

УДК 621.3

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШ-
ЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
PERSPECTIVE SYSTEMS OF POWER SUPPLY OF INDUSTRIAL ENDUS-
TRIAL ENTERPRISES**

Е. И. Кашкевич, Н.Д. Шибeko

Научный руководитель – С. В. Константинова, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

E. Kashkevich, N. Shibeko

Supervisor – S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе исследуются современные подходы к организации электроснабжения промышленных предприятий в условиях растущего спроса на электрическую энергию и экологических проблем. Рассмотрены ключевые технологии в области электроснабжения: умные сети (Smart Grid), микросети, гибридные системы с интеграцией возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителей. Проанализированы экономические, технические и экологические аспекты их внедрения в уже существующие системы, а также препятствия и перспективы развития. На основе анализа предложены рекомендации для промышленных потребителей.

Abstract: The paper studies modern approaches to the organisation of power supply to industrial enterprises in the context of growing demand for electricity and environmental problems. The paper considers key technologies in the field of power supply: Smart Grid, microgrids, hybrid systems with the integration of renewable energy sources (RES) and storage. The economic, technical and environmental aspects of their implementation in existing systems, as well as obstacles and development prospects are analysed. Based on the analysis, recommendations for industrial consumers are proposed.

Ключевые слова: электроснабжение, возобновляемые источники энергии, микросети, цифровизация, системы накопления энергии.

Keywords: electricity supply, renewable energy sources, micro grids, digitalization, energy storage systems.

Введение

Промышленные предприятия — крупнейшие потребители электроэнергии (до 40% мирового энергопотребления). Традиционные централизованные сети не справляются с требованиями устойчивости, энергоэффективности и гибкости. Рост тарифов, ужесточение экологических норм (Парижское соглашение), потери электрической энергии на больших расстояниях и риски перебоев стимулируют переход к инновационным системам.

Основная часть

1. Основные проблемы современных систем электроснабжения:

1.1) Старение инфраструктуры. В большинстве стран энергосистемы (линии электропередач, подстанции, трансформаторы) технологически устарели, и

потеряли свою актуальность, что повышает риски аварий и потерь энергии. К примеру, в странах СНГ значительная часть сетей построена в середине XX века и не рассчитана на современные нагрузки.

1.2) Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Из-за зависимости от погодных факторов солнечные и ветровые электростанции создают нестабильность в сетях, что приводит к сбоям в подаче электроэнергии, авариям или угрозе коллапса системе.

1.3) Изменение климата и экстремальные явления. Уязвимость энергетической инфраструктуры к климатическим изменениям и природным катаклизмам, что может привести к массовым отключениям. К примеру, события в Гомельской области РБ в 2024 году, где стихия нанесла серьезный ущерб энергетической инфраструктуре региона.

1.4) Рост спроса на электромобили. Массовый переход населения развитых стран на использование электромобилей требует модернизации сетей для пиковых нагрузок (рисунок 1). К примеру, в США к 2030 году прогнозируют увеличение спроса на электроэнергию на 25% из-за увеличения количества электро транспорта. А в РБ к 2025 году число электромобилей увеличилось в 2 раза по сравнению с 2022 годом.

АВТОМОБИЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ БАА

БЕЛАРУСЬ: РОСТ ПАРКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

- 10-кратный рост парка электромобилей
- При сохранении текущих условий рост парка в ближайшие годы **до 100 000 авто**

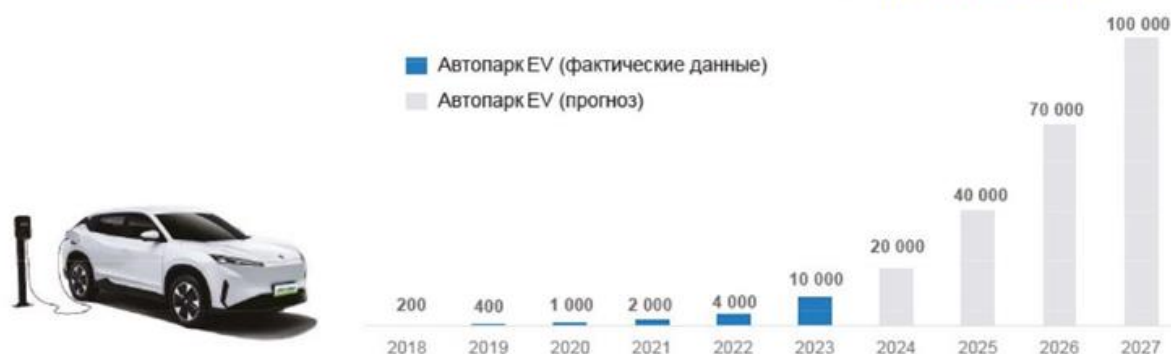


Рисунок 1 – Тенденция роста парка электромобилей в РБ

1.5) Декарбонизация и отказ от ископаемого топлива

Замена угольных и газовых электростанций требует огромных инвестиций в строительстве новой инфраструктуры и переобучения кадров.

2. Оценка роли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и систем накопления энергии (СНЭ).

Роль возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и систем накопления энергии (СНЭ) в современном мире энергетики крайне значима. Их внедрение трансформирует глобальную энергетику, экономику и экологию. Вот ключевые аспекты их влияния [1, 2, 3]:

2.1) Декарбонизация и борьба с изменением климата

- ВИЭ (солнечная, ветровая, гидро-, геотермальная энергия, биомасса) заменяют ископаемое топливо, сокращая выбросы CO₂. Например, по данным Международного Энергетического Агентства (МЭА), в перспективе ВИЭ могут стать крупнейшим источником электроэнергии, обогнав уголь.

- Системы накопления энергии (литий-ионные батареи, гидроаккумулирующие станции, водородные системы) решают проблему нестабильного генерирования ВИЭ, накапливая избыток энергии для использования в периоды низкой генерации (ночь, безветрие).

2.2) Энергетическая безопасность и независимость

- Повышение эффективности источников: ВИЭ снижают зависимость от импорта ископаемого топлива, что особенно важно для стран с дефицитом энергетических ресурсов.

- Децентрализация: Солнечные панели и домашние СНЭ позволяют создавать локальные микросети, повышая устойчивость систем электроснабжения к авариям и кризисам.

2.3) Технологический прогресс и экономика

- Снижение стоимости: Цена солнечных панелей упала на 80% за последнее десятилетие, а литий-ионных батарей — на 90%. Это делает ВИЭ и СНЭ более конкурентоспособными.

- Создание рабочих мест: ВИЭ обеспечивает рабочие места 13,7 млн человек в мире. Лидеры — Китай, ЕС, США.

- Инновации: Развитие новых технологий накопления (твердотельные батареи, гравитационные системы).

2.4) Социальные и экологические вызовы

- Землепользование: Ветряные и солнечные фермы, а также ГЭС требуют больших площадей, что негативно сказывается на сельском хозяйстве и животном мире.

- Ресурсы для СНЭ: Добыча лития, кобальта и редкоземельных металлов вызывает экологические и этические вопросы.

- Утилизация: Переработка батарей пока недостаточно развита, но некоторые компании (RedwoodMaterials, Northvolt) активно работают над замкнутым циклом переработки.

2.5) Перспективы и проблемы

- Сценарии развития: К 2050 году ВИЭ могут покрывать 60-85% мирового спроса на электроэнергию (МЭА), но для этого требуется:

- Инвестиции в ВИЭ и СНЭ (до \$1.3 трлн в год).

- Гибкое регулирование и поддержка государств (налоговые льготы, льготные тарифы).

- Региональные различия: В ЕС и Китае внедрение ВИЭ идёт быстро, в развивающихся странах — медленнее из-за высокой стоимости инфраструктуры и отсутствия инвестиций. В РБ доля ВИЭ в энергетическом балансе электрической энергии составляет лишь 1.5% (рисунок 2).

Рост установленной мощности ВИЭ

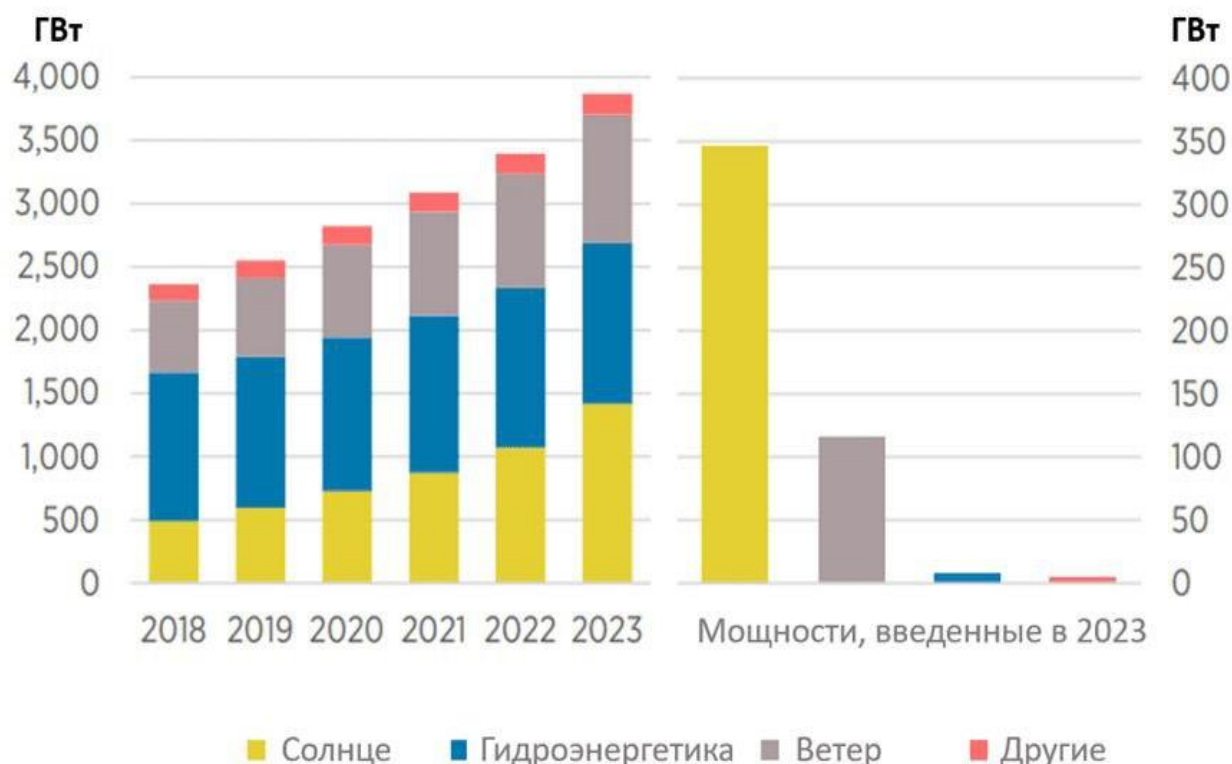


Рисунок 2 – Рост установленной мощности ВИЭ в мире

ВИЭ и СНЭ — основа энергетики будущего, но их успех зависит от системного подхода: интеграции с традиционной энергетикой, развития smart-сетей и международного сотрудничества. Без накопителей возобновляемая энергия останется дополнением, а с ними — станет основой безуглеродного мира.

3. Изучение влияния цифровизации на управление энергопотоками.

Изучение влияния цифровизации на управление энергопотоками охватывает множество аспектов, связанных с внедрением современных технологий в энергетическую отрасль [4].

3.1) Основные технологии цифровизации в энергетике:

- Умные устройства: Датчики и устройства собирают данные о потреблении, генерации и передаче энергии в реальном времени.
- Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение: Оптимизация прогнозирования спроса, балансировка сетей, обнаружение аварий.
- Программы для обработки информации: Анализ больших массивов данных для повышения эффективности управления энергосистемами.
- Цифровые двойники: Моделирование энергосистем для тестирования сценариев и предотвращения сбоев.

3.2) Влияние на управление энергопотоками:

А. Оптимизация генерации и распределения электроэнергии

- Умные сети (Smart Grids): Автоматическое перераспределение энергии, минимизация потерь, интеграция ВИЭ (ветер, солнце).
- Прогнозирование: Точные прогнозы генерации и потребления с учетом погоды, времени суток, поведения пользователей.

- Микросети и децентрализация: Локальные энергосистемы с автономным управлением, снижение зависимости от централизованных сетей.

В. Участие потребителей

- Потребители становятся производителями (солнечные панели, домашние аккумуляторы).

- Динамическое ценообразование: Тарифы меняются в зависимости от нагрузки (например, ночью энергия дешевле).

С. Снижение потерь и повышение надежности

- Мониторинг в реальном времени: Быстрое обнаружение утечек, аварий, несанкционированного доступа.

- Предиктивная аналитика: Предупреждение поломок оборудования до их возникновения.

3.3) Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ):

- Цифровизация позволяет управлять нестабильной генерацией от ВИЭ, балансируя ее с накопителями (батареи, гидроаккумулирующие станции) [5, 6].

- Пример: В Германии цифровые системы автоматически переключают потоки энергии между регионами при изменении ветровой или солнечной активности.

3.4) Примеры внедрения:

- Европа: Проекты умных сетей (Smart Grids) в рамках «Зеленого курса» для достижения декарбонизации.

- Китай: Национальная система мониторинга энергопотребления на основе ИИ.

- США: Использование цифровых двойников для моделирования энергосетей (например, компания GE).

3.5) Сопутствующие проблемы:

- Высокие затраты: Модернизация инфраструктуры требует значительных инвестиций.

- Регуляторные барьеры: Необходимость адаптации законодательства под новые модели.

- Квалификация кадров: Дефицит специалистов в области цифровой энергетики.

3.6) Перспективы:

- Умные города: Полностью автоматизированные и саморегулирующиеся энергосистемы.

- Гибридные системы: Комбинация ВИЭ, водородной энергетики и традиционных источников с цифровым управлением.

Цифровизация кардинально меняет управление энергопотоками, делая его более гибким, эффективным и экологичным. Однако успех зависит от решения технических, финансовых и регуляторных задач. Страны и компании, которые смогут интегрировать инновации, получают преимущество в переходе к устойчивой энергетике будущего. На сегодняшний момент развитие «умных сетей» в Беларуси находится на самом начальном уровне. Мировой опыт в реализации пилотных проектов и многочисленные исследования показывают, что применение интеллектуальных сетей в перспективно и экономически оправдано. На сегодняшний момент Smart Grid системы – это закономерный этап развития электроэнергетики с учетом мировых технических достижений. К этому стоит добавить

и тот факт, что для нашей страны не встанет вопрос о разработке основных концепций, ведь уже сейчас накоплен огромный опыт, который можно перенять и использовать уже установившееся и работающие технологии. Вероятно, внедрение «умных сетей» позволило бы решить проблемы с интеграцией Белорусской АЭС в энергосистему страны.

4. Рекомендации для промышленных предприятий в области энергетики будущего.

Промышленные предприятия играют ключевую роль в современной энергетике. Для минимизации затрат, декарбонизации и повышения конкурентоспособности предприятий рекомендуется:

4.1) Внедрение энергоэффективных технологий:

- Энергоаудит: проведение регулярного анализа энергопотребления для выявления «слабых мест» (устаревшее оборудование, потери в сетях).
- Модернизация оборудования: замена электродвигателей, насосов, систем вентиляции и других видов оборудования на энергоэффективные модели.
- Системы рекуперации: использование тепла от производственных процессов для отопления или генерации электроэнергии.

4.2) Переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ):

- Солнечные панели и ветрогенераторы: установка на территории предприятия для покрытия части энергопотребления.
- Зеленые РРА (Power Purchase Agreements): заключение долгосрочных контрактов на покупку энергии от ВИЭ-станций.
- Водородные технологии: использование «зеленого» водорода для энергоемких процессов (например, в металлургии, химической промышленности).

4.3) Цифровизация энергоменеджмента:

- Умные сети (Smart Grids): внедрение умных датчиков для мониторинга энергопотоков в реальном времени.
- Цифровые двойники: создание виртуальных моделей производственных линий для оптимизации энергозатрат.
- Искусственный интеллект: прогнозирование пиковых нагрузок и автоматическое перераспределение энергии между цехами.

4.4) Системы накопления энергии (СНЭ):

- Промышленные аккумуляторы: накопление избыточной энергии от ВИЭ для использования в периоды высоких тарифов.
- Гидроаккумулирующие системы: для предприятий с доступом к водным ресурсам.
- Тепловые накопители: сохранение избыточного тепла для последующего использования.

4.5) Управление спросом:

- Гибкие тарифы: участие в программах, где энергопотребление корректируется в зависимости от цены (например, работа ночью при низких тарифах) [7].
- Автоматизация процессов: интеграция систем, которые временно отключают неключевое оборудование при пиковых нагрузках на сеть.

4.6) Круговая экономика и устойчивость:

- Переработка отходов в энергию: использование биогаза из органических отходов или тепла от промышленных процессов.

- Декарбонизация: внедрение стандартов ESG (Environmental, Social, Governance) и участие в углеродных рынках.

- Цикл использования оборудования: выбор техники с возможностью ремонта, модернизации и утилизации.

4.7) Обучение и развитие персонала:

- Цифровые компетенции: подготовка специалистов по работе с ИИ, умным оборудованием и системами управления энергопотоками.

4.8) Партнерства и регуляторная поддержка:

- Участие в государственных программах: получение субсидий или налоговых льгот за внедрение «зеленых» технологий.

- Объединения с другими предприятиями: совместные проекты по строительству ВИЭ-станций или систем хранения энергии.

4.9) Адаптация к глобальным трендам:

- Декарбонизация: постепенный отказ от ископаемого топлива в пользу ВИЭ и водорода.

- Гибридные энергосистемы: комбинация солнечных панелей, ветрогенераторов и газовых турбин с улавливанием CO₂.

- Участие в международных инициативах: например, в рамках Парижского соглашения.

Промышленные предприятия, внедряющие цифровые технологии, ВИЭ и принципы устойчивости, не только снижают операционные затраты, но и укрепляют свою репутацию на рынке. Ключевыми пунктами для этого являются: энергоаудит и пилотные проекты; интегрирование ИИ и умных систем для оптимизации; активное участие в «зеленой» энергетике через инвестиции и инновации, что позволит оставаться конкурентоспособными в эпоху энергетического перехода.

Заключение

Перспективы электроснабжения промышленных предприятий в условиях глобальной энергетической трансформации связаны с интеграцией инновационных технологий, декарбонизацией и повышением устойчивости энергосистем. Анализ позволяет выделить следующие ключевые направления развития:

- 1) Цифровизация управления энергопотоками;

- 2) Переход на гибридные и возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и системы накопления электроэнергии (СНЭ);

- 3) Устойчивость и ресурсная эффективность;

- 4) Адаптивность инфраструктуры.

Такие проблемы, как высокая стоимость модернизации, дефицит квалифицированных кадров возможно решать с помощью государственных программ поддержки. В долгосрочной перспективе промышленные предприятия, ориентированные на гибкие энергосистемы, цифровые инновации и декарбонизацию, смогут сократить затраты. Успех зависит от системного подхода к управлению ресурсами, своевременной адаптации, стратегий, инвестиций в инфраструктуру и активного взаимодействия с научным сообществом.

Литература

- 1.Альтернативные источники энергии [сайт]. – URL: <https://nsportal.ru/ap/library/nauchno-tekhnicheskoe-tvorchestvo/2018/05/22/proekt-alternativnye-istochniki-energii> (дата обращения:25.03.2025).
- 2.Системы электроснабжения: проблемы, инновации, перспективы [сайт]. – URL: <https://rosbuild-expo.ru/ru/articles/sistemy-elektrosnabzheniya> (дата обращения:27.03.2025).
- 3.Декарбонизация экономики и энергетических систем [сайт]. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/521106-dekarbonizatsiya-ekonomiki-i-energeticheskikh-sistem> (дата обращения:30.03.2025).
4. Дэниел Ергин. В поисках энергии. Ресурсные войны, новые технологии и будущее энергетики. Москва, 2017.-720 с.
5. Альтернативные источники энергии и энергосбережение : практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. — Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2014. 317 с.
6. Тенденции на белорусском и мировом рынках электромобилей: реальность и перспективы [сайт]. – URL: <https://belchemoil.by/news/tehnologii-i-trendy/tendencii-na-belorusskom-i-mirovom-rynkah-elektromobilej-realnost-i-perspektivy> (дата обращения:..30.03.2025).
7. Основные показатели глобального использования возобновляемых источников энергии в 2023 году [сайт]. – URL: <https://eepir.ru/new/osnovnye-pokazateli-globalnogo-ispolzovaniya-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-nbsp-2023-nbsp-godu/> (дата обращения:..02.04.2025).