management information support

processes have defined using the ontology. The digital transformation of decision-making, in addition to intelligent data processing and integrated monitoring, requires changes in business processes of information using

Keywords: intelligent management support, systematization of information resources and processes, digitalization of management

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the FRC KSC SB RAS state assignment project of the fundamental research program of the Russian Federation (reg. FWES-2021-0004).

References

1. Programma "Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii" [The Program "Digital economy of the Russian Federation] 28 iyulya 2017 g. № 1632-r, available at: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (accessed: 01/09/2025).
2. Taseyko O.V., Nicheporchuk V.V., Postnikova U.S. Monitoring bezopasnosti territoriy [Monitoring the safety of territories]. Krasnoyarsk, SibGU im. Reshetneva [Krasnoyarsk, Siberian state university named after Reshetnev], 2024, 186 p.
3. Vasil'yeva Ye.V. Metodologiya issledovaniya vozmozhnostey tsifrovyykh platform i ekosistem: opyt primeneniya Platform Innovation Kit [Methodology for studying the capabilities of digital platforms and ecosystems: experience of using the Platform Innovation Kit]. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye* [Modern information technologies and IT education], 2023, vol. 19, no. 1, pp. 24-35, DOI:10.25559/SITITO.019.202301.024-035.
4. Dranko O.I., Novikov D.A., Raykov A.N., Chernov I.V. Upravleniye razvitiyem regiona. Modelirovaniye vozmozhnostey [Regional development management. Modeling of possibilities]. Moscow, Lenard, 2023, 452 p.
5. Rybakov A.V., Ivanov Ye.V. Tekhnologii primeneniya iskusstvennogo intellekta dlya prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy na urbanizirovannykh territoriyakh [Technologies for applying artificial intelligence to forecasting emergency situations in urbanized areas]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti, monitoringa okruzhayushchey sredy i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy"*, M. [Proc. of the All-Russian scientific and practical conference "Problems of ensuring environmental safety, environmental monitoring and forecasting emergency situations", Moscow], 2024, pp. 61-66.
6. Akimov V.A., Mishurnyy A.V., Yakimyyuk O.V., et al. Prognozno-analiticheskiye resheniya po prirodnym, tekhnogennym i biologo-sotsial'nym ugrozam yedinoy sistemy informatsionno-analiticheskogo obespecheniya bezopasnosti sredy zhiznedeyatel'nosti i obshchestvennogo poryadka "Bezopasnyy gorod" [Prediction and analytical solutions for natural, man-made and biological-social threats of the unified system of information and analytical support for the safety of the living environment and public order "Safe City"]. Moscow, FGBU VNII GOCHS (FC), 2022, 316 p.
7. Akimov V.A., Aref'yeva Ye.V., Oltyan I.Yu., Ivanova Ye.O., et al. Modeli i metody prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo kharaktera na urbanizirovannykh territoriyakh [Models and methods for forecasting natural emergencies in urban areas]. Moscow, FGBU VNII GOCHS (FC), 2024, 132 p.
8. Korobko, A.V. Tekhnologiya informatsionno-analiticheskoy podderzhki prinyatiya resheniy na osnove federalizatsii raznorodnoy informatsii v kontseptsii mnogomernogo predstavleniya dannykh: spetsial'nost' 2.3.8. "Informatika i informatsionnyye protsessy": avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchonoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Technology of information and analytical support for decision-making based on the federalization of heterogeneous information in the concept of multidimensional data representation: Abstract of a Doctor's degree dissertation]. *Sibirskiy federal'nyy universitet* [Siberian federal university], Krasnoyarsk, 2024, 39 p.
9. Perevolotskiy V.S., Gribova V.V. Podkhod k avtomaticheskomu formirovaniyu baz znaniy na osnove ontologiy [An approach to the automatic formation of knowledge bases based on ontologies]. *Nauchnyy aspekt* [Scientific aspect], 2023, vol. 2, no. 2, pp. 213-221.
10. Kobrinskiy B.A. Intellektual'nyye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: repornyye tochki [Intelligent decision support systems: reference points]. *Izbrannyye nauchnyye trudy XXIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Inzhiniring predpriyatiy i upravleniye znaniyami (IP&UZ-2021)"* [Selected scientific works of the XXIV International scientific conference "Enterprise engineering and knowledge management (IP&UZ-2021)"], 2022, pp. 38-45.
11. Massel' L.V., Massel' A.G. Semanticheskoye modelirovaniye pri postroyenii tsifrovyykh dvoynikov energeticheskikh ob'yektov i sistem [Semantic modeling in the construction of digital twins of energy facilities and systems]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Ontology of design], 2023, vol. 13, no. 1 (47), pp. 44-54.
12. Yurin A.Yu., Kotlov Yu.V. Aviatekhpom: sostoyaniye i perspektivy [Aviatekhpom: state and prospects]. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovaniye, yazyk* [Crede Experto: transport, society, education, language], 2024, no. 1, pp. 146-156.

13. Decree of the President of the Russian Federation of 16.10.2019 no. 501 “O Strategii v oblasti razvitiya grazhdanskoj oborony, zashchity naseleniya i territoriy ot chrezvychajnykh situatsiy, obespecheniya pozharnoy bezopasnosti i bezopasnosti lyudey na vodnykh ob"yektakh na period do 2030 goda” [On the Strategy for the development of civil defense, protection of the population and territories from emergencies, ensuring fire safety and safety of people on water bodies for the period up to 2030]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72771784/> (accessed: 01/11/2025).
14. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, MPSI, 2005, 584 p.
15. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia of 05/07/2021 no. 429 “Ob ustanovlenii kriteriyev informatsii o chrezvychajnykh situatsiyakh prirodno i tekhnogenno kharaktera” [On establishing criteria for information on emergency situations of natural and man-made nature]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402707588/> (accessed: 11/01/2025).
16. Oltyan I.Yu., Korovin A.I. Otsenka sostoyaniya zashchity naseleniya sub"yektov Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychajnykh situatsiy prirodno i tekhnogenno kharaktera [Assessment of the state of protection of the population of the constituent entities of the Russian Federation from emergency situations of natural and man-made nature]. Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti [Civil safety technologies], 2021, vol. 18, no. S, pp. 29-34, EDN:EBQXIX.
17. Golovin O.K., Suprun A.S. Tekhnologii adaptivnogo planirovaniya v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy [Adaptive planning technologies in decision support systems]. SPb, ITMO, 2020, 88 p.
18. Nicheporchuk V.V., Penkova T.G. Sistema analiticheskikh pokazateley dlya strategicheskogo kontrolya prirodno-tekhnogennoy bezopasnosti territoriy [Comprehensive analysis of natural and man-made safety of the territories of Krasnoyarsk Krai based on methods of intelligent data processing]. Problemy analiza riska [Issues of risk analysis], 2018, vol. 15, no. 1, pp. 34-41.
19. Penkova T.G., Nicheporchuk V.V. Kompleksnyy analiz prirodno-tekhnogennoy bezopasnosti territoriy Krasnoyarskogo kraja na osnove metodov intellektual'noy obrabotki dannykh [Comprehensive analysis of natural and man-made safety of the territories of Krasnoyarsk Krai based on methods of intelligent data processing]. Monitoring. Nauka i tekhnologii [Monitoring. Science and technology], 2016, no. 2 (27), pp. 64-71.
20. Shokin Yu.I., Moskvichev V.V., Nozhenkova L.F., Nicheporchuk V.V. Krizisnyye bazy dannykh dlya upravleniya bezopasnost'yu territoriy [Crisis datasets for territorial safety management]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computational technologies], 2011, vol. 16, no. 6, pp. 115-126.
21. Kontseptsiya sozdaniya i razvitiya infrastruktury prostranstvennykh dannykh Rossiyskoy Federatsii [Concept of creation and development of spatial data infrastructure of the Russian Federation]. Available at: <http://www.gisa.ru/fil> (accessed: 01/24/2025).
22. Metodicheskie rekomendatsii po poryadku razrabotki, proverki, ocenki i korrektyrovki elektronnykh pasportov territorij (ob"ektov) [Methodological recommendations on the procedure for developing, checking, assessing and adjusting electronic passports of territories (objects)]. Available at: <https://bazanpa.ru/mchs-rossii-metodicheskie-rekomendatsii-ot15072016-h3487966/> (accessed: 01/13/2025).
23. GOST R 22.3.22–2023. Bezopasnost' v chrezvychajnykh situatsiyah. Plan dejstvij po preduprezhdeniyu i likvidatsii CHS na territorii municipal'nogo obrazovaniya. Poryadok razrabotki. Trebovaniya k sodержaniyu i oformleniyu [Safety in emergency situations. Action plan for the prevention and elimination of emergency situations on the territory of a municipality. Development procedure. Requirements for content and design]. Moscow, Standartinform, 2023, 20 p.
24. Nozhenkova L.F. Nicheporchuk V.V. Tekhnologii kompleksnoj podderzhki upravleniya prirodno-tekhnogennoy bezopasnost'yu [Technologies for integrated support of natural and man-made safety management]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computational technologies], 2023, vol. 28, no. 4, pp. 109-121, DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.009.

Nicheporchuk Valeriy Vasilevich. Doctor of technical sciences, Institute of Computational Modelling SB RAS, senior researcher. Research areas: emergency risk assessment, development of decision support systems. AuthorID: 155773, SPIN: 7018-8279, ORCID: 0000-0001-5365-1307, valera@icm.krasn.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Kobyzhakova Svetlana Vladimirovna. ICM SB RAS, postgraduate student. Research areas: methods of managing fire safety of territories. Author ID: 1018508, SPIN 6233-3073, svetkob84@mail.ru, 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена после рецензирования 06.02.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 01/27/2025; approved after reviewing 02/06/2025; accepted for publication 02/13/2025.

УДК 330.42

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.011

Формирование многоуровневой системы ключевых показателей (KPI) региональной инновационной инфраструктуры

**Туктарова Полина Андреевна¹, Дмитриева Ирина Вадимовна²,
Ялтонская Диана Ильвировна²**

¹Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Россия, Иркутская область, поселок Молодежный, *ptuktarova@gmail.com*

²Уфимский университет науки и технологий,
Россия, Уфа

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые показатели для оценки эффективности работы инновационной инфраструктуры региона с помощью регрессионного анализа. В работе выделены этапы формирования системы ключевых показателей KPI. На первом этапе были сформулированы цель и задачи по созданию многоуровневой системы показателей эффективности KPI. На втором этапе определены ключевые показатели для дальнейшего анализа, чтобы исследовать, какие показатели могут отражать эффективность работы инновационной инфраструктуры региона. Для статьи были выбраны такие показатели, как: уровень инновационной активности в регионе, количество новых рабочих мест, созданных в инновационной сфере, объем запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг. На третьем этапе был выбран метод исследования – регрессионный анализ, и собраны данные по выделенным показателям. В статье рассматривается процесс формирования многоуровневой системы ключевых показателей (KPI) для оценки эффективности региональной инновационной инфраструктуры. Выделены основные компоненты инновационной инфраструктуры, определены показатели для каждой из них. В качестве основного метода анализа использовалась регрессионная модель, которая позволила выявить наиболее значимые факторы, влияющие на развитие инновационной инфраструктуры. Основным выводом статьи заключается в том, что разработка многоуровневой системы KPI является необходимым условием для эффективного управления инновационной инфраструктурой и достижения поставленных целей в этой области.

Ключевые слова: показатели, KPI, многоуровневая система, инновационная инфраструктура, множественная регрессия

Цитирование: Туктарова П.А. Формирование многоуровневой системы ключевых показателей (KPI) региональной инновационной инфраструктуры / П.А. Туктарова, И.В. Дмитриева, Д.И. Ялтонская // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 114-121. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.011.

Введение. В наши дни эффективность экономических процессов становится все более важным фактором. Чтобы добиться успеха в этой области, необходимо создать многоуровневую систему ключевых показателей (KPI) для инновационной инфраструктуры региона [1]. Современное общество сталкивается с развитием растущих технологий и новыми инновационными решениями. Развитая инновационная инфраструктура необходима для эффективного использования инноваций. Тем не менее, для того, чтобы оценить эффективность такого применения, необходима система ключевых показателей (KPI).

В статье для того, чтобы оценить эффективность региональной инновационной инфраструктуры, представлен процесс формирования многоуровневой системы показателей эффективности. Результаты исследования позволяют определить наиболее важные показатели, влияющие на эффективность развития региональной инновационной инфраструктуры. Основным выводом статьи является то, что создание многоуровневой системы показателей эффективности KPI поможет наилучшим образом оценить эффективность развитие инновационной инфраструктуры.

В работе выделены основные этапы формирования системы ключевых показателей KPI. На первом этапе были определены цели и задачи по созданию многоуровневой системы показателей эффективности KPI. На втором этапе определены ключевые показатели для

дальнейшего анализа, чтобы исследовать, какие показатели могут отражать эффективность работы инновационной инфраструктуры региона. Для статьи были выбраны такие показатели, как: уровень инновационной активности в регионе (x_1), количество новых рабочих мест, созданных в инновационной сфере (x_2), объем запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг (x_3) [2,3]. На третьем этапе был выбран метод исследования – регрессионный анализ, и собраны данные по выделенным показателям.

Целью исследования является оценка эффективности работы инновационной инфраструктуры региона с помощью регрессионного анализа.

1. Пути решения описываемой проблемы. Далее перейдем к построению множественной регрессии [4, 5]. Значениями факторов примем: уровень инновационной активности в регионе; количество новых рабочих мест, созданных в инновационной сфере; количество запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг; уровень инвестиций в инновационную деятельность на территории региона (x). Значение интегрального показателя (y) – эффективность работы инновационной инфраструктуры.

В таблице 1 представлена балльно-рейтинговая система оценки эффективности работы инновационной инфраструктуры.

Таблица 1. Балльно-рейтинговая система оценки эффективности работы инновационной инфраструктуры

Показатели	Рейтинг показателей	Высший	Низший	Условия снижения критерия
Уровень инновационной активности в регионе (x_1)	5	10 % выше – 5 баллов	Менее 2 % – 0 баллов	За каждый 1 % снижения, по сравнению с 10 %, снимается по 0,3 балла
Количество новых рабочих мест, созданных в инновационной сфере (x_2)	5	2 тыс. ед. и выше – 5 баллов	Менее 0,3 тыс. ед. – 0 баллов	За каждый 0,5 тыс. ед. снижения, по сравнению с 2 тыс. ед., снимается по 1 баллу
Объем запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг (x_3)	5	1 000 000 млн. руб. и выше – 5 баллов	менее 10 000 млн. руб. – 0 баллов	За каждый 100 000 млн. руб. снижения, по сравнению с 1 000 000 млн. руб., снимается по 0,3 балла
Итого	15			

С помощью применения множественной регрессионной модели можно будет увидеть связь между интегральным показателем и коэффициентами, которые являются важными при оценке эффективности работы инновационной инфраструктуры [6].

В таблице 2 представлены исходные данные для построения регрессионной модели. Модель будет строиться, исходя из 3 оценочных показателей (x) и 27 выбранных регионов РФ.

Таблица 2. Исходные данные

Регион РФ	Уровень инновационной активности в регионе (x_1), %	Количество новых рабочих мест, созданных в инновационной сфере (x_2), тыс. ед.	Объем запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг (x_3), млн. руб.	Оценка эффективности работы инновационной инфраструктуры (y), балл
Рязанская область	10,2	0,86	618 964,40	9
Смоленская область	6,4	0,22	436 145,60	6,8

г. Москва	11,3	2,29	644 641,60	11
г. Санкт-Петербург	15	15,42	22 739 663,30	15
Ярославская область	10,6	15,6	6 301 478,60	15
Республика Дагестан	3,1	1,91	141 446,50	6
Чеченская Республика	2	1,86	108 255,40	5
Республика Башкортостан	14,8	0,48	2 509 570,90	12
Республика Татарстан	32	1,42	5 034 628,50	14,6
Пермский край	11,6	1,1	2 218 978,10	13
Курганская область	11,8	1,66	249 349,80	10
Челябинская область	12,1	1,68	2 525 425,60	13,7
Красноярский край	7	0,52	3 663 909,20	11
Иркутская область	6,9	0,62	2 224 371,10	10,7
Республика Бурятия	4,4	0,5	323 436,90	6,1
Амурская область	6,8	0,57	424 048,60	7,3
Белгородская область	15,13	1,88	1561370,02	12,40
Брянская область	12,09	3,75	496301,15	7,97
Владимирская область	9,87	2,30	796397,78	10,20
Республика Карелия	5,49	0,19	305673,10	5,75
Республика Коми	10,74	0,77	1198694,98	8,80
Краснодарский край	5,02	0,71	2808036,75	7,90
Астраханская область	6,09	0,97	650317,87	6,90
Волгоградская область	8,17	1,02	1021632,25	9,20
Нижегородская область	15,36	1,14	2125409,56	12,00
Оренбургская область	6,99	0,32	1614452,98	7,50
Пензенская область	14,59	0,59	416773,37	11,10

Далее проверим все 4 условия Гаусса – Маркова [7].

1. Критерий поворотных точек. Остатки признаются случайными, если фактическое число поворотных точек (p) больше критического числа (q). В таблице 3 представлены расчетные значения p и q .

Таблица 3. Расчетные значения p и q

Наименование показателя	Значение
q	14,5506
p	22

Таким образом, по таблице 3 можно сделать вывод о том, что критерий поворотных точек выполняется.

2. R/S критерий. Нормальный закон распределения остатков можно проверить с помощью R/S критерия. Остатки признаются нормально распределёнными, если выполняется неравенство (1):

$$(R/S)_1 \leq R/S \leq (R/S)_2 \tag{1}$$

Таким образом, было получено следующее неравенство:

$$3,34 \leq 3,74 \leq 4,71 \tag{2}$$

Следовательно, неравенство выполняется и можно сделать вывод о том, что остатки признаются нормально распределенными.

Проверим 3-е условие Гаусса – Маркова: с учетом того, что $M(\varepsilon_i) = M(\varepsilon_j) = 0$, с помощью критерия Дарбина-Уотсона. Для оценки корреляции используется статистика, ниже представлена формула для её расчета (3):

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} = \frac{1242,97963}{934,09563} = 1,33068. \tag{3}$$

Для определения наличия автокорреляции остатков между соседними членами ряда используется критерий Дарбина – Уотсона. Остатки должны быть случайными, но иногда каждое следующее значение остатков зависит от предшествующих. В этом случае имеет место автокорреляции в остатках (рис. 1).

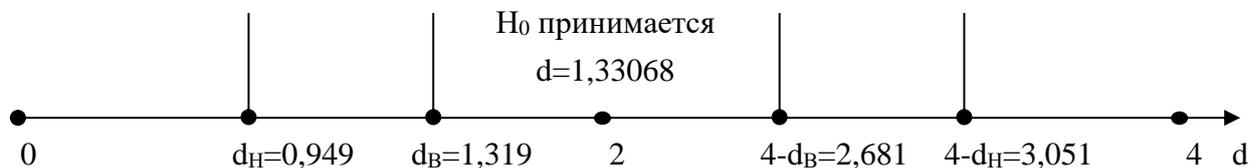


Рис. 1. Графическая интерпретация критерия Дарбина – Уотсона

Из рисунка 1 видно, что $d=1,33068$ находится между d_B и $4-d_B$, следовательно, принимается гипотеза об отсутствии автокорреляции в остатках.

3. Тест Голфелда-Кванда определения гетероскедастичности остатков.

Если для каждого значения фактора остатки имеют одинаковую дисперсию, это называется гомоскедастичностью. Если это условие не соблюдается, то имеет место гетероскедастичность.

В результате анализа были построены две регрессионные модели, после чего были рассчитаны суммы остатков. Далее было рассчитано фактическое значение теста Голфелда-Кванда по формуле (4):

$$F = \frac{\max(S_1, S_2)}{\min(S_1, S_2)} = \frac{43,2485}{10,9361} = 3,95 \tag{4}$$

Таким образом, фактическое значение теста Голфелда-Кванда = 3,95, F критическое = 5,05, следовательно, фактическое значение меньше критического, то есть гетероскеданстичности нет. В результате (4) условие теоремы Гаусса – Маркова выполняется. Так как все условия выполняются, то можно использовать стандартный классический регрессионный анализ. Также было проверено наличие мультиколлинеарности между факторами. В таблице 4 представлена матрица парных линейных коэффициентов корреляции.

Таблица 4. Матрица парных линейных коэффициентов корреляции

1	0,164947766	0,320834593
0,164947766	1	0,776882747
0,320834593	0,776882747	1

Далее был посчитан определитель матрицы: $\text{Det}|R|= 0,348537341$. Можно сделать вывод о том, что определитель матрицы межфакторной корреляции отличен от нуля, отсюда следует вывод об отсутствии мультиколлинеарности.

Далее, после того, как рассчитали определитель матрицы межфакторной корреляции, проведем регрессионный анализ, чтобы построить уравнение регрессии, который представлен в таблице 5.

Таблица 5. Регрессионный анализ

Регрессионная статистика					
Множественный R	0,83860320				
R-квадрат	0,70325534				
Нормированный R-квадрат	0,66454951				
Стандартная ошибка	1,72269577				
Наблюдения	27				
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	161,761491	53,9204971	18,16923781	0,0000028819
Остаток	23	68,2566571	2,96768074		
Итого	26	230,018148			
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%
Y-пересечение	5,75659083	0,69812687	8,24576599	0,000000025	4,312405360
Переменная X 1	0,33027977	0,06186545	5,33867862	0,000020215	0,202301336
Переменная X 2	0,24086454	0,13863813	1,73736136	0,095698357	-0,045930296
Переменная X 3	0,00000007	0,00000013	0,60451602	0,551418126	-0,000000190

После проведения регрессионного анализа были получены следующие коэффициенты по каждой из переменных x (табл. 6).

Таблица 6. Значения коэффициентов по переменным

	Коэффициенты
Y-пересечение	5,75659083
Переменная X_1	0,33027977
Переменная X_2	0,24086454
Переменная X_3	0,00000007

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = 5,75659083 + 0,33027977x_1 + 0,24086454x_2 + 0,00000007x_3. \quad (5)$$

Полученное уравнение регрессии отражает взаимосвязь между оценкой эффективности работы инновационной инфраструктуры, уровнем инновационной активности в регионе, количеством новых рабочих мест, созданных в инновационной сфере и объемом запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг.

Из уравнения видно, что с ростом уровня инновационной активности в регионе показатель эффективности работы инновационной инфраструктуры возрастает на 0,33027977. Рост показателя количества новых рабочих мест приводит к увеличению показателя эффективности работы инновационной инфраструктуры на 0,24086454. Рост показателя объемов, запущенных на рынок инновационных продуктов или услуг, приводит к увеличению показателя эффективности работы инновационной инфраструктуры на 0,00000007.

Таким образом, было выявлено уравнение, которое позволит оценить эффективность работы инновационной инфраструктуры.

Выполнив регрессионный анализ, можно прийти к выводу, что значение коэффициента множественной корреляции расположено ближе к 1 и составляет 0,83860320 единиц, то есть наблюдается тесная связь между признаками.

Такой подход, основанный на использовании множественной регрессии при оценке эффективности работы инновационной инфраструктуры, подходит для применения, поэтому,

для большей эффективности, рекомендуется проводить данную работу с периодичностью раз в полгода.

Заключение. В статье было предложено уравнение, которое позволит оценить эффективность работы инновационной инфраструктуры. Рассматривается процесс формирования многоуровневой системы ключевых показателей (КРІ) для оценки эффективности региональной инновационной инфраструктуры. Выделены основные компоненты инновационной инфраструктуры, определены показатели для каждой из них, а также предложены методы их измерения.

В качестве основного метода анализа использовалась регрессионная модель, которая позволила выявить наиболее значимые факторы, влияющие на развитие инновационной инфраструктуры. Основным выводом статьи заключается в том, что разработка многоуровневой системы КРІ является необходимым условием для эффективного управления инновационной инфраструктурой и достижения поставленных целей в этой области.

В результате исследования выявлено, что сбор и анализ данных, определение целей и задач, разработка системы КРІ и ее внедрение на всех уровнях управления инновационной инфраструктурой региона позволяют оценить эффективность работы инновационной инфраструктуры региона и принимать управленческие решения на основе фактических данных. Таким образом, формирование многоуровневой системы ключевых показателей (КРІ) региональной инновационной инфраструктуры является важным инструментом для оценки и повышения эффективности работы инновационной инфраструктуры региона и достижения поставленных целей.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-28-00395.

Список источников

1. Раевич А.С. Оценка ключевых показателей эффективности предприятия / А.С. Раевич // Молодой ученый, 2020. – № 49 (339). – С. 138-142.
2. Мансурова Ю.Т. Эконометрика: курс лекций: учебное пособие / Ю.Т. Мансурова, П.А. Туктарова // Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2022. – URL: https://uust.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022%E2%80%9090173.pdf (дата обращения: 12.01.24).
3. Шаповалов Д.А. Аналитические средства: математическая экономика и эконометрика / Д.А. Шаповалов, Д.А. Хабаров // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral», 2020. – №3. – С. 387-393.
4. Горбачевская Т.С. Использование трендовых моделей для прогнозирования экономических процессов / Т.С. Горбачевская, А.Н. Богатова, А.Д. Трофимова и др. // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet», 2020. – № 5. – С. 235-239.
5. Клисторин В.И. О математике в экономической науке / В.И. Клисторин // Всероссийский экономический журнал ЭКО, 2020. – №11. – С. 38-58.
6. Муравьева В.С. Основные составляющие организационно-экономического моделирования / В.С. Муравьева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2021. – № 172(08). – С. 1-19.
7. Куницына А.Г. Прогнозирование с помощью регрессионного анализа / А.Г. Куницына, Л.А. Винковская // Журнал Достижения науки и образования, 2020. – № 2. – С. 17-19.

Ялтонская Диана Ильвировна. Ассистент кафедры экономики предпринимательства Уфимского университета науки и технологий, diana.khamidullina.2016@mail.ru, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса 12.

Дмитриева Ирина Вадимовна. Старший преподаватель кафедры экономики предпринимательства Уфимского университета науки и технологий. Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса 12.

Туктарова Полина Андреевна. Кандидат экономических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, ptuktarova@gmail.com, Россия, Иркутская область, Иркутский район, поселок Молодежный.

UDC 330.42

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.011

Formation of a multi-level system of key indicators (KPI) of regional innovation infrastructure

Polina A. Tuktarova¹, Irina V. Dmitrieva², Diana I. Yaltonskaya²

¹Irkutsk state agrarian university named after A.A. Ezhevsky,
Russia, Irkutsk region, Molodezhny settlement, ptuktarova@gmail.com

²Ufa university of science and technology,
Russia, Ufa

Abstract. The article discusses key indicators for assessing the efficiency of the region's innovation infrastructure using regression analysis.

The work highlights the stages of forming a system of key KPI indicators. The first step was to define goals and objectives for creating a multi-level system of KPI performance indicators. The second step is to determine the key indicators for further analysis in order to explore which indicators may reflect the effectiveness of the region's innovation infrastructure. For the article, the following indicators were selected: the level of innovation activity in the region (x1), the number of new jobs created in the innovation sector (x2), the volume of innovative products or services launched on the market (x3). The third step was to collect data on selected indicators and then select a research method - regression analysis.

The article examines the process of forming a multi-level system of key indicators (KPIs) to assess the effectiveness of regional innovation infrastructure. The main components of the innovation infrastructure were identified, and indicators for each of them were determined.

A regression model was used as the main method of analysis, which made it possible to identify the most significant factors influencing the development of innovation infrastructure. The main conclusion of the article is that the development of a multi-level KPI system is a necessary condition for the effective management of innovation infrastructure and achieving goals in this area.

Keywords: key indicators, KPI, multi-level system, innovation infrastructure, multiple regression

Acknowledgments: The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of scientific project № 23-28-00395.

References

1. Rayevich A.S., Otsenka pokazateley effektivnosti predpriyatiya [Assessment of enterprise performance indicators]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2020, no. 49 (339), pp. 138-142.
2. Mansurova Yu.T., Tuktarova P.A. *Ekonometrika: kurs lektsiy: uchebnoye posobiye* [Econometrics: course of lectures: textbook]. UGATU, 2022, available at: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-173.pdf (accessed: 01/12/24).
3. Shapovalov D.A., Khabarov D.A. *Analiticheskiye sredstva: matematicheskaya ekonomika i ekonometrika* [Analytical tools: mathematical economics and econometrics]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy "Integral"* [International journal of applied sciences and technologies "Integral"], 2020, no. 3, pp. 387-393.
4. Gorbachevskaya T.S., Bogatova A.N., Trofmova A.D., et al. *Ispol'zovaniye trendovykh modeley dlya prognozirovaniya ekonomicheskikh protsessov* [Using trend models to predict economic processes]. *Nauchno-obrazovatel'nyy zhurnal dlya studentov i prepodavateley "StudNet"* [Scientific and educational journal for students and teachers "StudNet"], 2020, no. 5, pp. 235-239.
5. Klistorin V.I. *O matematike v ekonomicheskoy nauke* [On mathematics in economics]. *Vserossiyskiy ekonomicheskyy zhurnal EKO* [All-Russian economic journal ECO], 2020, no. 11, pp. 38-58.
6. Muravieva V.S. *Osnovnye sostavlyayushchie organizatsionno-ekonomicheskogo modelirovaniya* [The main components of organizational and economic modeling]. *Politematicheskyy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2021, no. 172 (08), pp. 1-19.
7. Kunitsyna A.G., Vinskovskaya L.A. *Prognozirovaniye s pomoshchyu regressionnogo analiza* [Forecasting using regression analysis]. *Zhurnal Dostizheniya nauki i obrazovaniya* [Journal of Science and Education Achievements], 2020, no. 2, pp. 17-19.

Yaltonskaya Diana Ilvirovna. Assistant of the department of economics of entrepreneurship, Ufa university of sciences and technologies, *diana.khamidullina.2016@mail.ru*, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Karl Marx 12.

Dmitrieva Irina Vadimovna. Senior lecturer of the department of economics of entrepreneurship, Ufa university of sciences and technologies, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Karl Marx 12.

Tuktarova Polina Andreevna. PhD in economics of the department of computer science and mathematical research, Irkutsk state agrarian university named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk region, Irkutsk distrikt, Molodezhny settlement, *ptuktarova@gmail.com*.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 12/20/2024; approved after reviewing 01/17/2025; accepted for publication 02/13/2025.

Визуализация динамики учебного процесса с помощью когнитивных карт диагностики знаний в интеллектуальных обучающих системах

Углев Виктор Александрович, Смирнов Георгий Артёмович

Сибирский федеральный университет,

Россия, Железногорск, vauglev@sfu-kras.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема концентрации данных из образовательного цифрового следа и отображения её динамики. Произведен сравнительный анализ методов визуализации и предложено рассмотреть модификацию метода когнитивных карт диагностики знаний с учётом отображения динамики учебного процесса. Раскрыта суть метода и показаны этапы формирования карт. Иллюстрации подготовлены по экспериментальным данным студентов магистратуры Сибирского федерального университета в интеллектуальной обучающей системе AESU. В заключении даны возможные направления дальнейшего совершенствования метода когнитивных карт диагностики знаний.

Ключевые слова: когнитивная визуализация, системный подход, картирование, цифровой образовательный след, когнитивные карты диагностики знаний

Цитирование: Углев В.А. Визуализация динамики учебного процесса с помощью когнитивных карт диагностики знаний в интеллектуальных обучающих системах / В.А. Углев, Г.А. Смирнов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 122-129. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.012.

Введение. Комплексный подход к управлению в интеллектуальных системах, ориентированных на данные, опирается на средства Data Visualization (раздел Data Mining). В киберсоциальных системах такими данными является цифровой след [1]. Когнитивная визуализация важна не только для свёртки больших массивов данных в виде легко воспринимаемого графического образа, но и для реализации возможности результативного пояснения решений интеллектуальных систем [2], с акцентом на самых актуальных элементах модели сложившейся ситуации. Особенно это важно для организации работы планировщиков современных *интеллектуальных автоматизированных обучающих систем* (ИАОС), где диагностика учебной ситуации происходит на базе *образовательного цифрового следа* (ОЦС).

Применение графических средств для обобщения данных об ОЦС всё чаще применяется в современных ИАОС [3]. Непосредственная реализация механизма свёртки информации в Data Visualization может базироваться на широком перечне методов [4]: 1) кластеры в гиперпространстве факторов; 2) нейронная сеть Кохонена (SOM, единственный тип искусственных нейронных сетей, ориентированных на визуализацию); 3) кубы данных; 4) дашборды; 5) семантические сети; 6) онтологии; 7) мнемосхемы; 8) фейкодер Джоунса; 9) лица Чернова; 10) модуль Тризкина; 11) метод унифицированного графического воплощения активности; 12) карты.

Очевидно, что простейшие методы визуализации (таблицы с окрашенными ячейками, 2-D графики, круговые диаграммы и гистограммы) в сравнение не включались, т.к. свёртка данных в них минимальна. Воспользуемся двумя специфическими порядковыми шкалами для сравнения выбранных 12 методов: шкалой «разнообразия элементов» визуального образа (ось абсцисс) и шкалой «уровня обобщения» в плоскости визуального образа (ось ординат). Первая шкала будет описывать следующие состояния: 1) точки (только координаты); 2) линии и векторы; 3) плоскости, поверхности и/или простые геометрические фигуры; 4) многомерные объекты; 5) связки многомерных объектов (структуры); 6) абстрактные образы; 7) целевые (специфицированные под предметную область) комплексные образы.

Для описания второй шкалы выделим следующие семь состояний: 1) количественное усреднение/обобщение параметра; 2) качественное представление или результат фазификации

(перевода из количественной оценки в качественную) параметра; 3) множество однородных параметров; 4) множество разрозненных параметров; 5) единый многопараметрический образ; 6) образ с элементами семантики; 7) образ с элементами семантики и динамики. Результат сравнения графических нотаций приведен на рис. 1.

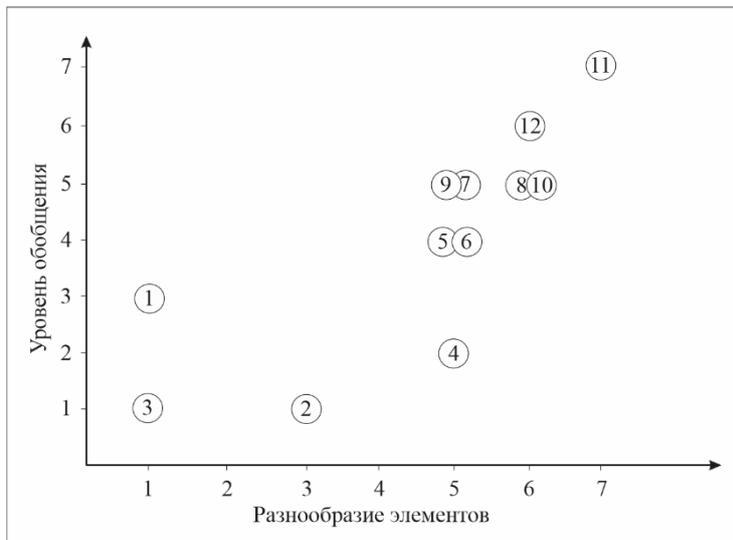


Рис. 1. Схема динамики проверки дидактического материала по дисциплине в процессе его изучения

Из данного рисунка видно, что нотация карт (№12) имеет ряд преимуществ при комплексной визуализации данных из цифрового образовательного следа. При этом нотации карты бывают разные: от достаточно примитивных (те же SOM [5]) до очень содержательных (например, когнитивные карты диагностики знаний [6]). Дальнейшее сравнение по ряду более простых 11 критериев было проведено нами в [7]. В работах [5-6, 8-9] приводятся различные графические нотации карт, используемые для визуализации содержания цифрового образовательного следа. В этой статье мы подробно рассмотрим такой метод картирования, как *когнитивные карты диагностики знаний* (ККДЗ или СМКД), который позволяет отображать не только статическую обстановку, но и может быть адаптирован для отображения динамики учебной ситуации.

Метод когнитивных карт диагностики знаний. ККДЗ – это метод составления когнитивных карт (картирования), осуществляющий компактное представление (визуализацию) семиотических структур (данных о синтактике, семантике и прагматике) в приложении к диагностике знаний об экземпляре какого-либо объекта или выполняемого им процесса (денотат) с целью повышения качества процесса принятия решений и их аргументированности [6]. Примеры карт в различных режимах приведены далее на рис. 2-4 и 6. Каждый элемент карты (квадрат *ii*) соответствует дидактической единице, а его раскраска – оценке степени её освоения в знании или одном из компетентностных аспектов (в зависимости от выбранного): зелёный – полностью освоен, красный – совсем не освоен, белый – граница неопределённости, серый – не укомплектован измерительными материалами. За счёт того, что в этой графической нотации совмещены синтаксическая (структурная) составляющая (дидактический материал *ii* расположен по кругу в соответствии с исходной образовательной траекторией) и семантическая (соответствующие причинно-следственные связи внутри круга), такое представление позволяет сформировать целостный образ сложившейся учебной ситуации. Рассмотрим пример на базе одной из учебных дисциплин «Методология научной деятельности», состоящей из 33-х дидактических единиц. Базовая карта этого курса ориентирована на отражение структуры учебного материала (левая часть с рис. 2), а частная карта адаптируется под индивидуальный

образовательный запрос конкретного учащегося (см. правую часть). Для дополнения этой конструкции элементами прагматики (для довершения построения сущности по квадрату Поспелова из подхода прикладной семиотики [10]) используется другая нотация – сквозная карта, о которой можно подробнее прочитать в [11] (далее для иллюстрации данной статьи нам эти нотации ККДЗ не понадобятся).

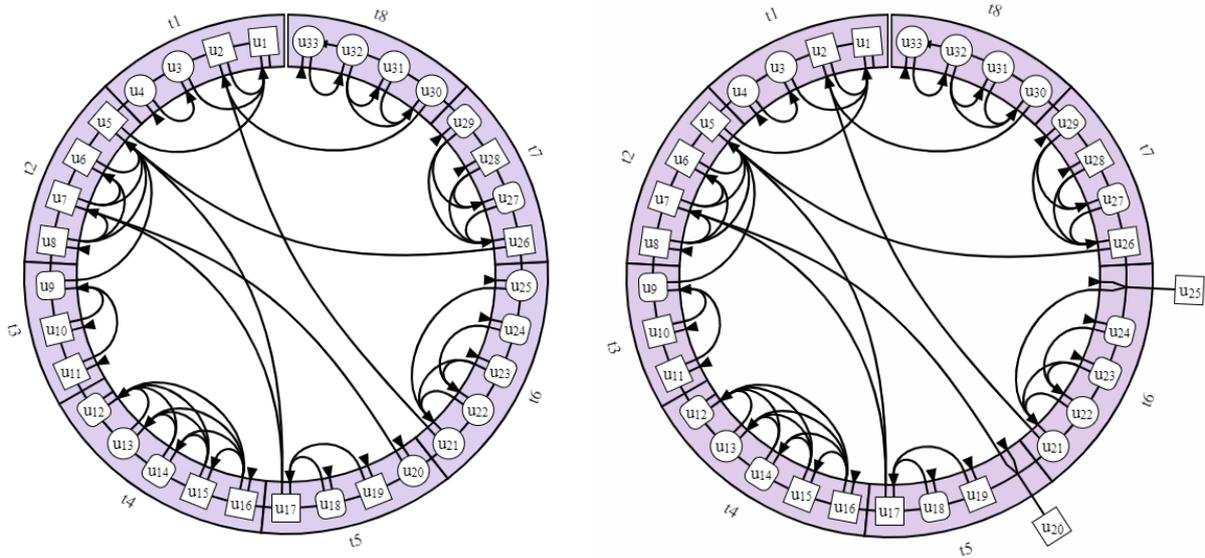


Рис. 2. Базовая ККДЗ по курсу «Методология научной деятельности» и её индивидуализированная версия для одного из учащихся

Пусть учащийся (магистрант первого курса специальности «Информатика и вычислительная техника» при изучении дисциплины «Системный анализ и синтез» в весеннем семестре 2024 учебного года в результате работы в экспериментальной ИАОС AESU) произвел запись на курс и по результатам анкетирования и входного контроля для него сформировалась индивидуализированная ККДЗ (правая часть с рис. 2). Далее он обращается к дидактическому материалу и ИАОС накапливает ОЦС. На рис. 3 приведены примеры трех частных ККДЗ, которые построены для этого учащегося: первая карта построена в самом начале изучения дисциплины, вторая – в середине семестра, а третья – ближе к его завершению. Из них видно, что проблемные u_i не всегда могут быть освоены только при повторном их изучении: в ряде случаев потребуются повторно поработать и с тем материалом, который напрямую влиял на него (см, например, связку u_9 с u_5 на центральной карте).

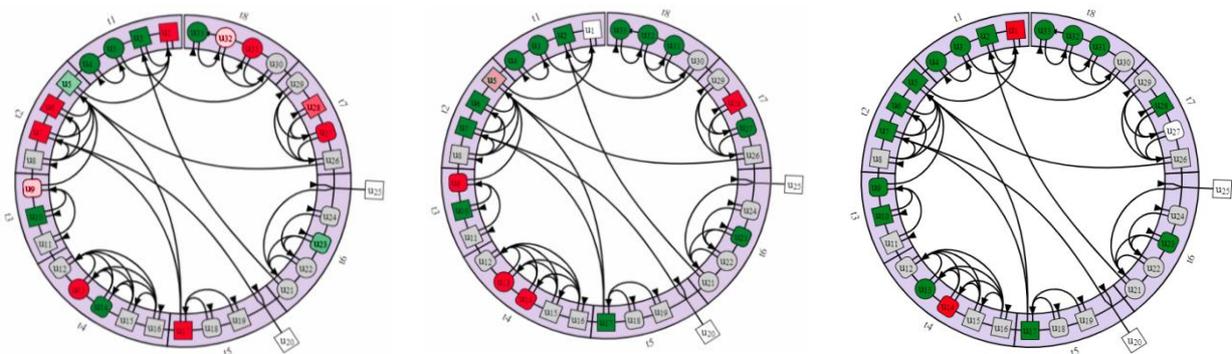


Рис. 3. Примеры ККДЗ одного из учащихся на различных этапах изучения дисциплины (частная карта, знаниевый аспект)

Достаточно ли в таком виде отображать динамику, обращаясь к реальным данным из цифрового образовательного следа? Очевидно, что нет, т.к., во-первых, не в каждый момент

времени целесообразно проводить контрольно-измерительные мероприятия по всему учебному материалу (включая тот, который ещё не изучен) и, во-вторых, упор в контроле следует делать на том материале, который был только что изучен (включая непосредственно связанный с ним) для закрепления знаний и оперативного выявления затруднений. По этой причине пересмотрим подход к процессу формирования карты.

Динамика показателей. Данные, которые будут учитываться при отрисовке ККДЗ для дисциплины из примера, приведены на схеме (рис. 4). По оси абсцисс (горизонтали) показан номер дидактической единицы, а по оси ординат (вертикали) – шаг обучения относительно базовой траектории обучения (исключая повторное обращение к учебному материалу): очевидно, что на этапе входного и итогового контроля в проверке участвовал материал всего курса, в середине семестра аналогичный срез делался в качестве фиксации промежуточных результатов изучения дисциплины. Цвета обозначают три режима актуализации (охвата контролируемого материала):

- зеленый – все задания к текущей дидактической единице (оценки определяются впервые);
- желтый – часть заданий, связанных с дидактическими единицами, которые связаны с текущей родительскими связями (оценки обновляются);
- красный – результаты оценки заданий, которые прямо и косвенно участвуют в изучении текущей дидактической единицы (загружаются последние сохраненные оценки из ОЦС).

Номера дидактических единиц курса

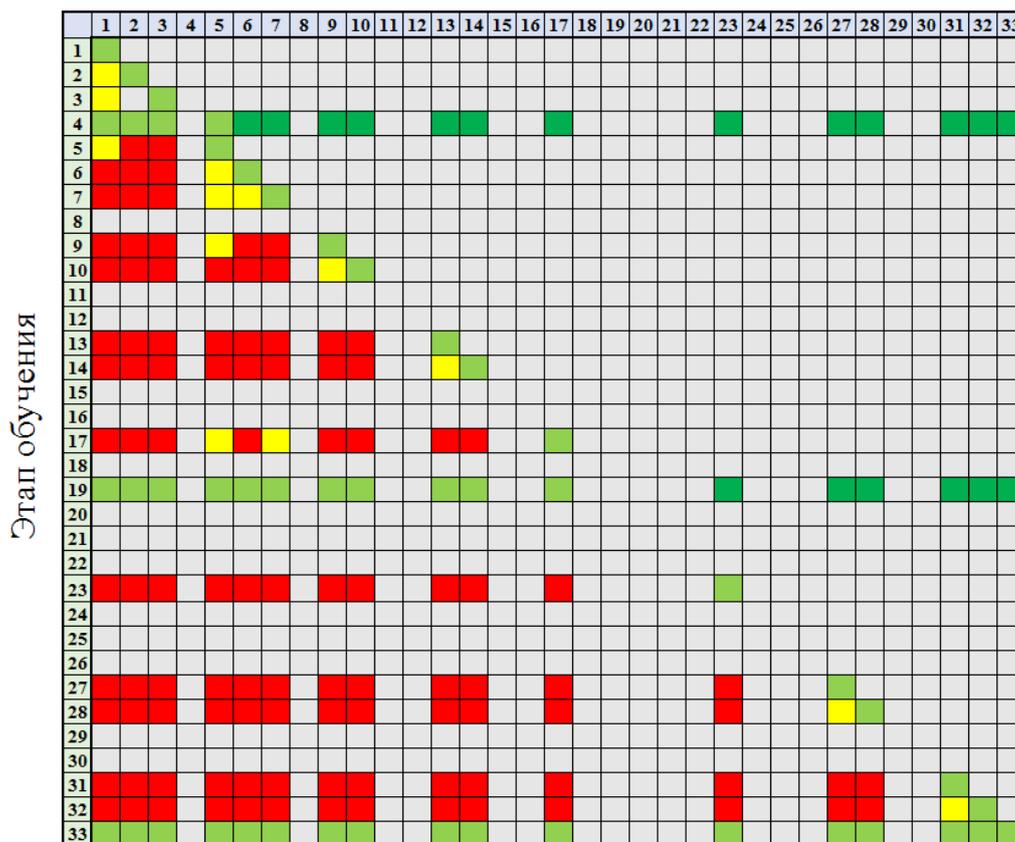


Рис. 4. Схема динамики проверки дидактического материала по дисциплине в процессе его изучения

Визуализация динамики. При таком подходе к фиксации и обновлению исходных данных для карты появляется возможность формировать карту на определённую дату, обозначая отдельным цветом тот материал, к изучению которого учащийся ещё не приступал. На ри-

сунке 5 приведен пример такой карты на те же даты, что и для рис. 3. Здесь неизученный материал из модели курса на момент его фиксации в ОЦС окрашен желтым цветом.

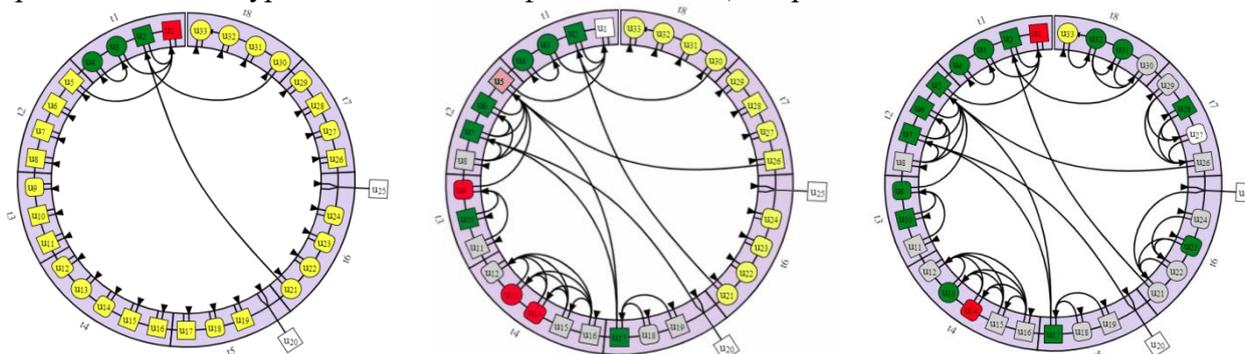


Рис. 5. Примеры ККДЗ учащегося на различных этапах изучения дисциплины с исключением из визуализации оценок ещё не изученного материала (частная карта, знаниевый аспект)

Очевидно, что приведённый пример, несмотря на достижение более реалистичной картины текущих знаний (или уровня развития компетентностей, если выбран соответствующий аспект), достаточно сложен для восприятия. Для повышения концентрации данных на карте и расстановке акцентов используем нотацию упрощённой карты. Для примера выведем те же три карты, что и на рис. 5, но в упрощенном режиме отрисовки ККДЗ (см. рис. 6). Теперь более наглядно показано то, к какому учебному материалу ИАОС рекомендует обратиться в первую очередь: например, для центральной карты это *u5* и *u12*. При необходимости исключить рассеивания внимания на «лишних» элементах карты, элементы учебного курса, окрашенные желтым, также можно «спрятать».

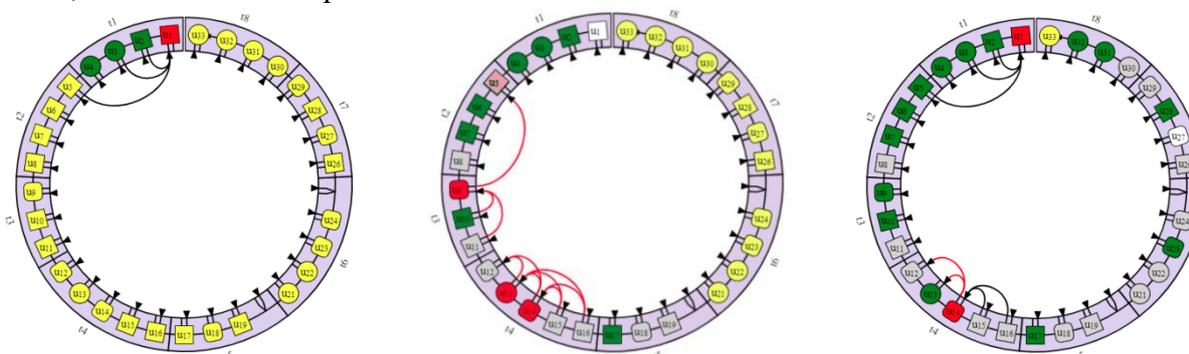


Рис. 6. Примеры ККДЗ учащегося на различных этапах изучения дисциплины в упрощенном режиме (знаниевый аспект)

Как видно из приведённого выше иллюстративного материала, метод ККДЗ может не только повысить концентрацию отображаемых данных, но и сделать отображение синхронным с процессом обучения, т.е. адекватно отражать динамику успехов учащегося при работе с ИАОС. Наши эксперименты показывают, что согласование содержимого карт с текстом рекомендаций/подсказок ускоряют восприятие учащимся сложившейся ситуации и способствуют развитию его инициативы по выяснению причин предъявляемых оценок со стороны обучающей системы.

Таким образом, в экспериментальной ИАОС AESU можно отобразить данные об учащемся на любую дату по выбранной дисциплине. Так, например, на декабрь 2024 г. в хранилище ОЦС обучающей системы зафиксированы более 2000 этапов работы магистрантов с

электронными курсами, каждый из которых может быть выведен в виде ККДЗ относительно различных аспектов.

Заключение. В качестве завершения хотелось бы порассуждать о перспективах дальнейшего повышения уровня концентрации данных из ОЦС, выводимых с помощью карт, для демонстрации динамики показателей. Мы можем выделить по меньшей мере три такие возможности:

1. Закодировать приращения значений данных текущей карты за счёт внесения в карту условных обозначений уже имеющихся элементов. Мы эту возможность изначально привязывали к начертанию текстовой метки: прямой шрифт – оценка существенно не изменилась (например, определять через фазификацию по методу нечёткой логики [12]) или выставлена впервые; курсив – оценка имеет значительно меньшее значение, чем та, которая была получена при предыдущем этапе проверки; жирность – значение оценки возросло по сравнению с предыдущим этапом контроля. Пример реализации такой карты можно увидеть на рис. 3, приведенном в работе [11].

2. Предусмотреть изменение заливки каждого элемента курса на карте в виде градиента значений той оценки, которая имела для каждого элемента относительно предыдущего этапа контроля.

3. Реализовать последовательную анимацию карты в соответствии с изменениями оценок.

Все возможности одновременно могут быть реализованы в рамках ИАОС, как альтернативные варианты отображения. Преимущества последнего – это возможность дополнительно выводить в анимации данные о траектории работы учащегося с курсом. Ещё большие возможности по концентрации данных можно получить путём комбинирования предложенных идей со сквозной нотацией ККДЗ, о которой можно узнать подробнее из [6].

Список источников

1. Horváth I. Designing next-generation cyber-physical systems: Why is it an issue? *Journal of integrated design and process science*, 2022, vol. 26, pp. 317-349, DOI:10.3233/JID-220008.
2. Arrieta A., Díaz-Rodríguez N., Del Ser et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information fusion*, 2020, vol. 58, pp. 82-115, DOI:10.1016/j.inffus.2019.12.012.
3. Ives K., Leinonen J., Hellas A. Supporting self-regulated learning with visualizations in online learning environments. *Proceedings of the 49th ACM Technical symposium on computer science education*, 2018, pp. 257-262, DOI:10.1145/3159450.3159509.
4. Han J., Kamber M., Pei J. *Data mining concepts and techniques*. The Morgan Kaufmann series in data management systems, 2011, vol. 5, pp. 83-124.
5. Qian J., Nguyen N., Oya Y., et al. Introducing self-organized maps (SOM) as a visualization tool for materials research and education. *Results in materials*, 2019, vol. 4, no. 100020, DOI:10.1016/j.rinma.2019.100020.
6. Uglev V. Cognitive maps of knowledge diagnosis (CMKD): the essence of the method, classification, characteristics and synthesis principles. *Novel & intelligent digital systems conferences. LNNS*, Springer, 2024, vol. 1170, pp. 594-605, DOI:10.1007/978-3-031-73344-4_51.
7. Углев В.А. Сравнительный анализ методов когнитивной визуализации данных из образовательного цифрового следа / В.А. Углев // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: Материалы VIII Международной научной конференции. – Красноярск: КГПУ, 2024. – Т. 1. – С. 324-328.
8. Gorban A., Zinovyev A. Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps. *IEEE International conference on data science and advanced analytics (DSAA)*, 2015, pp. 1-9, DOI:10.1109/DSAA.2015.7344818.
9. Uglev V., Sychev O. Evaluation, comparison and monitoring of multiparametric systems by unified graphic visualization of activity method on the example of learning process. *Algorithms*, 2022, 468 p.
10. Осипов Г.С. От ситуационного управления к прикладной семиотике / Г.С. Осипов // *Новости искусственного интеллекта*, 2002. – № 6. – С. 3-7.

11. Uglev V., Smirnov G. Combined maps as a tool of concentration and visualization of knowledge in the logic of operation of the intelligent tutoring systems. Intelligent tutoring systems, LNCS, Springer, 2024. vol. 14798, pp. 27-39, DOI:10.1007/978-3-031-63028-6_3.
12. Zadeh L.A., Aliev R.A. Fuzzy logic theory and applications: part I and part II. World scientific publishing, New Jersey, USA, 2018.

Углеv Виктор Александрович. Доцент, канд. техн. наук ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», доцент. Член Российской ассоциации искусственного интеллекта. Основные направления исследований: интеллектуальные автоматизированные обучающие системы, инженерия знаний, системная инженерия, когнитивная компьютерная графика, имитационное моделирование, методология науки. AuthorID: 559875, SPIN: 7368-2910, ORCID: 0000-0003-1205-2652, uglev-v@yandex.ru, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Кирова, 12а.

Смирнов Георгий Артёмович. Аспирант ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Основные направления исследований: искусственный интеллект, автоматизированные обучающие системы, инженерия знаний, системная инженерия. AuthorID: 1245841, SPIN: 9183-5051, ORCID: 0009-0003-7402-4419, Determaer2012@gmail.com, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Кирова, 12а.

UDC 004.42:004.822:378

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.012

Visualization of the dynamics of the educational process using cognitive of knowledge diagnosis

Viktor A. Uglev, Georgy A. Smirnov

Siberian federal university,

Russia, Zheleznogorsk, vauglev@sfu-kras.ru

Abstract. The paper deals with the issue of concentration of data from the digital educational footprint and display of its dynamics. The comparative analysis of visualization methods is made and it is proposed to consider the modification of the method of cognitive maps of knowledge diagnosis with the account of displaying the dynamics of the educational process. The essence of the method is revealed and the stages of map formation are shown. Illustrations are prepared on the basis of experimental data of master's students of Siberian Federal University in the intelligent tutoring system AESU. In conclusion, possible directions for further improvement of the method of cognitive maps of knowledge diagnosis are given.

Keywords: cognitive visualization, system approach, mapping, digital educational footprint, cognitive maps of knowledge diagnosis

References

1. Horváth I. Designing next-generation cyber-physical systems: Why is it an issue? Journal of integrated design and process science, 2022, vol. 26, pp. 317-349, DOI:10.3233/JID-220008.
2. Arrieta A., Díaz-Rodríguez N., Del Ser et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. Information fusion, 2020, vol. 58, pp. 82-115, DOI:10.1016/j.inffus.2019.12.012.
3. Iives K., Leinonen J., Hellas A. Supporting self-regulated learning with visualizations in online learning environments. Proceedings of the 49th ACM Technical symposium on computer science education, 2018, pp. 257-262, DOI:10.1145/3159450.3159509.
4. Han J., Kamber M., Pei J. Data mining concepts and techniques. The Morgan Kaufmann series in data management systems, 2011, vol. 5, pp. 83-124.
5. Qian J., Nguyen N., Oya Y., et al. Introducing self-organized maps (SOM) as a visualization tool for materials research and education. Results in materials, 2019, vol. 4, no. 100020, DOI:10.1016/j.rinma.2019.100020.

6. Uglev V. Cognitive maps of knowledge diagnosis (CMKD): the essence of the method, classification, characteristics and synthesis principles. Novel & intelligent digital systems conferences. LNNS, Springer, 2024, vol. 1170, pp. 594-605, DOI:10.1007/978-3-031-73344-4_51.
7. Uglev V.A. Sravnitel'ny`j analiz metodov kognitivnoj vizualizacii danny`x iz obrazovatel'nogo cifrovogo sleda [Comparative analysis of methods of cognitive visualization of data from the educational digital footprint]. Informatizatsiya obrazovaniya i metodika elektronnoho obucheniya: tsifrovyye tekhnologii v obrazovanii: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Informatization of education and e-learning methods: digital technologies in education: Proceedings of the VIII International scientific conference], Krasnoyarsk, KGPU, 2024, vol. 1, pp. 324-328.
8. Gorban A., Zinovyev A. Fast and user-friendly non-linear principal manifold learning by method of elastic maps. IEEE International conference on data science and advanced analytics (DSAA), 2015, pp. 1-9, DOI:10.1109/DSAA.2015.7344818.
9. Uglev V., Sychev O. Evaluation, comparison and monitoring of multiparametric systems by unified graphic visualization of activity method on the example of learning process. Algorithms, 2022, 468 p.
10. Osipov G.S. Ot situacionnogo upravleniya k prikladnoj semiotike [From situational management to applied semiotics]. Novosti iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence news], 2002, vol. 6, pp. 3-7.
11. Uglev V., Smirnov G. Combined maps as a tool of concentration and visualization of knowledge in the logic of operation of the intelligent tutoring systems. Intelligent tutoring systems, LNCS, Springer, 2024. vol. 14798, pp. 27-39, DOI:10.1007/978-3-031-63028-6_3.
12. Zadeh L.A., Aliev R.A. Fuzzy logic theory and applications: part I and part II. World scientific publishing, NewJersey, USA, 2018.

Uglev Viktor Alexandrovich. Associate professor, candidate of technical sciences, Siberian federal university. Member of the Russian association of artificial intelligence. Main research areas: Intelligent Tutoring Systems, knowledge engineering, systems engineering, cognitive computer graphics, simulation modeling, methodology of science. AuthorID: 559875, SPIN: 7368-2910, ORCID: 0000-0003-1205-2652, uglev-v@yandex.ru, 662971, Krasnoyarsk territory, Zheleznogorsk, Kirova str., 12a.

Smirnov Georgy Artemovich. Postgraduate student of the Siberian federal university. Main research areas: artificial intelligence, Intelligent tutoring systems, knowledge engineering, systems engineering. AuthorID: 1245841, SPIN: 9183-5051, ORCID: 0009-0003-7402-4419, Determaer2012@gmail.com, 662971, Krasnoyarsk territory, Zheleznogorsk, Kirova str., 12a.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024; одобрена после рецензирования 14.01.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 12/20/2024; approved after reviewing 01/14/2025; accepted for publication 02/13/2025.

Программные системы и комплексы

УДК 004.9

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.013

Геоинформационная система поддержки принятия решений по действиям при угрозе размыва путей на Улан-Баторской железной дороге

Аршинский Леонид Вадимович¹, Знайдюк Алексей Николаевич¹, Кириллова Татьяна Климентьевна¹, Старцев Сергей Петрович², Сэлэнгэ Мунхсайхан^{1,2}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *kirillova_tk@irgups.ru*

²Улан-Баторская железная дорога,
Монголия, Улан-Батор

Аннотация. В работе описана система поддержки принятия решений (СППР) по действиям в условиях угрозы размыва путей для Улан-Баторской железной дороги. Кратко представлена информация о дороге, описаны геоклиматические условия её функционирования. Дана математическая модель километрового расчёта угрозы размыва железнодорожных путей в зависимости от метеорологического прогноза, состояния пути и наличия искусственных сооружений. Рассматриваются состав СППР, её функциональность и общие принципы работы.

Ключевые слова: геоинформационная система, система поддержки принятия решений, Улан-Баторская железная дорога, размыв путей, система контроля опасности размыва дороги

Цитирование: Л.В. Аршинский. Геоинформационная система поддержки принятия решений по действиям при угрозе размыва путей на Улан-Баторской железной дороге / Л.В. Аршинский, А.Н. Знайдюк, Т.К. Кириллова, С.П. Старцев, М. Сэлэнгэ // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 130-142. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.013.

Введение. Улан-Баторская железная дорога (УБЖД) – один из важнейших компонентов транспортного комплекса Монголии. История железнодорожного сообщения в Монголии началась с соглашения о взаимопомощи между правительствами Монгольской народной республики (МНР) и СССР в 1936 году, когда постановлением Президиума Центрального Комитета Монгольской Народно-Революционной партии от 09 октября 1936 года № 26, премьер-министру МНР А. Амару и члену президиума Центрального Комитета партии Р. Мэнду было поручено приступить к организации работ по строительству железной дороги. В результате в августе 1938 года была открыта узкоколейная линия Налайх – Улан-Батор длиной 43 км, построенная с участием советских специалистов и на предоставленные Советским Союзом кредитные средства. Спустя одиннадцать лет в 1949 г. была проложена, а в 1950 г. сдана в постоянную эксплуатацию линия «Наушки – Улан-Батор». Также в 1949 году было учреждено совместное монголо-советское акционерное общество «Улан-Баторская железная дорога».

К настоящему времени УБЖД – это крупнейший экономический субъект Монголии. Общая протяженность железнодорожных линий составляет 1815 км. Основной линией является Трансмонгольская магистраль Сухэ-Батор – Улан-Батор – Дзамын-Уд протяженностью 1111 км, связывающая между собой Россию, Монголию и Китай [1] (рис. 1).

Одной из серьёзных проблем эксплуатации дороги являются сложные погодные условия, обусловленные географическим положением Монголии. Территория страны – это, фактически, горное плато, расположенное примерно на высоте 1,5 км над уровнем моря. При этом, если на севере и западе преобладают горы, юг – пустынный, здесь расположена пустыня Гоби; в центральной и восточной частях преобладают равнины [2].

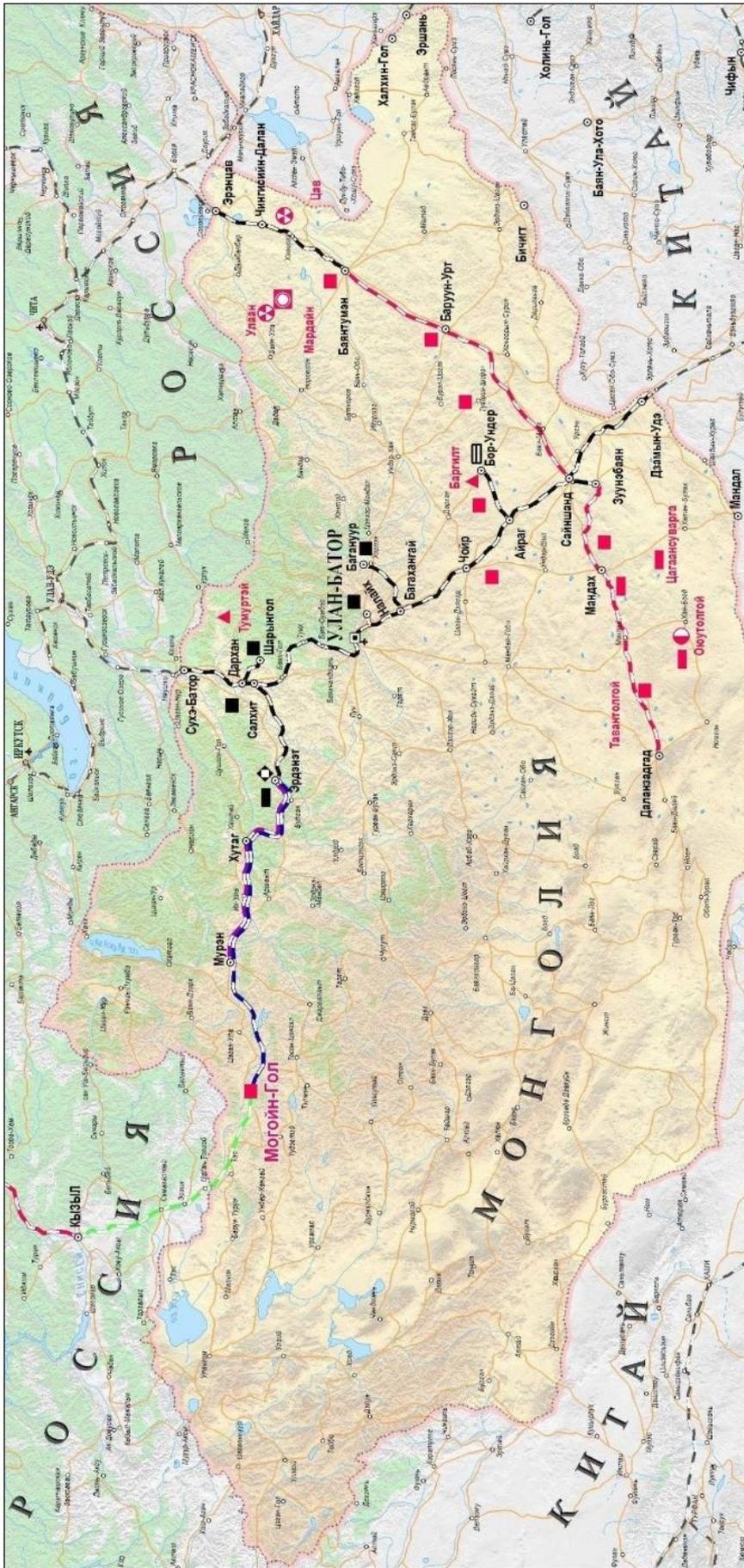


Рис. 1. Схема Улан-Баторской железной дороги с действующими и перспективными направлениями. Черным цветом обозначены действующие направления, красным и синим – перспективные

Несмотря на общий сухой резко-континентальный климат, персонал дороги ежегодно сталкивается с проблемой размыва путей, обусловленных влиянием паводков. Среднегодовое количество осадков в Монголии составляет 250 мм. При этом на севере в горах, прилегающих к озеру Хубсугул, их выпадает до 400 мм, на юге, в пустыне Гоби, – около 40 мм; 85 % годового количества осадков выпадает с апреля по сентябрь [2]. Поскольку осадки распределены неравномерно географически и по сезонам, в период с апреля по сентябрь возникает угроза размыва путей. Особенно опасны в этом смысле внезапные ливни, которые в условиях гористой местности приводят к движению по горным склонам больших масс воды, способных за короткий срок разрушить дорожное полотно и привести к остановке движения.

Прогнозирование размывов. В настоящее время ликвидация последствий размывов ведётся в основном «по факту»: по получении сигнала о событии бригады выезжают на место, оценивают обстановку и принимают необходимые меры. Безусловно, для противодействия размывам полотно дороги снабжено искусственными сооружениями (ИССО): мостами, водопропускными трубами и т.д., но осадки могут превышать их возможности [3]. Поскольку между событием размыва и началом ликвидации его последствий существует временной лаг, масштаб негативных последствий со временем нарастает.

Для эффективной борьбы с размывами более эффективной стратегией является предсказание возможности подобных событий по месту и времени для своевременной подготовки парирующих мероприятий [4–6]. Для этого Гидрометцентр Монголии снабжает УБЖД прогнозами погоды по всей протяженности дороги.

Для предсказания места возможного размыва с учётом прогноза погоды и наличия ИССО разработана модель, рассчитывающая уровень угрозы. Модель учитывает такие характеристики обстановки, как:

1. Состояние земляного полотна.
2. Характеристика пути.
3. Высота насыпи.
4. Наличие прилегающих искусственных сооружений (ИССО).
5. Изменение естественного характера водотока относительно железной дороги за счет строительства.
6. Состояние водоотводных канав.
7. Наличие и состояние водораздельных и водооградительных дамб.
8. Наличие и состояние конуса скрепления.
9. Состояние ИССО по водопропускной способности.
10. Площадь водосбора.
11. Рельеф местности с уклонами к железнодорожному пути.
12. Предполагаемая скорость потока воды.
13. Направление потока воды к насыпи железной дороги.
14. Наличие притрассовых автодорог.
15. Обеспеченность материалами и инструментом для водоборьбы.
16. Стаж работников, участвующих в предупреждении/ликвидации последствий.

Характеристики имеют числовые интервальные или лингвистические значения. Например, первая – значения: щебень, песок, гравий; вторая учитывает тип шпал: железобетонные, комбинированные, деревянные; третья характеризуется числовыми интервалами: от 4.6 до 6 м и более, от 3.1 до 4.5 м, от 1,6 до 3 м., от 1,1 до 1,5 м, от 0 до 1 м, и так далее. Более подробно с этим вопросом можно ознакомиться в работах [6–8].

Общая угроза вычисляется, как сумма вкладов каждой из характеристик $d(X_i)$, умноженных на меру их значимости $k(X_i)$ с последующим умножением на зависящий от времени показатель прогноза осадков $w(t)$, который принимает значения от нуля и выше

(нулевое значение $w(t)$ – прогноз отсутствия осадков); вклады $d(X_i)$ и значимости $k(X_i)$ задаются специалистами экспертно [6-8]:

$$D(t) = w(t) \cdot \sum_{i=1}^{16} k(X_i) d(X_i). \quad (1)$$

Здесь t – время (дискретность три часа, прогнозный интервал трое суток).

Согласно (1) при минимальных или отсутствующих по прогнозу осадках опасность размыва минимизируется или вовсе обнуляется.

Суммарный показатель D попадает в один из следующих интервалов (уровней опасности):

- опасность отсутствует ($D \leq 50$) – зелёный уровень;
- средний уровень ($50 < D \leq 84$) – жёлтый;
- высокий уровень ($84 < D \leq 120$) – оранжевый;
- очень высокий уровень ($120 < D$) – красный.

Предполагается, что в зависимости от величины показателя $D(t)$ соответствующие службы будут заранее принимать необходимые меры: готовиться к выезду или выезжать на предполагаемое место, готовить технику, оборудование и так далее. Перечень управленческих решений дан в таблице 1.

Таблица 1. Управленческие решения при угрозе размыва пути

Управленческие рекомендации.	Критерии опасности			
	красный	оранжевый	жёлтый	зелёный
Закрытие или ограничение движения	▼	▼		
Выставление постов безопасности	▼	▼		
Направление противоразмывных поездов на приграничные станции	▼			
Направление землеройной техники для распределения потоков воды	▼	▼	▼	
Отмена всех планово-предупредительных и неотложных работ на участке	▼			
Обеспечение готовности к аварийно-восстановительным работам специальной техники и восстановительного поезда	▼	▼		
Организация дополнительного осмотра пути для выявления разрушений, выплесков, переувлажнения земляного полотна, угрожающих безопасности движения	▼	▼	▼	

Основанная на такой модели угроз система поддержки принятия решений (СППР) изначально была реализована в простейшей форме в виде электронной таблицы, в которую с покิโลметровым интервалом заносятся сведения о характеристиках $d(X_i)$ и $k(X_i)$ (рис. 2, цветом отмечены характеристики). После покิโลметрового расчёта показателя $D(t)$ строки, соответствующие значимой величине угрозы для заданного момента времени, выделяются цветом согласно вышеуказанной схеме: жёлтым (средний уровень угрозы), оранжевым (высокий уровень) и красным (очень высокий уровень). Зелёный уровень не выделяется, чтобы не отвлекать внимание.

В зависимости от ситуации на каждом километре, в расчёте участвуют соответствующие столбцы таблицы.

КМ	ПК	Род сооружения	Числа и значения параметров в пасп.м	Год постройки	Состояние земельного полотна	Характеристика пути	Высота насыпи	Наличие ИССО	Изменение естественного характера водотока относительно ж.д. за счет строительства автодорог	Состояние водотоков канав	Водораздельные и водоградительные дамбы	Укрепления конуса	Состояние ИССО по водопропускной способности	Площадь водосбора	Рельеф местности с уклонами к ж.д. пути, %	Скорость потока воды	Направление потока воды к насыпи ж.д.	Наличие протрассовых автодорог
ОЦЕНКА РИСКА																		
11	2	ЖЕМ	1949	3	3	3	4	5	4	3	3	1	3	3	3	3	3	3
8	ЖЕМ	1949	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
12	7	ЖЕМ	1949	3	3	4	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	ЖЕМ	1949	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14	1	ЖЕМ	1949	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
15				3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
16	4	ЖЕМ	1949	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
17	1	ЖЕМ	8,9	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
18	8	ЖЕМ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
19	5	ЖЕМ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
20	2	ЖЕМ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
21	3	ЖСТ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	ЖСТ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	ЖСТ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
22	8	ЖСТ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	ЖСТ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	ЖСТ	1948	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Рис. 2. Фрагмент таблицы характеристик

Развитием табличного подхода к СППР стала её разработка в виде геоинформационной системы (ГИС) СКОРД 1.0, отображающей прогноз на карте и выдающей рекомендации по мерам противодействия.

Система контроля опасности размыва дороги СКОРД. Рассмотрим возможности СППР СКОРД. Система осуществляет мониторинг опасности возможного размыва участков земляного полотна и искусственных сооружений Улан-Баторской железной дороги, с использованием современных геоинформационных технологий, а также возможностью мониторинга состояния ИССО. ПО реализовано как веб-приложение с использованием ГИС-технологий.

Архитектура веб-приложения клиент-серверная, где клиенты – рабочие компьютеры, через которые пользователи отправляют запросы, а сервером является отдельная машина, обрабатывающая запросы пользователей, например, отображения информации на карте о рисках размыва, загрузка новых данных, введенных пользователями. Такая архитектура позволяет работать с веб-приложением нескольким пользователям (рисунки 3, 4). Серверная часть реализуется на Django. Система содержит компоненты:

1. Клиент – устройство, либо ПО, которое пользователь использует для своих целей. Аппаратные средства (терминалы, планшеты) выступают в роли «тонких клиентов», Клиенты отправляют серверу в виде особого кода запрос на получение сведений. Клиент включает:
 - 1.1. Модули системы: авторизация, личный кабинет, где хранятся сведения о пользователе и приходят уведомления с риском размыва и необходимыми управленческими рекомендациями по оперативным мерам.
 - 1.2. Интерактивная карта (googlemap карта) представляет собой прослойку между клиентом и сервером. С её помощью пользователь может видеть необходимые ему данные с окрашиванием дороги в три цвета.
 - 1.3. Мессенджер, реализованный по типу «Телеграмма», дает возможность обмениваться сообщениями и файлами.
2. Сервер – место хранения веб-приложения. В процессе отправки запросов и предоставления ответов он выполняет обработку запросов, производит вычисления, хранит информацию.

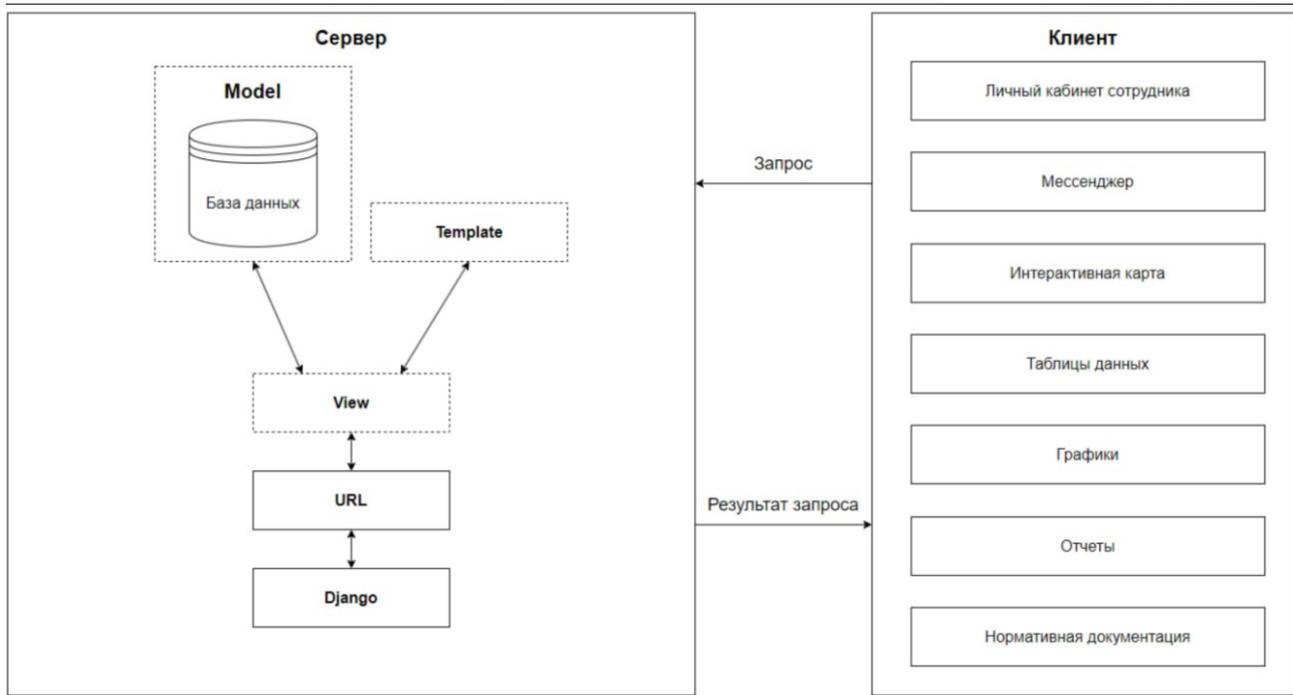


Рис. 3. Архитектура веб-приложения

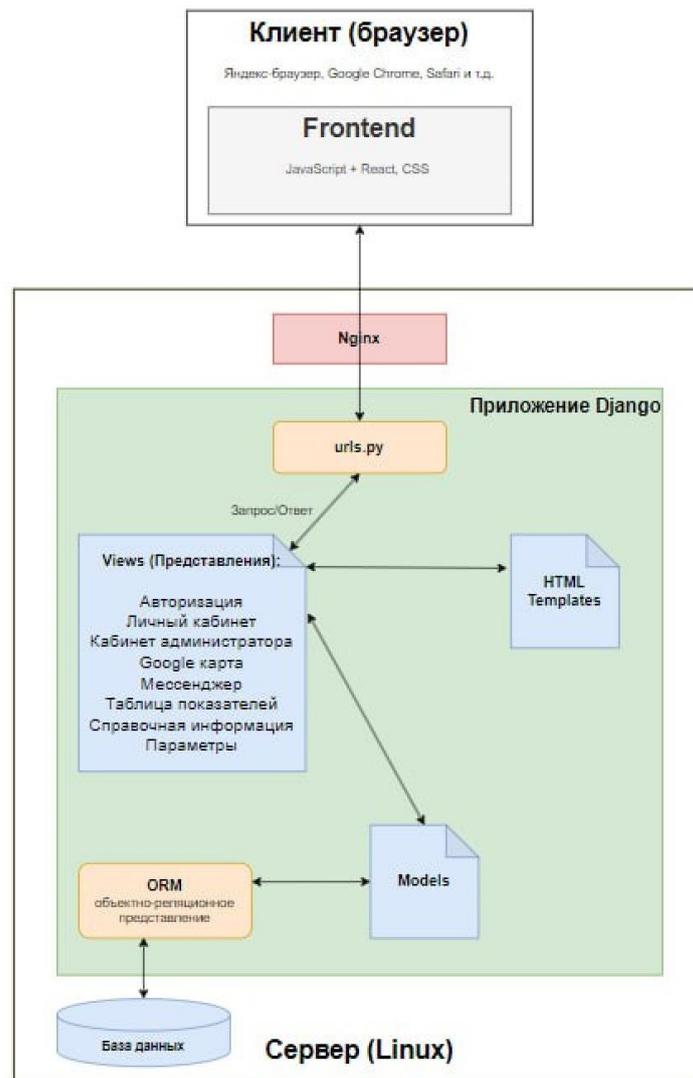


Рис. 4. Сервер Django

Для хранения информации была спроектирована реляционная база данных, которая содержит 19 таблиц и работает под управлением СУБД PostgreSQL.

На основе требований УБЖД и исследований, проведенных в работах [9-11], определена функциональность приложения, которая включает:

- прогнозирование места (участки дороги), где есть риск размыва пути с указанием степени опасности (жёлтая зона – средний уровень риска, оранжевая зона – опасная, с вероятностью размыва, красная зона – очень высокий уровень риска) на основе данных об ожидаемом количестве осадков (ручной и автоматизированный ввод);
- выдачу рекомендаций о необходимом комплексе управленческих решений при оперативном планировании мероприятий;
- формирование отчётов, содержащих таблицу данных (рис. 2), гистограммы по семнадцати показателям с фильтром по календарю и выборкой по километрам (в форматах PDF и Excel);
- осуществление автоматической рассылки уведомлений о рисках размыва пути (уровень риска и километр), в виде всплывающего сообщения; более подробное уведомление отправляется в личный кабинет пользователя;
- мессенджер, позволяющий осуществлять рассылку публичных и личных сообщений пользователям, создавать группы, прикреплять файлы;
- функцию добавления характеристик строения пути и построения аналитических графиков за разные промежутки времени, возможность сделать выборку по рисковому километрам дороги;
- интерактивную карту железной дороги на основе технологии API Google Map, показывающую уровень риска размыва с окрашиванием дороги в цвет опасности;
- возможность прикрепления фото- и видеоматериалов на карту для визуализации объектов ИССО;
- возможность добавления/удаления административно-правовых документов (вкладка «Справочная информация»);
- другие функции.

Для корректной работы системы можно использовать браузеры, обеспечивающие полную совместимость со стандартами: HTML5, CSS 2.0 и выше, JavaScript, EcmaScript.

Рекомендуемое ПО:

1. Google Chrome версия не ниже 84.X.
 2. Mozilla Firefox версия не ниже 79.X.
- СППР СКОРД поддерживает два языка:

- русский;
- монгольский.

Язык выбирается при регистрации/входе пользователя в веб-приложение. Для этой цели предусмотрен соответствующий интерфейсный элемент.

Работа с СППР СКОРД. Процесс начинается, с того, что гидрометцентр Монголии присылает прогноз погоды по участкам и времени. Эти данные соответствующим образом обрабатываются и заносятся в базу данных (БД). Данные прогноза динамические – изменяются каждые три часа. После обработки данных выполняется покилометровый расчет согласно (1). Результаты также заносятся в БД.

По итогам расчёта в личные кабинеты сотрудников дороги автоматически рассылаются управленческие рекомендации и короткие всплывающие уведомления об угрозе (средний, высокий и очень высокий риск размыва) – рисунок 5.



Рис. 5. Всплывающие уведомления

Функциональность системы сгруппирована по следующим основным блокам: Справочная информация; Чаты; ГИС «Карта»; Отчеты; Личный кабинет; Личный кабинет администратора.

Расчет базовых показателей риска размыва осуществляется согласно (1) с учетом весовых коэффициентов $k(X_i)$ и показателя уровня прогнозируемых осадков $w(t)$. Система позволяет добавлять показатели и редактировать их.

Для работы с нормативно-справочной информацией служит раздел «Справочники». После входа в него будут доступны справочники: Нормативные документы; Акты; Приказы; Распоряжения.

Для работы со справочниками в системе предусмотрены такие функции, как:

- 1) добавление новой записи в справочник;
- 2) редактирование выбранной записи;
- 3) удаление выбранной записи;
- 4) поиск записей справочника, удовлетворяющих заданным критериям.

Функции добавления, редактирования и удаления доступны пользователю только при наличии соответствующих прав.

Мессенджер используется для мгновенного обмена текстовыми сообщениями и мультимедиа между зарегистрированными пользователями через интернет с возможностью прикрепления файлов. Основные элементы интерфейса:

- список чатов и групп;
- основной блок для просмотра содержимого чатов и групп;
- переход в главное меню;
- поле для полнотекстового поиска над списком чатов и групп.

Функциональность чата включает следующие возможности:

- сопровождение до 200 участников в приватном или публичном чате;
- сопровождение до 3 администраторов чата;
- упоминания, ответы, пересылка сообщений, а также отметки о прочтении;
- общение с другими пользователями один на один или в групповых беседах;
- отправление текстовых, а также фото-, видео- и иных файлов;
- связь с коллегами в рабочем пространстве, используя адресную книгу организации;
- для себя лично чат можно использовать как блокнот или облачное хранилище.

Лимиты для сообщений:

- максимальная длина текста в одном сообщении (посте) 4096 символов; при публикации текста большего размера он автоматически будет разделен на несколько сообщений;
- к одному сообщению можно прикрепить до 6 файлов (фото или видео) объемом до 2 Гб;
- сообщение с медиафайлами может содержать до 1024 символов.

Если создать группу, появляется возможность общаться с несколькими собеседниками одновременно. Для группы и канала можно установить фото, добавить и изменить название. Сообщения, которые пишутся в группе, видны всем. Группой можно управлять, назначив администратора (по умолчанию администратор – создатель группы). Администратор может добавлять и удалять участников.

ГИС Карта. СКОРД является ГИС-приложением, основанным на технологии API Google Map. На карте в цвете отображаются километровые данные об угрозе размыва в зависимости от прогноза погоды и характеристик ИССО, располагаемых на участках пути. В мелком масштабе отображается карта местности со схемой железной дороги и перечнем станций, но без искусственных сооружений (рис. 6).

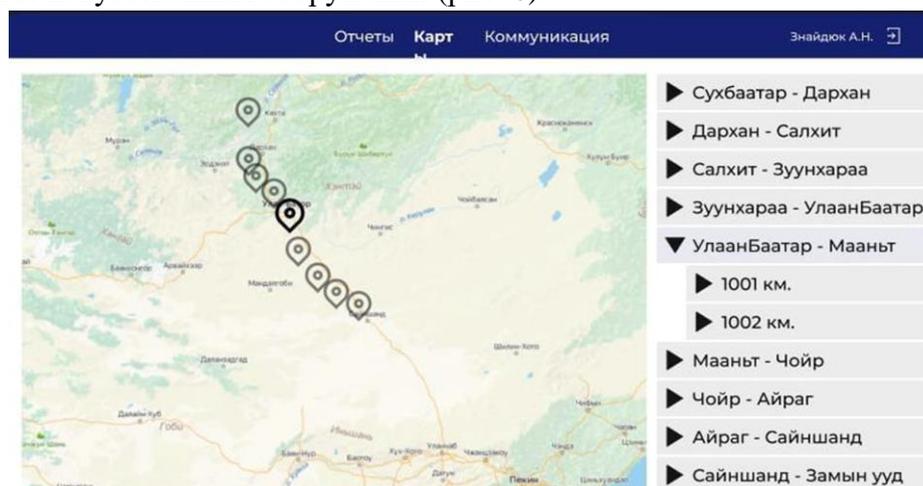


Рис. 6. Мелкомасштабная карта дороги с отображением станций

При максимальном приближении (укрупнении масштаба карты) отображаются также объекты инфраструктуры: мосты, трубы и т.д., как показано на рисунке 7.

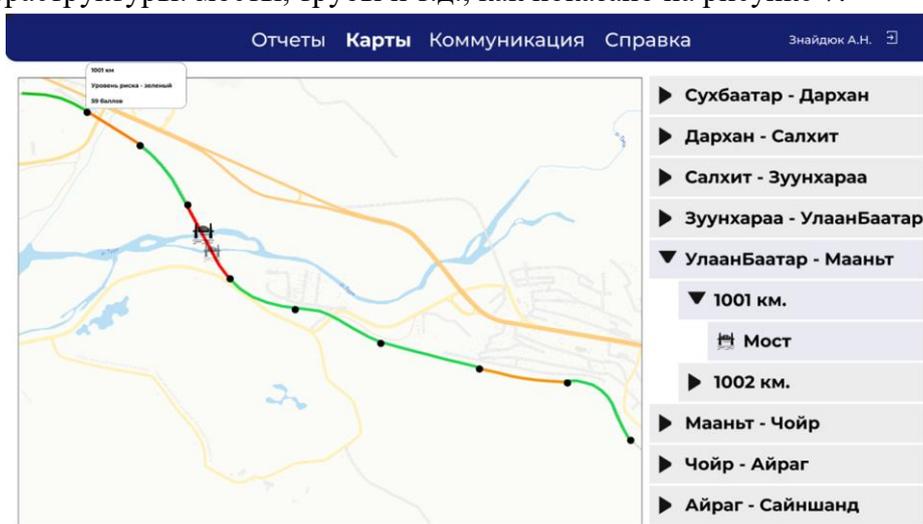


Рис. 7. Крупномасштабная карта с отображением ИССО

Для визуализации объектов ИССО предусмотрена возможность прикреплять несколько фото и один видеоматериал на участок карты, рисунок 8.

Личные кабинеты пользователя и системного администратора. Для работы в системе необходимо авторизоваться. После прохождения авторизации пользователь попадает на страницу личного кабинета. Личный кабинет – это раздел приложения, который видят только авторизованные пользователи. Вход, в него осуществляется с помощью логина и пароля. Здесь пользователь может посмотреть личную информацию о себе: «Фамилия», «Имя», «Должность», «Участок», «Станция», «Телефон», «Электронная почта» и отредактировать её.



Видеозапись объекта:



Рис. 8. Пример визуализация ИССО

Аналоги СППР СКОРД. Проведено исследование существующих аналогов системы. На данный момент для осуществления процесса прогнозирования рисков размыва на УБЖД не существует прямых аналогов, а только системы со схожими функциональными возможностями. В частности, рассмотрены такие системы, как: ГИС «Панорама» и «Система моделирования и прогнозирования ЧС».

ГИС «Панорама» – комплекс прогнозирования чрезвычайных ситуаций, предназначен для выполнения автоматизированного прогнозного моделирования и оценки потенциальных последствий чрезвычайных ситуаций. Комплекс выполняет построение и анализ математических моделей чрезвычайных ситуаций. С помощью данного комплекса возможно выполнение расчета параметров поражающих факторов и построение зоны возможного поражения в результате возникновения чрезвычайной ситуации. Зона поражения наносится на карту обстановки района чрезвычайной ситуации условными обозначениями, которые соответствуют требованиям МЧС. При расчете учитываются погодные условия, которые вводятся оператором в момент расчета [12].

Система моделирования и прогнозирования ЧС предназначена для заблаговременного и оперативного прогнозирования масштабов заражения на случай выбросов сильнодействующих ядовитых веществ в окружающую среду при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. Система моделирования и прогнозирования ЧС позволяет осуществлять прогнозирование масштабов зон заражения при авариях на технологических емкостях и хранилищах, при транспортировке железнодорожным, трубопроводным и другими видами транспорта, а также в случае разрушения химически опасных объектов. Стоимость определяется индивидуально в зависимости от проектного решения.

Обе системы предназначены для других целей и не решают задач УБЖД.

Заключение. Представленная СППР СКОРД не имеет аналогов для решения подобных задач, основные функции реализованы. По её полному завершению она позволит руководству и службам УБЖД повысить оперативность принимаемых решений, уменьшая последствия размывов железнодорожных путей.

Список источников

1. Какие железнодорожные линии существуют в Монголии. – URL: [https://dzen.ru/a/X6A73G8ezBNvlq4-\(дата обращения 20.10.2024\)](https://dzen.ru/a/X6A73G8ezBNvlq4-(дата обращения 20.10.2024)).
2. Монголия (Монгол улс). – URL: <https://bigenc.ru/c/mongoliia-aed287> (дата обращения 20.10.2024).

3. Программа технической модернизации и развития АО «УБЖД» на период 2014 – 2020 годы / ОАО «ИЭРТ», ИПИИ «Иркутскжелдорпроект» – филиал ОАО «Росжелдорпроект», 2013. – 5 этап. – Том 2. – ПЗ. – Часть 1. – 263 с.
4. Бурэн-Итгэл Г. Повышение эффективности использования автономных локомотивов для грузоперевозок на железных дорогах Монголии [Текст] дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2 / Гантумур Бурэн-Итгэл Московский энергет. институт М. – 2022. – 131 с.
5. Перфильева Е.В. Программа «Элегия» для принятия решения в условиях риска / Е.В. Перфильева, А.Д. Мелехова, О.В. Благоразумова, В.А. Подвербный // Фундаментальные и прикладные исследования в условиях геополитической нестабильности. Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2023. – С. 11-14.
6. Филатов Е.В. Программа РЕД_PROGNOZ для оперативного автоматизированного информирования об опасности размыва участков земляного полотна и искусственных сооружений Улан-Баторской железной дороги / Е.В. Филатов, П.Н. Холодов, В.А. Подвербный // Научно-исследовательские публикации, 2023. – № 3. – С. 90-94
7. Филатов Е.В. К вопросу анализа рисков размывов пути на Улан-Баторской железной дороге / Е.В. Филатов, Д.А. Ковенькин, В.А. Подвербный // Наукосфера, 2023. – № 8-1. – С. 113-122.
8. Филатов Е.В. Предложения по совершенствованию методики факторного анализа рисков размывов пути, разработанной специалистами Улан-Баторской железной дороги / Е.В. Филатов, Д.А. Ковенькин, В.А. Подвербный // Наукосфера, 2023. – № 8-1. – С. 123-130.
9. Мунгунхуяг Г., Кириллова Т.К. Проектирование мобильного приложения мониторинга технического состояния локомотива и ремонтных работ ТО-2 на Улан-Баторской железной дороге// Молодая наука Сибири. 2023. № 3 (21). С. 123-129
10. Балжир Мунхдэлгэр Организация и развитие грузовых перевозок на сети Монгольской железной дороги: диссертация кандидата технических наук. – М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – 129 с
11. Обзор отрасли грузоперевозок в России 2020 год. / О. Архангельская, П. Галова, С. Трофимов, В. Махачев. Эрнст энд Янг – оценка и консультационные услуги. – 54 с.
12. Акционерное общество Конструкторское бюро “Панорама”. – URL: https://gisinfo.ru/price/price_linux.htm. (дата обращения: 31.03.2024)

Аршинский Леонид Вадимович. Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 520252, SPIN: 9286-4084, ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.

Знайдюк Алексей Николаевич. Магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 1233438, SPIN: 9296-4330, znaidyuk00@gmail.com, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.

Кириллова Татьяна Климентьевна. К.э.н., доцент, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 526681, SPIN: 5252-5970, kirillova_tk@irgups.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.

Старцев Сергей Петрович. Главный инженер АО “УБЖД”, baikal1969@yandex.ru, Монголия, г. Улан-Батор-13, П/я-376, ул. Сеула-42.

Сэлэнгэ Мунхсайхан. Магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения. AuthorID: 1233438, SPIN: 9296-4330, munkhsaikhan93@gmail.com, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.

UDC 004.9

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.013

Geoinformation system for decision support on actions in case of threat of track erosion on the Ulaanbaatar railway

Leonid V. Arshinskiy¹, Aleksey N. Znaidyuk¹, Tatyana K. Kyrillova¹, Sergey P. Starcev², Selenge Mukhsaikhan^{1,2}

¹Irkutsk state transport university,
Russia, Irkutsk, *kirillova_tk@irgups.ru*

²Ulaanbaatar railway,
Mongolia, Ulaanbaatar

Abstract. The paper describes a decision support system (DSS) for actions in conditions of a threat of track erosion for the Ulaanbaatar Railway. Information about the road is briefly presented, and the geoclimatic conditions of its operation are described. A mathematical model is given for kilometer-by-kilometer calculation of the threat of track erosion depending on the meteorological forecast, track condition and the presence of artificial structures. The composition of the DSS, its functionality and general principles of operation are considered.

Keywords: geographic information system, decision support system, Ulaanbaatar Railway, track erosion, road washout hazard monitoring system

References

1. Kakiye zheleznodorozhnyye linii sushchestvuyut v Mongolii [What railway lines exist in Mongolia?]. Available at: <https://dzen.ru/a/X6A73G8ezBNvlq4-> (accessed: 10/20/2024)
2. Mongoliya (Mongol uls) [Mongolia (Mongol uls)]. Available at: <https://bigenc.ru/c/mongoliia-aed287> (accessed: 10/20/2024).
3. Programma tekhnicheskoy modernizatsii i razvitiya AO "UBZhD" na period 2014 – 2020 gody / OAO "IERT", IPII "Irkutskzheldorproekt" – filial OAO "Roszheldorproekt" [The program of technical modernization and development of JSC "UBZhD" for the period 2014-2020 / JSC "IERT", IPII "Irkutskzheldorproekt" - a branch of JSC "Roszheldorproekt"], 2013, 5 phase, vol. 2, PZ, ch. 1, 263 p.
4. Buren-Itgel G. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya avtonomnykh lokomotivov dlya gruzoperevozok na zheleznykh dorogah Mongolii [Tekst] dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.4.2 [Improving the efficiency of using autonomous locomotives for freight transportation on Mongolian railways [Text] dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 2.4.2]. Moskovskij energet. institut M. [Moscow Power Engineering Institute M.], 2022, 131 p.
5. Perfil'eva E.V., Melekhova A.D., Blagorazumova O.V., Podverbnyj V.A. Programma "Elegiya" dlya prinyatiya resheniya v usloviyah riska [The "Elegiya" program for decision-making under risk conditions]. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v usloviyah geopoliticheskoy nestabil'nosti. Materialy XXIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Rostov-na-Donu [Fundamental and applied research in conditions of geopolitical instability. Proceedings of the XXIII All-Russian scientific and practical conference], 2023, pp. 11-14.
6. Filatov Ye.V., Kholodov P.N., Podverbnyy V.A. Programma RED_PROGNOZ dlya operativnogo avtomatizirovannogo informirovaniya ob opasnosti razmyva uchastkov zemlyanogo polotna i iskusstvennykh sooruzheniy Ulan-Batorskoy zheleznoy dorogi [Program RED_PROGNOZ for prompt automated information about the danger of erosion of sections of the roadbed and artificial structures of the Ulaanbaatar railway]. Nauchno-issledovatel'skiye publikatsii [Research publications], 2023, no 3, pp. 90-94.
7. Filatov Ye.V., Koven'kin D.A., Podverbnyy V.A. K voprosu analiza riskov razmyvov puti na Ulan-Batorskoy zheleznoy doroge [On the issue of analyzing the risks of track erosion on the Ulaanbaatar railway]. Naukosfera [Naukosfera], 2023, no. 8-1. pp. 113-122.
8. Filatov Ye.V., Koven'kin D.A., Podverbnyy V.A. Predlozheniya po sovershenstvovaniyu metodiki faktornogo analiza riskov razmyvov puti, razrabotannoy spetsialistami Ulan-Batorskoy zheleznoy dorogi [Proposals for improving the methodology for factor analysis of track erosion risks developed by specialists of the Ulaanbaatar Railway]. Naukosfera [Naukosfera], 2023, no. 8-1, pp. 123-130.
9. Mungunhuyag G., Kirillova T.K. Proektirovaniye mobil'nogo prilozheniya monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotiva i remontnykh rabot TO-2 na Ulan-Batorskoy zheleznoy doroge [Design of a mobile application for monitoring the technical condition of a locomotive and maintenance work TO-2 on the Ulaanbaatar Railway]. Molodaya nauka Sibiri [Young science of Siberia], 2023, no. 3 (21), pp. 123-129
10. Balzhir Munhdelger Organizatsiya i razvitie gruzovykh perevozok na seti Mongol'skoj zheleznoy dorogi: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk [Organization and development of freight transportation on the Mongolian railway network: dissertation of candidate of technical sciences]. M.: MGUPS (MIIT), 2015, 129 s
11. Arkhangel'skaya O., Galova P., Trofimov S., Makhachev V. Obzor otrasli gruzoperevozok v Rossii 2020 god [Overview of the cargo transportation industry in Russia 2020]. Ernst end Yang – otsenka i konsul'tatsionnyye uslugi [Ernst & Young – assessment and consulting services], 54 p.

12. Aktsionernoye obshchestvo Konstruktorskoye byuro "Panorama" [Joint-Stock company design bureau "Panorama"], available at: https://gisinfo.ru/price/price_linux.htm. (accessed: 03/31/2024).

Arshinskiy Leonid Vadimovich. Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department Information systems and information security of Irkutsk state transport university. AuthorID: 520252, SPIN: 9286-4084, ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.

Znaidyuk Aleksey Nikolaevich. Master's student of the department Information systems and information security of the Irkutsk state transport university. Author ID: 1233438, SPIN: 9296-4330, znaidyuk00@gmail.com, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.

Kirillova Tatyana Klimentyevna. PhD, associate professor, chief of the department Information systems and information security of Irkutsk state transport university. AuthorID 526681, SPIN: 5252-5970, AuthorID: 526681, kirillova_tk@irgups.ru, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.

Startsev Sergey Petrovich. Chief engineer of JSC UBZhD, baikal1969@yandex.ru, Mongolia, Ulaanbaatar-13, N/A-376, Seoul street-42.

Selenge Munkhsaikhan. Master's student of the department Information systems and information security of Irkutsk state transport university. AuthorID: 1233438, SPIN: 9296-4330, munkhsaikhan93@gmail.com, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky, 15.

Статья поступила в редакцию 01.11.2024; одобрена после рецензирования 03.02.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 11/01/2024; approved after reviewing 02/03/2025; accepted for publication 02/13/2025.

УДК 004.031.42

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.014

Автоматизация создания фондов оценочных средств по образовательным программам, реализуемым университетом

Алексеев Роман Вячеславович¹, Лукьянов Никита Дмитриевич²

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, Иркутск, alekseevrv@ex.istu.edu

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск

Аннотация. В статье рассматривается проблема эффективного управления оценкой качества подготовки обучающихся по образовательной программе в целом или по отдельным ее компонентам. Традиционные методы создания фондов оценочных средств часто сталкиваются с трудностями, такими, как неоднозначность критериев оценки и ограниченная адаптивность к потребностям участников образовательного процесса. В статье предлагается внедрение автоматизированной системы для создания и управления фондами оценочных средств по образовательным программам университета. Это позволит более точно и объективно оценивать достижения запланированных результатов обучения (компетенций, индикаторов достижения компетенций, знаний, умений, навыков и/или практического опыта) по образовательной программе или отдельным ее компонентам, уменьшая человеческий фактор в процессе оценки. Использование современных информационных технологий способствует повышению качества образования и оптимизации учебного процесса.

Ключевые слова: фонд оценочных средств, оптимизация учебного процесса, учебные планы, компетенции, LMS Moodle, файлы .plx

Цитирование: / Алексеев Р.В. Автоматизация создания фондов оценочных средств по образовательным программам, реализуемым университетом / Р.В. Алексеев, Н.Д. Лукьянов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 143-152. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.014.

Введение. В современном образовательном процессе одним из ключевых аспектов является определение уровня достижения результатов обучения и/или освоения образовательной программы (ОП), установленных ОП по соответствующему направлению подготовки или специальности, как в рамках аккредитационной экспертизы, при контрольно-надзорной деятельности, так и в рамках внутренней системы оценки качества образования [1-2]. Однако, процесс создания фондов оценочных средств (ФОС) традиционными методами часто сопряжен с рядом проблем, таких, как трудоемкость, неоднозначность критериев оценки и ограниченная адаптивность к потребностям участников образовательного процесса [3]. Актуальность данного исследования обусловлена изменениями в Российском законодательстве применительно к процедурам государственной аккредитации, контрольно-надзорной деятельности и требованиями федеральных государственных образовательных стандартов [4].

Для усовершенствования учебного процесса в вузе возникает необходимость автоматизации создания оценочных материалов, формирования и управления фондами оценочных средств, обеспечивающих оценку достижения запланированных результатов обучения (компетенций, индикаторов достижения компетенций, знаний, умений, навыков и/или практического опыта) по образовательной программе в целом или отдельным ее компонентам [5-6]. Автоматизация процессов в образовании становится неотъемлемой частью современной педагогической практики [7]. Особенно актуальным это является как в контексте создания оценочных материалов по дисциплинам учебных планов, так и формирования фонда оценочных средств по образовательной программе [8]. Использование автоматизированных систем при создании оценочных материалов и формировании фондов оценочных средств

открывает перед преподавателями новые возможности для более точной и объективной оценки уровня подготовки обучающихся, а перед администрацией образовательных учреждений – возможность независимой оценки качества по образовательной программе [9]. Это также способствует уменьшению влияния человеческого фактора в процессе оценки, что повышает надежность и справедливость процедуры.

Целью исследования являются проектирование и разработка информационной системы для создания оценочных материалов, формирования и управления фондами оценочных средств, а также внедрение данной системы в образовательный процесс. Предполагается, что использование современных информационных технологий позволит значительно улучшить качество оценки достижений запланированных результатов обучения (компетенций, индикаторов достижения компетенций, знаний, умений, навыков и/или практического опыта) по образовательной программе и сделает процесс обучения более эффективным и адаптивным к потребностям участников образовательного процесса. Результатом исследования является комплекс административных и технических решений, направленных на решение задачи автоматизации формирования фондов оценочных средств с целью повышения качества образования и оптимизации учебного процесса.

1. Постановка задачи. На сегодняшний день, в связи с изменениями законодательства в сфере образования, в первую очередь в процедурах государственной аккредитации и контрольно-надзорной деятельности [10], на первый план выходит процедура оценки качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся по образовательной программе. Данная процедура, согласно требованиям федеральных государственных образовательных стандартов, должна включать в себя системы внутренней и внешней оценки, которые позволяли бы проанализировать качество подготовки обучающихся, как в рамках промежуточной аттестации, так и при проведении государственной или профессионально-общественной аккредитации. Иначе говоря, современные фонды оценочных средств должны позволять проводить независимую оценку не только знаний, умений по отдельным дисциплинам, но и формирование индикаторов достижения компетенций и/или компетенций в целом, которые отражены в рабочей программе дисциплины (РПД).

Таким образом, задачей является создание системы, которая позволяла бы оценивать результаты обучения в процессе освоения отдельных дисциплин (профессиональных модулей), практик или образовательной программы в целом; контролировать и управлять процессом формирования компетенций, приобретения обучающимися необходимых знаний, умений, навыков (ЗУН) и/или практического опыта; определять уровень сформированности компетенций, установленных соответствующей программой. При этом должны соблюдаться ключевые принципы:

- валидности (соответствия целям и планируемым результатам обучения);
- надежности (использование единообразных методов, критериев, шкал оценивания);
- своевременности (поддержание развивающей обратной связи, использование формирующего оценивания).

Первоначально, создаваемые профессорско-преподавательским составом оценочные материалы необходимо распределить по уровням сложности:

Базовый уровень сложности – вопросы для оценки знаний терминологии, фактов, параметров, теории, принципов. Как правило, это вопросы с выбором ответа либо комбинированные вопросы.

Повышенный уровень сложности – вопросы для оценки умений применять знания при решении типовых задач, проводить сопоставление, устанавливать последовательность. Как правило, это комбинированные вопросы либо вопросы с развернутым ответом.

Высокий уровень сложности – вопросы для оценивания навыков в нестандартной ситуации, решение нетиповых задач, алгоритмы, доказательства, обоснования. Это вопросы на установление последовательности, соответствия, вопросы с развернутым ответом и т.п.

На основе распределенных по уровням сложности вопросов необходимо создать банк вопросов, который также будет разделен по компетенциям. Далее, для составления и последующего прохождения диагностического тестирования, банк вопросов необходимо загрузить в используемую в вузе систему управления обучением (LMS). Схема процесса создания ФОС представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема построения вопросов

Однако, при любой принятой системе составления ФОС на первый план выходит проблема управления созданными банками вопросов, а также возможность быстрого создания теста уже не по одной конкретной дисциплине, а по компетенции, которая может формироваться с помощью целого набора дисциплин. Таким образом, задачей является создание такой информационной системы, которая позволила бы:

- создавать учебные дисциплины;
- создавать и связывать с дисциплинами компетенции;
- создавать банк вопросов в соответствии с блоком ЗУН;
- создавать готовый для независимой оценки качества документ ФОС.

Поэтому, для решения поставленной задачи, вполне естественным видится применение одного из существующих инструментов, как части создаваемой системы.

В качестве примера рассмотрим такие платформы, как Quizlet [11], Quizizz [12] и Edmodo [13]. Одним из ключевых элементов этих систем являются банки вопросов, которые позволяют формировать задания на основе заранее определенных компетенций. Основными преимуществами этих систем являются:

- возможности для интерактивного обучения;
- удобный интерфейс;
- простота в создании вопросов.

В то же время, несмотря на наличие различных систем, многие из них имеют значительные недостатки, которые могут ограничивать их эффективность, например:

- большинство систем не позволяют настроить вопросы под специфические требования курса или программы, что может привести к тому, что задания не будут полностью соответствовать заявленным компетенциям;
- многие платформы не предоставляют достаточные инструменты для анализа результатов, что затрудняет выявление проблем в обучении и корректировку учебного процесса на основе полученных данных;

- не все системы поддерживают различные форматы вопросов, что ограничивает возможности преподавателей в создании разноплановых заданий;
- большинство платформ являются зарубежными разработками и их применение в сфере государственного образования прямо запрещено Постановлением Правительства РФ от 11 октября 2023 г. № 1678 [14].

В свою очередь, системы управления обучением (LMS (Learning Management System)), которые становятся неотъемлемой частью современного образовательного процесса [15] и представляют собой программные платформы, обеспечивающие планирование, реализацию, отслеживание, а также оценку учебных процессов, позволяют преподавателям создавать и управлять учебными материалами, а учащимся – получать доступ к курсам в любое время. Такие системы отвечают требованиям быстро меняющегося образовательного стандарта, обеспечивая гибкость и доступность, необходимые для успешного освоения знаний.

В частности, платформа LMS Moodle (Moodle Pty Ltd, 2023), которая активно используется в целях дистанционного обучения в качестве основного или дополнительного ресурса для обучения и информационной поддержки в таких крупнейших вузах страны, как Московский государственный университет (МГУ), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Новосибирский государственный университет, Московский физико-технический институт (МФТИ) и других. В системе Moodle представлен широкий выбор типов вопросов для создания оценочных материалов. Например, такие, как: множественный выбор, пропущенное слово, упорядочение, соответствие, короткий ответ. Данные типы вопросов, в зависимости от контекста, могут соответствовать всем трем уровням сложности. Для высокого уровня сложности есть возможность формировать вопросы по типу «эссе».

2. Решение задачи. В рамках исследования представлены ключевые аспекты технических решений и общей схемы функционирования системы автоматизации создания оценочных материалов, формирования и управления фондами оценочных средств (ФОС). Разработанные технические решения являются неотъемлемой частью представленной системы, анализируется структура и взаимосвязь компонентов системы. Далее, опишем применяемые технические решения и общую схему функционирования разрабатываемой системы ФОС.

Одной из основных задач является парсинг (автоматизированный сбор и систематизация данных) учебных планов в формате .plx. Данный тип файла был разработан в Южно-Российском государственном университете экономики и сервиса (ЮРГУЭС) при внедрении первого поколения Государственных образовательных стандартов (ГОС). Файлы .plx, содержащие учебные планы, представляют собой иерархический структурированный документ, информация в котором представлена в виде тегов и атрибутов, при этом теги имеют различный уровень вложенности. Кроме того, теги одной группы (например, дисциплины, компетенции и т.п.) имеют уникальный код, что позволяет связывать их с тегами других групп, например, *<ПланыКомпетенцииДисциплины>*. Основными элементами учебных планов в контексте файлов .plx являются:

- *<Документ>* – содержит код уровня образования, название и шифр основной образовательной программы (ООП), уровень обучения;
- *<ПланыНовыеЧасы>* – код вида работы, код объекта, количество часов, курс и семестр;
- *<ПланыСтроки>* – название и код дисциплины, код ООП;
- *<ПланыКомпетенции>* – название и шифр компетенции или индикатор компетенции в зависимости от уровня вложенности;

- *<ПланыКомпетенцииДисциплины>* – связывает посредством кодов компетенции и дисциплины между собой.

Одним из существующих программных алгоритмов для анализа учебных планов (УП) является проведение декомпозиции плана относительно заложенных компетенций и их индикаторов [2]. Данное решение может быть масштабировано для использования в различных образовательных организациях, так как информационная система "Планы" на сегодняшний день является одной из наиболее распространенных для проектирования, хранения компонентов образовательных программ и работы с ними. Однако, указанные решения также содержат недостатки, например:

- требует дополнительных усилий для освоения и внедрения в образовательные организации;
- могут возникать сложности при интеграции данного метода в существующие системы управления образовательным процессом;
- не исключены ошибки в анализе, особенно в случае неправильного ввода данных или интерпретации результатов;
- необходимость в доступе к специализированным программным средствам.

С технической точки зрения, учебные планы в формате PLX представляют собой модифицированный формат XML, который является языком разметки. Он используется для хранения и передачи данных, а информация представлена в формате тегов (с атрибутами). В данном исследовании парсинг выполняется средствами библиотеки языка программирования Python - BeautifulSoup (Python Software Foundation, 2023). Алгоритм парсинга состоит из следующих этапов:

- Создание функций для перебора всех необходимых тегов и атрибутов в циклах, таких, как: *“КодФормыОбучения”*, *“КодВидаРаботы”*, *“ПланыКомпетенции”*, *“ПланыКомпетенцииДисциплины”* и т.д.
- Обработка полученных данных при помощи функций языка программирования Python.
- Передача обработанных данных в созданные словари и списки в циклах.
- Перебор данных в словарях и списках и их дальнейшая передача в базу данных при помощи SQL запросов (Structured Query Language).

После парсинга файла информация передается в базу данных PostgreSQL 14 (PostgreSQL Global Development Group, 2023). Далее, в системе LMS Moodle, при помощи SQL запросов создаются категории на основе года набора, направления подготовки/ специальности, формы обучения и профиля/специализации/программы, а также курсы на основе дисциплин из учебного плана.

После этого этапа преподаватель получает доступ к шаблонам, созданным при помощи Python-библиотеки Jinja2 (Pallets Project, 2023), являющейся де-факто стандартом при написании веб-приложений довольно популярной встроенной системы шаблонов Django (Django Software Foundation, 2023) в формате .docx, для визуализации шаблонов, которые содержат в себе различные типы вопросы для тестирования и проверки формирования компетенций у обучающихся. Затем преподаватель загружает заполненный шаблон в информационную систему, которая при помощи Python-модуля xml.etree.ElementTree (Python Software Foundation, 2023) и .php-скриптов получает данные и преобразует их в формат банка вопросов, который систематически разделяется по различным компетенциям. На рис. 2 представлена схема, которая является графическим отображением процесса функционирования программы.

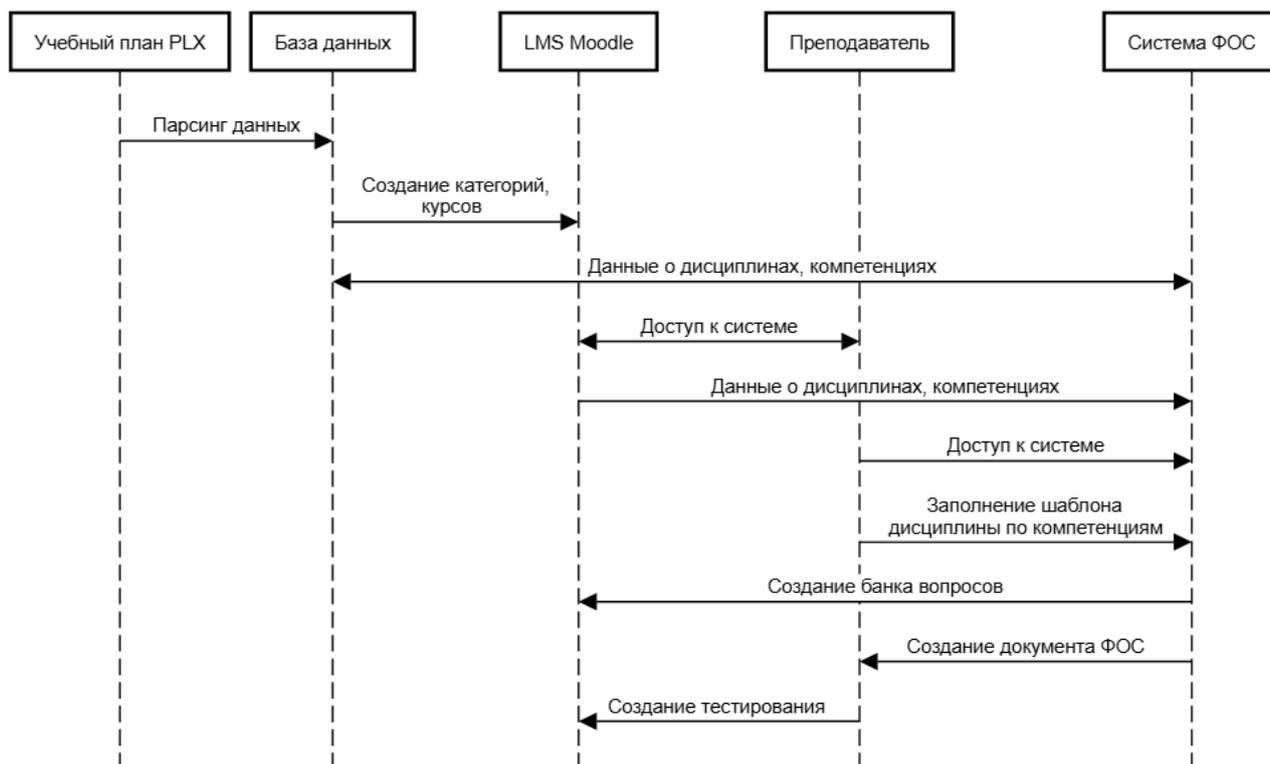


Рис. 2. Процесс функционирования программы

Таким образом, спроектирована и реализована система, позволяющая автоматизировать процесс создания ФОС по дисциплинам учебных планов, а также представляющая собой инструмент для быстрого формирования банка вопросов в разрезе не учебных дисциплин, а компетенций учебного плана.

3. Обсуждение результатов. Алгоритм работы при формировании ФОС может быть представлен в следующем виде: 1) при помощи веб-интерфейса преподаватель входит в информационную систему; 2) заполнение шаблона с вопросами по дисциплинам, к которым привязаны индикаторы достижения компетенций, установленные образовательной программой; этот шаг позволяет структурировать процесс составления ФОС и последующую оценку освоения компетенций на более системном уровне; 3) загрузка заполненного шаблона в информационную систему и последующее создание банка вопросов в платформе LMS Moodle.

Банк вопросов разделен по индикаторам/компетенциям, указанным в шаблоне, что облегчает оценку качества подготовки обучающихся в соответствии с поставленными образовательными целями и требованиями. Кроме того, преподаватель имеет возможность автоматизированно создать документ ФОС для использования его в рамках независимой внутренней или внешней оценки качества образовательной деятельности, в том числе в целях проведения диагностического тестирования при процедуре государственной аккредитации. Этот документ содержит как вопросы, распределенные по формируемым компетенциям, в соответствии с учебным планом, так и информацию о результатах обучения, а также критериях оценивания с учетом уровня сложности вопросов, что способствует формированию системы объективной и детализированной оценки качества подготовки обучающихся. На рис. 3. представлена схема информационных потоков, которая отражает работу системы для автоматизации создания и дальнейшего управления фондами оценочных средств.

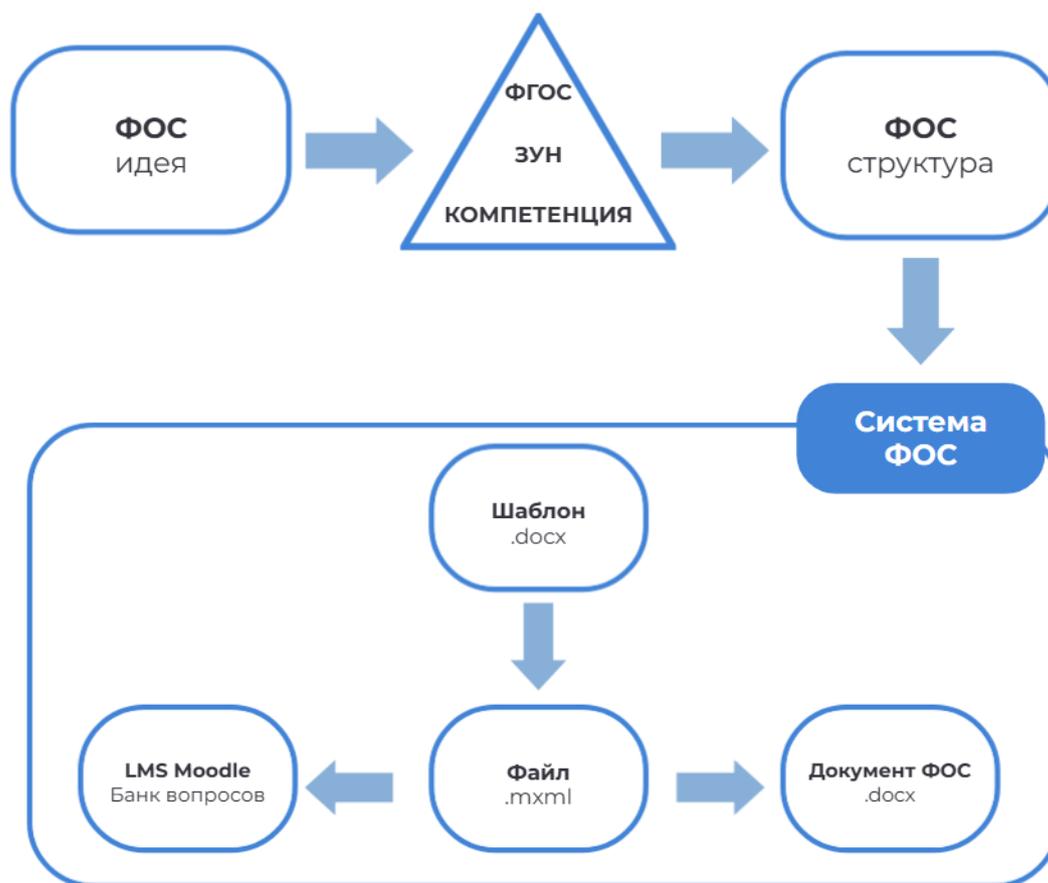


Рис. 3. Общая схема информационных потоков

Наличие информационной системы, поддерживающей процесс создания оценочных материалов, формирования и управления ФОС, является ключевым элементом для эффективной работы преподавателей и администрации учебного заведения. Автоматизация этого процесса позволяет существенно сократить временные и трудовые затраты на подготовку оценочных материалов, облегчает мониторинг и анализ оценок студентов, а также усиливает прозрачность системы оценки компетенций. Использование платформы LMS Moodle для создания банка вопросов, разделенного по компетенциям, дает возможность более точно и целенаправленно оценивать уровень освоения образовательной программы. Это способствует выявлению слабых мест в обучении и позволяет принимать меры по их устранению, повышая тем самым результативность образовательного процесса. Таким образом, наличие вышеописанной информационной системы является важным компонентом современной образовательной среды, способствующим повышению качества обучения.

Заключение. В ходе проведенного исследования была спроектирована и разработана информационная система для создания оценочных материалов, формирования и управления фондами оценочных средств, что позволило значительно улучшить качество оценки подготовки обучающихся и сделать процесс обучения более эффективным и адаптивным к потребностям участников образовательного процесса, в том числе повысить качество образования и оптимизировать учебный процесс.

Современные информационные технологии, использованные при разработке системы, открывают новые возможности для более точной и объективной оценки сформированности компетенций по реализуемым образовательным программам, а также способствуют уменьшению влияния человеческого фактора в процессе оценки, что повышает надежность и справедливость процедуры.

Проведенное исследование подтверждает актуальность и важность автоматизации процессов в образовании. Внедрение автоматизированной системы для создания и управления фондами оценочных средств является важным шагом в направлении улучшения качества образования и эффективности образовательного процесса. Однако, необходимо продолжать исследования в этой области для дальнейшего совершенствования системы и расширения ее функциональности.

Список источников

1. Васильков Ю.В. Роль и опыт применения информационных технологий в формировании компетентностного подхода в образовании / Ю.В. Васильков, Н.Н. Заботина, Л.С. Гущина // Научно-методический электронный журнал «Концепт», 2016. – Т. 37. – С. 30-37.
2. Зыкова Т.В. Алгоритм анализа и оценки учебных планов образовательных программ / Т.В. Зыкова, А.А. Кытманов, Е.А. Халтурин и др. // Журнал «Информатика и образование», 2024. – Т. 39. – № 1. – С. 52-64. – DOI:10.32517/0234-0453-2024-39-1-52-64.
3. Томильцев А.В. Проблемы оценки профессиональной подготовки: методологические подходы / А.В. Томильцев, А.В. Мальцев // Образование и наука, 2018. – Т. 20. – № 4. – С. 9-33. – DOI: 10.17853/1994-5639-2018-4-9-33.
4. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 18 апреля 2023 г. № 409 "Об утверждении аккредитационных показателей по образовательным программам высшего образования, методики расчета и применения аккредитационных показателей по образовательным программам высшего образования". <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406806022/?ysclid=lw82a8i8fx404894761> (дата обращения: 13.05.2024)
5. Зыкова Т.В. Применение силового алгоритма визуализации графов для анализа учебных планов образовательных программ высшего образования / Т.В. Зыкова, А.А. Кытманов, Е.А. Халтурин и др. // Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование», 2023. – Т. 19. – № 1. – DOI:10.25559/SITITO.019.202301.104-116.
6. Бершадская М.Д., Серова А.В., Чепуренко А.Ю., Зима Е.А. Компетентностный подход к оценке образовательных результатов: опыт российского социологического образования / М.Д. Бершадская, А.В. Серова, А.Ю. Чепуренко и др. // Высшее образование в России, 2019. – Т. 28. – № 2. – С. 38-50. – DOI:10.31992/0869-3617-2019-28-2-38-50.
7. Сердитова Н.Е., Белоцерковский А.В. Образование, качество и цифровая трансформация / Н.Е. Сердитова, А.В. Белоцерковский // Высшее образование в России, 2020. – Т. 29. – №4. – С. 9-15. – DOI: 10.31992/0869-3617-2020-29-4-9-15.
8. Пилипенко С.А. Сопряжение ФГОС и профессиональных стандартов: выявленные проблемы, возможные подходы, рекомендации по актуализации / С.А. Пилипенко, А.А. Жидков, Е.В. Караваева и др. // Высшее образование в России, 2016. – № 6 (202). – С. 5-15.
9. Уваров А.Ю. Трудности и перспективы цифровой трансформации образования / А.Ю. Уваров, Э. Гейбл, И.В. Дворецкая и др. – М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2019. – 344 с.
10. Государственная аккредитация образовательных учреждений и образовательных программ. – URL: <https://obrnadzor.gov.ru/gosudarstvennye-uslugi-i-funkczii/gosudarstvennye-uslugi/gosudarstvennaya-akkreditacziya/> (дата обращения: 14.05.2024)
11. Судаков И.А. Использование онлайн-сервиса Quizlet в самостоятельной работе студентов по овладению иноязычной лексикой // Экономические и социально-гуманитарные исследования, 2019. – № 2 (22). – С. 213-217.
12. Трегубова Т. М. О некоторых особенностях использования Quizizz в качестве инструмента веб-оценивания знаний студентов как способе внедрения цифровой геймификации на занятиях иностранного языка / Т.М. Трегубова, Г.Р. Ситдикова, Л.А. Малахова и др. // Вестник Казанского государственного университета культуры и искусств, 2023. – № 3. – С. 101-109.
13. Бойко Е.Н. Социальная образовательная платформа как способ взаимодействия студентов при смешанном обучении (на примере EDMODO) / Е.Н. Бойко, А.В. Кукс, // Мир науки, культуры, образования, 2017. – № 1(62). – С. 43-45.
14. Постановление Правительства Российской Федерации от 11.10.2023 № 1678 "Об утверждении Правил применения организациями, осуществляющими образовательную деятельность, электронного обучения, дистанционных образовательных технологий при реализации образовательных программ". <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310120031> (дата обращения: 07.11.2024)

15. Исаева Е.С. Современные LMS платформы дистанционного обучения: анализ и сравнение / Е.С. Исаева // Педагогика. Вопросы теории и практики, 2021. – Т. 6. – № 6. – DOI:10.30853/ped20210127.

Алексеев Роман Вячеславович. Аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, программист центра электронного обучения, Иркутский национальный исследовательский технический университет. ORCID: 0009-0000-5374-2081, alekseevrv@ex.istu.edu, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83.

Лукьянов Никита Дмитриевич. Руководитель центра электронного обучения, доцент, к.т.н., Иркутский национальный исследовательский технический университет. AuthorID: 732737, SPIN: 8971-7440, ORCID: 0000-0002-8826-3424, lukyanovnd@istu.edu, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83.

UDC 004.031.42

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.014

Automation of creation of assessment funds for educational programs implemented by the university

Roman V. Alekseev¹, Nikita D. Lukyanov²

¹Melentiev energy systems institute SB RAS, Russia, Irkutsk, *alekseevrv@ex.istu.edu*

²National research Irkutsk state technical university, Russia, Irkutsk

Abstract. This article considers the problem of effective management of assessment of the quality of students' training in the educational program as a whole or in its individual components. Traditional methods of creating assessment funds often face difficulties, such as ambiguity of evaluation criteria and limited adaptability to the needs of participants of the educational process. The article proposes the introduction of an automated system for the creation and management of funds of assessment tools for educational programs of the university. This will allow to more accurately and objectively assess the achievement of planned learning outcomes (competencies, indicators of competencies achievement, knowledge, skills, abilities, skills and/or practical experience) for an educational program or its individual components, reducing the human factor in the assessment process. The use of modern information technologies helps to improve the quality of education and optimize the learning process.

Keywords: assessment fund, optimization of the educational process, curricula, competencies, LMS Moodle, .plx files

References

1. Vasilkov Yu. V., Zabolotina N. N., Gushchina L. S. Rol i opyt primeneniya informacionnyh tekhnologij v formirovanii kompetentnostnogo podhoda v obrazovanii [Role and experience of information technology application in the formation of competence-based approach in education]. Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal "Kontsept" [Scientific and methodological electronic journal "Concept"], 2016, vol. 37, pp. 30-37.
2. Zykova T.V., Kytmanov A.A., Khalturin E.A. et al. Algoritm analiza i ocenki uchebnyh planov obrazovatelnyh programm [Algorithm of analysis and evaluation of educational programmes curricula]. Zhurnal "Informatika i obrazovaniye" [Journal "Informatics and Education"], 2024, vol. 39, no. 1, pp. 52-64, DOI:10.32517/0234-0453-2024-39-1-52-64.
3. Tomiltsev A.V., Maltsev A.V. Problemy ocenki professionalnoj podgotovki: metodologicheskie podhody [Problems of professional training evaluation: methodological approaches]. Obrazovaniye i nauka [Education and science], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 9-33, DOI:10.17853/1994-5639-2018-4-9-33
4. Prikaz Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya RF ot 18 aprelya 2023 g. № 409 "Ob utverzhenii akkreditacionnyh pokazatelej po obrazovatel'nyh programmam vysshego obrazovaniya, metodiki rascheta i primeneniya akkreditacionnyh pokazatelej po obrazovatel'nyh programmam vysshego obrazovaniya" [Order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation from 18 April 2023 No. 409 "On Approval of accreditation indicators for educational programmes of higher education, the methodology of calculation and application of accreditation indicators for educational programmes of higher education"], available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406806022/?ysclid=1w82a8i8fx404894761> (accessed: 05/13/2024)

5. Zykova T.V., Kytmanov A.A., Khalturin E.A., et al. Primenenie silovogo algoritma vizualizatsii grafov dlya analiza uchebnykh planov obrazovatelnykh programm vysshego obrazovaniya [Application of power algorithm of graph visualization for the analysis of curricula of educational programmes of higher education]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal "Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye"* [International scientific journal "Modern information technologies and IT-education"], 2023, vol. 19, no. 1, DOI:10.25559/SITITO.019.202301.104-116
6. Bershadskaya M.D., Serova A.V., Chepurenko A.Y., et al. Kompetentnostnyy podhod k ocenke obrazovatelnykh rezultatov: opyt rossijskogo sociologicheskogo obrazovaniya [Competence-based approach to the assessment of educational outcomes: the experience of Russian sociological education]. *Vyssheye obrazovaniye v Rossii* [Higher education in Russia], 2019, vol. 28, no. 2, pp. 38-50, DOI: 10.31992/0869-3617-2019-28-2-38-50.
7. Serditova N.E., Belotserkovsky A.V. Obrazovanie, kachestvo i cifrovaya transformatsiya [Education, quality and digital transformation]. *Vyssheye obrazovaniye v Rossii* [Higher education in Russia], 2020, vol. 29, no. 4, pp. 9-15, DOI: 10.31992/0869-3617-2020-29-4-9-15.
8. Pilipenko S.A., Zhidkov A.A., Karavaeva E.V., et al. Sopryazhenie FGOS i professionalnykh standartov: vyyavlenyye problemy, vozmozhnye podhody, rekomendatsii po aktualizatsii [Pairing of FSES and professional standards: identified problems, possible approaches, recommendations for actualisation]. *Vyssheye obrazovaniye v Rossii* [Higher education in Russia], 2016, no. 6, pp. 5-15.
9. Uvarov A. Y., Gable E., Dvoretzskaya I. V. V., et al. Trudnosti i perspektivy cifrovoj transformatsii obrazovaniya [Difficulties and prospects of digital transformation of education]. M.: Izdatel'skiy dom Vysshey shkoly ekonomiki [Moscow: Publishing house of the Higher school of economics], 2019, 344 p.
10. Gosudarstvennaya akkreditatsiya obrazovatel'nykh uchrezhdenij i obrazovatel'nykh programm [State accreditation of educational institutions and educational programmes]. Available at: <https://obrnadzor.gov.ru/gosudarstvennye-uslugi-i-funkczii/gosudarstvennye-uslugi/gosudarstvennaya-akkreditatsiya/> (accessed: 05/14/2024).
11. Sudakov I.A. Ispol'zovanie onlajn-servisa Quizlet v samostoyatel'noj rabote studentov po ovladeniyu inoyazychnoj leksikoj [On-line service quizlet in unsupervised work of students to master foreign language vocabulary]. *Ekonomicheskiye i sotsial'no-gumanitarnyye issledovaniya* [Economic and social research], 2019, no. 2, pp. 213-217.
12. Tregubova T. M., Sitdikova G. R., Malahova L. A., Serova Z. N., O nekotorykh osobennostyakh ispol'zovaniya Quizizz v kachestve instrumenta veb-ocenivaniya znaniy studentov kak sposobe vnedreniya cifrovoj gejmifikatsii na zanyatiyakh inostrannogo yazyka [About some features of using quizizz as a tool for web-based assessment of students' knowledge as a way to introduce digital gamification in foreign language classes]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv* [Bulletin of Kazan state university of culture and arts], 2023, no.3, pp. 101-109.
13. Bojko E. N., Kuks A. V., Social'naya obrazovatel'naya platforma kak sposob vzaimodejstviya studentov pri smeshannom obuchenii (na primere EDMODO) [Social educational system as a platform of interaction of students by means of blended learning (on the example of EDMODO)]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya* [The world of science, culture and education], 2017, no. 1, pp. 43-45.
14. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federatsii ot 11.10.2023 № 1678 "Ob utverzhenii Pravil primeneniya organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi obrazovatel'nyu deyatel'nost', elektronnoho obucheniya, distantsionnykh obrazovatel'nykh tekhnologij pri realizatsii obrazovatel'nykh programm" [Resolution of the Government of the Russian Federation of 11.10.2023 No. 1678 "On Approval of the rules for the application of e-learning and distance education technologies in the implementation of educational programs by organizations engaged in educational activities"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310120031> (accessed: 11/07/2024).
15. Isaeva E. S. Sovremennyye LMS platformy distantsionnogo obucheniya: analiz i sravnenie [Modern LMS Platforms for Distance Education: Analysis and Comparison]. *Pedagogika. Voprosy teorii i praktiki* [Pedagogy. Theory & practice], 2021, vol. 6, no. 6, DOI:10.30853/ped20210127.

Alekseev Roman Vyacheslavovich. Postgraduate student, Melentiev energy systems institute SB RAS. ORCID: 0009-0000-5374-2081, alekseevrv@ex.istu.edu, 664074, Irkutsk, 130 Lermontov str.

Lukyanov Nikita Dmitrievich. Head of e-learning center, associate professor, Ph.D., Irkutsk national research technical university, SPIN: 8971-7440, AuthorID: 732737, ORCID: 0000-0002-8826-3424, lukyanovnd@istu.edu, 664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.

Статья поступила в редакцию 03.09.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 09/03/2024; approved after reviewing 11/21/2024; accepted for publication 02/11/2025.

УДК 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.015

Автоматизированное программное управление механизмами перемещения подъемного крана

Дунаев Михаил Павлович, Саушкин Алексей Анатольевич

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

Аннотация. В статье проведен анализ конструкции электрического консольного крана с магнитным захватом. Разработаны циклограммы работы механизма перемещения крана, алгоритм работы программируемого логического контроллера (ПЛК) системы управления механизмом перемещения крана, программа работы ПЛК системы управления механизмом перемещения крана. Предложена техническая реализация способа управления механизмом перемещения подъемного крана. Определена экспериментальная осциллограмма угловой скорости двигателя механизма горизонтального перемещения консольного крана с магнитным захватом, подтверждающая работоспособность разработанных алгоритмов и программ.

Ключевые слова: подъемный кран, преобразователь частоты, электропривод, управление.

Цитирование: Дунаев М.П. Автоматизированное программное управление механизмом перемещения подъемного крана / М.П. Дунаев, А.А. Саушкин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 1(37). – С. 153-160. – DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.015.

Введение. Грузоподъемный кран – машина, предназначенная для подъема и перемещения груза, подвешенного с помощью грузового крюка или другого грузозахватного органа [1]. Рабочий цикл крана состоит из трёх этапов: 1) захват груза; 2) рабочий ход (перемещение груза, разгрузка); 3) холостой ход (возврат грузоподъемного механизма в исходное положение).

Рабочий и холостой ход на диаграммах движения имеют также три характерных участка: разгон, установившееся движение и торможение. Очень важное значение имеют участки разгона и торможения, так как именно в эти моменты и возникают динамические нагрузки [2-6].

Классификация подъемных кранов может быть проведена по следующим показателям.

1. По конструкции: стреловые, мостовые, козловые, консольные.
2. По возможности перемещения: стационарные, передвижные.
3. По типу привода: ручные, электрические, гидравлические, пневматические, с двигателем внутреннего сгорания.
4. По типу грузозахватного органа: крюковые, грейферные, магнитные, клещевые, контейнерные.

В настоящее время весьма актуальной становится автоматизация работы подъемно-транспортного оборудования, что позволяет не только сократить время ручного труда машиниста крана, тем самым облегчив условия его труда, но и улучшить производительность процесса погрузочно-разгрузочных работ.

Целью работы является разработка системы автоматизированного управления механизмом перемещения подъемного крана.

Для реализации данной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ конструкции объекта управления;
- разработать циклограммы работы механизмов перемещения;
- разработать алгоритм работы ПЛК системы управления;
- разработать программу работы ПЛК системы управления;
- предложить техническую реализацию системы управления;

– определить экспериментальные циклограммы работы.

Анализ объекта управления. На рис. 1 представлен внешний вид электрического консольного крана с магнитным захватом. Основные узлы крана:

- А – рама для установки манипулятора,
- В – механизм горизонтального перемещения (вдоль оси X),
- С – механизм горизонтального перемещения (вдоль оси Y),
- Д – механизм вертикального перемещения (вдоль оси Z),
- Е – механизма захвата (электромагнит).

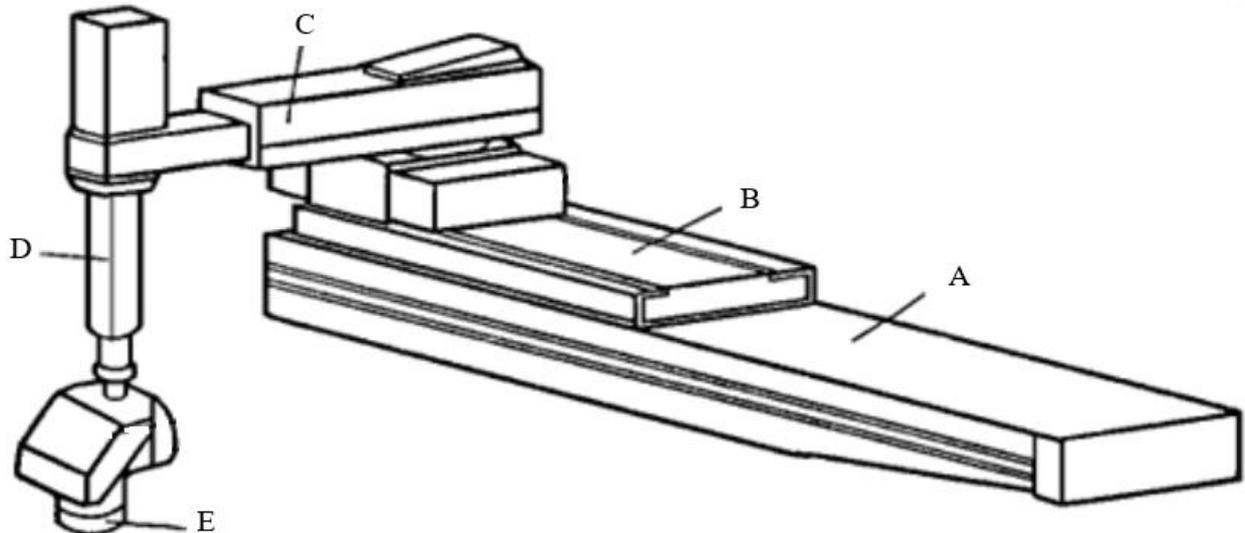


Рис. 1. Внешний вид электрического консольного крана с магнитным захватом

На рис. 2 представлена функциональная система управления электрического консольного крана с магнитным захватом, отражающая техническую реализацию системы управления механизмами перемещения крана.

Общее управление движением и координация отдельных частей крана производится посредством программируемого логического контроллера (ПЛК). Команды управления, идущие от ПЛК [7-15] по общей шине управления, поступают на все локальные системы управления механизмами перемещения крана. Механизмы В и С приводятся в движение двумя двигателями переменного тока серии 4А [16] при управлении от двух преобразователей частоты [17] Danfoss FC302 (ПЧ-1 и ПЧ-2). Механизм Д приводится в движение двигателем постоянного тока типа ДПМ-35-Н1-ОД при управлении от преобразователя В1. Механизм Е приводится в действие подачей напряжения в катушку электромагнита от преобразователя В2.

Циклограммы работы механизмов перемещения подъемного крана. На рис. 3 представлены циклограммы работы механизмов перемещения электромеханического крана-манипулятора.

Для сокращения общего времени перемещения груза и увеличения производительности работы крана целесообразно проектировать циклограммы работы механизмов перемещения таким образом, чтобы некоторые их участки шли одновременно, т.е. с наложением по времени. Реализация именно такого подхода проиллюстрирована на рис. 3, где обратный ход механизмов В и С максимально совмещен по времени.

Алгоритмы работы системы управления подъемного крана. Функция общей системы управления краном была возложена на ПЛК (см. рис. 2). Для увеличения функциональных возможностей данный ПЛК был реализован в виде двух частей (ПЛК-1 и ПЛК-2), штатно имеющихся в системах управления ПЧ-1 и ПЧ-2.



Рис. 2. Функциональная схема системы управления консольного крана с магнитным захватом

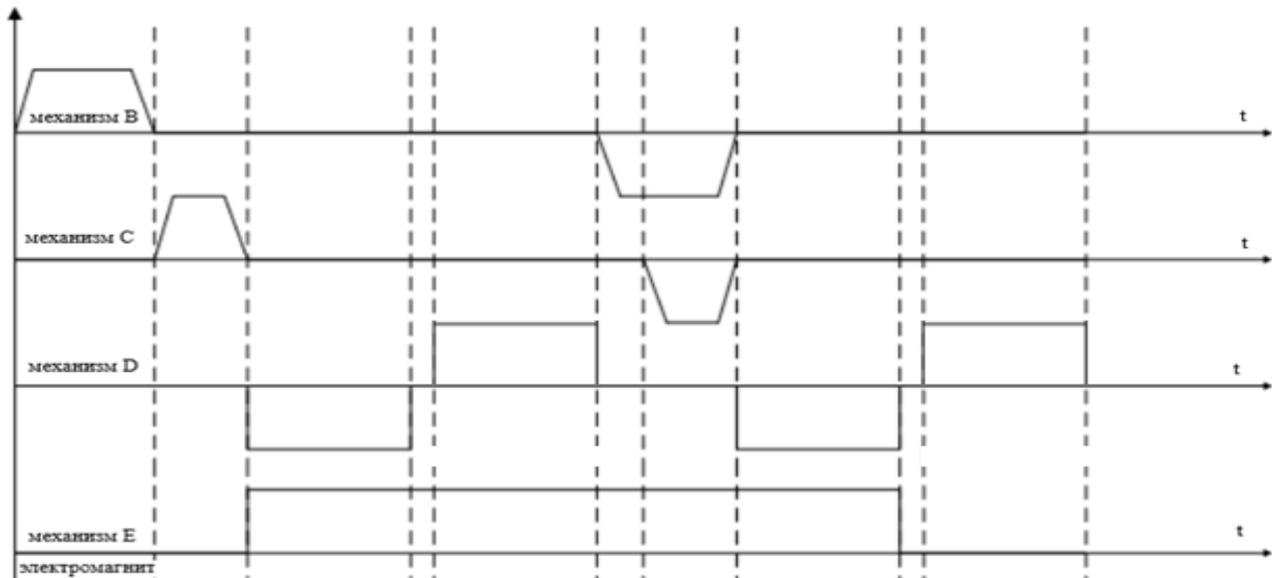


Рис. 3. Циклограммы работы перемещения консольного крана с магнитным захватом

На рис. 4 представлены алгоритмы работы системы управления консольного крана с магнитным захватом. Графическое изображение алгоритмов представлено в оригинальном виде, сгенерированном служебной программой Danfoss MCT10 [18]. С помощью программы Danfoss MCT10 осуществлялись удаленный доступ к параметрам систем управления ПЧ, а также их программирование и вывод информации, в том числе в графическом виде.

Программы работы ПЛК системы управления. На рис. 5 представлены программы работы системы управления консольного крана с магнитным захватом. Эти программы соответствуют алгоритмам работы системы управления консольного крана с магнитным захватом, показанным на рис. 4. Табличное изображение программы работы системы управления представлено в оригинальном виде, также сгенерированном служебной программой Danfoss MCT10.

Столбец ID включает идентификатор ячейки памяти, в которой хранится команда; столбец Name иллюстрирует текущее состояние ПЛК (SL Controller Event или SL Controller

Action); столбец Setup 1 указывает состоявшееся событие (SL Controller Event) или действие (SL Controller Action), производимое ПЛК.

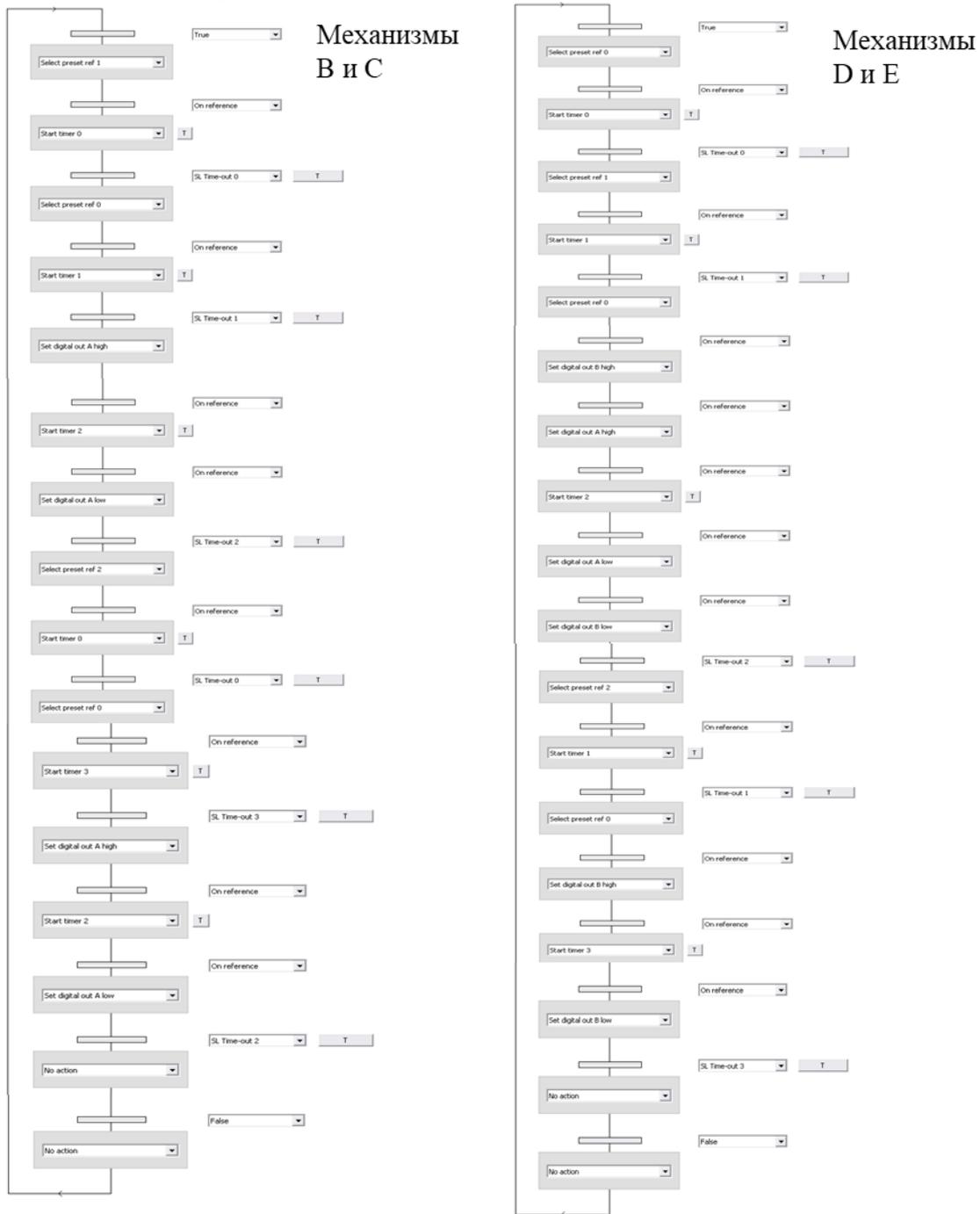


Рис. 4. Алгоритмы работы системы управления консольного крана с магнитным захватом

Экспериментальная циклограмма работы механизма перемещения подъемного крана. Экспериментальная проверка работоспособности и согласованности функционирования разработанных алгоритмов и программ проводилась на лабораторном макете консольного крана с магнитным захватом, система управления которого была построена согласно функциональной схеме рис. 2, а программа составлена в соответствии с рис. 5. В ходе экспериментальных исследований была полностью подтверждена работоспособность и согласованность работы механизмов перемещения крана, правильность функционирования разработанных алгоритмов и программ.

Программа ПЛК-1

ID	Name	Setup 1
1351.0	SL Controller Event	True
1351.1	SL Controller Event	On reference
1351.2	SL Controller Event	SL Time-out 0
1351.3	SL Controller Event	On reference
1351.4	SL Controller Event	SL Time-out 1
1351.5	SL Controller Event	On reference
1351.6	SL Controller Event	On reference
1351.7	SL Controller Event	SL Time-out 2
1351.8	SL Controller Event	On reference
1351.9	SL Controller Event	SL Time-out 0
1351.10	SL Controller Event	On reference
1351.11	SL Controller Event	SL Time-out 3
1351.12	SL Controller Event	On reference
1351.13	SL Controller Event	On reference
1351.14	SL Controller Event	SL Time-out 2
1351.15	SL Controller Event	False
1351.16	SL Controller Event	False
1351.17	SL Controller Event	False
1351.18	SL Controller Event	False
1351.19	SL Controller Event	False
1352.0	SL Controller Action	Select preset ref 1
1352.1	SL Controller Action	Start timer 0
1352.2	SL Controller Action	Select preset ref 0
1352.3	SL Controller Action	Start timer 1
1352.4	SL Controller Action	Set digital out A high
1352.5	SL Controller Action	Start timer 2
1352.6	SL Controller Action	Set digital out A low
1352.7	SL Controller Action	Select preset ref 2
1352.8	SL Controller Action	Start timer 0
1352.9	SL Controller Action	Select preset ref 0
1352.10	SL Controller Action	Start timer 3
1352.11	SL Controller Action	Set digital out A high
1352.12	SL Controller Action	Start timer 2
1352.13	SL Controller Action	Set digital out A low
1352.14	SL Controller Action	No action
1352.15	SL Controller Action	No action
1352.16	SL Controller Action	DISABLED
1352.17	SL Controller Action	No action
1352.18	SL Controller Action	No action
1352.19	SL Controller Action	No action

Программа ПЛК-2

ID	Name	Setup 1
1351.0	SL Controller Event	True
1351.1	SL Controller Event	On reference
1351.2	SL Controller Event	SL Time-out 0
1351.3	SL Controller Event	On reference
1351.4	SL Controller Event	SL Time-out 1
1351.5	SL Controller Event	On reference
1351.6	SL Controller Event	On reference
1351.7	SL Controller Event	On reference
1351.8	SL Controller Event	On reference
1351.9	SL Controller Event	On reference
1351.10	SL Controller Event	SL Time-out 2
1351.11	SL Controller Event	On reference
1351.12	SL Controller Event	SL Time-out 1
1351.13	SL Controller Event	On reference
1351.14	SL Controller Event	On reference
1351.15	SL Controller Event	On reference
1351.16	SL Controller Event	SL Time-out 3
1351.17	SL Controller Event	False
1351.18	SL Controller Event	False
1351.19	SL Controller Event	False
1352.0	SL Controller Action	Select preset ref 0
1352.1	SL Controller Action	Start timer 0
1352.2	SL Controller Action	Select preset ref 1
1352.3	SL Controller Action	Start timer 1
1352.4	SL Controller Action	Select preset ref 0
1352.5	SL Controller Action	Set digital out B high
1352.6	SL Controller Action	Set digital out A high
1352.7	SL Controller Action	Start timer 2
1352.8	SL Controller Action	Set digital out A low
1352.9	SL Controller Action	Set digital out B low
1352.10	SL Controller Action	Select preset ref 2
1352.11	SL Controller Action	Start timer 1
1352.12	SL Controller Action	Select preset ref 0
1352.13	SL Controller Action	Set digital out B high
1352.14	SL Controller Action	Start timer 3
1352.15	SL Controller Action	Set digital out B low
1352.16	SL Controller Action	No action
1352.17	SL Controller Action	No action
1352.18	SL Controller Action	DISABLED
1352.19	SL Controller Action	No action

Рис. 5. Программы работы ПЛК системы управления консольного крана с магнитным захватом

На рис. 6 представлена экспериментальная осциллограмма угловой скорости двигателя механизма В перемещения консольного крана с магнитным захватом. Данная экспериментальная осциллограмма угловой скорости соответствует циклограмме работы механизма В (рис. 1), показанной на рис. 3, что подтверждает сделанный выше вывод.

Следует тем не менее отметить, что у применяемых методов программного управления имеются ограничения, поскольку они применимы только для кранового оборудования, работающего на однотипных погрузочно-разгрузочных операциях.

Заключение. Проведен анализ конструкции электрического консольного крана с магнитным захватом. Разработаны циклограммы работы механизма перемещения крана, алгоритм работы ПЛК системы управления механизмом перемещения крана, программа работы ПЛК системы управления механизмом перемещения крана. Предложена техническая реализация способа управления механизмом перемещения подъемного крана. Определена

экспериментальная осциллограмма угловой скорости двигателя механизма В (рис.1) перемещения консольного крана с магнитным захватом, подтверждающая работоспособность разработанных алгоритмов и программ. Сделан вывод об ограничении применяемых методов программного управления, поскольку они применимы только для кранового оборудования, работающего на однотипных погрузочно-разгрузочных операциях.

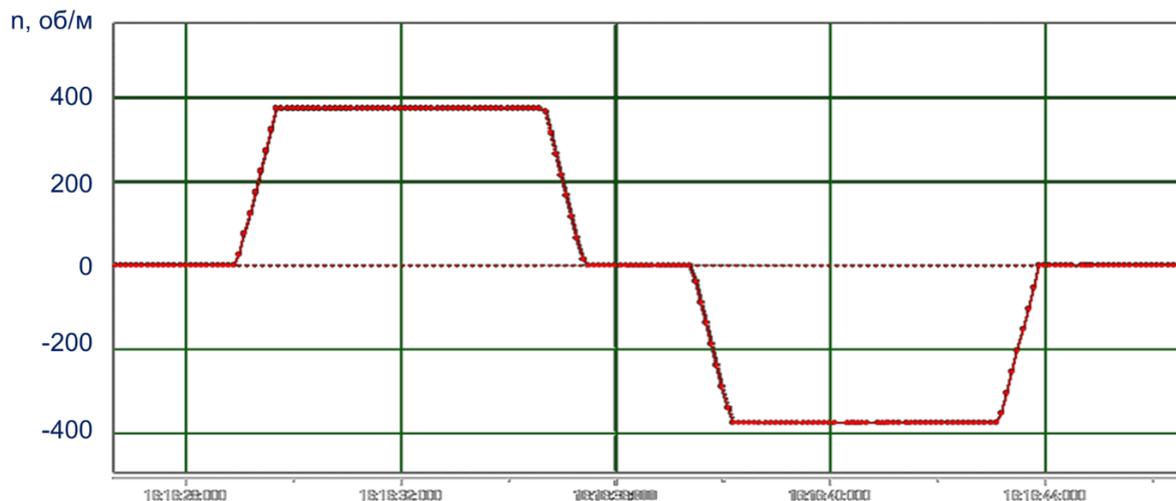


Рис. 6. Экспериментальная циклограмма работы механизма Е перемещения крана

Список источников

1. Фельдман Ю.И. Состояние и перспективы развития автоматизированных электроприводов с преобразователями частоты для крановых и судовых грузоподъемных механизмов / Ю.И. Фельдман, Л.М. Миронов, А.Д. Машихин и др. // *Электротехника*, 1995. – № 10. – С. 2-5.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
3. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учеб. для вузов / А.С. Анучин. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
4. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
6. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. – 240 с.
7. Peña J.M., Díaz E.V., Implementation of V/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor, 2016 IEEE ANDESCON, 2016, pp. 1-4, DOI:10.1109/ANDESCON.2016.7836196.
8. Isidori A. Nonlinear control systems (3rd edition). Berlin Springer-Verlag, 1995, 549 p.
9. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives. Oxford: Clarendon press, 1996, 456 p.
10. Kohlrusz G., Fodor D. Comparison of scalar and vector control strategies of induction motors. Hungarian journal of industrial chemistry, 2011, pp. 265-270.
11. Jisha L.K., Powly Thomas A.A. A comparative study on scalar and vector control of Induction motor drives. 2013 International conference on circuits, controls and communications (CCUBE), 2013, pp. 1-5, DOI:10.1109/CCUBE.2013.6718554.
12. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction motor control design. London: Springer, 2010, 351 p.
13. Asnil, Husnaini I., Astrit E. Microcontroller based 120° and 180° conduction modes of three-phase inverter for photovoltaic generation. ARPN journal of engineering and applied sciences, 2018, 13, 3579-3586.
14. Gulyamov K., Yunusov R., Dovudov S., et al. Study of the DC/DC boost converter physical model. Proceedings of the 2021 Ural-siberian smart energy conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 November 2021, Novosibirsk, 2021, pp. 77-80.
15. Gulyamov K., Sharifov B., Dovudov S., et al. Increase in power of DC/DC converters with increased number of conversion channels. Proceedings of the 2020 Ural smart energy conference, USEC 2020, Ekaterinburg, 13–15 November 2020, Ekaterinburg, 2020, pp. 59-62.

16. Кравчик А.Э. Асинхронные двигателя серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982.
17. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: Учеб. Пособие / М.П. Дунаев. – Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 116 с.
18. Руководство по программированию FC-302. – Москва, 2010. – 207 с.

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

Саушкин Алексей Анатольевич. Аспирант Иркутского национального исследовательского технического университета. ORCID: 0000-0001-5600-4615, leha-34714@inbox.ru, 664074, Россия, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 621.314.3

DOI:10.25729/ESI.2025.37.1.015

Automated program control of crane travel mechanisms

Mikhail P. Dunaev, Aleksei A. Saushkin

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

Abstract. The article analyzes the design of an electric jib crane with a magnetic gripper. Cyclograms of the crane movement mechanism operation have been developed. An algorithm for the operation of the PLC of the crane travel mechanism control system has been developed. The work program of the PLC of the crane travel mechanism control system has been developed. A technical implementation of the method of controlling the mechanism of movement of a crane is proposed. An experimental oscillogram of the angular velocity motor of the movement mechanism B of a jib crane with a magnetic gripper is determined, confirming the operability of the developed algorithms and programs.

Keywords: crane, frequency converter, electric drive, control

References

1. Feldman U.I., Mironov L.M., Mashihin A.D. et al. Sostoianie i perspektivi razvitiia avtomatizirovanih elektroprivodov s preobrazovateliami chastoti dlia kranovih i sudovih gruzopodemnih mehanizmov [Status and development prospects of automated electric drives with frequency converters for crane and marine lifting mechanisms]. Elektrotehnika [Electrical engineering], 1995, no. 10, pp. 2-5.
2. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo: GOU VPO "Ivanovskii gosudarstvennii energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina" [Ivanovo: State educational institution of higher professional education "Ivanovo State power engineering university named after V.I. Lenin"], 2008, 298 p.
3. Anuchin A.S. Sistemi upravleniia elektroprivodov: ucheb. dlia vuzov [Electric drive control systems: textbook for universities]. M.: Izd. dom MEI [Moscow: MPEI Publishing house], 2015, 373 p.
4. Sandler A.S., Sarbatov R.S. Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinhronimi dvigateliami [Automatic frequency control of asynchronous motors]. M.: Energia [M.: Energy], 1974, 328 p.
5. German-Galkin, S.G. Cifrovie elektroprivodi s tranzistornimi preobrazovateliami [Digital electric drives with transistor converters]. L.: Energoatomizdat, 1986, 248 p.
6. Sabinin U.A., Gruzov V.L. Chastotno-reguliruemie asinhronie dvigateliami elektroprivodi [Frequency-controlled asynchronous electric drives]. L.: Energoatomizdat. Leningr. Otdelenie [L.: Energoatomizdat. Leningrad branch], 1985, 240 p.
7. Peña J.M., Díaz E.V., Implementation of V/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor, 2016 IEEE ANDESCON, 2016, pp. 1-4, DOI:10.1109/ANDESCON.2016.7836196.
8. Isidori A. Nonlinear control systems (3rd edition). Berlin Springer-Verlag, 1995, 549 p.
9. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives. Oxford: Clarendon press, 1996, 456 p.
10. Kohlrusz G., Fodor D. Comparison of scalar and vector control strategies of induction motors. Hungarian journal of industrial chemistry, 2011, pp. 265-270.

11. Jisha L.K., Powly Thomas A.A. A comparative study on scalar and vector control of Induction motor drives. 2013 International conference on circuits, controls and communications (CCUBE), 2013, pp. 1-5, DOI:10.1109/CCUBE.2013.6718554.
12. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction motor control design. London: Springer, 2010, 351 p.
13. Asnil, Husnaini I., Astrit E. Microcontroller based 120° and 180° conduction modes of three-phase inverter for photovoltaic generation. ARPN journal of engineering and applied sciences, 2018, 13, 3579-3586.
14. Gulyamov K., Yunusov R., Dovudov S., et al. Study of the DC/DC boost converter physical model. Proceedings of the 2021 Ural-siberian smart energy conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 November 2021, Novosibirsk, 2021, pp. 77-80.
15. Gulyamov K., Sharifov B., Dovudov S., et al. Increase in power of DC/DC converters with increased number of conversion channels. Proceedings of the 2020 Ural smart energy conference, USEC 2020, Ekaterinburg, 13–15 November 2020, Ekaterinburg, 2020, pp. 59-62.
16. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., et al. Asinhronie elektrodvigateli serii 4A: Spravochnik [Asynchronous motors of the 4A series: Handbook]. M.: Energoizdat, 1982.
17. Dunaev M.P. Silovie elektronie preobrazovateli elektrostancii: Ucheb. posobie. [Power electronic converters of power plants: Textbook. Manual]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU [Irkutsk, Publishing house of IRNITU], 2016, 116 p.
18. Rukovodstvo po programirovaniu FC-302 [Programming guide FC-302]. Moskva [Moscow], 2010, 207 p.

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

Saushkin Aleksei Anatolyevich. Aspirant, Irkutsk national research technical university. ORCID: 0000-0001-5600-4615, leha-34714@inbox.ru, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov str., 83.

Статья поступила в редакцию 29.06.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2025; принята к публикации 26.02.2025.

The article was submitted 06/29/2024; approved after reviewing 02/26/2025; accepted for publication 02/26/2025.

