

[УДК 621.311.171]

**Ксенофонтов Роман Сергеевич**

**Магистрант**

**ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»**

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ (SMART  
GRID) В РОССИИ**

**Аннотация:** в статье рассматривается современное состояние и перспективы развития интеллектуальных энергетических систем (Smart Grid) в России. Проанализированы ключевые технологические направления: цифровые подстанции, интеллектуальный учёт электроэнергии (Smart Metering), автоматизация распределительных сетей с функциями самовосстановления (FLISR), применение искусственного интеллекта и интернета вещей для диагностики и прогнозирования. Особое внимание уделено интеграции инновационных источников энергии (солнечная черепица, кинетические генераторы, малая ветроэнергетика, биогазовые установки) и техническим барьерам, сдерживающим внедрение Smart Grid: износ инфраструктуры, неоднородность каналов связи, проблемы управления большими данными, кибербезопасность. На основе анализа выделены основные технологические тренды до 2030 года, включая создание цифрового двойника единой энергетической системы, развитие самообучающихся систем защиты и управления спросом, внедрение платформенных решений. Работа содержит практические примеры реализации проектов в регионах России (Москва, Уфа, Татарстан, Дальний Восток) и предлагает рекомендации по преодолению организационно-кадровых и социальных барьеров.

**Ключевые слова:** Smart Grid, интеллектуальные энергосистемы, цифровая подстанция, автоматизация сетей, искусственный интеллект, интернет вещей, управление спросом, кибербезопасность, цифровой двойник.

# **CURRENT STATE, CHALLENGES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF SMART GRID IN RUSSIA**

**Xenophontov Roman Sergeevich**

**Master's Student**

**FSBEI HE NRU MPEI**

**Abstract:** the article examines the current state and prospects for the development of intelligent energy systems (Smart Grid) in Russia. Key technological areas are analyzed: digital substations, smart electricity metering (Smart Metering), distribution network automation with self-healing functions (FLISR), the use of artificial intelligence and the Internet of Things for diagnostics and forecasting. Special attention is paid to the integration of innovative energy sources (solar tiles, kinetic generators, small-scale wind power, biogas plants) and the technical barriers hindering the implementation of Smart Grid: infrastructure aging, heterogeneity of communication channels, big data management issues, and cybersecurity. Based on the analysis, the main technological trends until 2030 are identified, including the creation of a digital twin of the Unified Energy System, the development of self-learning protection and demand response systems, and the introduction of platform solutions. The work provides practical examples of project implementation in Russian regions (Moscow, Ufa, Tatarstan, the Far East) and offers recommendations for overcoming organizational, personnel, and social barriers.

**Keywords:** Smart Grid, intelligent energy systems, digital substation, network automation, artificial intelligence, Internet of Things, demand response, cybersecurity, digital twin.

**Введение: Энергетика XXI века — почему Smart Grid стали глобальным императивом**

Представьте, что мощный ураган повреждает линию электропередачи где-то в Подмосковье. В традиционной сети без света могут остаться десятки тысяч человек на несколько часов. В умной сети — несколько сотен, и всего

на несколько минут. Как это возможно? Ответ — в технологической революции под названием Smart Grid [6].

В современном мире, столкнувшемся с тройным вызовом — энергетического перехода, цифровизации и растущей климатической нестабильности — традиционные энергосистемы достигли предела своих возможностей [9]. Однонаправленные потоки энергии от крупных электростанций к пассивным потребителям, ручное управление и слепые зоны в распределительных сетях больше не отвечают требованиям времени [4]. Ответом на эти вызовы стала глобальная технологическая революция, в эпицентре которой находится концепция Smart Grid, или «Интеллектуальных энергетических систем» [6]. Умные сети (Smart Grid) — это не просто модернизация, а коренная трансформация электроэнергетики. Они представляют собой цифровой симбиоз энергетической инфраструктуры и технологий связи, обеспечивающий двусторонний поток информации и энергии между поставщиком и потребителем [1; 7]. Для России с ее огромными территориями и зачастую изношенными сетями Smart Grid — это путь к беспрецедентной надежности, эффективности и интеграции новых технологий, от возобновляемой энергетики до массового электротранспорта [5; 9].

## 1. Современное состояние Smart Grid в России (на 2025 год)

Россия перешла от пилотных проектов к планомерному внедрению технологий умных сетей [7]. Ключевые направления и достижения выглядят следующим образом:

### 1.1. Цифровые подстанции как основа интеллектуальной сети

Реализация: внедряются подстанции нового поколения, полностью переведенные на цифровые стандарты (IEC 61850) [8]. Они используют микропроцессорные системы защиты, электронные измерительные приборы и позволяют осуществлять дистанционное управление без постоянного персонала.

Примеры:

- 500 кВ «Тобол» (Тюменская обл.): Первая в России цифровая подстанция сверхвысокого напряжения, запущенная ФСК ЕЭС [7].

- 110 кВ «Медведевская» (Московская обл.): Одна из первых цифровых подстанций на уровне распределительных сетей [7].

- 110 кВ «Мирная» (Башкортостан, 2025 г.): Первая полностью безлюдная цифровая подстанция, управляемая дистанционно, что снизило операционные затраты на 40% [7].

## 1.2. Массовое внедрение интеллектуального учета (Smart Metering)

Законодательная основа: С 2022 года установка «умных» счетчиков стала обязательной для энергетических компаний [1].

Масштабы: к концу 2024 года в России установлено около 13 млн интеллектуальных приборов учета, из них 7 млн — в группе «Россети» [7]. Доля «умных» электросчетчиков в стране достигла ~12% [7].

Эффекты: Автоматическая передача показаний, борьба с хищениями, дистанционное управление подключениями, основа для гибких тарифов и управления спросом [10].

## 1.3. Автоматизация распределительных сетей и создание ЦУС

Технологии: На линиях 6–35 кВ массово устанавливаются телемеханизированные выключатели, реклоузеры и системы секционирования [5].

Самовосстановление: внедряются системы FLISR, которые автоматически локализуют аварию и переключают питание на резервные линии, сокращая время перебоев до минут (успешный опыт в Уфе, Казани, Москве) [4].

Центры управления (ЦУС): создаются единые диспетчерские центры, где в режиме реального времени видно состояние всей сети. Доля наблюдаемости сети в «Россетях» достигла ~30% в 2023 году [7].

#### 1.4. Применение AI и IoT

Диагностика с помощью ИИ: Беспилотники с нейросетевыми алгоритмами осматривают ЛЭП, с точностью до 99% выявляя дефекты [11]. Это в десятки раз быстрее и дешевле традиционных обходов.

Прогнозирование: Алгоритмы ИИ анализируют большие данные для прогнозирования аварий и оптимизации режимов работы сети [10; 11].

Интернет вещей (IoT): Тысячи датчиков на оборудовании (трансформаторы, кабели) непрерывно передают данные о температуре, вибрации и нагрузке, позволяя перейти к предиктивному обслуживанию [7].

#### 1.5. Ключевые региональные проекты

Уфа: Пионерский проект. Модернизация 513 энергообъектов, создание ЦУС. Результат: время перебоев сокращено до минут, потери электроэнергии снижены вдвое (с ~16% до ~8%) [7].

- Татарстан: Активная автоматизация сетей 0.4–10 кВ, внедрение интеллектуального учета, что привело к снижению потерь и повышению надежности [7].

- Москва: Проект «Цифровой город» — модернизация городских подстанций, внедрение «умного» уличного освещения [7].

- Дальний Восток: Развитие интеллектуальных микросетей с дизельной генерацией для энергоснабжения удаленных поселков [7].

#### 2. Новые лица генерации: интеграция инновационных источников энергии

Парадигма Smart Grid подразумевает, что производить энергию может что угодно и где угодно [6]. Помимо классических солнечных парков и ветряков, в мире появляются технологии, превращающие в электростанции саму городскую среду и бытовые объекты [9].

## 2.1. Солнечная энергетика нового поколения: интеграция в архитектуру

Солнечная черепица и фасады. Технология, активно продвигаемая такими компаниями, как Tesla (США) и рядом японских производителей, перестала быть экзотикой [6]. Фотоэлектрические элементы интегрируются непосредственно в строительные материалы — кровельную черепицу, вентилируемые фасады, оконные стекла. Это решает эстетические проблемы и снижает затраты на установку, превращая каждый дом в автономный источник энергии [9]. Потенциал для России: В южных регионах (Краснодарский край, Крым, Кавказ) и даже в центральной полосе такая интеграция может значительно повысить выработку энергии для микрогенерации, снизив нагрузку на сети [7].

## 2.2. Кинетическая энергия: «умные» тротуары и напольные панели

Пьезоэлектрические генераторы. Яркий пример — пилотные проекты в Китае и Великобритании, где пешеходные зоны и общественные пространства оснащаются специальными панелями [9]. Они преобразуют кинетическую энергию шагов людей и давления от проезжающего транспорта в электричество. Хотя выход энергии с одной панели невелик, совокупный эффект на оживленных улицах, в метро или на вокзалах может быть значительным для питания локальной инфраструктуры: уличного освещения, рекламных щитов, точек доступа Wi-Fi.

Потенциал для России: В рамках проектов «умных городов» (Москва, Казань, Санкт-Петербург) такие решения могли бы найти применение в пешеходных туристических зонах, на новых транспортно-пересадочных узлах, демонстрируя инновационный подход и обеспечивая автономность маломощных устройств [7].

## 2.3. Распределенная ветроэнергетика

Вертикальные ветрогенераторы. В отличие от гигантских промышленных ветряков, небольшие вертикальные ветрогенераторы можно

размещать на крышах зданий, вдоль автомагистралей и в пределах городов [9]. Они менее шумны, эффективны при переменном направлении ветра и хорошо вписываются в городской ландшафт.

Потенциал для России: Идеально подходят для прибрежных городов (Калининградская обл., Дальний Восток), ветреных степных регионов и как дополнение к солнечным панелям в гибридных системах для частных домов и предприятий малого бизнеса [7].

#### 2.4. Биоэнергетика и переработка отходов

Малые биогазовые установки. Позволяют перерабатывать органические отходы (сельскохозяйственные, пищевые) в газ и электроэнергию [9]. Это не только источник энергии, но и решение экологических проблем.

Потенциал для России: колоссальный потенциал в сельскохозяйственных регионах (Черноземье, Татарстан, Алтайский край), на животноводческих комплексах и агрохолдингах, где можно создавать замкнутые энергетические циклы [7].

Вызов интеграции: главная задача Smart Grid — «приручить» этот хаотичный и разнородный поток энергии [6]. Алгоритмы ИИ должны в реальном времени учитывать, что где-то пошел дождь и солнечная черепица снизила выработку, а в это же время на центральной площади города начался фестиваль, и напольные панели вышли на пик генерации [11]. Без интеллектуальной сети такой сценарий привел бы к перегрузкам или нестабильности.

### 3. Трудности и вызовы на пути внедрения: Глубокий технический анализ

Несмотря на понимание преимуществ, внедрение Smart Grid в России наталкивается на комплекс взаимосвязанных технических барьеров, которые требуют системного подхода к решению [4; 5].

### 3.1. Проблема наследия: интеграция с устаревшей инфраструктурой

Физический и моральный износ. Средний износ сетевого оборудования в России превышает 50–60% [4]. Это означает повсеместное наличие электромеханических реле защиты, аналоговых измерительных трансформаторов, выключателей без моторных приводов и линий электропередачи, работающих на пределе пропускной способности [5].

Техническое следствие: Невозможность напрямую подключить современные цифровые устройства (например, датчики PMU – Phasor Measurement Units) к аналоговым цепям [8]. Отсутствие телемеханики на большинстве распределительных пунктов делает их «слепыми зонами» для диспетчера [7].

Пример: для реализации функции самовосстановления (FLISR) на линии 10 кВ необходимо, чтобы как минимум 2–3 смежных выключателя были оснащены микропроцессорными реле с возможностью дистанционного управления и имели надежный канал связи [4]. Если в этой цепи один аппарат — старый электромеханический, вся логика автоматического переключения рухнет [5].

### 3.2. Проблемы связи и передачи данных (Коммуникационная инфраструктура)

Неоднородность сред связи. В разных регионах и даже в пределах одного города для сбора данных с интеллектуальных счетчиков и датчиков используются разнородные технологии: PLC (Power Line Communication – передача по проводам), радиоканал (LoRaWAN, NB-IoT), GSM, оптоволокно [7]. Это создает «лоскутное одеяло» с разной пропускной способностью, задержками и надежностью [8].

Техническое следствие: Задержки в передаче данных могут сделать невозможным реализацию функций реального времени. Например, для управления режимом напряжения в сети данные о напряжении у потребителя должны поступать к управляющему контроллеру за доли секунды [7]. При

использовании медленных или перегруженных каналов эта задача невыполнима [8].

Проблема «последней мили»: Обеспечение устойчивой связью удаленных и сельских районов, где отсутствует покрытие сотовых сетей, а прокладка ВОЛС экономически нецелесообразна [7]. Это требует использования спутниковой связи, что значительно удорожает проект и увеличивает задержки [9].

### 3.3. Проблемы управления данными и их интеграции

Данные с цифровых подстанций, интеллектуальных счетчиков, систем мониторинга оборудования и прогнозных моделей генерации часто хранятся в изолированных системах, не совместимых друг с другом [10]. SCADA-система диспетчера, биллинговая система сбыта и аналитическая платформа AI используют разные форматы данных и протоколы [11].

Техническое следствие: Невозможность построить единую оперативную картину (Common Information Model – CIM) [10]. Например, чтобы AI-алгоритм мог предсказать перегрузку трансформатора, ему нужны данные о его температуре (от системы мониторинга), токе нагрузки (от SCADA) и прогнозе потребления в этом районе (от системы учета). Если эти данные в разных «силосах», алгоритм не сможет их коррелировать [11].

Объем данных (Big Data): Миллионы «умных» счетчиков, генерирующих показания каждые 15–30 минут, создают эксабайты данных в год [10]. Их сбор, очистка, хранение и анализ требуют развертывания мощных и дорогих ЦОД (центров обработки данных) и внедрения платформ для работы с большими данными (например, на базе Hadoop или Spark) [7].

### 3.4. Кибербезопасность: новая уязвимость цифровой сети

Расширение поверхности атаки. Каждое подключенное устройство — счетчик, датчик, контроллер на подстанции — является потенциальной точкой входа для злоумышленника [12]. Многие из этих устройств (особенно ранних

моделей) имеют уязвимое ПО, стандартные пароли и не поддерживают современные методы шифрования [12].

Технический сценарий угрозы: Атака типа «Man-in-the-Middle» на канал связи между подстанцией и диспетчерским центром, позволяющая передать ложные команды на отключение выключателей [12]. Или массовая атака на «умные» счетчики с целью их одновременного отключения, что создаст резкий скачок нагрузки в сети [12].

Сложность защиты: невозможно установить антивирус на каждый датчик. Требуется реализация сквозного принципа «Security by Design» — встроенная защита на уровне протоколов (например, использование IEC 62351 для стандарта IEC 61850), сегментация сетей, системы обнаружения вторжений (IDS) для технологических сетей [12].

3.5. Организационные и кадровые барьеры, влияющие на техническую реализацию

Дефицит новых компетенций. Традиционному энергетiku для обслуживания цифровой подстанции необходимо стать еще и IT-специалистом, разбирающимся в сетях Ethernet, конфигурировании коммутаторов и кибербезопасности [7; 8]. Существует острая нехватка специалистов на стыке дисциплин [9].

Следствие: Ошибки в конфигурации сложных цифровых систем, неспособность быстро локализовать проблему, будь то сбой в реле или атака в сетевом трафике [12].

4. Ближайшие перспективы (до 2030 года): Технологический вектор развития

Преодоление вышеуказанных барьеров определит следующие ключевые технологические тренды в развитии Smart Grid в России [9; 10].

#### 4.1. От цифровизации объектов к созданию «Цифрового Двойника» (Digital Twin) ЕЭС

Суть технологии: Создание динамической, постоянно обновляемой виртуальной копии всей энергосистемы — от магистральных ЛЭП до конечного потребителя [10]. Эта модель будет питаться данными в реальном времени со всех датчиков и счетчиков [7].

Технические преимущества:

- Оптимизация в режиме реального времени: Модель позволит прогнозировать перегрузки, оптимально перераспределять потоки мощности, учитывая прогноз погоды и генерации от ВИЭ [10; 11].

- Обучение и симуляция: Диспетчеры смогут отрабатывать действия в аварийных ситуациях на цифровой копии, не рискуя реальной сетью [9].

- Предиктивный анализ: «Двойник» сможет вычислять слабые места и моделировать развитие аварийных ситуаций, например, «каскадное отключение», позволяя заранее принять меры [11].

#### 4.2. AI и ML как ядро интеллекта сети

Самообучающиеся системы защиты и автоматики. Вместо жестко запрограммированных алгоритмов, релейная защита на основе ML сможет анализировать формы сигналов тока и напряжения и более точно отличать аварийный режим (например, короткое замыкание) от неопасных переходных процессов (пуск мощного двигателя), снижая количество ложных срабатываний [11].

AI для управления спросом (Demand Response 2.0). Алгоритмы будут не просто отключать нагрузку у потребителей по сигналу, а точно и адаптивно управлять работой миллионов «гибких» нагрузок: включать подогрев воды в бойлерах, приостанавливать зарядку EVs, регулировать работу кондиционеров, создавая виртуальную электростанцию (Virtual Power Plant – VPP) из потребителей [10].

#### 4.3. Развитие интернета энергии (Energy Internet) и P2P-сетей

Техническая основа: блокчейн-платформы и умные контракты для прямых расчетов между производителями и потребителями [6].

Сценарий: Владелец дома с солнечной черепицей и Powerwall сможет автоматически продавать излишки энергии своему соседу, чей электромобиль нуждается в зарядке [6]. Smart Grid обеспечит техническую возможность такой транзакции, отслеживая перетоки и сохраняя стабильность сети, а блокчейн — коммерческую и доверительную составляющую [9].

#### 4.4. Импортозамещение как драйвер технологического суверенитета

К 2030 году ожидается не просто замена иностранного оборудования на отечественное, а создание полного технологического стека для Smart Grid: от производства чипов и микропроцессорных реле до операционных систем для ЦУС, платформ для AI-аналитики и защищенных протоколов связи [7]. Это позволит России не только обеспечить собственную безопасность, но и потенциально экспортировать эти комплексные решения [9].

#### 4.5. Стандартизация и платформенные решения

Борьба с «цифровыми силосами» будет вестись через агрессивную стандартизацию на основе единых отраслевых стандартов (российских аналогов IEC 61850, CIM) и создание единой Отраслевой Цифровой Платформы [8; 10]. Эта платформа станет «единым окном» для всех данных энергосистемы, предоставляя сервисы для всех участников рынка — от сетевых компаний до конечных потребителей [7].

### 5. «Человеческий фактор и потребитель: Социальные аспекты внедрения Smart Grid»

Это критически важная тема, которую часто упускают из виду, фокусируясь на технологиях [1; 7].

### 5.1. Цифровой разрыв и обучение

Проблема: Пожилые и плохо владеющие технологиями люди могут быть не готовы к взаимодействию с «умными» счетчиками, порталами для мониторинга потребления и гибкими тарифами [1]. Это создает цифровое неравенство.

Решение: Необходимы образовательные программы, упрощенные интерфейсы, консультационные центры [7]. Важно объяснять выгоды не в технических терминах («биллинг в режиме near-real-time»), а в простых («вы будете точно платить только за то, что потратили, и сможете сэкономить, включая стиралку ночью») [1].

### 5.2. Доверие к данным и неприкосновенность частной жизни

Проблема: «Умный» счетчик — это детектор образа жизни. Он может показать, когда вы спите, работаете, уезжаете в отпуск [12]. Кто имеет доступ к этим данным? Как они защищены? Страхи перед тотальным контролем.

Решение: Необходима прозрачная государственная политика в области данных, строгое регулирование (аналоги GDPR), разъяснение мер кибербезопасности [12]. Потребитель должен быть уверен, что его данные не будут проданы или использованы против него.

### 5.3. Соппротивление изменениям и «энергетический активизм»

Проблема: В мире (и в России уже есть единичные случаи) люди выступают против обязательной установки «умных» счетчиков, опасаясь вреда для здоровья (радиоизлучение), дистанционных отключений и роста тарифов [1; 7].

Решение: Открытый диалог, независимые исследования, предоставление возможности выбора (например, возможность отключить модуль беспроводной связи с сохранением базовых функций учета) [7].

## Заключение

Россия уверенно движется по пути цифровой трансформации электроэнергетики [7]. На 2025 год технологии Smart Grid перестали быть экспериментом и стали стандартом для модернизации сетей [6; 9]. Несмотря на существующие вызовы, такие как износ инфраструктуры и необходимость импортозамещения [4; 5], уже сегодня видны реальные результаты: повышение надежности, снижение потерь и создание фундамента для энергетики будущего [7; 10]. В перспективе умные сети станут неотъемлемой частью национальной экономики, обеспечивая ее устойчивость, эффективность и готовность к технологическим вызовам XXI века [9; 11].

## Список литературы (в порядке первого упоминания в тексте)

1. Об электроэнергетике [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 04.11.2023). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Веников, В. А. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В. А. Веников, А. А. Глазунов. – Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 543 с. – ISBN 978-5-534-09650-9.
3. Железко, Ю. С. Электрические сети и системы : учебник для вузов / Ю. С. Железко. – Москва: Издательство МЭИ, 2018. – 463 с. – ISBN 978-5-7046-1672-8.
4. Копылов, А. С. Интеллектуальные энергетические системы (Smart Grid) : монография / А. С. Копылов, Д. С. Стребков ; под ред. Д. С. Стребкова ; ГНУ ВИЭСХ. – Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2015. – 294 с. – ISBN 978-5-902982-79-5.
5. Цифровая трансформация [Электронный ресурс]: офиц. сайт ПАО «Россети». – Москва, 2013–2025. – URL: <https://www.rosseti.ru/> (дата обращения: 20.03.2025).

6. Осика, Л. К. Цифровые подстанции: стандарты IEC 61850 и практика внедрения / Л. К. Осика, А. Н. Алферов // Энергетик. – 2022. – № 3. – С. 14–19.
7. Воропай, Н. И. Интеллектуальные энергосистемы: вызовы и пути развития / Н. И. Воропай, А. З. Гамм // Электричество. – 2021. – № 5. – С. 2–9.
8. Кобец, Б. Б. Управление спросом в интеллектуальных энергосистемах / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова // Известия РАН. Энергетика. – 2023. – № 2. – С. 53–62.
9. Шевченко, С. Ю. Применение искусственного интеллекта для диагностики оборудования электрических сетей / С. Ю. Шевченко, Д. А. Павлов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 4. – С. 68–74.
10. Гурьянов, А. В. Кибербезопасность технологических сетей электроэнергетики / А. В. Гурьянов, Е. С. Федоров // Информационные системы в промышленности. – 2024. – № 1. – С. 32–39.
11. Об утверждении Правил технологического присоединения [Электронный ресурс]: постановление Правительства РФ от 27.12.2010 № 1172 (ред. от 28.12.2022). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
12. О ценообразовании в сфере электроэнергетики [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 29.12.2011 № 1178 (ред. от 24.11.2022). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».