

## Научная статья

УДК 621.316

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-28-39

Беляевский Роман Владимирович, Овчинников Александр Геннадьевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

\* для корреспонденции: ovag@yandex.ru

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СУШИЛЬНОЙ ГРУППЫ  
КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ****Аннотация.**

Развитие интеллектуальных сетей имеет решающее значение для достижения глобальным сообществом общих целей в области энергетической безопасности, экономического развития и смягчения последствий изменения климата. Интеллектуальные энергосистемы позволяют оптимизировать процедуры реагирования на спрос и энергоэффективность, интегрировать переменные возобновляемые источники энергии и услуги по зарядке электромобилей, одновременно снижая пиковую нагрузку и стабилизируя электроэнергетическую систему. В статье представлен комплексный анализ современных интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid). Представлен всесторонний разбор ключевых концепций, лежащих в основе интеллектуальных электрических сетей, которые сегодня рассматриваются как фундамент для модернизации мировой энергетической инфраструктуры. Рассматриваются теоретические основы и эволюция взглядов на построение энергосистем будущего, где традиционные электрические сети трансформируются в гибкие, адаптивные и саморегулирующиеся комплексы. Особое внимание уделено таким концепциям, как двусторонний поток энергии и информации между потребителями и производителями, самовосстановление и надежность систем, управление спросом и т. д. Анализируются основные принципы функционирования интеллектуальных сетей: автоматизация процессов, распределенная генерация, активное участие потребителей в управлении спросом, а также возможность быстрой адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Изучен зарубежный и отечественный опыт, а также перспективы развития интеллектуальных электрических сетей в России как стратегического направления для обеспечения энергетической безопасности и устойчивого развития страны. Рассмотрены внедренные технологии, достигнутые цели и полученные результаты в различных регионах Российской Федерации и сделан вывод о необходимости разработки эффективных методов повышения эффективности работы электросетевых организаций при внедрении концепции интеллектуальных сетей.

**Информация о статье**

Поступила:

07 апреля 2026 г.

Одобрена после  
рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к печати:

15 июня 2026 г.

**Ключевые слова:**

Smart Grid, интеллектуальная электроэнергетическая система, электроэнергия, сеть, потребление, нагрузка, эффект

**Для цитирования:** Беляевский Р.В., Овчинников А.Г. Анализ состояния развития интеллектуальных электрических сетей // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 3 (185). С. 28-39. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-28-39, EDN: XZEYKW

**Введение**

С конца XIX века электрические сети играют ключевую роль в обеспечении пользователей электроэнергией. Во времена создания этих сетей принципы их работы были довольно простыми: доставлять выработанную электроэнергию в дома, здания и во все места, где в ней была потребность. Основная архитектура электрических сетей создавалась с учетом потребностей крупных, преимущественно углеродных технологий производства энергии [1]. Однако с ростом спроса на электро-

энергию актуализируется вопрос организации более эффективных распределительных систем.

Уже сегодня очевидно, что потребности завтрашних потребителей будут существенным образом отличаться от нынешних, а производство электроэнергии также изменится и будет включать в себя больше переменных и локальных источников генерации. В связи с этим можно отметить, что потребление электроэнергии в эффективной энергетической системе в ближайшие годы будет иметь совершенно иные характеристики, чем те, которые привычны на сегодняшний день. Энергетические

вызовы, с которыми в настоящее время сталкивается современное общество, меняют всю цепочку поставок электроэнергии – от генерации, передачи и распределения до непосредственно потребления. С учетом появления новых энергетических рынков и расширения практики торговли энергоресурсами, а также тенденции к размещению крупных генерирующих мощностей вдали от мест потребления возникает потребность в более гибкой транспортировке электроэнергии [2]. Помимо этого, сетям предстоит интегрировать децентрализованные и возобновляемые источники энергии (наземные/морские ветряные электростанции, фотоэлектрические системы, комбинированные теплоэлектростанции), а также множество мелких поставщиков, и обеспечить электроснабжение растущего числа электромобилей.

Согласно экспертным прогнозам, в ближайшие несколько лет отдельным вызовом станет оптимизация энергопотребления, охватывающая сферы электроэнергии, газа и тепла [3]. Стремление к использованию определенных технологий генерации с более низким уровнем выбросов углерода в сочетании со значительным повышением эффективности на стороне спроса требует от потребителей более активной позиции и более тесного взаимодействия с сетями.

Все эти вызовы и ожидания привели к появлению концепции «интеллектуальных энергетических систем» (Smart Grid), которые получили широкое распространение во всем мире и опираются на передовые технологии для оптимизации эффективности. В рамках данной концепции предполагается объединение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) с электросетями, что позволило им стать «интеллектуальными». Эта идея, включающая «сетевые вычисления», все чаще рассматривается как необходимая для эффективной и надеж-

ной доставки электроэнергии, а также для повышения безопасности [4]. Цифровые технологии, входящие в состав интеллектуальных сетей, включают датчики мощности/тока, системы управления, центры обработки данных и интеллектуальные счетчики. Об актуальности и темпах развития концепции Smart Grid наглядно свидетельствует глобальное развертывание ее ключевых компонентов (см. Рис. 1).

Во многих странах мира предпринимаются значительные целенаправленные усилия по преобразованию устаревших систем распределения электроэнергии в интеллектуальные сети, но этот процесс достаточно сложный и, согласно прогнозам, займет несколько лет, а то и десятилетий. Например, для достижения целей REPowerEU, предусмотренных планом климатической нейтральности, в период с 2020 по 2030 г. потребуется около 584 млрд евро инвестиций в электроэнергетическую инфраструктуру, в частности, в распределительную сеть [5]. С другой стороны, концептуальные представления Smart Grid остаются пока еще неясными и расплывчатыми в отношении технологических и организационных преобразований системы энергоснабжения.

Таким образом, актуальность и научно-практическая значимость рассматриваемых вопросов предопределили выбор темы данной статьи.

Ключевые тенденции, которые способны оказать сильное влияние на развитие интеллектуальных электросетей, описывают в своих трудах Якимович Б. А., Какушина Е. Г., Малюк Е. Г. [6], Minghui Liu, Sasa Yang [7], Яппаров Р. Р. [8].

Проблемы гармонизации нормативных и коммерческих рамок, общих технических стандартов и протоколов, информационных и телекоммуникационных систем, а также условия успешного взаимодействия новых и старых конструкций сетевого

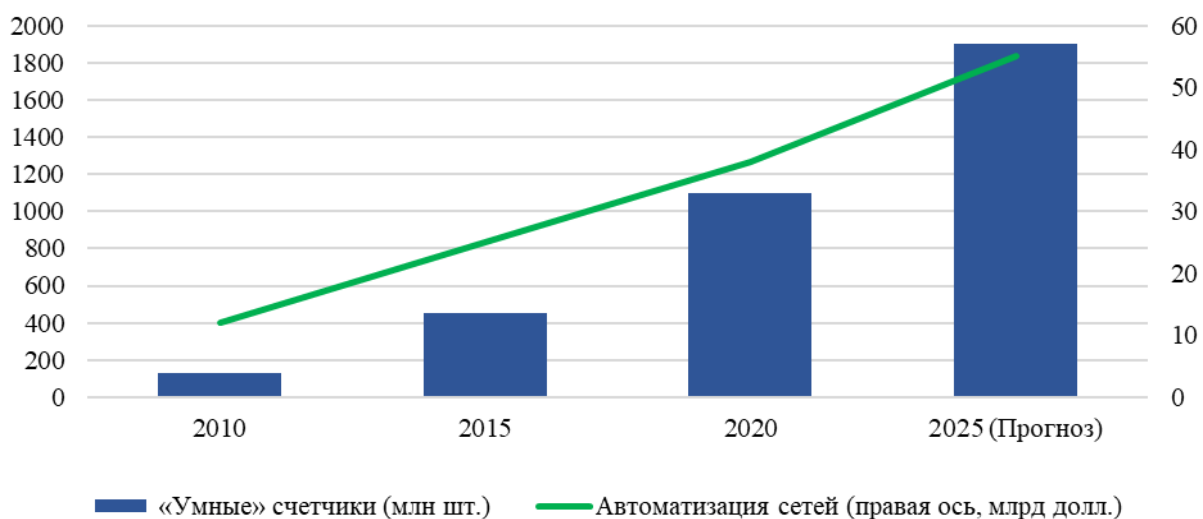


Рис. 1. Глобальное развертывание компонентов Smart Grid  
(составлено по данным Международного энергетического агентства)  
Fig. 1. Global Deployment of Smart Grid Components  
(compiled based on data from the International Energy Agency)

оборудования в процессе развертывания Smart Grid детально рассматривают Иванов А. В., Чайкин В. С. [9], Кравец Е. О. [10], Zhengtang Fu, Xi Lu [11], Rahul Shenoy, Andrew Tudor, Dhruva Nathan [12].

Анализ особенностей организации динамического управления интеллектуальными энергетическими сетями посредством комбинации цифровых систем, что позволяет повысить способность как потребителей, так и коммунальных предприятий отслеживать, контролировать и прогнозировать потребление энергии, входит в круг научных интересов Мухаметгалиева С. И. [13], Тихомирова А. Л., Пирожниковой А. П. [14], Куликова М. М., Индюкова М. А. [15], Sanggeon Yun, Hanning Chen [16].

Широкий спектр исследований и наработок в области Smart Grid является свидетельством набирающих обороты инициатив в области их развития, которые растут как по количеству, так и по масштабам. Число публикаций увеличивается ежегодно, темпы изменений высоки, проводятся непрерывные эксперименты, зачастую демонстрирующие различные результаты. Соответственно, динамизм, активный прогресс в данной сфере предопределяет появление новых вопросов, которые требуют более углубленной проработки. Так, например, отдельного внимания заслуживают ключевые аспекты интеграции интеллектуальных сетей в более широкий контекст умных городов. Кроме

того, в уточнении нуждаются основные элементы инфраструктуры, которая позволяет в режиме реального времени контролировать и управлять доставкой электроэнергии от источников генерации до конечных потребителей.

Таким образом, цель статьи заключается в проведении анализа основных концепций интеллектуальных электрических сетей и рассмотрении особенностей их реализации на практике.

#### Результаты исследования

С технической точки зрения энергетическая система определяется как система, которая преобразует один или несколько потоков энергии в потоки энергии другого вида [17]. Внедрение интеллектуальных решений и инноваций в энергетическую систему в первую очередь рассматривается как серьезное изменение, заключающееся в замене старых технологий новыми. Таким образом, в большинстве публикаций можно встретить точку зрения, согласно которой интеллектуальная сеть – это общий термин, охватывающий модернизацию как магистральных, так и распределительных сетей. Другими словами, концепция интеллектуальной сети заключается в «цифровом обновлении» систем распределения и передачи энергии на большие расстояния с целью оптимизации текущих операций за счет сокращения потерь, а также открытия новых рынков для производства альтернативной энергии [18].

Интеллектуальная энергосистема использует

Таблица 1. Сравнительный анализ операционной эффективности традиционных и интеллектуальных электрических сетей  
Table 1. Comparative analysis of the operational efficiency of traditional and smart grids

Параметр/характеристика	Традиционная электрическая сеть	Интеллектуальная электрическая сеть	Эффективность
Надежность (индексы SAIDI/SAIFI)	Средняя длительность отключений (SAIDI) – 100-200 минут в год на абонента. Частота отключений (SAIFI) – ~1-1,5 инцидента в год	Автоматическое обнаружение и изоляция повреждений сокращают SAIDI до <60 минут. SAIFI снижается до <0,7	Снижение длительности отключений на 40-70%. Уменьшение частоты инцидентов на 30-50%.
Эффективность передачи	Технические и коммерческие потери при передаче и распределении составляют 6-10% от всей выработанной энергии	Оптимизация потоков мощности и точный учет снижают потери до 3-5%	Сокращение потерь на 2-5%, что эквивалентно экономии миллиардов кВт·ч в национальном масштабе
Интеграция возобновляемых источников (ВИЭ)	Предельная доля нестабильных ВИЭ (солнце, ветер) без угрозы для надежности сети составляет ~15-20%	Системы управления и накопления энергии позволяют безопасно интегрировать до 40-50% ВИЭ и более	Увеличение пропускной способности для ВИЭ в 2-3 раза, что является ключевым фактором для декарбонизации
Управление пиковой нагрузкой	Пиковые нагрузки покрываются за счет запуска дорогостоящих и неэффективных «пиковых» электростанций	Программы управления спросом и динамическое тарифообразование снижают пиковое потребление	Снижение пиковой нагрузки на 5-15%, что откладывает или отменяет необходимость инвестиций в новую генерацию на миллиарды долларов
Операционные и эксплуатационные затраты	Высокие затраты из-за необходимости ручного съема показаний, выезда бригад для поиска неисправностей и плановых осмотров	Автоматизация сбора данных и диагностики сокращает потребность в привлечении ремонтных бригад	Снижение операционных затрат и трудозатрат на 15-25% за счет сокращения выездов ремонтных бригад и автоматизации учета
Точность учета и выставления счетов	Ежемесячный съем показаний, средняя точность ~98-99% с учетом ошибок и неучтенного потребления	Данные в реальном времени с AMI (Advanced Metering Infrastructure). Точность >99,9%	Практически полное устранение коммерческих потерь и ошибок в счетах. Основа для сложных тарифов и управления спросом
Информационная осведомленность	~1 точка данных (показание) на потребителя в месяц. Мониторинг сети осуществляется на уровне подстанций	Тысячи точек данных на потребителя в час/минуту. Полная наблюдаемость сети до конечного потребителя	Экспоненциальный рост объема данных, позволяющий использовать предиктивную аналитику для прогнозирования сбоя и оптимизации режимов работы

инновационные продукты и услуги в сочетании с продвинутыми технологиями мониторинга, управления, связи и самовосстановления для достижения следующих целей:

- облегчение подключения и эксплуатации электростанций всех размеров и технологий;
- предоставление потребителям возможности участвовать в оптимизации работы системы;
- значительное снижение воздействия всей системы электроснабжения на окружающую среду;
- обеспечение более высокого уровня надежности и безопасности поставок электроэнергии.

Специалисты и эксперты отмечают, что в отличие от большинства других низкоуглеродных энергетических технологий интеллектуальные решения должны быть внедрены как в существующие системы (которым в некоторых случаях более 40-50 лет), так и в совершенно новые сети. Кроме того, приложения Smart Grid должны быть установлены с минимальным нарушением повседневной работы электроэнергетической системы [19].

В итоге систематизации имеющихся на сегодняшний день публикаций и технических спецификаций, а также опыта развертывания Smart Grid в разных странах мира в Таблице 1 представлены результаты сравнения традиционных и интеллектуальных энергетических сетей.

Интеллектуальные сети представляют собой развивающийся набор технологий, которые внедряются с разной скоростью в различных условиях по всему миру, в зависимости от местной коммерческой привлекательности, совместимости с существующими системами, изменений в регулировании и инвестиционных рамок. Эксперты прогнозируют, что будущие сетевые архитектуры будут развиваться поэтапно, причем первый этап, получивший название «Smart Grid 1.0», предполагает использование в основном уже устоявшиеся инновационных технологий в растущем числе проектов. В более долгосрочной перспективе на этапе «Smart Grid 2.0» планируется внедрение более амбициоз-

ных инноваций [16] (см. Рис. 2).

Таким образом, с появлением интеллектуальных сетей традиционная концепция электросети эволюционировала от системы с электромеханическим управлением к системе с электронным и цифровым управлением. В связи с этой эволюцией традиционные мероприятия по планированию и эксплуатации сети могут быть структурированы следующим образом:

- процессы мониторинга и измерения, передача данных в операционные центры и автоматическое реагирование с использованием полевых устройств, цифровых датчиков, коммуникационных технологий;
- управление информацией посредством обмена данными между соответствующими устройствами и системами;
- обработка информации, чтобы помочь операторам использовать такие доступные данные.

Данная структуризация позволяет сформировать новое понимание того, как решать проблемы организации и обслуживания энергосетей, начиная от прогнозирования нагрузок, обеспечения стабильности системы и до обнаружения неисправностей, а также безопасности энергосистемы в целом.

В Таблице 2 представлена краткая характеристика ключевых концепций интеллектуальных электрических сетей.

Рассмотрим концепции, описанные в Таблице 2, более подробно.

**Двусторонний поток энергии и информации** является основой интеллектуальной энергосистемы, включая энергетическую, информационную и коммуникационную инфраструктуру, обеспечивающую ее функциональность. Эта инфраструктура поддерживает двунаправленный поток как электроэнергии, так и информации, что знаменует отход от традиционной однонаправленной энергосистемы. Хотя концепция «двунаправленного потока информации» является широко известной и простой, идея «двунаправленного потока электроэнергии» представляет собой трансформационную парадигму. В традиционных энергосистемах электроэнергия

обычно генерируется на централизованных электростанциях, передается по высоковольтным сетям, распределяется по сетям низкого напряжения и, наконец, поставляется конечным пользователям. Однако в интеллектуальной энергосистеме электроэнергия может течь в обратном направлении, что позволяет пользователям возвращать энергию в сеть. Например, владельцы домов, оборудованных солнечными панелями, имеют возможность генерировать избыточную электроэнергию и поставлять ее обратно в сеть, способствуя общей доступности энергии. Аналогичным образом электромобили могут способствовать балансировке нагрузки, передавая накопленную энергию обратно в сеть в периоды пикового спроса, что называется «сглаживанием пиков» [3]. Этот двунаправленный поток энергии особенно важен в таких сценариях, как работа микросетей. В случае отключения электро-

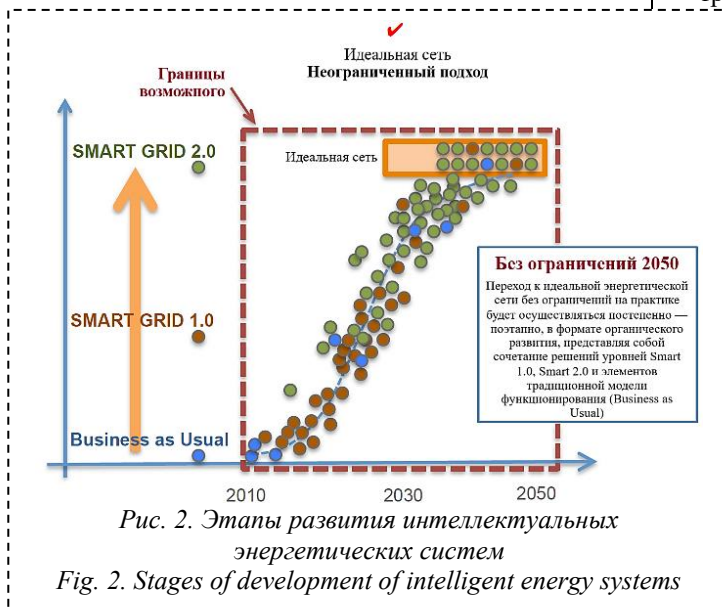


Рис. 2. Этапы развития интеллектуальных энергетических систем

Fig. 2. Stages of development of intelligent energy systems

энергии, вызванного сбоями в подаче, энергия, возвращаемая потребителями, может помочь сохранить функциональность. Такие возможности повышают отказоустойчивость и адаптивность интеллектуальной энергосистемы.

Связь в сетях Smart Grid основана на беспроводных и проводных сетевых технологиях. Сети можно классифицировать по функциональности в рамках Smart Grid. Классы включают домашнюю сеть, сеть доступа, сеть соседства, сеть обратной связи и внешние сети. Кроме того, сети Smart Grid соединяют бытовую технику, выключатели, интеллектуальные счетчики, трансформаторы, реле, конденсаторные батареи, интегрированные электронные устройства, приводы, точки доступа, концентраторы, сканеры, принтеры, маршрутизаторы, камеры, устройства для полевых испытаний, компьютеры и другие устройства.

**Самовосстановление и надежность.** Система самовосстановления была разработана как форма интеллектуальной технологии управления путем

интеграции современной теории устойчивого управления (т. е. подход на основе переменных состояния) с различными компьютерными методами искусственного интеллекта (т. е. генетический алгоритм и байесовская вероятность) [11]. Способность к самовосстановлению имеет решающее значение для интеллектуальной энергосистемы, обеспечивая изоляцию неисправных компонентов от сети и возможность автономного возвращения системы к нормальной работе без вмешательства человека. Сеть с возможностью самовосстановления может предотвратить или сократить перебои в подаче электроэнергии, минимизировать время восстановления, поддерживая надежность и доступность системы. Широко признано, что проактивные меры, такие как разделение интеллектуальной энергосистемы на изолированные микросети, внедрение программ управления нагрузкой и диспетчеризация мобильных аварийных ресурсов, эффективно повышают отказоустойчивость и обеспечивают самовосстановление интеллектуальных энер-

Таблица 2. Ключевые свойства концепций интеллектуальных электрических сетей  
Table 2. Key properties of smart grid concepts

Концепция	Описание	Ключевые технологии	Цель и преимущества
Двусторонний поток энергии и информации	В отличие от традиционных сетей, где энергия течет в одном направлении, Smart Grid позволяют энергии двигаться и в обратную сторону. Потребители могут генерировать свою энергию (например, с помощью солнечных панелей) и продавать излишки обратно в сеть	«Умные» счетчики, распределенные источники энергии (солнечные панели, ветроэнергетические установки), системы управления сетью	<b>Цель:</b> интеграция возобновляемых источников энергии, повышение стабильности сети <b>Преимущества:</b> снижение нагрузки на крупные электростанции, экономическая выгода для потребителей
Самовосстановление и надежность	Сеть способна автоматически обнаруживать и изолировать неисправности (например, обрыв линии), перенаправляя потоки энергии в обход поврежденного участка	Датчики и сенсоры на линиях, автоматические выключатели, системы SCADA, продвинутая автоматизация	<b>Цель:</b> минимизировать время и масштабы отключений электроэнергии <b>Преимущества:</b> значительное повышение надежности электроснабжения, снижение экономических потерь от простоев
Управление спросом	Потребители могут добровольно или автоматически снижать свое энергопотребление в часы пиковой нагрузки в обмен на финансовые стимулы	«Умные» счетчики, системы управления домашней энергией, «умные» бытовые приборы	<b>Цель:</b> сгладить пики потребления, снизить нагрузку на сеть <b>Преимущества:</b> снижение необходимости строить новые дорогие электростанции, экономия для потребителей, повышение общей эффективности системы
Интеграция распределенной генерации	Бесшовная интеграция в сеть множества небольших источников энергии, включая солнечные панели на крышах, малые ветряные турбины и накопители энергии (аккумуляторы)	Инверторы, системы управления распределенными энергоресурсами, микросети	<b>Цель:</b> децентрализация производства энергии, повышение устойчивости <b>Преимущества:</b> увеличение доли «зеленой» энергии, энергетическая независимость для отдельных районов или объектов
Кибербезопасность и защита данных	Обеспечение защиты сети от кибератак и несанкционированного доступа, а также защита конфиденциальности данных потребителей, собираемых «умными» счетчиками	Системы шифрования, межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений, защищенные протоколы связи	<b>Цель:</b> обеспечить безопасное и стабильное функционирование критически важной инфраструктуры <b>Преимущества:</b> защита от массовых отключений, вызванных атаками, сохранение приватности граждан
Продвинутая инфраструктура измерений	Система, которая обеспечивает сбор данных о потреблении в реальном времени, удаленное управление и двустороннюю связь между потребителем и поставщиком	«Умные» счетчики, сети передачи данных (RF Mesh, PLC, сотовая связь), система управления данными счетчиков	<b>Цель:</b> получить точную и оперативную картину энергопотребления в сети <b>Преимущества:</b> точные счета за электроэнергию, быстрое обнаружение хищений, основа для всех остальных концепций Smart Grid

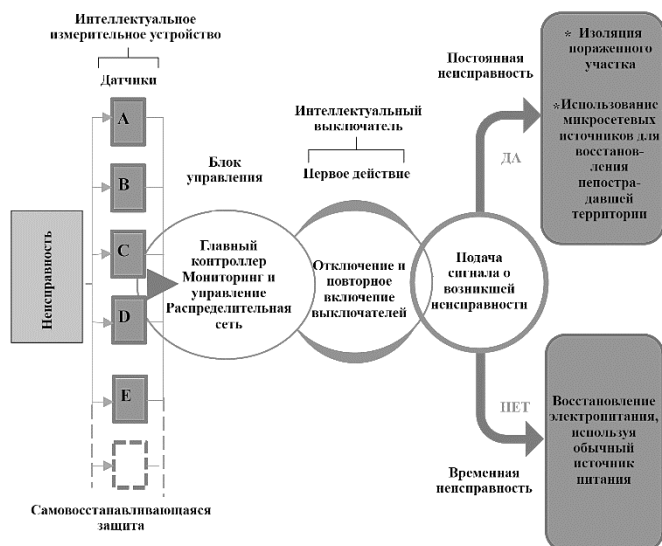


Рис. 3. Схема самовосстанавливающейся системы защиты электросети

Fig. 3. Self-healing power grid protection system diagram

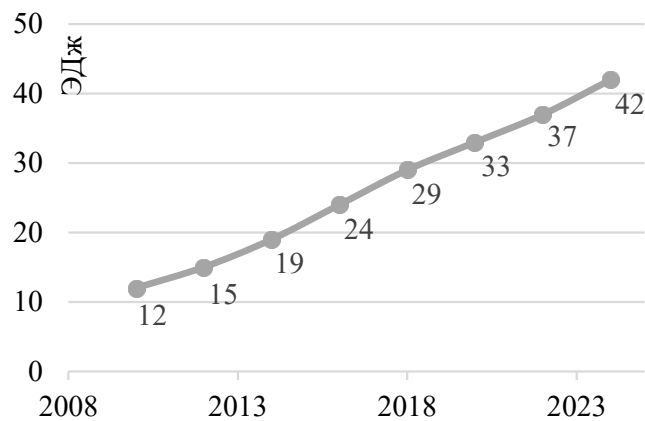


Рис. 4. Глобальная экономия энергии вследствие управления спросом [10, 14, 17]

Fig. 4. Global energy savings through demand response [10, 14, 17]

госсистем [2].

В то же время необходимо отметить, что самовосстановление интеллектуальной энергосистемы требует мощных вычислительных ресурсов, функционирующих в режиме реального времени, которые контролируют, измеряют, добавляют прогнозную аналитику, действуют и готовят быстрые решения для диагностики, локализации и изоляции различных неисправностей, реформирования и перенаправления потока энергии распределительной системы с целью сокращения отключений и перебоев в подаче электроэнергии. На Рис. 3 показана самовосстанавливающаяся система защиты электросети.

Из Рис. 3 видно, что самовосстанавливающаяся система защиты использует измерительные устройства и датчики для эффективной подачи электроэнергии потребителям при сохранении высокого качества. Эти датчики способны обнаруживать сигналы, указывающие на неисправности в линиях электропередачи сети. Датчики образуют кластеры и устанавливают прямые связи с главным контрол-

лером через беспроводное соединение. Несколько кластеров связываются с главным контроллером по беспроводной сети, обеспечивая бесперебойную работу. В случае неисправности система быстро реагирует, восстанавливая поврежденные ветви, что обеспечивает быстрый возврат к нормальному режиму функционирования.

**Управление спросом** является одной из ключевых функций интеллектуальной энергосистемы. Этот концептуальный элемент включает в себя ряд стратегий и технологий, направленных на изменение и оптимизацию моделей потребления электроэнергии. Данная функция реализуется путем прямого или косвенного стимулирования потребителей к изменению и переносу их нагрузки на электросети с пиковых часов на непиковые, что дает ряд долгосрочных преимуществ: позволяет сократить потребность в дорогостоящих пиковых электростанциях, снизить частоту обслуживания распределительных и передающих сетей, улучшить качество электроэнергии, минимизировать нагрузку на инфраструктуру сети [7]. Важно отметить, что управление спросом не обязательно нацелено на сокращение потребления электроэнергии и не приводит к нему, однако благодаря этому инструменту регулируется время использования электроэнергии.

С технической точки зрения управление спросом включает в себя стратегическое энергосбережение, сглаживание пиковых нагрузок, перераспределение спроса и заполнение провалов, чтобы достичь целей коммунальных предприятий по формированию оптимального режима распределения энергии. Исследования, проведенные по всему миру, показали, что в целом инициативы по управлению спросом могут значительно снизить общее потребление электроэнергии в пиковые периоды примерно на 20-40%, а за счет использования энергоэффективных приборов спрос можно дополнительно сократить на 20-30%. На Рис. 4 представлена статистика глобальной экономии энергии за счет политик энергоэффективности, реализуемых благодаря управлению спросом.

**Интеграция распределенной генерации.** В результате внедрения интеллектуальных энергетических систем обеспечивается беспрепятственное объединение традиционных электросетей с передовыми технологиями, в частности с системами альтернативной генерации, такими как солнечные панели и ветряные турбины. Этот процесс позволяет интегрировать возобновляемые источники энергии и распределенные энергетические ресурсы, включая солнечные панели на крышах и домашние аккумуляторы, обеспечивая стабильную и надежную систему производства электроэнергии. Энергетический сектор получает огромную выгоду за счет снижения зависимости от ископаемого топлива и повышения стабильности сети благодаря нескольким ключевым элементам:

1. Интеграция возобновляемых источников: солнечные панели и ветряные турбины объединяются в сеть.

2. Хранение энергии: аккумуляторные системы управляют колебаниями энергоснабжения.

3. Реагирование на спрос: автоматизированные системы балансируют спрос и предложение энергии в режиме реального времени.

Реализация данной концепции на практике предполагает использование технологий, которые повышают способность управлять сетью, или же нетрадиционных подходов в качестве альтернативы модернизации линий электропередач и мощности подстанций. В контексте Smart Grid особого внимания заслуживают передовые сетевые технологии, которые могут быть разделены на четыре группы в зависимости от их воздействия и степени зрелости:

- передовые компоненты;
- мониторинг и оптимизация системы; программное обеспечение для интеграции распределенных энергетических ресурсов;
- технологии хранения энергии [18].

Передовые трансформаторы, управление сетью и хранение энергии – это высокоразвитые решения с высокой добавленной стоимостью. Они могут помочь операторам сетей интегрировать возобновляемые источники энергии в систему, где монито-

ринг сети является ключевым фактором, позволяющим получить представление о ее состоянии и улучшить работу по всей цепочке создания стоимости (например, планирование и обслуживание сети). В некоторых странах, например, в Великобритании, уже начали стимулировать операторов энергосистем к мониторингу низковольтных сетей для поддержки электромобилей и возобновляемых источников энергии в энергосистеме. С этой целью устанавливаются интеллектуальные устройства с вычислительными возможностями, соединяя необходимое полевое оборудование для сбора данных на месте с подходящей телекоммуникационной сетью, которая позволяет получить информацию о низковольтной энергосистеме.

**Кибербезопасность и защита данных.** Внедрение усовершенствований и расширенных возможностей в интеллектуальную сеть электроснабжения усложняет традиционные распределительные сети и подвергает их различным типам атак. Эти проблемы могут предоставить хакерам доступ к инфраструктуре сети, поставить под угрозу безопасность и целостность передаваемых данных и нарушить работу сервиса. В отличие от традиционных электрических сетей, Smart Grid включает в себя множество компонентов, расположенных за пределами помещений энергокомпании, что подвергает их риску физического вторжения. Кроме

Таблица 3. Анализ технических аспектов и эффективности внедрения Smart Grid  
Table 3. Analysis of technical aspects and efficiency of Smart Grid implementation

Технический параметр	Российская Федерация	Страны-лидеры (ЕС, США, Китай)	Ключевые технические различия и акценты
Уровень проникновения «умных» счетчиков	Низкий/средний. Массовая установка началась после 2020 года. Охват оценивается в 20-30% домохозяйств	Высокий/завершенный. В таких странах как Италия, Швеция, Китай охват приближается к 90-100%. В США – более 70%	В РФ фокус на борьбе с коммерческими потерями. В странах-лидерах AM это фундамент для управления спросом и динамических тарифов
Потери в сетях	Высокие. Оценочный уровень потерь составляет 10-13%, в некоторых распределительных сетях – значительно выше	Низкие/средние. В США и большинстве стран ЕС – 4-8%. В Германии и Японии – <5%	В РФ высокий износ сетей и большие расстояния передачи – главные причины технических потерь
Надежность электроснабжения	Средние показатели. SAIDI (средняя длительность отключений) сильно варьируется по регионам, но в целом выше европейских значений	Высокие показатели. Внедрение автоматизации (FLISR) позволило снизить SAIDI на 40-70% в модернизированных сетях	В РФ автоматизация распределительных сетей находится на начальном этапе. В ЕС и США это уже стандартная практика для повышения надежности
Интеграция возобновляемых источников	Низкий уровень. Доля ВИЭ (без учета крупных ГЭС) в энергобалансе невелика. Сеть не сталкивается с серьезными проблемами их интеграции	Высокий уровень. В Германии доля ВИЭ в выработке >50%. Главный технический вызов – управление нестабильностью генерации с помощью прогнозирования, DERMS и систем накопления	В РФ инфраструктура Smart Grid развивается «на опережение», в то время как в ЕС ее внедрение было реакцией на стремительный рост ВИЭ
Автоматизация подстанций и сетей	Фрагментарная. Внедряются «цифровые подстанции» и «цифровые РЭС», но пока в виде пилотных проектов. Преобладают подстанции с частичной автоматизацией	Глубокая. Широкое применение стандартов (например, МЭК 61850), полная наблюдаемость и дистанционное управление – стандарт для новых и модернизированных объектов	Разрыв в уровне внедрения ПО для управления сетями (ADMS), систем предиктивной аналитики и цифровых двойников
Развитие сетей для электро-транспорта	Начальный этап. Интеграция зарядной инфраструктуры в сети планируется, но пока не является ключевым драйвером модернизации	Активная фаза. Технологии V2G (Vehicle-to-Grid) и «умной» зарядки активно тестируются и внедряются для балансировки суточных графиков нагрузки	Нагрузка от электромобилей – один из главных стимулов для внедрения Smart Grid в странах-лидерах, так как без «умного» управления она может вызвать коллапс локальных сетей

того, интеллектуальная энергосистема состоит из множества компонентов, контролирующих спрос и предложение на электроэнергию, которые способны стать потенциальными точками входа для кибератак [4]. Таким образом, можно отметить, что будущее интеллектуальных сетей и систем управления энергопотреблением зависит от внедрения надежных мер кибербезопасности. Благодаря интеграции новых технологий, таких как блокчейн и прогнозная аналитика, а также усилению межотраслевого сотрудничества, энергетическая отрасль находится в выгодном положении для защиты от будущих киберугроз. Такой проактивный подход не только защитит критически важную инфраструктуру, но и обеспечит постоянную надежность и эффективность систем распределения энергии на долгие годы.

**Продвинутая инфраструктура измерений** представляет собой интегрированную систему фиксированной сети, которая обеспечивает двустороннюю связь между энергетическими предприятиями и потребителями. Система собирает, хранит, анали-

зирует и представляет данные об энергопотреблении, открывая таким предприятиям возможность отслеживать динамику спроса и нагрузки. Продвинутая инфраструктура измерений состоит из нескольких взаимосвязанных компонентов:

- 1) интеллектуальные счетчики;
- 2) коммуникационные сети, которые служат основой двусторонней связи между интеллектуальными счетчиками и головной системой;
- 3) система управления данными, представляющая собой центральное хранилище, в котором собираются, хранятся, обрабатываются и анализируются все данные, поступающие с измерительных устройств.

Будущее развитие инфраструктуры будет определяться как технологическим прогрессом, так и развитием нормативно-правовой базы. Со стороны технологий ожидается интеграция инфраструктуры с усовершенствованной аналитикой данных, Интернетом вещей для приложений «умного дома». С точки зрения законодательства в решении нуждаются вопросы конфиденциальности и безопасности

Таблица 4. Примеры реализации проектов Smart Grid в Российской Федерации

Table 4. Examples of Smart Grid project implementation in the Russian Federation

Регион/проект	Ключевые компании	Внедряемые технологии и компоненты	Цели и достигнутые результаты
Программа «Цифровая трансформация 2030»	ПАО «Россети» (и дочерние общества)	Цифровые подстанции, интеллектуальные системы учета, цифровые районы электрических сетей, системы мониторинга и предиктивной аналитики	<b>Цель:</b> полная цифровизация электросетевого комплекса к 2030 г <b>Результаты:</b> снижение операционных расходов, сокращение потерь электроэнергии, повышение надежности и доступности электроснабжения
Калининградская область	«Россети Янтарь»	Массовая установка интеллектуальных приборов учета, создание системы дистанционного управления подстанциями, автоматизация распределительных сетей	<b>Цель:</b> повышение надежности и управляемости изолированной энергосистемы <b>Результаты:</b> снижение потерь электроэнергии на 18,5% в пилотных районах, сокращение времени ликвидации аварий, точный учет потребления
Белгородская область	«Россети Центра – Белгородэнерго», «Росатом»	«Умный квартал» в Белгороде, модернизация распределительных пунктов, установка интеллектуальных приборов учета	<b>Цель:</b> создание пилотной зоны «Умного города» с интеллектуальной энергетической инфраструктурой <b>Результаты:</b> отработка технологий цифровой передачи данных, повышение эффективности учета в рамках пилотного квартала
Ярославская, Тульская области	«Россети», РФПИ	Установка более 220 тысяч интеллектуальных приборов учета	<b>Цель:</b> борьба с несанкционированными подключениями и снижение коммерческих потерь <b>Результаты:</b> экономический эффект от внедрения превысил 400 млн рублей (на ранних этапах), потери снижены на 10-30%
Москва и Московская область	«Россети Московский регион»	Цифровые двойники электрических сетей, развитие интеллектуальной транспортной системы, внедрение отечественного ПО для управления сетями	<b>Цель:</b> управление одной из самых загруженных в мире энергосистем <b>Результаты:</b> улучшение контроля, сокращение расходов на импортное ПО, создание основы для интеграции электротранспорта
Уфа, Башкортостан	ООО «Башкирэнерго»	Оптимизация режимов работы сети, снижение потерь	<b>Цель:</b> повышение экологичности и эффективности <b>Результаты:</b> снижение выбросов CO <sub>2</sub> на 550 тыс. тонн ежегодно за счет сокращения избыточной генерации и потерь
Кемеровская область – Кузбасс	«Россети Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС»	Массовая установка интеллектуальных приборов учета	<b>Цель:</b> борьба с несанкционированными подключениями и снижение коммерческих потерь <b>Результаты:</b> снижение потерь электроэнергии, точный учет потребления

данных, собираемых интеллектуальными счетчиками.

Как уже отмечалось ранее, внедрение концепции интеллектуальных энергетических систем в различных странах мира происходит неравномерно, соответственно, и уровень эффективности использования передовых технологий тоже разный. В Таблице 3 представлен краткий обзор результатов развертывания Smart Grid в разных странах мира.

Несмотря на то, что внедрение Smart Grid в России пока отстает от практики ведущих стран мира, уже сегодня можно отметить ряд заметных результатов и достижений, который свидетельствуют о том, что страна движется в направлении развертывания «активно-адаптивной» электрической сети, которая позволяет добиться высокого уровня автоматизации и точности управляющих воздействий на сеть. По мнению экспертов, Россия имеет все шансы быть в числе лидирующих государств, где крупные компании обладают большими перспективами для формирования интеллектуальной энергетики. Такое утверждение базируется на чрезвычайно высокой степени интеграции российской энергосистемы, чего нет в других странах.

Развитие концепции интеллектуальных энергетических систем в РФ осуществляется в соответствии с Энергетической стратегией до 2050 года, ряд реализуемых пилотных проектов в разных регионах страны демонстрирует уже сегодня высокие результаты, хотя некоторые из них еще далеки до своего завершения. Более подробная информация представлена в Таблице 4.

Как свидетельствует Таблица 4, основные организации, ответственные за реализацию проектов – это группа ПАО «Россети» и ее дочерние компании. Они выступают в качестве главных драйверов цифровизации электросетей в стране. Ключевые цели реализуемых проектов включают в себя повышение эффективности, надежности и экологичности электроэнергетической системы.

#### **Выводы**

Подводя итоги, можно отметить, что в настоящее время новая энергетическая система сталкивается с рядом вызовов: устойчивость энергетической структуры, гибкость регулирования и контроля энергосистемы, интерактивность режима потребления, синергия широко распределенных систем хранения энергии на стороне источника-сети-нагрузки и сложность системы торговли квотами на выбросы углерода. Цифровизация и интеллектуальные технологии являются эффективным средством для решения этих проблем. В статье рассмотрены ключевые концепции интеллектуальных энергетических систем, описаны их достоинства, недостатки, результаты внедрения в разных странах мира. Отдельное внимание уделено реализации проектов Smart Grid в России.

Можно отметить, что мероприятия, предлагаемые к реализации в рамках концепций интеллектуальных электрических сетей, «оторваны» от существующего состояния электросетевого оборудования. Но именно анализ текущего состояния сетей должен лежать в основе любой концепции. В част-

ности, в Кемеровской области – Кузбассе неоптимальная загрузка трансформаторных подстанций значительно ухудшает эффект от любых мероприятий Smart Grid.

Необходимо разработать эффективные методы, основанные на концепции интеллектуальных сетей, при внедрении которых эффективность работы электросетевых организаций повышается вследствие оптимизации загрузки трансформаторов либо нивелирования влияния низкой загрузки трансформаторов.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тожибоев А. К., Хакимов М. Ф. Интеллектуальная система учета электроэнергии солнечных энергетических систем // Экономика и социум. 2024. № 6–1 (121). С. 1374–1377.
2. Волкова И., Бурда Е., Гаврикова Е. Механизмы взаимодействия экономических агентов в интеллектуальных энергетических системах // Энергетическая политика. 2022. № 3 (169). С. 86–98.
3. Mohammad Ghiasi, Zhanle Wang, Mehran Mehrandezh. Evolution of smart grids towards the Internet of energy: Concept and essential components for deep decarbonisation // IET Smart Grid. 2022. Vol. 6. Iss. 1. Pp. 45–52.
4. Weihao Hu, Qiuwei Wu. Applications of artificial intelligence in renewable energy systems // IET Renewable Power Generation. 2022. Vol. 16. Pp. 187–193.
5. Dongqi Liu, Yaonan Wang. Embodied Intelligence for Micro-Integrated Energy Systems: Key Technologies and Applications // IET Smart Energy Systems. 2025. Vol. 1. Iss. 2. Pp. 90–98.
6. Якимович Б. А., Какушина Е. Г., Малюк Е. Г. Развитие энергетики России на основе интеллектуальных энергетических систем // Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 4. С. 54–58.
7. Minghui Liu, Sasa Yang. Energy Security, Intelligence and Innovation Quality: Evidence From China's New Energy Demonstration City Policy // Expert Systems. 2024. Vol. 42. Iss. 2. Pp. 36–42.
8. Яппаров Р. Р. Потенциал мировой электрогенерации на основе возобновляемых источников энергии и системы интеллектуальных сетей для обеспечения энергетической безопасности // Научно-исследовательские публикации. 2023. № 1. С. 37–39.
9. Иванов А. В., Чайкин В. С., Соснина Е. Н. Архитектурная модель интеллектуальной энергетической системы как инструмент системной инженерии // Энергия единой сети. 2022. № 5–6(66–67). С. 16–25.
10. Кравец Е. О. Интеллектуальная система энергетического менеджмента как один из инструментов цифровой трансформации энергетического комплекса // Торговля и рынок. 2023. Т. 1. № 3(67). С. 50–56.
11. Zhengtang Fu, Xi Lu. Forecasting heterogeneous risk diffusion in the carbon neutral integrated energy system: A case study of China // Journal of Industrial Ecology. 2025. № 56. Pp. 123–129.

12. Rahul Shenoy, Andrew Tudor, Dhruva Nathan. An Adaptive Intelligent System Based on Energy-Efficient Synaptic Resistor Circuits with Fast Real-Time Learning // *Advanced Intelligent Systems*. 2022. Vol. 4. Iss. 10. Pp. 76–84.

13. Мухаметгалиев С. И. Тенденции, ограничения и перспективы интеграции цифровых технологий в управлении производственными активами энергетической отрасли // *Научный аспект*. 2024. Т. 12. № 5. С. 1634–1640.

14. Тихомиров А. Л., Пирожникова А. П. Нейроуправление системами теплоснабжения // *Умная цифровая экономика*. 2023. Т. 3. № 2. С. 112–122.

15. Куликов М. М., Индюков М. А. Перспективы применения технологии big data в электроэнергетике // *Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ)*. Серия: Социально-экономические науки. 2023. Т. 16. № 1. С. 131–137.

16. Sanggeon Yun, Hanning Chen. HyperSense: Hyperdimensional Intelligent Sensing for Energy-

Efficient Sparse Data Processing // *Advanced Intelligent Systems*. 2024. Vol. 6. Iss. 12. Pp. 56–63.

17. Янь Ц. Интеллектуальные системы в автоматизации и управлении электроэнергетическими системами // *Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в вузе и школе*. 2022. № 38. С. 1135–1140.

18. Клименко Ю. А. Разработка моделей и методов управления распределительными энергетическими системами в реальном времени // *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022. № 3. С. 85–87.

19. Meryeme Azaroual, Nsilulu T. Mbungu Toward an intelligent community microgrid energy management system based on optimal control schemes // *International Journal of Energy Research*. 2022. Vol. 46. Iss. 15. Pp. 29–34.

20. Tao Chen, Ciwei Gao, Zhengqin Wang. Intelligent energy management of low carbon hybrid energy system with solid oxide fuel cell and accurate battery model // *IET Smart Grid*. 2022. Vol. 6. Iss. 1. Pp. 167–174.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Беляевский Роман Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

**Овчинников Александр Геннадьевич**, аспирант кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: ovag@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Беляевский Роман Владимирович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Овчинников Александр Геннадьевич – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-28-39

**Roman V. Belyaevsky, Aleksandr G. Ovchinnikov\***

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\* for correspondence: ovag@yandex.ru

## ANALYSIS OF THE STATE OF DEVELOPMENT OF SMART GRIDS

### *Abstract.*

*The development of smart grids is crucial for the global community to achieve shared goals in energy security, economic development, and climate change mitigation. Smart grids optimize demand response and energy efficiency, integrate variable renewable energy sources and electric vehicle*



### Article info

Received:

07 April 2026

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

15 June 2026

**Keywords:** Smart Grid, intelligent electric power system, electricity, grid, consumption, load, effect

charging services, while simultaneously reducing peak load and stabilizing the electric power system. This article presents a comprehensive analysis of modern smart grids. It provides a comprehensive analysis of the key concepts underlying smart grids, which are now considered the foundation for modernizing the global energy infrastructure. It examines the theoretical foundations and evolving views on building energy systems of the future, where traditional electric grids are being transformed into flexible, adaptive, and self-regulating systems. Particular attention is paid to concepts such as the two-way flow of energy and information between consumers and producers, self-healing and system reliability, demand management, and others. The key operating principles of smart grids are analyzed: process automation, distributed generation, active consumer participation in demand management, and the ability to quickly adapt to changing operating conditions. International and domestic experience is examined, as well as the prospects for the development of smart grids in Russia as a strategic direction for ensuring energy security and sustainable development. Implemented technologies reviewed, achieved goals, and results obtained in various regions of the Russian Federation and concludes with a conclusion on the need to develop effective methods for improving the efficiency of electric grid organizations when implementing the smart grid concept.

**For citation:** Belyaevsky R.V., Ovchinnikov A.G. Analysis of the state of development of smart grids. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 3(185):28-39 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-28-39, EDN: XZEYKW

### REFERENCES

1. Tozhiboev A.K., Khakimov M.F. Intelligent electricity metering system for solar energy systems. *Economy and Society*. 2024; 6-1(121):1374-1377.
2. Volkova I., Burda E., Gavrikova E. Mechanisms of interaction between economic agents in intelligent energy systems. *Energy Policy*. 2022; 3(169):86-98.
3. Mohammad Ghiasi, Zhanle Wang, Mehran Mehrazdeh. Evolution of smart grids towards the Internet of energy: Concept and essential components for deep decarbonization. *IET Smart Grid*. 2022; 6(1):45-52.
4. Weihao Hu, Qiuwei Wu. Applications of Artificial Intelligence in Renewable Energy Systems. *IET Renewable Power Generation*. 2022; 16:187-193.
5. Dongqi Liu, Yaonan Wang. Embodied Intelligence for Micro-Integrated Energy Systems: Key Technologies and Applications. *IET Smart Energy Systems*. 2025; 1(2):90-98.
6. Yakimovich B.A., Kakushina E.G., Malyuk E.G., Development of Russia's Energy Sector Based on Intelligent Energy Systems. *Power Installations and Technologies*. 2022; 8(4):54-58.
7. Minghui Liu, Sasa Yang. Energy Security, Intelligence, and Innovation Quality: Evidence From China's New Energy Demonstration City Policy. *Expert Systems*. 2024; 42(2):36-42.
8. Yapparov R.R. Potential of global electricity generation based on renewable energy sources and smart grid systems to ensure energy security. *Research publications*. 2023; 1:37-39.
9. Ivanov A.V., Chaikin V.S., Sosnina E.N. Architectural model of an intelligent energy system as a system engineering tool. *Energy of the unified grid*. 2022; 5-6(66-67):16-25.
10. Kravets E.O. Intelligent energy management system as one of the tools for digital transformation of the energy complex. *Trade and market*. 2023; 1(3(67)):50-56.
11. Zhengtang Fu, Xi Lu. Forecasting heterogeneous risk diffusion in the carbon-neutral integrated energy system: A case study of China. *Journal of Industrial Ecology*. 2025; 56:123-129.
12. Rahul Shenoy, Andrew Tudor, Dhruva Nathan. An Adaptive Intelligent System Based on Energy-Efficient Synaptic Resistor Circuits with Fast Real-Time Learning. *Advanced Intelligent Systems*. 2022; 4(10):76-84.
13. Mukhametgaliev S.I. Trends, Limitations, and Prospects for the Integration of Digital Technologies in the Management of Production Assets in the Energy Industry. *Scientific Aspect*. 2024; 12(5):1634-1640.
14. Tikhomirov A.L., Pirozhnikova A.P. Neuro-control of Heat Supply Systems. *Smart Digital Economy*. 2023; 3(2):112-122.
15. Kulikov M.M., Induykov M.A. Prospects for Applying Big Data Technology in the Electric Power Industry. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Social and Economic Sciences*. 2023; 16(1):131-137.
16. Sanggeon Yun, Hanning Chen. HyperSense: Hyper-perdimensional Intelligent Sensing for Energy-Efficient Sparse Data Processing. *Advanced Intelligent Systems*. 2024; 6(12):56-63.
17. Yan Q. Intelligent Systems in Automation and Control of Electric Power Systems. *Modern Problems of Linguistics and Methods of Teaching the Russian Language in Universities and Schools*. 2022; 38:1135-1140.
18. Klimenko Yu.A. Development of Models and Methods for Controlling Distribution Energy Systems

in Real Time. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022; 3:85-87.

19. Meryeme Azaroual, Nsilulu T. Mbungu Toward an intelligent community microgrid energy management system based on optimal control schemes.

*International Journal of Energy Research*. 2022; 46(15):29-34.

20. Tao Chen, Ciwei Gao, Zhengqin Wang. Intelligent energy management of low carbon hybrid energy system with solid oxide fuel cell and accurate battery model. *IET Smart Grid*. 2022; 6(1):167-174.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the author:*

**Roman V. Belyaevsky**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply of Mining and Industrial Enterprises, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Russia, 650000, Kemerovo, Vesennyaya str., 28)

**Aleksandr G. Ovchinnikov**, postgraduate student of the Department of Power Supply of Mining and Industrial Enterprises T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), e-mail: [ovag@yandex.ru](mailto:ovag@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

Roman V. Belyaevsky – research problem statement; scientific management, conceptualization of research, drawing the conclusions, writing the text.

Aleksandr G. Ovchinnikov – reviewing the relevant literature, data collection, data analysis, drawing the conclusions, writing the text.

*Authors have read and approved the final manuscript.*

