

Комплексный подход к анализу и управлению режимами электрических сетей 0.4 кВ на основе данных интеллектуальной системы учета электроэнергии

Р. А. Белоусов¹, Е. С. Латыпов¹, А. А. Николаев², Е. М. Фискин²✉,
М. М. Фискина², Д. С. Федосов², В. В. Федчишин²

¹ НТЦ «КУМИР», Иркутск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

✉ fmm1@rambler.ru

Аннотация. Повышение наблюдаемости и энергоэффективности распределительных сетей 0.4 кВ представляет собой приоритетную задачу цифровизации электроэнергетики. Традиционные решения на базе цифровых подстанций экономически нецелесообразны для многочисленных объектов низкого напряжения. Предложен комплексный подход, использующий данные инфокоммуникационной платформы «КУМИР-РЕСУРС» с дискретностью сбора 1 мин для решения задач оперативного управления без установки дополнительного оборудования. Рассматриваются две взаимосвязанные задачи: многокритериальная оптимизация распределения однофазных потребителей по фазам для минимизации потерь и несимметрии, а также выявление аномальных режимов потребления (безучетное потребление, скрытый майнинг) методами машинного обучения. Для оптимизации фазной нагрузки применен генетический алгоритм, для детекции аномалий – анализ временных рядов с адаптивной коррекцией порогов. Моделирование на реальных данных показало снижение технических потерь на 21.2 %, полное устранение дисбаланса токов и ликвидацию перегрузки фаз. Результаты подтверждают возможность трансформации системы коммерческого учета в инструмент активного управления режимами сети.

Ключевые слова: MatLab, анализ временных рядов, безучетное электропотребление, генетический алгоритм, дисбаланс электрической нагрузки, «КУМИР-РЕСУРС», распределительные электрические сети, технические потери электроэнергии, цифровизация электроэнергетики

Для цитирования: Комплексный подход к анализу и управлению режимами электрических сетей 0.4 кВ на основе данных интеллектуальной системы учета электроэнергии / Р. А. Белоусов, Е. С. Латыпов, А. А. Николаев, Е. М. Фискин, М. М. Фискина, Д. С. Федосов, В. В. Федчишин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 6. С. 85–96. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-6-85-96.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

A Comprehensive Approach to Analysis and Operation Management of 0.4 kV Electrical Networks Based on Data from an Intelligent Electricity Metering System

R. A. Belousov¹, E. S. Latypov¹, A. A. Nikolaev², E. M. Fiskin²✉,
M. M. Fiskina², D. S. Fedosov², V. V. Fedchishin²

¹ KUMIR Research and Engineering Center, Irkutsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

✉ fmm1@rambler.ru

Abstract. Enhancing observability and energy efficiency of 0.4 kV distribution networks is a priority objective in the digitalization of the power sector. Traditional solutions based on digital substations are economically unfeasible for

numerous low-voltage facilities. This paper proposes a comprehensive approach utilizing data from the «KUMIR-RESOURCE» ICT platform with a 1-minute sampling interval to address operational management tasks without installing additional hardware. Two interrelated tasks are addressed: multi-criteria optimization of single-phase consumer distribution across phases to minimize losses and asymmetry, and detection of anomalous consumption patterns (unmetered consumption, hidden cryptocurrency mining) using machine learning methods. A genetic algorithm is employed for phase load optimization, while time series analysis with adaptive threshold correction is used for anomaly detection. Simulation based on real data demonstrated a 21.2 % reduction in technical losses, complete elimination of current imbalance, and resolution of phase overloads. The results confirm the potential to transform the commercial metering system into a tool for active network operation management.

Keywords: MatLab, time series analysis, unmetered electricity consumption, genetic algorithm, electric load imbalance, «KUMIR-RESOURCE», distribution electrical networks, technical electricity losses, digitalization of the power engineering sector

For citation: A Comprehensive Approach to Analysis and Operation Management of 0.4 kV Electrical Networks Based on Data from an Intelligent Electricity Metering System / R. A. Belousov, E. S. Latypov, A. A. Nikolaev, E. M. Fiskin, M. M. Fiskina, D. S. Fedosov, V. V. Fedchishin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 6. P. 85–96. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-6-85-96.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Введение. Современные электроэнергетические системы переживают этап глубокой трансформации, обусловленной широким внедрением цифровых технологий, развитием концепции «умной сети» и ростом требований к надежности, эффективности и устойчивости электроснабжения [1]. В этих условиях обеспечение высокой наблюдаемости и управляемости распределительных сетей становится одной из главных задач, особенно в отношении объектов низкого напряжения, где сосредоточена значительная часть технических и коммерческих потерь. Традиционные подходы к цифровизации, предусматривающие создание полноценных цифровых подстанций с многоуровневыми системами защиты, использованием протоколов МЭК 61850 и организацией оптоволоконных каналов связи, оказываются экономически нецелесообразными при модернизации существующих подстанций 0.4 кВ, которых в России насчитывается свыше 400 тыс. [2].

В связи с этим все большее внимание привлекают альтернативные решения, сочетающие высокую функциональность с низкими капитальными затратами. Одно из таких решений – коммуникационная платформа «КУМИР-РЕСУРС», разработанная и апробированная на объектах Иркутской области, которая позволяет организовать как коммерческий, так и технический учет электроэнергии, обеспечивая при этом режим, близкий к реальному времени [3]. В данной статье рассматривается расширение функциональности платформы за счет интеграции с методами оптимизации режимов работы сети, что позволяет не только наблюдать за состоянием системы, но и

принимать обоснованные управленческие решения. Особое внимание уделено оптимизации распределения однофазных потребителей по фазам, которая напрямую влияет на уровень потерь, что напряжения и долговечность оборудования.

В дополнение к задачам симметрирования нагрузок и снижения технических потерь особое внимание уделяется выявлению аномальных режимов потребления электроэнергии – таких, как безучетное потребление и нецелевое энергоемкое использование в коммерческих целях, например, для майнинга криптовалют. Эти явления часто характеризуются высокой степенью стабильности мощности в течение суток, что резко отличается от типичного профиля бытового или коммерческого потребителя. Платформа «КУМИР-РЕСУРС» обеспечивает сбор данных с интервалом в 1 мин по узлам учета, формируя массив больших данных, пригодный для применения методов искусственного интеллекта. Анализ таких данных позволяет не только фиксировать текущее состояние электрической сети, но и выявлять скрытые аномалии, в том числе участки с повышенными потерями и нетипичными для бытовой нагрузки паттернами энергопотребления. Таким образом, предлагается рассмотреть платформу не только как систему учета, но и как инструмент аналитики и обнаружения аномалий, что значительно расширяет ее функциональные возможности.

Постановка задачи и научная новизна. Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности эксплуатации распределительных сетей 0.4 кВ при

ограниченных инвестиционных возможностях. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на полную цифровизацию объектов, предлагаемый метод фокусируется на использовании уже существующей инфраструктуры учета для решения задач оперативного управления. Основная идея заключается в том, что данные, собираемые платформой «КУМИР-РЕСУРС» с интервалом в 1 мин, могут служить не только основой для расчета потерь и выявления хищений, но и входными параметрами для математических моделей, направленных на оптимизацию режимов сети.

В качестве такой задачи рассмотрена оптимизация распределения однофазных потребителей по фазам трехфазной сети, что позволяет минимизировать технические потери, снизить несимметрию токов и улучшить качество электроэнергии. Научная новизна работы состоит в разработке и практической реализации оптимизационной модели, адаптированной к условиям реальных распределительных сетей и использующей данные коммерческого учета в качестве входной информации. В отличие от существующих решений, предложенный подход не требует дополнительного оборудования и может быть внедрен с минимальными затратами в режиме постобработки. Практическая значимость заключается в возможности снижения технических потерь, улучшения баланса нагрузки и повышения надежности электроснабжения, что особенно важно для сетей с высокой долей однофазных потребителей.

Архитектура платформы «КУМИР-РЕСУРС» и ее роль в повышении наблюдаемости. Платформа «КУМИР-РЕСУРС» представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для автоматизации учета и мониторинга электроэнергии в распределительных сетях. Ее архитектура построена на принципах масштабируемости и гибкости, что позволяет интегрировать до 50 млн узлов учета на один сервер, используя различные каналы связи – GSM, Ethernet, PLC и др. [4].

Техническая реализация платформы основана на высокопроизводительной архитектуре (операционная система Linux, система управления базами данных PostgreSQL, ядро на языке стандарта C99), способной обрабатывать миллионы транзакций в сутки, что подтверждено стендовыми испытаниями на масштабируемость до 50 млн узлов. Важная особенность состоит в прямом опросе приборов учета, исключающем необходимость развертывания дорогостоящих промежу-

точных серверов сбора данных. Для передачи информации используется гибридный подход (радиоканал 868 МГц, GSM, проводной интерфейс) на базе протокола КУМИР-NET, совместимого со стандартом DLMS/COSEM. Применение шифрования и помехоустойчивого кодирования обеспечивает достоверность данных даже в сложных условиях эксплуатации. Платформа поддерживает дифференцированную периодичность опроса: 15 мин для коммерческого учета и до 1 мин для технического учета и анализа, а также мониторинг дополнительных аналоговых и дискретных параметров (например, температура контактных соединений, температура окружающего воздуха, положение коммутационных аппаратов и пр.), что существенно расширяет наблюдаемость сети.

Основное достоинство платформы – ее способность функционировать на базе уже установленных интеллектуальных счетчиков, что исключает необходимость в капитальных вложениях на модернизацию измерительной инфраструктуры. Платформа обеспечивает сбор данных с интервалом в 1 мин, что значительно превосходит типовые режимы опроса в традиционных системах учета и позволяет выявлять кратковременные аномалии – такие, как провалы напряжения, кратковременные перегрузки и дисбаланс фазных токов.

Функционал платформы включает в себя не только коммерческий учет, но и технический учет электроэнергии, расчет потерь, мониторинг качества электроэнергии, балансировку нагрузок и обнаружение безучетного потребления [5]. В условиях, когда традиционные подходы к цифровизации подстанций 0.4 кВ экономически нецелесообразны, платформа «КУМИР-РЕСУРС» позволяет обеспечить до 80–85 % функционала цифровой подстанции при затратах, составляющих всего 20–25 % от стоимости типовых решений.

Апробация платформы на объектах Иркутской области показала ее высокую эффективность: удалось выявить участки с аномальными техническими потерями (до 25 %), дисбалансом нагрузок до 40 % и случаями бездоговорного потребления, что подтверждает ее потенциал как инструмента не только для учета, но и для активного управления режимами сети [6].

На рис. 1 представлен web-интерфейс платформы с суточными профилями нагрузки на примере одного из присоединений. Видно, что платформа обеспечивает детализированный мониторинг с временным разрешением в 1 мин, что позволяет фиксировать плановые режимы как потребления, так и отклонения от нормальных профилей.

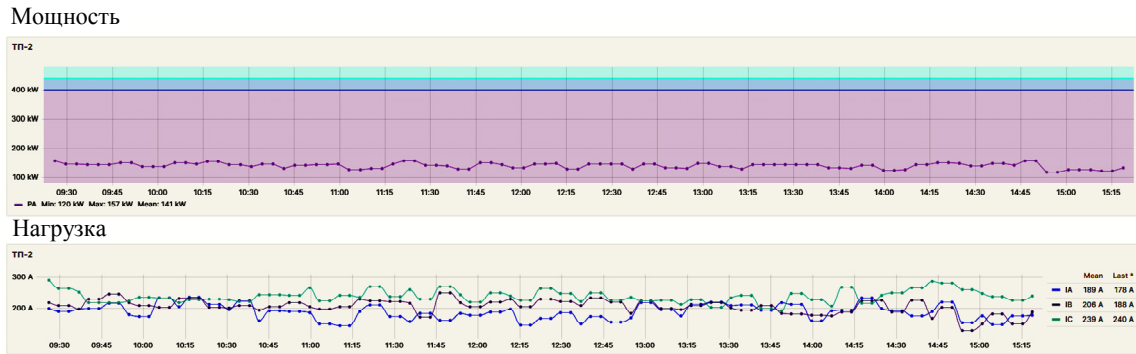


Рис. 1. Интерфейс платформы «КУМИР-РЕСУРС» с визуализацией суточных профилей нагрузки по фазам
Fig. 1. Interface of the «KUMIR-RESOURCE» platform visualizing daily load profiles by phase

Математическая модель оптимизации распределения нагрузки по фазам. Задача оптимизации распределения однофазных потребителей по фазам сети 0.4 кВ типичная задача дискретной оптимизации, возникающей в условиях асимметричной нагрузки. Рассмотрим участок сети, включающий N однофазных потребителей, каждый из которых подключен к одной из трех фаз (A, B, C). Цель состоит в перераспределении потребителей таким образом, чтобы минимизировать технические потери, снизить дисбаланс токов и удержать напряжение в допустимых пределах.

Пусть I_i – ток i -го потребителя, R_i – активное сопротивление участка линии до точки подключения, а $x_{i,f} \in \{0, 1\}$ – бинарная переменная, равная 1, если потребитель i подключен к фазе f , и 0 – в противном случае. Суммарные технические потери в сети определяются как

$$P_{\text{птп}} = \sum_{f \in \{A, B, C\}} \sum_{i=1}^N x_{i,f} I_i^2 R_i. \quad (1)$$

Критерий (1) отражает основную цель – снижение потерь активной мощности, что напрямую связано с экономией электроэнергии и снижением эксплуатационных расходов. Для оценки степени асимметрии нагрузки используется коэффициент небаланса токов

$$\Delta I = \max_f \left(\sum_i x_{i,f} I_i \right) - \min_f \left(\sum_i x_{i,f} I_i \right), \quad (2)$$

который характеризует разницу между наибольшим и наименьшим токами по фазам. Минимизация (2) способствует улучшению качества электроэнергии и снижению дополнительных потерь в нулевом проводе сети 0.4 кВ. Кроме того, учитывается отклонение напряжения в узлах потребления

$$\Delta U = \sum_f \sum_i x_{i,f} |U_i - U_{\text{ном}}|, \quad (3)$$

где U_i – фактическое напряжение в узле i , а $U_{\text{ном}} = 220$ В для однофазных потребителей. Критерий (3) важен для обеспечения соответствия требованиям ГОСТ 32144–2013 по качеству электроэнергии.

Задача оптимизации решается при следующих ограничениях:

- каждый потребитель подключен только к одной фазе:

$$\sum_f x_{i,f} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, N;$$

- ток в любой фазе не должен превышать допустимого значения I_{max} :

$$\sum_i x_{i,f} I_i \leq I_{\text{max}}, \quad \forall f \in \{A, B, C\}.$$

Целевая функция формируется как взвешенная сумма критериев:

$$F = w_1 P_{\text{птп}} + w_2 \Delta I + w_3 \Delta U + \lambda \text{Ш},$$

где $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.2$ – весовые коэффициенты, отражающие приоритеты; λ – коэффициент «строгости» (весовой коэффициент) соблюдения ограничений; Ш – штраф за нарушение технических ограничений. Такой подход позволяет учитывать несколько целей одновременно и находить компромиссное решение.

Учитывая высокую размерность задачи и отсутствие упорядоченности в пространстве поиска, использование метода полного перебора вычислительно нецелесообразно. В связи с этим применяется генетический алгоритм (ГА), который эффективно работает в условиях больших размерностей и не гарантирует глобального оптимума, но позволяет находить «достаточно хорошее» решение за приемлемое время [7]–[9]. ГА основан на принципах естественного отбора и включает операции селекции, кроссовера и мутации, что делает его устойчивым к локальным минимумам [10].

Во введении также отмечалась возможность использовать данные системы учета не только для расчета потерь, но и для обнаружения аномалий в потреблении электроэнергии. Например, скрытый майнинг криптовалют характеризуется высокой стабильностью потребляемой мощности в течение суток, независимо от времени года и дня недели.

Для автоматизации процесса выявления таких режимов разработан алгоритм на основе анализа временных рядов. На первом этапе для каждого узла учета формируется суточный профиль потребления с шагом 1 мин. Затем рассчитываются следующие статистические признаки:

- среднее значение мощности за сутки μ ;
- стандартное отклонение σ (или дисперсия $D = \sigma^2$);
- коэффициент вариации $CV = \sigma/\mu$;
- размах колебаний (разница между максимумом и минимумом);
- доля времени, в течение которого мощность изменяется менее чем на 5 % от среднего значения.

Участки с низкой дисперсией и коэффициентом вариации (например, $CV < 0.1$) и высокой долей стабильного потребления классифицируются как

подозрительные. Однако для исключения ложных срабатываний (например, при использовании электроотопления в зимний период) применяется адаптивный пороговый алгоритм с учетом сезонности. Он сравнивает текущий профиль с историческими данными за аналогичные периоды и оценивает степень отклонения от нормального поведения.

На рис. 2 продемонстрирован реальный случай выявления аномального потребления через платформу «КУМИР-РЕСУРС». Характерная особенность – стабильная мощность с коэффициентом вариации менее 5 % на протяжении 24 ч, что нехарактерно для бытовых потребителей. Такие профили автоматически помечаются системой для последующей проверки. По данным платформы, на анализируемом участке было выявлено 16 подобных случаев, что составило 53 % от общего числа узлов учета.

Для повышения точности классификации могут быть использованы методы опорных векторов (SVM) и «случайного леса» (Random Forest), обученные на размеченных данных (реальные случаи майнинга и штатного электропотребления). Обучение может быть выполнено на выборке из не-

Поиск майнинга

Начало периода: Конец периода: Тип архива:

Реактивная энергия устройства, кВт: Мощность устройства, кВт: Процент нестабильности, %:

M	Код узла	Тип прибора	E активная			E реакт.пр.	E реакт.обр.	Число устр-в	E расчёт	Адрес
			Avg	Std	Min					
M	VV_165	Меркурий 234	2,21	0,00	2,20	0,00	0,39	3,00	4,50	
M	VV_042	Меркурий 234	8,45	0,69	7,36	0,02	0,29	2,00	3,00	
M	VV_138	Меркурий 234	7,70	0,58	7,26	0,01	0,24	2,00	3,00	
M	VV_117	Энергомера СЕ307 СПОДЭС	2,96	0,01	2,95	0,03	0,18	1,00	1,50	
	VV_075	Меркурий 234	2,79	1,51	0,23	0,00	0,12	1,00	1,50	
M	VV_154	Меркурий 234	5,37	0,46	4,46	0,00	0,11	1,00	1,50	
M	VV_070	Меркурий 234	1,24	0,27	0,61	0,00	0,11	1,00	1,50	
M	VV_141	Меркурий 234	4,43	0,60	3,89	0,03	0,10	0,00	0,00	
	VV_039	Меркурий 234	2,43	1,11	1,52	0,03	0,10	0,00	0,00	
M	VV_068	Меркурий 234	3,06	0,75	1,97	0,02	0,08	0,00	0,00	
	VV_155	Меркурий 234	1,88	0,82	0,61	0,03	0,07	0,00	0,00	
M	VV_089	Меркурий 234	2,94	0,75	2,34	0,02	0,06	0,00	0,00	
	VV_036	Меркурий 234	2,33	0,30	1,78	0,21	0,04	0,00	0,00	
	VV_013	Меркурий 234	3,60	1,13	2,60	0,07	0,04	0,00	0,00	
	VV_002	Меркурий 234	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	
M	VV_012	Меркурий 234	2,86	0,51	2,29	0,06	0,02	0,00	0,00	
M	VV_142	Меркурий 234	1,23	0,20	0,93	0,02	0,02	0,00	0,00	
	VV_093	Меркурий 234	0,70	0,71	0,03	0,03	0,02	0,00	0,00	
M	VV_106	Меркурий 234	1,15	0,14	0,50	0,04	0,02	0,00	0,00	
	VV_053	Меркурий 234	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
	VV_109	Меркурий 234	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	
	VV_037	Энергомера СЕ307 СПОДЭС	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
	VV_125	Меркурий 234	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
	VV_150	Меркурий 234	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
	VV_067	Меркурий 234	1,81	0,67	0,93	0,18	0,01	0,00	0,00	
	VV_011	Меркурий 234	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
M	VV_145	Меркурий 234	1,13	0,01	1,10	0,06	0,00	0,00	0,00	
M	VV_144	Меркурий 234	2,19	0,44	1,19	0,26	0,00	0,00	0,00	
M	VV_151	Меркурий 234	3,66	0,16	3,50	0,15	0,00	0,00	0,00	
	VV_026	Меркурий 206	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	

Рис. 2. Пример обнаружения аномального режима потребления со стабильной нагрузкой в течение суток (буква М в столбце слева – подозрение на майнинг криптовалют)

Fig. 2. Example of detecting an anomalous consumption pattern with a stable load throughout the day (the letter M in the left column indicates suspected cryptocurrency mining)

скольких десятков узлов, где наличие майнинга было подтверждено выездными проверками. Метод SVM эффективен при работе с небольшим числом признаков, а метод «случайного леса» позволяет оценить важность каждого параметра (например, дисперсия оказывается наиболее значимым признаком «серого» майнинга).

Также для выявления локальных очагов повышенных потерь может быть применен метод пространственной кластеризации (DBSCAN) на географической карте сети. Участки с одновременно высокими потерями и стабильным потреблением помечаются как приоритетные для выездной проверки.

Экспериментальная часть и реализация модели. Экспериментальная часть исследования была направлена на проверку эффективности предложенного подхода к оптимизации распределения нагрузки в типовом узле распределительной сети 0.4 кВ. В качестве объекта моделирования рассмотрен сектор сети с 20 однофазными потребителями, токи которых варьировались от 20 до 70 А, что соответствует реальным условиям эксплуатации в жилых и коммерческих зонах. Исходное распределение потребителей по фазам формировалось случайным образом, что имитировало типичную ситуацию, когда подключение выполняется без учета баланса нагрузок.

Оптимизация была направлена на перераспределение потребителей с целью минимизации суммарных технических потерь, снижения несимметрии токов и поддержания напряжения в допустимых пределах. Задача была сформулирована

как многокритериальная оптимизационная задача с дискретными переменными, где каждой переменной соответствовал выбор фазы подключения для каждого потребителя. Учитывая высокую размерность задачи (3^{20} возможных комбинаций) и отсутствие упорядоченности в пространстве поиска, использование метода полного перебора оказалось вычислительно нецелесообразным.

В связи с этим выбран генетический алгоритм как один из наиболее эффективных эволюционных методов, способных находить «достаточно хорошее» решение за приемлемое время. Алгоритм был реализован в среде MatLab R2015a с использованием встроенных функций, что обеспечило его автономность и воспроизводимость.

На рис. 3 показан реальный режим работы участка сети до оптимизации. Наблюдается существенный дисбаланс: ток по фазе А периодически превышает допустимое значение, в то время как фазы В и С недогружены. Такие данные, полученные через платформу «КУМИР-РЕСУРС», служат входной информацией для алгоритма оптимизации. Для верификации модели было проанализировано 12 реальных участков сети с количеством потребителей от 15 до 85.

На рис. 4 представлен код программы для моделирования данных и реализации генетического алгоритма.

Размер популяции составил 100 особей; количество поколений – 200; вероятность кроссовера – 0.8; вероятность мутации – 0.02. В качестве целевой функции использовалась взвешенная сумма трех компонент (6): потерь активной мощ-

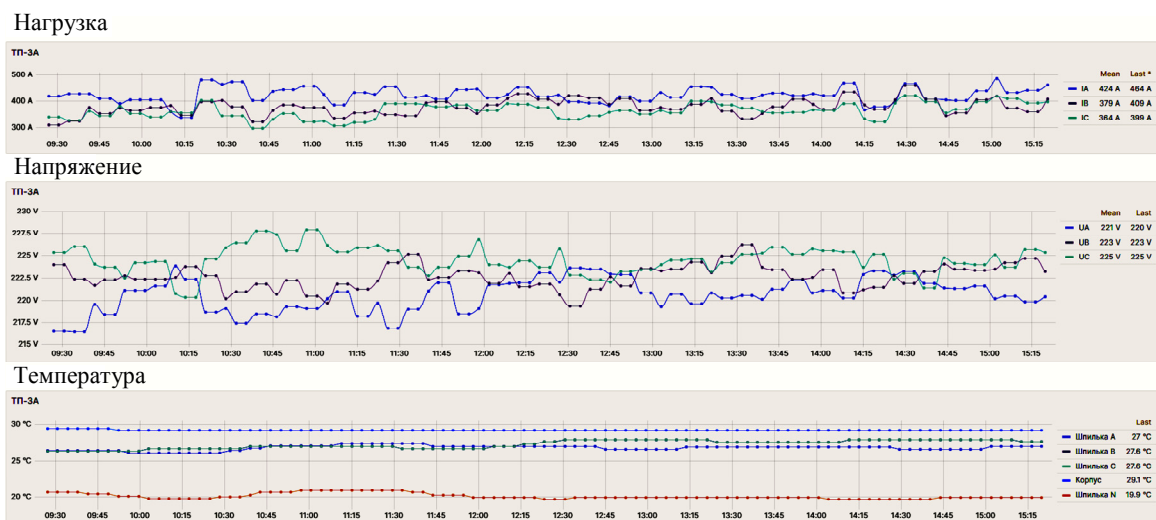


Рис. 3. Фрагмент SCADA-системы с отображением фактического дисбаланса токов по фазам на реальном участке сети 0.4 кВ

Fig. 3. Fragment of the SCADA system displaying the actual phase current imbalance on a real 0.4 kV network section

ности, небаланса токов и отклонения напряжения, с коэффициентами 0.5, 0.3 и 0.2 соответственно. Дополнительно вводился штраф за превышение допустимого тока по любой из фаз, что обеспечивало выполнение технических ограничений.

В ходе моделирования установлено, что алгоритм стабильно сходится к оптимальному реше-

нию уже к десятому поколению, что подтверждает его эффективность и устойчивость.

Результаты и визуализация. На рис. 5–10 представлены результаты моделирования.

На рис. 5 наблюдается значительный дисбаланс токов: фаза C перегружена (511 А), фазы A и B недогружены (194 и 180 А соответственно) при

<pre>clear; clc; close all; N = 20; % количество однофазных потребителей I_nominal = [50, 45, 30, 60, 20, 40, 55, 35, 25, 70, 48, 52, 33, 65, 28, 44, 58, 37, 22, 68]; % токи, А R_line = 0.1 * ones(N, 1); % сопротивление линии, Ом I_max_phase = 300; % допустимый ток фазы, А U_nom = 220; % номинальное напряжение, В w1 = 0.5; % потери w2 = 0.3; % несимметрия w3 = 0.2; % отклонение напряжения pop_size = 100; n_gen = 200; pc = 0.8; % вероятность кроссовера pm = 0.02; % вероятность мутации population = randi([1, 3], pop_size, N); best_fitness_history = zeros(n_gen, 1); for gen = 1:n_gen fitness = zeros(pop_size, 1); for i = 1:pop_size x = population(i, :); fitness(i) = -evaluateFitness(x, I_nominal, R_line, I_max_phase, w1, w2, w3); end [~, idx] = min(fitness); best_fitness_history(gen) = - fitness(idx); prob = exp(fitness - max(fitness)); prob = prob / sum(prob); parents_idx = randsample(1:pop_size, pop_size, true, prob); parents = population(parents_idx, :); offspring = parents; for i = 1:2:pop_size if rand < pc cp = randi([1, N-1]); offspring(i, cp+1:end) = parents(i+1, cp+1:end); offspring(i+1, cp+1:end) = parents(i, cp+1:end); end end end</pre>	<pre>for i = 1:pop_size for j = 1:N if rand < pm current = offspring(i, j); options = setdiff([1,2,3], current); offspring(i, j) = options(randi(length(options))); end end population = offspring; end [~, idx] = min(fitness); best_solution = population(idx, :); initial_solution = randi([1,3], 1, N); I_A_init = sum(I_nominal(initial_solution == 1)); I_B_init = sum(I_nominal(initial_solution == 2)); I_C_init = sum(I_nominal(initial_solution == 3)); I_A_opt = sum(I_nominal(best_solution == 1)); I_B_opt = sum(I_nominal(best_solution == 2)); I_C_opt = sum(I_nominal(best_solution == 3)); P_loss_init = I_A_init^2*R_line(1) + I_B_init^2*R_line(1) + I_C_init^2*R_line(1); P_loss_opt = I_A_opt^2*R_line(1) + I_B_opt^2*R_line(1) + I_C_opt^2*R_line(1); savings_kW = (P_loss_init - P_loss_opt) / 1000; savings_percent = (P_loss_init - P_loss_opt) / P_loss_init * 100; imbalance_init = max([I_A_init, I_B_init, I_C_init]) - min([I_A_init, I_B_init, I_C_init]); imbalance_opt = max([I_A_opt, I_B_opt, I_C_opt]) - min([I_A_opt, I_B_opt, I_C_opt]);</pre>
--	---

Рис. 4. Код программы на языке MatLab для реализации генетического алгоритма

Fig. 4. MatLab program code for implementing the genetic algorithm

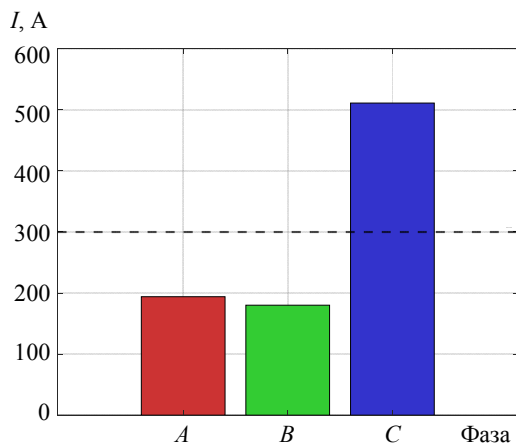


Рис. 5. Действующие значения токов по фазам до оптимизации

Fig. 5. RMS values of phase currents before optimization

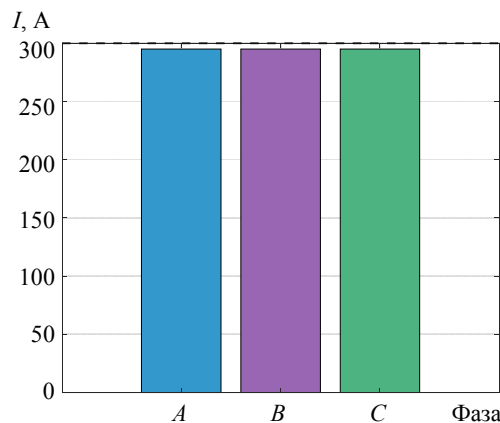


Рис. 6. Токи по фазам после оптимизации

Fig. 6. Phase currents after optimization

длительно допустимом фазном токе 300 А, обозначенном штриховой линией.

После оптимизации, как видно на рис. 6, нагрузка по фазам распределена равномерно и сопровождается одинаковым током 295 А. Перегрузка устранена, режим стал симметричным.

На рис. 7 показано, что потери активной мощности за счет перераспределения нагрузок по фазам снизились с 33.116 до 26.108 кВт (на 21.2 %).

Рис. 8 показывает, что после перераспределения нагрузок дисбаланс токов отсутствует, что улучшает показатели качества электроэнергии, снижает перегрев нулевого провода и преждевременный износ оборудования.

По рис. 9 видно, что целевая функция стабилизируется достаточно быстро, уже на первых поколениях, что подтверждает эффективность применения ГА.

Круговая диаграмма на рис. 10 показывает, как были перераспределены потребители для достижения симметрии. В таблице приведены обобщенные показатели электрической сети до и после оптимизации.

Предложенный подход к анализу больших данных с платформы «КУМИР-РЕСУРС» демонстрирует переход от пассивного мониторинга к активному выявлению скрытых проблем в сетях 0.4 кВ. Особенно ценно то, что обнаружение аномалий выполняется не в реальном времени, а на основе постобработки данных, что снижает требования к вычислительным ресурсам систем учета электроэнергии и позволяет применять сложные модели без необходимости вычислений в реальном времени. При этом важно то, что модель может быть дообучена на новых данных, что делает ее адаптивной к меняющимся условиям. В будущем возможно развитие системы в сторону

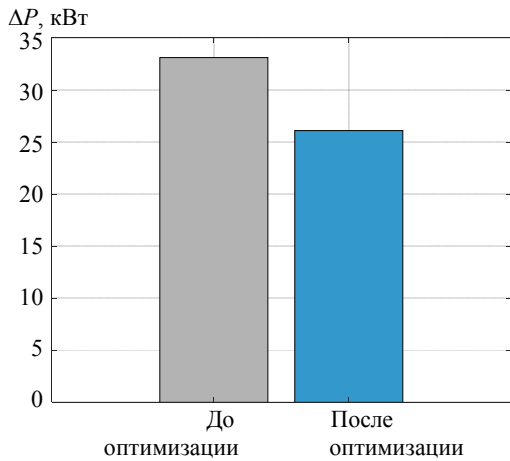


Рис. 7. Сравнение потерь активной мощности до и после оптимизации

Fig. 7. Comparison of active power losses before and after optimization

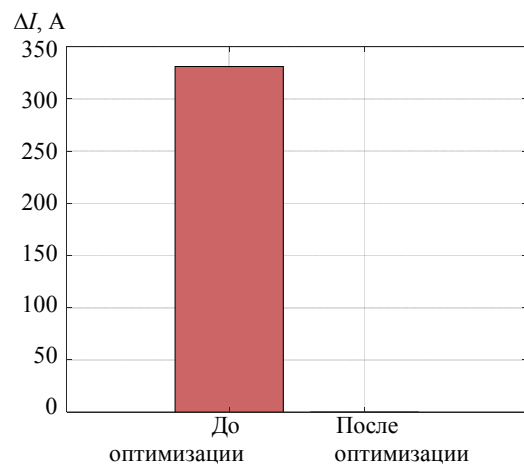


Рис. 8. Динамика небаланса токов
Fig. 8. Current unbalance dynamics

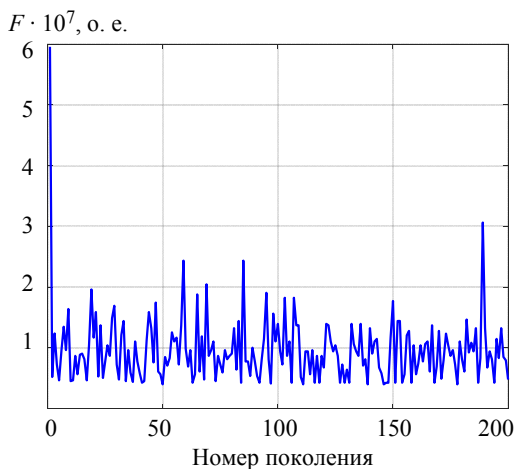


Рис. 9. Сходимость генетического алгоритма
Fig. 9. Convergence of the genetic algorithm

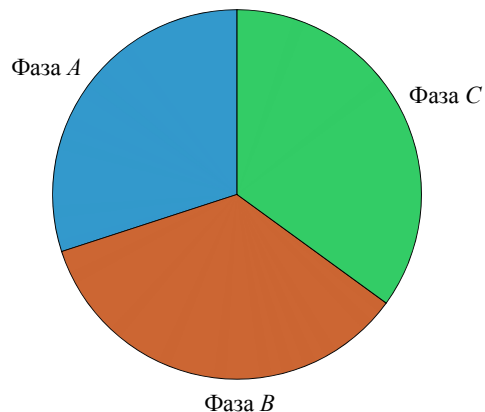


Рис. 10. Распределение потребителей по фазам
Fig. 10. Distribution of consumers across phases

Итоговые показатели оптимизации
Final optimization results

Показатель	До оптимизации	После оптимизации	Изменение
Ток фазы <i>A</i> , А	194	295	+101
Ток фазы <i>B</i> , А	180	295	+115
Ток фазы <i>C</i> , А	511	295	–216
Потери, кВт	33.116	26.108	–21.2 %
Небаланс токов, А	331	0	–331
Перегрузка фаз	Да (фаза <i>A</i>)	Нет	Устранена

обнаружения безучетного потребления с помощью анализа невязки баланса в трансформаторной подстанции и последующего поиска «подозреваемых» среди потребителей с аномальными профилями.

Обсуждение результатов. Полученные результаты демонстрируют высокую практическую значимость предложенного подхода. Снижение технических потерь на 21.2 % при одновременном устранении перегрузки по одной из фаз и устранении дисбаланса токов свидетельствует о высокой эффективности оптимизационной модели.

Важно отметить, что все улучшения достигнуты за счет перераспределения уже существующих нагрузок без привлечения дополнительных ресурсов, что делает подход особенно привлекательным для эксплуатационных организаций. Кроме того, визуализация результатов, включающая сравнение токов по фазам, динамику потерь и сходимость алгоритма, обеспечивает высокую наглядность и позволяет использовать модель как инструмент поддержки принятия решений как для инженеров, так и для руководителей.

Следует подчеркнуть, что предложенный подход не обязательно требует полной автоматизации переключений – даже ручное переключение нагрузок между фазами на основе рекомендаций модели может привести к значительному эффекту.

Практическая реализация предложенного подхода на объектах Иркутской области показала, что даже ручное переключение нагрузок между фазами на основе рекомендаций системы позволяет достичь экономического эффекта. Годовая экономия электроэнергии только на одном трансформаторе 10/0.4 кВ мощностью 250 кВА составляет порядка 12...15 тыс. кВт·ч. При масштабировании на 100 подобных трансформаторов годовой экономический эффект может составить несколько миллионов рублей.

В перспективе возможна интеграция модели с системами дистанционного управления нагрузками, что позволит реализовать полностью авто-

матизированный цикл: от сбора данных к анализу, оптимизации и исполнению. Такой подход открывает новые возможности для создания «умных» низковольтных сетей, способных адаптироваться к изменяющимся условиям нагрузки и минимизировать потери в режиме, близком к реальному времени.

Заключение. В ходе выполнения исследования разработан и апробирован комплексный подход к повышению энергоэффективности распределительных сетей 0.4 кВ, основанный на интеграции данных коммуникационной платформы «КУМИР-РЕСУРС» и методов математической оптимизации.

Показано, что использование данных о токах и напряжениях, собираемых с интервалом в 1 мин, позволяет не только осуществлять мониторинг режимов работы, но и формировать обоснованные управленческие решения, направленные на снижение технических потерь и улучшение качества электроэнергии. Разработанная модель оптимизации распределения однофазных нагрузок по фазам сети, реализованная с помощью генетического алгоритма, продемонстрировала высокую эффективность: потери снизились на 21.2 %, дисбаланс токов – с 331 до 0 А, перегрузка по фазе была устранена.

Полученные результаты подтверждают, что платформа «КУМИР-РЕСУРС» может служить не только инструментом учета, но и основой для активного управления режимами сети. Предложенный подход может быть рекомендован для широкого внедрения в сетевые компании, особенно в условиях ограниченного бюджета на модернизацию. В дальнейшем планируется развитие модели в направлении динамической оптимизации с учетом суточных профилей нагрузки и интеграции с системами управления спросом.

Также платформа «КУМИР-РЕСУРС» может стать основой для создания системы интеллектуального анализа больших данных. Разработанные методы позволяют выявлять нетипичные режимы

потребления – такие, как скрытый майнинг и безучетное потребление, на основе анализа стабильности профиля мощности. Использование методов машинного обучения и их интеграция в единую систему мониторинга открывает новые возможности для снижения коммерческих потерь, повышения наблюдаемости и усиления контроля за режимами работы распределительных сетей. В дальнейшем планируется развитие системы в направлении прогнозирования аномалий энергопотребления.

Таким образом, интеграция платформы «КУМИР-РЕСУРС» с методами математической оптимизации и машинного обучения создает основу для перехода от пассивного учета к активному управлению распределительными сетями. Апробация подхода на реальных данных подтвердила его практическую значимость: снижение технических потерь на 20–23 %, выявление случаев безучетного потребления и майнинга криптовалют, улучшение качества электроэнергии за счет симметрирования нагрузок.

Список литературы

1. Майоров А. В. Технические решения для повышения надежности эксплуатации распределительных электрических сетей в рамках цифровой трансформации // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. № 53(14). С. 2–6.
2. Жуков В. В., Шмелев А. В., Михеев Д. В. Оценка надежности цифровой подстанции и элементов интеллектуальной электрической сети // *Электричество*. 2019. № 9. С. 4–15. doi: 10.24160/0013-5380-2019-9-4-15.
3. Концептуальный подход к созданию и развитию интеллектуальной системы учета энергоресурсов «КУМИР-Ресурс» / Р. А. Белоусов, А. Н. Гапеенко, Е. М. Фискин, А. А. Николаев, В. В. Федчишин, М. М. Фискина // *Автоматизация в промышленности*. 2023. № 8. С. 3–7. doi: 10.25728/avtprom.2023.08.01.
4. Belousov R., Fiskin E., Fiskina M. Integrated systems for commercial and technological control of energy resources consumption in urban areas and businesses in Russia // *E3S Web of Conf.* Irkutsk: EDP Sci., 2018. Vol. 39. P. 04004. doi: 10.1051/e3sconf/20183904004.
5. Литвинов А. А., Кононова М. С., Кононов А. А. Экономические показатели внедрения интеллектуальной системы учета электроэнергии на примере территориальной сетевой компании «Горэлектросеть-Воронеж» // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2022. № 1(20). С. 90–98. doi: 10.36622/VSTU.2022.52.29.009.
6. Devlin M., Hayes B. P. Non-Intrusive load monitoring using electricity smart meter data: A deep learning approach // 2019 IEEE Power & Energy Soc. General Meeting (PESGM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973732.
7. Пестерев А. А., Костинский С. С., Наракидзе Н. Д. Методика оптимального распределения однофазных электроприемников в системах электроснабжения по критерию снижения дополнительных потерь, вызванных несимметрией и несинусоидальностью нагрузки // *Вест. Северо-Кавказского ФУ*. 2025. № 2(107). С. 22–35. doi: 10.37493/2307-907X.2025.2.2.
8. Genetic algorithm for energy commitment in a power system supplied by multiple energy carriers / M. Dehghani, M. Mardaneh, O. P. Malik, J. M. Guerrero, C. Sotelo, D. Sotelo, M. Nazari-Heris, K. Al-Haddad, R. A. Ramirez-Mendoza // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 23. P. 10053. doi: 10.3390/su122310053.
9. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм, А. И. Хальясмаа, С. А. Ерошенко, П. В. Матренин, Н. А. Попкова, Д. А. Секацкий // *Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. doi: 10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354.
10. Полищук В. И., Ткаченко В. А., Шепелев А. О. Расчет установившегося режима электрической сети с применением генетического алгоритма // *Вестн. Северо-Кавказского ФУ*. 2025. № 1 (106). С. 21–28. doi: 10.37493/2307-907X.2025.1.2.

Информация об авторах

Белоусов Роман Анатольевич – канд. техн. наук, технический директор ООО «НТЦ «КУМИР». Мкр. Университетский, 74, Иркутск, 664082, Россия.
E-mail: office@ntckumir.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5737-5354>

Латыпов Евгений Сергеевич – ведущий инженер ООО «НТЦ «КУМИР». Мкр. Университетский, 74, Иркутск, 664082, Россия.
E-mail: support@ntckumir.ru

Николаев Андрей Андреевич – аспирант кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем. Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия.
E-mail: Nikolaev-9494@mail.ru

Фискин Евгений Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем. Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия.
E-mail: fmml@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3862-8675>

Фискина Маргарита Михайловна – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем. Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия.
E-mail: fmml@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6723-1047>

Федосов Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой электрических станций, сетей и систем. Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия.
E-mail: fedosov_ds@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>

Федчишин Вадим Валентинович – канд. техн. наук, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем. Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия.

Вклад авторов:

Белоусов Р. А. – разработка информационной системы.
Латыпов Е. С. – верификация результатов исследования.
Николаев А. А. – оформление текста и иллюстративного материала.
Фискин Е. М. – разработка математической модели и программы.
Фискина М. М. – аналитические расчеты.
Федосов Д. С. – теоретическое обоснование статьи и численные расчеты.
Федчишин В. В. – анализ литературы по теме статьи.

References

- Majorov A. V. Tehnicheskie reshenija dlja povyshenija nadezhnosti jekspluatatsii raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej v ramkah cifrovoj transformatsii // Jelektrojenergija. Peredacha i raspredelenie. 2019. № 53(14). S. 2–6. (In Russ.).
- Zhukov V. V., Shmelev A. V., Miheev D. V. Ocenka nadezhnosti cifrovoj podstancii i jelementov intellektual'noj jelektricheskoy seti // Jelektrichestvo. 2019. № 9. S. 4–15. doi: 10.24160/0013-5380-2019-9-4-15. (In Russ.).
- Konceptual'nyj podhod k sozdaniju i razvitiju intellektual'noj sistemy ucheta jenergoresursov «KUMIR-Resurs» / R. A. Belousov, A. N. Gapeenko, E. M. Fiskin, A. A. Nikolaev, V. V. Fedchishin, M. M. Fiskina // Avtomatizacija v promyshlennosti. 2023. № 8. S. 3–7. doi: 10.25728/avtprom.2023.08.01. (In Russ.).
- Belousov R., Fiskin E., Fiskina M. Integrated systems for commercial and technological control of energy resources consumption in urban areas and businesses in Russia // E3S Web of Conf. Irkutsk: EDP Sci., 2018. Vol. 39. P. 04004. doi: 10.1051/e3sconf/20183904004.
- Litvinov A. A., Kononova M. S., Kononov A. A. Jekonomicheskie pokazateli vnedrenija intellektual'noj sistemy ucheta jelektrojenergii na primere terri-torial'noj setевой kompanii «Gorjelektroset'-Voronezh» // Zhilishhnoe hozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura. 2022. № 1(20). S. 90–98. doi: 10.36622/VSTU.2022.52.29.009. (In Russ.).
- Devlin M., Hayes B. P. Non-Intrusive load monitoring using electricity smart meter data: A deep learning approach // 2019 IEEE Power & Energy Soc. General Meeting (PESGM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973732.
- Pesterev A. A., Kostinskij S. S., Narakidze N. D. Metodika optimal'nogo raspredelenija odnofaznyh jelektropriemnikov v sistemah jelektrosnabzhenija po kriteriju snizhenija dopolnitel'nyh poter', vyzvannyh nesimmetrijej i nesinusoidal'nost'ju nagruzki // Vest. Severo-Kavkazskogo FU. 2025. № 2(107). S. 22–35. doi: 10.37493/2307-907X.2025.2.2. (In Russ.).
- Genetic algorithm for energy commitment in a power system supplied by multiple energy carriers / M. Dehghani, M. Mardaneh, O. P. Malik, J. M. Guerrero, C. Sotelo, D. Sotelo, M. Nazari-Heris, K. Al-Haddad, R. A. Ramirez-Mendoza // Sustainability. 2020. Vol. 12, no. 23. P. 10053. doi: 10.3390/su122310053.
- Optimizacija topologii seti s Vlje-generaciej na osnove modifirovannogo adaptirovannogo geneticheskogo algoritma / A. M. Bramm, A. I. Hal'jasmaa, S. A. Eroshenko, P. V. Matrenin, N. A. Popkova, D. A. Seckackij // Jenergetika. Izv. vysshih uchebnyh zavedenij i

jenergeticheskikh ob#edinenij SNG. 2022. T. 65, № 4. S. 341–354. doi: 10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354. (In Russ.).

10. Polishhuk V. I., Tkachenko V. A., Shepelev A. O. Raschet ustanovivshegosja rezhima jelektricheskoj seti s

primeneniem geneticheskogo algoritma // Vestn. Severo-Kavkazskogo FU. 2025. № 1(106). S. 21–28. doi: 10.37493/2307-907X.2025.1.2. (In Russ.).

Information about the authors

Roman A. Belousov – Cand. Sci. (Eng.), Technical Director LLC «KUMIR Research and Engineering Center», Universitetskiy microraion, 74, Irkutsk, 664082, Russia.

E-mail: office@ntckumir.ru

Evgeniy S. Latypov – Lead engineer LLC «KUMIR Research and Engineering Center», Universitetskiy microraion, 74, Irkutsk, 664082, Russia.

E-mail: support@ntckumir.ru

Andrey A. Nikolaev – postgraduate student of the Department of Radioelectronics and Telecommunication Systems. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia.

E-mail: Nikolaev-9494@mail.ru

Evgeniy M. Fiskin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Telecommunication Systems. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia.

E-mail: fmm1@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3862-8675>

Margarita M. Fiskina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Telecommunication Systems. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia.

E-mail: fmm1@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7755-7275>

Denis S. Fedosov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Stations, Networks and Systems. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia.

E-mail: fedosov_ds@istu.edu

<https://orcid.org/0000-0001-5989-9549>

Vadim V. Fedchishin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electrical Stations, Networks and Systems. Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russia.

Author contribution statement:

Belousov R. A. – development of the information system.

Latypov E. S. – verification of research results.

Nikolaev A. A. – text formatting and preparation of illustrative materials.

Fiskin E. M. – development of the mathematical model and software.

Fiskina M. M. – analytical calculations.

Fedosov D. S. – theoretical framework of the study and numerical simulations.

Fedchishin V. V. – literature review on the subject of the article.

Статья поступила в редакцию 07.03.2026; принята к публикации после рецензирования 17.04.2026; опубликована онлайн 29.06.2026.

Submitted 07.03.2026; accepted 17.04.2026; published online 29.06.2026.