

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

О.В. Логиновский, loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

Д.В. Топольский, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

Н.Д. Топольский, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

И.Г. Топольская, topolskaiaig@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3314-6623>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются методы и алгоритмы проактивного управления цифровыми подстанциями в активно-адаптивных электроэнергетических системах. Проактивное управление представлено как организационная задача, требующая нового подхода к распределению функций принятия решений. Показано, что цифровые подстанции трансформируются в активных агентов системы управления, а цифровые трансформаторы выступают информационными агентами, формирующими данные для поддержки решений на всех уровнях иерархии управления энергообъектами. **Цель исследования:** разработка методов и алгоритмов проактивного управления энергообъектами в активно-адаптивных электроэнергетических системах, обеспечивающих интеллектуальную поддержку обоснованности и оперативности принятия решений диспетчерским персоналом на основе прогнозного анализа данных цифровых трансформаторов и перераспределения функций между уровнями иерархии управления энергообъектами. **Материалы и методы.** Исследование базируется на теории организационных систем, теории активных систем и теории информационных процессов и систем. Применены методы системного анализа, математического и имитационного моделирования, искусственного интеллекта (гибридные нейросетевые архитектуры CNN + Bi-GRU с вниманием), а также экспериментальные методы на платформе «Авача». **Результаты.** Разработана концепция распределенного проактивного управления с переносом функций интеллектуальной поддержки на полевой уровень, сокращающая время реакции до 1–2 мс. Предложен метод поддержки решений на основе нейросетевой архитектуры с точностью 96,1 % и эффективностью 0,8 MFLOPS. Обоснован принцип распределения функций с асинхронным алгоритмом lock-free синхронизации. Разработана методология интеграции в инфраструктуру цифровых подстанций, совместимая с МЭК 61850. Эксперименты на платформе «Авача» подтвердили точность 95,7 % и время реакции $1,2 \pm 0,3$ мс. Результаты внедрены в ООО «Челэнергоприбор». **Заключение.** Разработанные методы реализуют новую организационную структуру управления цифровыми подстанциями, соответствующую стратегии создания интеллектуальных активно-адаптивных систем, и повышают живучесть энергосистем за счет раннего выявления аварийных режимов.

Ключевые слова: проактивное управление, активно-адаптивная сеть, цифровая подстанция, интеллектуальная поддержка принятия решений, гибридная нейронная сеть, цифровой трансформатор, МЭК 61850

Для цитирования: Методы и алгоритмы проактивного управления цифровыми подстанциями в активно-адаптивных электроэнергетических системах / О.В. Логиновский, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский, И.Г. Топольская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2026. Т. 26, № 2. С. 54–63. DOI: 10.14529/ctcr260205

Original article

DOI: 10.14529/ctcr260205

METHODS AND ALGORITHMS FOR PROACTIVE CONTROL OF DIGITAL SUBSTATION IN ACTIVE-ADAPTIVE ELECTRIC POWER SYSTEMS

O.V. Loginovskiy, loginovskiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

D.V. Topolskii, topolskiidv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9370-7851>

N.D. Topolskii, topolskiind@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0522-1748>

I.G. Topolskaia, topolskaiaig@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3314-6623>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The paper considers methods and algorithms for proactive control of energy facilities in active-adaptive electric power systems. Proactive control is presented as an organizational task requiring a new approach to the distribution of decision-making functions. It is shown that digital substations are transformed into active agents of the control system, and digital transformers act as information agents generating data to support decisions at all levels of the hierarchy. **Aim.** Development of methods and algorithms for proactive control that improve the validity and efficiency of dispatch personnel decisions based on predictive analysis of digital transformer data and redistribution of functions between hierarchy levels. **Materials and methods.** The research is based on the theory of organizational systems, the theory of active systems and the theory of information processes and systems. Methods of system analysis, mathematical and simulation modeling, artificial intelligence (hybrid neural network architectures CNN + Bi-GRU with attention), and experimental methods on the Avacha platform were applied. **Results.** A concept of distributed proactive control with the transfer of intelligent support functions to the field level has been developed, reducing response time to 1–2 ms. A decision support method based on a neural network architecture with 96.1% accuracy and 0.8 MFLOPS efficiency is proposed. The principle of function distribution with an asynchronous lock-free synchronization algorithm is substantiated. A methodology for integration into the digital substation infrastructure compatible with IEC 61850 has been developed. Experiments on the Avacha platform confirmed 95.7% accuracy and 1.2 ± 0.3 ms response time. The results are implemented at Chelenergopribor LLC. **Conclusion.** The developed methods implement a new organizational structure for digital substation management corresponding to the strategy of creating intelligent active-adaptive systems and increase the survivability of power systems through early detection of emergency modes.

Keywords: proactive control, active-adaptive network, digital substation, intelligent decision support, hybrid neural network, digital transformer, IEC 61850

For citation: Loginovskiy O.V., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Topolskaia I.G. Methods and algorithms for proactive control of digital substation in active-adaptive electric power systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2026;26(2):54–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr260205

Введение

Цифровая трансформация активно развивает интеллектуальные энергосистемы – неотъемлемый элемент умного производства и качества жизни. В этой связи на цифровизацию энергетики направлены значительные ресурсы и достижения в информационных технологиях, электронике, экономике и управлении [1, 2].

Как отмечает академик Д.А. Новиков, энергетическая политика России нацелена на эффективное использование ресурсов для экономического роста и повышения качества жизни. Решение этих задач требует не экстенсивного наращивания мощностей, а модернизации технологий управления – перехода к интеллектуальной энергетике [3]. Ключевая черта новой энергетики – повышение гибкости управления и способности адаптироваться к изменению внешних условий, что отражено в концепции «интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью» [4].

Гибкость обеспечивается новым взглядом на информацию и управление. Меняется не только объем, но и состав информации: проактивное управление основывается на прогнозах потребления и генерации, экономических и финансовых данных [3].

С позиций теории организационных систем [5, 6], совокупность цифровых подстанций образует иерархическую организационную сеть с распределением функций, включением лиц, принимающих решения, и необходимостью координации в условиях временных ограничений.

Основа перехода к интеллектуальным энергосистемам – цифровые подстанции и цифровые измерительные трансформаторы. В новой парадигме подстанция становится активным агентом с функциями мониторинга, анализа и принятия решений [7, 8], а цифровые трансформаторы – информационными агентами, формирующими потоки данных в стандарте МЭК 61850-9-2 для управленческих решений [9, 10].

Однако существующая практика базируется на реактивной модели, где управляющее воздействие следует за аварией. Временной лаг между первыми признаками аварии и ее идентификацией часто достаточен для развития тяжелой системной аварии из-за высокой динамики процессов и ограничений человека при восприятии больших объемов информации.

Переход к проактивному управлению становится организационной необходимостью: способность заблаговременно идентифицировать признаки аварии и предоставить лицу, принимающему решение, верифицированный прогноз – ключевой фактор повышения живучести организационной сети. Возникает научная задача разработки методов интеллектуальной поддержки принятия решений, трансформирующих данные цифровых трансформаторов в прогнозные оценки состояний объекта.

На рис. 1 представлено сравнение вариантов организации управления цифровой подстанцией. Традиционная централизованная архитектура управления приводит к задержкам до 10–15 мс. В предлагаемой архитектуре устройство объединения становится активным интеллектуальным агентом, способным выполнять проактивный анализ локально и инициировать воздействия, сокращая время реакции до 1–2 мс.



Рис. 1. Сравнение вариантов организации управления цифровой подстанцией
Fig. 1. Comparison of options for organizing digital substation control

Цифровые трансформаторы создают информационную основу для проактивного управления (рис. 2). Аппаратной основой оконечного блока выбрана отечественная платформа «Авача» (рис. 3) с поддержкой МЭК 61850, аппаратным ускорителем и синхронизацией Precision Time Protocol (PTP) в соответствии со стандартом IEEE 1588.

Цель исследования – разработка методов и алгоритмов проактивного управления энергообъектами в активно-адаптивных электроэнергетических системах, обеспечивающих интеллектуальную поддержку обоснованности и оперативности принятия решений диспетчерским персоналом на основе прогнозного анализа данных цифровых трансформаторов.

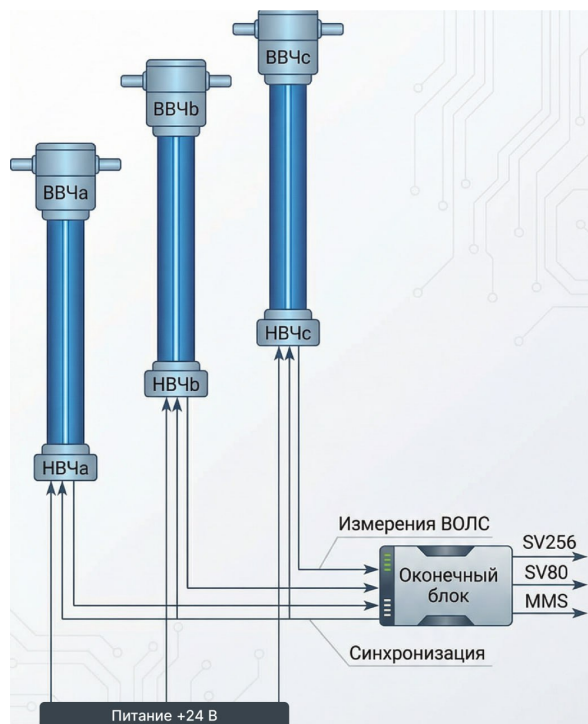


Рис. 2. Функциональная схема измерительной системы на основе цифрового трехфазного трансформатора
Fig. 2. Functional diagram of the measuring system based on a digital three-phase transformer



Рис. 3. Плата обработки цифровых сигналов «Авача»
Fig. 3. Digital signal processing board “Avacha”

1. Постановка задач

Анализ современного состояния исследований в области интеллектуальных энергосистем и теории активных систем позволяет выделить ключевые нерешенные научные проблемы управления цифровыми подстанциями как активными агентами организационной системы [11–15].

Первая проблема – оптимальное распределение полномочий между диспетчерским центром и распределенными агентами. Требуется формализовать, какие функции могут быть делегированы на полевой уровень для повышения быстродействия и живучести системы.

Вторая проблема – координация автономных агентов в условиях неполной информации и потенциального конфликта локальных целей. Необходимы алгоритмы согласованной работы для достижения глобальной цели – устойчивости энергоснабжения [16].

Третья проблема – архитектура систем поддержки принятия решений, встраиваемых в агента. Требуется баланс между точностью прогноза, интерпретируемостью, вычислительной сложностью и устойчивостью при ограничениях реального времени [17, 18].

Четвертая проблема – обеспечение устойчивости и безопасности распределенной системы: защита от сбоев, кибератак и ошибочных решений на основе применения искусственного интеллекта (ИИ), включая механизмы доверия и резервирования, совместимые с МЭК 61850 [19, 20].

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать концепцию распределенного проактивного противоаварийного управления цифровой подстанцией.
2. Предложить метод интеллектуальной поддержки решений на основе гибридной нейросетевой архитектуры.
3. Обосновать принцип распределения функций с асинхронным алгоритмом lock-free синхронизации.
4. Разработать методику обучения нейросетевой модели для проактивного анализа.
5. Создать методологию интеграции в инфраструктуру цифровых подстанций, совместимую с МЭК 61850.
6. Экспериментально подтвердить работоспособность алгоритмов проактивного управления на платформе «Авача».

2. Концепция распределенного проактивного управления цифровыми подстанциями

Классическая энергосистема представляет собой централизованную иерархическую структуру с реактивной моделью управления, характеризующуюся инерционностью, низкой адаптивностью и уязвимостью к каскадным авариям [3, 5, 21]. В рамках концепции активно-адаптивных сетей предлагается архитектура распределенного проактивного управления, основанная на перераспределении функций анализа и принятия решений между уровнями иерархии. Ключевой элемент – трансформация цифровой подстанции в активного агента с функциями автономного мониторинга, анализа и принятия решений [7, 8, 11].

В традиционной архитектуре (рис. 4) данные последовательно передаются через устройство объединения в шину процесса к централизованным устройствам РЗА, что приводит к задержкам 10–15 мс [1].

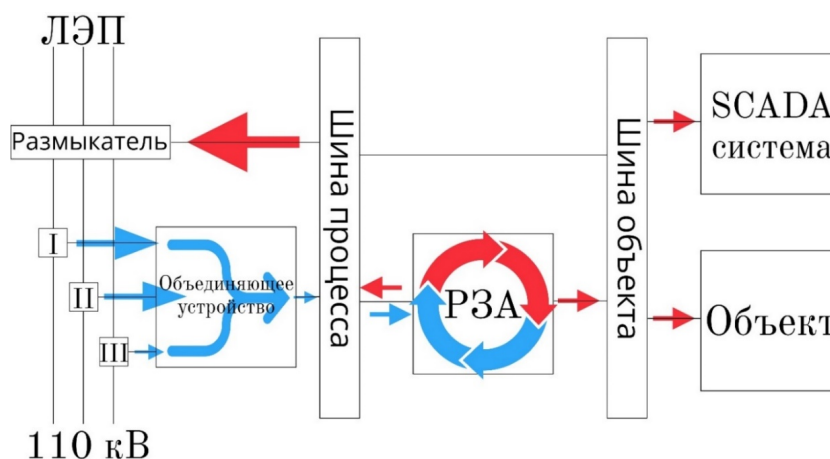


Рис. 4. Схема движения данных при аварийной ситуации в традиционной архитектуре цифровой подстанции

Fig. 4. Data flow diagram in an emergency situation in the traditional architecture of digital substation

В предлагаемой архитектуре устройство объединения становится активным интеллектуальным агентом, выполняющим проактивный анализ локально и инициирующим управляющие воздействия (рис. 5). Сохраняется обратная совместимость: устройство продолжает передавать SV-пакеты в шину процесса для традиционных РЗА, создавая резервный канал защиты [22].

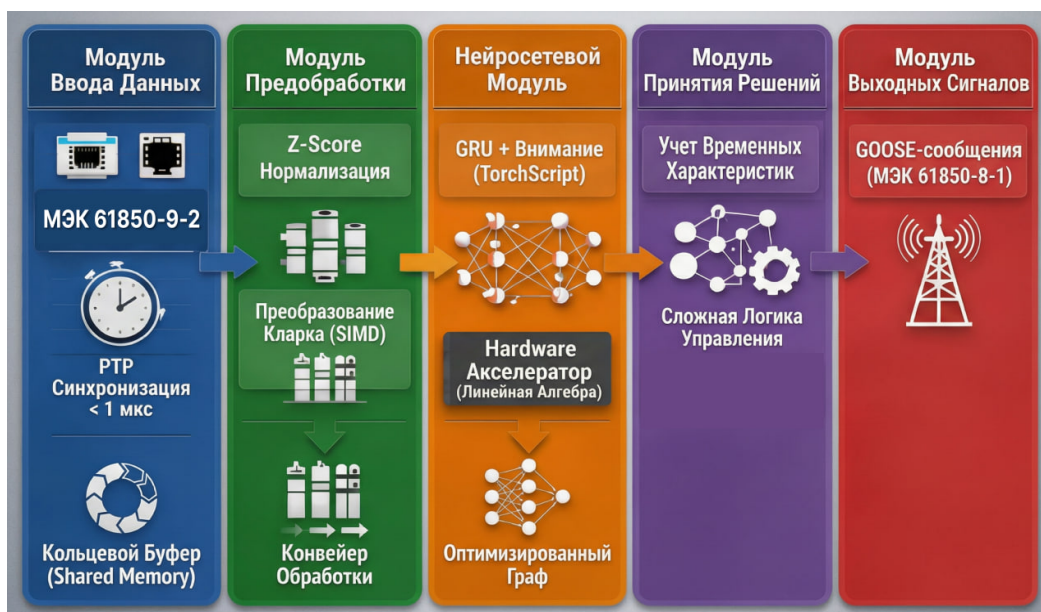


Рис. 5. Модульная архитектура программного комплекса интеллектуального устройства объединения
Fig. 5. Modular architecture of the software complex of the intelligent merging unit

Ключевые принципы концепции:

- децентрализация обработки данных на месте их генерации;
- распределенная архитектура принятия решений с автономными узлами;
- сохранение резервирования традиционных систем РЗА;
- интеграция нейросетевых моделей для прогнозирования аварийных режимов.

Техническая реализация предполагает оснащение устройства объединения вычислительными модулями для машинного обучения. Оценка эффективности показывает сокращение времени реакции до 1–2 мс за счет исключения промежуточных этапов передачи данных и организации локального контура принятия решений. Дополнительное преимущество – повышение отказоустойчивости: каждый модуль работает автономно, обеспечивая локальную защиту при отказах других компонентов.

3. Метод интеллектуальной поддержки принятия решений на основе гибридной нейросетевой архитектуры

Для реализации проактивного управления необходим аналитический инструментарий, способный выявлять сложные зависимости в высокочастотных потоках данных от цифровых трансформаторов [17, 18]. Традиционные методы требуют ручного конструирования признаков и недостаточно адаптивны [23]. В таблице представлен сравнительный анализ архитектур нейронных сетей для проактивного анализа.

Сравнительный анализ архитектур нейронных сетей для проактивного анализа
Comparative analysis of neural network architectures for proactive analysis

Архитектура сети	Точность (F1-score), %	Время вывода, мс	Потребление памяти, МБ	Поддержка временных зависимостей	Способность к выделению локальных паттернов	Пригодность для встраивания
CNN (только сверточные слои)	89,2 ± 1,5	0,4	0,3	Низкая	Высокая	Высокая
LSTM (однонаправленная)	92,8 ± 0,9	1,8	1,1	Высокая	Низкая	Средняя
GRU (однонаправленная)	93,1 ± 0,8	1,5	0,9	Высокая	Низкая	Средняя
Bi-LSTM (двунаправленная)	94,5 ± 0,7	2,3	1,8	Очень высокая	Низкая	Низкая
Bi-GRU (двунаправленная)	94,8 ± 0,6	1,9	1,4	Очень высокая	Низкая	Средняя
CNN + LSTM	95,2 ± 0,5	2,1	1,6	Высокая	Высокая	Средняя
CNN + Bi-GRU с вниманием	96,1 ± 0,4	1,7	1,2	Очень высокая	Высокая	Высокая

Задача формализована как многоклассовая классификация многомерных временных рядов. Пространство входных сигналов: $X \subseteq R^{T \times F}$, где T – длина временной последовательности (1000 отсчетов, что соответствует 100 мс при частоте дискретизации 10 кГц), $F = 6$ – количество измерительных каналов (три фазы тока и три фазы напряжения) [9].

Множество классов включает нормальный режим и 16 типов аварий. Ограничение времени реакции $\tau_{max} = 2$ мс формализовано как

$$\tau_{inf}(f_{\theta}) + \tau_{comm} \leq \tau_{max},$$

что требует алгоритмов с гарантированным временем выполнения [10].

На основе сравнительного анализа (см. таблицу) обоснован выбор гибридной архитектуры CNN + Bi-GRU с механизмом внимания, обеспечивающей оптимальный баланс точности (96,1 % F1-score) и вычислительной эффективности (0,8 MFLOPS).

Сверточные слои выделяют локальные паттерны, двунаправленные GRU анализируют временные зависимости в прямом и обратном направлениях, механизм внимания фокусируется на информативных участках сигнала.

Для преодоления дефицита реальных данных об авариях разработан генератор синтетических

данных на основе физического моделирования 17 типов режимов с вариацией ключевых параметров [8, 24]. Предобработка включает z-score нормализацию, разбиение на окна и аугментацию.

Для физической осмысленности решений в функцию потерь введен регуляризационный член, штрафующий нарушения законов электротехники: $\sum_{k \in \{A, B, C\}} i_k(t) \approx 0$. Обучение оптимизировано с использованием модифицированной функции потерь, AdamW и стратегии постепенного размораживания слоев [25].

После обучения модель экспортируется в TorchScript с квантованием до 8 бит и прунингом, что сокращает объем до 450 КБ [26]. Результирующая модель обеспечивает точность 96,1 % при эффективности 0,8 MFLOPS, позволяя реализацию на встраиваемых платформах.

Выводы

Разработаны методы и алгоритмы проактивного управления энергообъектами в активно-адаптивных системах, обеспечивающие интеллектуальную поддержку решений диспетчерского персонала [3, 5].

Разработана концепция распределенного проактивного управления с переносом функций поддержки на полевой уровень. Децентрализация [7, 21] сокращает время реакции до 1–2 мс [10].

Предложен метод поддержки решений на основе CNN + Vi-GRU с вниманием, трансформирующий данные в прогнозные оценки с точностью 96,1 % при эффективности 0,8 MFLOPS. Сравнительный анализ [17, 18, 23] подтвердил преимущества подхода.

Обоснован принцип распределения функций с асинхронным алгоритмом lock-free синхронизации, обеспечивающий обработку до 50 000 выборок/с с задержкой менее 800 мкс [9].

Разработана методология интеграции в инфраструктуру цифровых подстанций, совместимая с МЭК 61850 и регламентами, обеспечивающая поэтапное внедрение без остановки процессов [8].

Создана методика генерации синтетических данных для 17 типов аварий [24]. Квантование и прунинг сократили объем модели до 450 КБ при точности 95,9 % и времени вывода менее 0,8 мс [25, 26].

Экспериментально подтверждена работоспособность на платформе «Авача»: точность 95,7 %, время реакции $1,2 \pm 0,3$ мс. Результаты внедрены в ООО «Челэнергоприбор».

Разработанные методы реализуют новую организационную структуру управления, соответствующую стратегии создания интеллектуальных активно-адаптивных систем [1, 3], и повышают живучесть энергосистем за счет раннего выявления аварийных режимов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на развитие методов адаптивного обучения нейросетевых моделей в процессе эксплуатации, расширение номенклатуры диагностируемых аварийных режимов, а также на создание унифицированных программно-аппаратных решений для масштабирования системы на подстанции более высоких классов напряжения и интеграцию с перспективными стандартами МЭК 61850 второго поколения.

Список литературы

1. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н.И. Воропай, М.В. Губко, С.П. Ковалев и др. // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2–14. DOI: 10.25728/ru.2019.1.1
2. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 9–27.
3. Новиков Д.А. Современная теория управления: тренды и новые вызовы // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности. 2020. № 1 (3). С. 61–70. DOI: 10.20948/future-2020-5
4. Шаповалова Е.Ю. Организация интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью // Экономика и социум. 2019. № 1-2 (56). С. 136–139.
5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. 128 с.
6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСУ, 2005. 584 с.
7. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др. М.: Инфра-М, 2020. 450 с. DOI: 10/12737/1087996
8. Topolsky N., Topolsky D., Topolskaya I. Structure Optimization of the Software and Hardware Complex for Electricity Metering // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, Russian Federation, 2022. P. 234–238. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906631

9. Топольский Д.В., Топольский Н.Д., Юмагулов Н.И. Разработка технических решений для создания электронного оборудования информационного взаимодействия цифровых электрических подстанций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024. № 6. С. 18–23.
10. Разработка программного комплекса для испытания цифровых измерительных трансформаторов на вибростенде / О.В. Логиновский, Г.И. Волович, Д.В. Топольский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 19–31. DOI: 10.14529/ctcr240102
11. Leitão P., Mařík V., Vrba P. Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9, no. 4. P. 2360–2372. DOI: 10.1109/TII.2012.2222034
12. Marik V., McFarlane D. Industrial adoption of agent-based technologies // IEEE Intelligent Systems. 2005. Vol. 20, no. 1. P. 27–35. DOI: 10.1109/MIS.2005.11
13. Monostori L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges // Procedia CIRP. 2014. Vol. 17. P. 9–13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115
14. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
15. Zhang Y., Zhu Z., Lv J. CPS-Based Smart Control Model for Shopfloor Material Handling // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 14, no. 4. P. 1764–1775. DOI: 10.1109/TII.2017.2759319
16. A SOA-based architecture for empowering future collaborative cloud-based industrial automation / S. Karnouskos, A.W. Colombo, T. Bangemann et al. // IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada, 2012. P. 5766–5772. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389042
17. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
18. Learning Phrase Representations using RNN Encoder–Decoder for Statistical Machine Translation / K. Cho, B. van Merriënboer, C. Gulcehre et al. // arXiv preprint: arXiv:1406.1078. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1406.1078
19. Оптимизация системы управления программно-аппаратного комплекса для учета электроэнергии / Г.И. Волович, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский, А.А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 4. С. 57–65. DOI: 10.14529/ctcr230406
20. Information security ensuring in industrial networks on digital substations / Y.G. Plaksina, N.D. Topolskiy, I.G. Topolskaya et al. // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia, 2018. P. 8570074. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570074
21. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. М.: ИПУ РАН, 2003. 102 с.
22. Гречухин В.Н. Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2006. № 4. С. 35–42.
23. Wang Z., Yan W., Oates T. Time Series Classification from Scratch with Deep Neural Networks: A Strong Baseline // 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Anchorage, AK, USA, 2017. P. 1578–1585. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966039
24. Гречухин В.Н., Лебедев В.Д. Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № SD. С. 98–99.
25. Han S., Mao H., Dally W.J. Deep Compression: Compressing Deep Neural Networks with Pruning, Trained Quantization and Huffman Coding // International Conference on Learning Representations (ICLR). 2016.
26. Jacob B., Kligys S., Chen B. et al. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT, USA, 2018. P. 2704–2713. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00286

References

1. Voropai N.I., Gubko M.V., Kovalev S.P. et al. [Problems of development of digital energy in Russia]. *Control Sciences*. 2019;(1):2–14. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2019.1.1
2. Loskutov A.B. Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies. *Smart Electrical Engineering*. 2018;(1):9–27. (In Russ.)
3. Novikov D.A. Modern management theory: Trends and new challenges. *Futurity Designing. Digital Reality Problems*. 2020;1(3):61–70. (In Russ.) DOI: 10.20948/future-2020-5
4. Shapovalova E.Yu. Organization of intellectual electric power system with active adaptive network. *Economy and Society*. 2019;1-2(56):136–139. (In Russ.)
5. Burkov V.N., Novikov D.A. *Teoriya aktivnykh sistem: sostoyanie i perspektivy* [Theory of Active Systems: State and Prospects]. Moscow: Sinteg, 1999. 128 p. (In Russ.)
6. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow: MPSU, 2005. 584 p. (In Russ.)
7. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *The effective management of organizational and production structures. Monograph*. Moscow: Infra-M Publ., 2020. 450 p. (In Russ.) DOI: 10.12737/1087996
8. Topolsky N., Topolsky D., Topolskaya I. Structure Optimization of the Software and Hardware Complex for Electricity Metering. In: *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, Russian Federation, 2022. P. 234–238. DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906631
9. Topolsky D.V., Topolsky N.D., Yumagulov N.I. Development of Technical Solutions for Creation of Electronic Equipment Information Interaction of Digital Electrical Substations. *Instruments and Systems. Monitoring, Control and Diagnostics*. 2024;(6):18–23. (In Russ.)
10. Loginovskiy O.V., Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Beliakov A.E. Development of a software package for testing digital instrument transformers on a vibration stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):19–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240102
11. Leitão P., Mařík V., Vrba P. Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013;9(4):2360–2372. DOI: 10.1109/TII.2012.2222034
12. Marik V., McFarlane D. Industrial adoption of agent-based technologies. *IEEE Intelligent Systems*. 2005;20(1):27–35. DOI: 10.1109/MIS.2005.11
13. Monostori L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*. 2014;17:9–13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115
14. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
15. Zhang Y., Zhu Z., Lv J. CPS-Based Smart Control Model for Shopfloor Material Handling. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(4):1764–1775. DOI: 10.1109/TII.2017.2759319
16. Karnouskos S., Colombo A.W., Bangemann T. et al. A SOA-based architecture for empowering future collaborative cloud-based industrial automation. In: *IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, QC, Canada, 2012. P. 5766–5772. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389042
17. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997;9(8):1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
18. Cho K., van Merriënboer B., Gulcehre C. et al. Learning Phrase Representations using RNN Encoder–Decoder for Statistical Machine Translation. *arXiv preprint: arXiv:1406.1078*. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1406.1078
19. Volovich G.I., Topolskii D.V., Topolskii N.D., Maksimov A.A. Optimization of the control system of a software and hardware complex for electricity accounting. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(4):57–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230406
20. Plaksina Y.G., Topolskiy N.D., Topolskaya I.G. et al. Information security ensuring in industrial networks on digital substations. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. Chelyabinsk, Russia, 2018. P. 8570074. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570074

21. Novikov D.A. *Setevye struktury i organizatsionnye sistemy* [Network Structures and Organizational Systems]. Moscow: Institute of Control Sciences RAS, 2003. 102 p. (In Russ.)
22. Grechukhin V.N. Electron current and potential transformers. Their state, development perspective and introduction on OPY 110–750 kilovolt stations and sub-stations of power network. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2006;(4):35–42. (In Russ.)
23. Wang Z., Yan W., Oates T. Time Series Classification from Scratch with Deep Neural Networks: A Strong Baseline. In: *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. Anchorage, AK, USA, 2017. P. 1578–1585. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966039
24. Grechukhin V.N., Lebedev V.D. [Digital Combined Current and Voltage Transformer Based on a Standard Voltage Transformer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2010;SD:98–99. (In Russ.)
25. Han S., Mao H., Dally W.J. Deep Compression: Compressing Deep Neural Networks with Pruning, Trained Quantization and Huffman Coding. In: *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2016.
26. Jacob B., Kligys S., Chen B. et al. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference. In: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City, UT, USA, 2018. P. 2704–2713. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00286

Информация об авторах

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Топольский Дмитрий Валерианович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiidv@susu.ru.

Топольский Никита Дмитриевич, преподаватель кафедры электронных вычислительных машин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskiind@susu.ru.

Топольская Ирина Геннадьевна, старший преподаватель кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; topolskaiaig@susu.ru.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Dmitrii V. Topolskii, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiidv@susu.ru.

Nikita D. Topolskii, Lecturer of the Department of Electronic Computing Machines, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskiind@susu.ru.

Irina G. Topolskaia, Senior Lecturer of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; topolskaiaig@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025

The article was submitted 30.10.2025