

УДК 621.313

Зеленькевич А.И., к.т.н., доцент,
Селицкая О.Ю., ст. преподаватель, Таль А.Л., студент,
Андросик А.А., студент
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Существующие системы регулирования напряжения, основанные на детерминированных алгоритмах, зачастую не справляются с быстрыми и сложными вариациями нагрузок в реальном времени. В этом контексте искусственный интеллект (далее – ИИ) предлагает принципиально новые возможности за счет способности анализировать большие объемы данных, выявлять сложные нелинейные зависимости и вырабатывать оптимизационные решения в условиях неопределенности [1].

На основе анализа современных тенденций и технологических разработок в области электроэнергетики и ИИ, можно предположить алгоритм развития систем управления качеством напряжения в сетях напряжением 0,4 кВ на ближайшие три года (2025–2027 годы).

Ожидается, что в прогнозируемый период доминирующим подходом станет использование гибридных интеллектуальных систем, комбинирующих различные методы ИИ. Значительный потенциал демонстрируют модели машинного обучения, в частности, методы глубокого обучения, такие как «долгая краткосрочная память» (*LSTM*), которые эффективны для прогнозирования временных рядов [2] и способны с высокой точностью предсказывать динамику потребления, учитывая суточные, недельные и сезонные колебания напряжения, а также случайные всплески активности, что крайне важно для компенсации несинусоидальности напряжения.

Ключевыми технологическими направлениями развития на период 2025–2027 годов являются:

- адаптивное управление компенсирующими устройствами на основе предиктивной аналитики, позволяющей предположить, что

внедрение ИИ позволит перейти от реактивного к опережающему управлению устройствами компенсации реактивной мощности и фильтрами высших гармоник. Вместо реакции на уже произошедшие отклонения, системы на основе машинного обучения будут прогнозировать возникновение несимметрии и несинусоидальности на несколько шагов вперед, *pre-emptively*, корректируя работу силовой электроники (напр-р, активные фильтры, статические тиристорные компенсаторы). Это позволит не только устранять нарушения, но и активно предотвращать их, поддерживая форму кривой напряжения в пределах, регламентированных стандартами IEEE 519 или ГОСТ 32144-2013;

- создание цифровых двойников распределительных сетей 0,4 кВ – виртуальных динамических моделей конкретных участков сети, на которых можно будет без риска для реального оборудования тестировать различные сценарии управления, включая экстремальные режимы работы, и обучать нейросетевые регуляторы, а в реальном времени моделировать последствия подключения новой мощной нелинейной нагрузки (напр-р, зарядной станции постоянного тока) и предлагать оптимальные точки для подключения и настройки компенсирующих устройств. Подобные проекты уже анонсируются крупными компаниями, такими как *Siemens Energy* и *General Electric* [3,4];

- децентрализованное интеллектуальное управление в условиях распределенной генерации (*DER*), которая вносит дополнительную нестабильность в сеть 0,4 кВ. Здесь ИИ является ключевым инструментом для координации работы множества мелких генераторов и накопителей. Целью является поддержание качества напряжения в узле подключения путем генерации или потребления реактивной мощности в нужные моменты времени. Это позволит использовать парк бытовых инверторов в качестве распределенной системы компенсации, значительно повысив устойчивость сети к несимметрии;

- интеграция с платформами интернета вещей (*IoT*) и *edge*-вычислениями для непосредственного подключения к устройствам контроля и управления (*edge computing*) для повышения эффективности обработки всего массива данных на централизованных серверах.

Согласно отчетам, рынок ИИ в энергетике и электроэнергетике демонстрирует устойчивый рост с *CAGR* 24,54% и, как ожидается, достигнет 17,745 млрд. долларов США к 2029 году. Учитывая текущую динамику, к 2027 году можно ожидать, что технологии ИИ

для мониторинга и управления качеством электроэнергии перейдут из стадии пилотных проектов в стадию коммерчески доступных и массово внедряемых решений.

В нормативной сфере вероятно появление новых стандартов и рекомендаций, разработанных с учетом возможностей интеллектуальных систем. Международные организации, такие как *IEEE* и *CIGRE*, могут инициировать рабочие группы по созданию руководящих документов по применению ИИ для компенсации несимметрии и высших гармоник.

Но, несмотря на оптимистичный прогноз, такое развитие столкнется с рядом проблем, к которым можно отнести: сложность интерпретации решений, принимаемых глубокими нейронными сетями, которые могут вызывать недоверие у персонала и затруднить сертификацию систем безопасности; недостаточный уровень кибербезопасности; дефицит квалифицированных кадров, способных разрабатывать, внедрять и обслуживать гибридные системы на стыке энергетики и *data science*.

Преодоление этих барьеров потребует тесного сотрудничества между научным сообществом, индустрией и регуляторами.

Список использованной литературы

1. Итоги X Международной научно-технической конференции «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей» 1–3 июля 2025 года. Москва – URL: <https://storage.yandexcloud.net/eepr/uploads/2025/09/Itoqi-konferencii-Razvitie-i-povyshenie-nadezhnosti-setei-2025.pdf> (дата обращения: 19.10.2025).
2. Sun, F.; Meng, X.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Jiang, H.; Liu, P. Agricultural Product Price Forecasting Methods: A Review. *Agriculture* 2023, 13, 1671. – URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture13091671> (date of access: 15.10.2025).
3. Artificial Intelligence (AI) in Energy and Power Market - Forecasts from 2024 to 2029 – URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5794099/artificial-intelligence-ai-in-energy-power> (date of access: 15.10.2025).
4. North America High-Voltage Power Transformer Market Size– URL: <https://www.gminsights.com/zh/industry-analysis/north-america-high-voltage-power-transformer-market> (date of access: 15.10.2025).
5. Artificial Intelligence (AI) in Hardware Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034 – URL: <https://www.precedenceresearch.com/artificial-intelligence-in-hardware-market> (date of access: 15.10.2025).