

УДК 621.31:004.7; 621.311:004.78

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРА ДАННЫХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ: ОТ SCADA ДО EDGE- АНАЛИТИКИ

Рубцов К.Д.¹, аспирант ФИЦ КНЦ СО РАН

Научный руководитель: Лосев В.В.², к.т.н., доцент

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ КНЦ СО РАН),
г. Красноярск [1]

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

Современный этап развития электроэнергетики характеризуется глубокой цифровой трансформацией, обусловленной внедрением интеллектуальных энергосистем (Smart Grid) и активным использованием распределённой генерации, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Эти изменения требуют принципиально новых подходов к сбору, обработке и анализу телеметрических данных, что ставит перед исследователями и инженерами ряд сложных задач. Согласно последним исследованиям MIT Energy Initiative (2023), объёмы данных, генерируемых современными энергосистемами, увеличились на 2-3 порядка по сравнению с традиционными SCADA-системами (Supervisory Control and Data Acquisition), что создаёт беспрецедентную нагрузку на инфраструктуру.

С развитием Индустрии 4.0 (четвёртая промышленная революция) представляет собой парадигму цифровизации производственных и инфраструктурных систем, основанную на интеграции киберфизических систем (CPS), интернета вещей (IoT), искусственного интеллекта (AI) и облачных вычислений. В контексте электроэнергетики это подразумевает:

- Глубокая автоматизация: переход от локальных систем управления к сквозным цифровым платформам);
- Цифровые двойники (Digital Twins): виртуальные модели энергообъектов для прогнозирования и оптимизации их работы;
- Децентрализация управления – внедрение edge-вычислений и распределённых решений на основе блокчейн-технологий.

Индустрия 4.0 трансформирует электроэнергетику, обеспечивая переход от централизованных систем к адаптивным, самоорганизующимся сетям. Од-

нако успешная реализация требует решения вопросов безопасности, стандартизации и экономической целесообразности.

Актуальность данной работы определяется следующими ключевыми факторами:

1. *Технологический прорыв.* Переход от централизованных систем к распределённым edge-архитектурам (граничные вычисления) открывает новые возможности для мониторинга и управления энергосистемами, но требует детального изучения их эффективности, энергопотребления и адаптивности к условиям массового интернета вещей (IoT).

2. *Практическая значимость.* Современные энергосистемы сталкиваются с необходимостью обработки данных в режиме реального времени, включая контроль быстропротекающих переходных процессов, характерных для ВИЭ, таких как солнечные и ветровые электростанции.

3. *Экономические и экологические аспекты.* Оптимизация энергопотребления и снижение затрат на передачу данных являются критически важными для устойчивого развития энергетической инфраструктуры.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ 3-ёх поколений технологий сбора данных в электроэнергетике:

- Централизованных SCADA-систем (1990-2010 гг.);
- Гибридных облачных платформ (2010-2020 гг.);
- Распределённых edge-архитектур.

Основные задачи исследования включают:

- оценку архитектурных особенностей и ограничений каждой технологии;
- анализ энергоэффективности и масштабируемости решений;
- исследование адаптивности технологий к условиям Smart Grid и распределённой генерации.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к оценке технологий, учитывающем не только технические параметры (латентность, частоту опроса), но и экономические, экологические аспекты, а также требования кибербезопасности.

Практическая значимость исследования определяется возможностью использования его результатов для проектирования современных систем мониторинга и управления энергосистемами, а также для разработки рекомендаций по модернизации существующей инфраструктуры.

Методология исследования базируется на анализе научных публикаций, патентов и отраслевых отчётов, а также на моделировании ключевых сценариев работы энергосистем с использованием специализированного программного обеспечения (MATLAB, Simulink, SimInTech).

Централизованные SCADA-системы (1990-2010 гг.)

Классические SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition), разработанные в конце XX века, представляли собой значительный технологический прорыв для своего времени. Однако их архитектура, основанная на централизованном принципе сбора и обработки данных, сегодня демонстрирует существенные ограничения при работе в условиях Smart Grid и распределённой генерации [2].

Архитектурные особенности традиционных SCADA-систем включают 3 основных компонента.

А) На *нижнем уровне* находятся удалённые терминальные устройства (RTU), которые осуществляют сбор данных с полевых датчиков. Эти устройства, как правило, обладали ограниченной вычислительной мощностью и выполняли лишь базовые функции сбора и первичной обработки сигналов. В качестве альтернативы RTU иногда использовались программируемые логические контроллеры (PLC), которые дополнительно могли выполнять простейшие алгоритмы автоматического управления.

Б) *Средний уровень* архитектуры составляли системы связи, которые в большинстве случаев основывались на проводных технологиях. Наиболее распространёнными решениями были:

- Power Line Communication (PLC) – технология передачи данных по силовым линиям;
- Оптоволоконные линии связи;
- Выделенные медные линии.

В случаях, когда прокладка проводных соединений была невозможна или экономически нецелесообразна, применялись беспроводные технологии, преимущественно GPRS (General Packet Radio Service)/GSM (Global System for Mobile Communications) или радиоканалы в УКВ-диапазоне (ультракороткие волны). Однако эти решения имели существенные ограничения по пропускной способности и надёжности связи.

В) Верхний уровень системы представлял собой центральный сервер, который выполнял функции:

- Окончательной обработки и хранения данных;
- Визуализация информации через интерфейсы HMI (Human-Machine Interface);
- Формирования управляющих воздействий.

Главной проблемой данной архитектуры стало её принципиальное несоответствие современным требованиям к системам мониторинга и управления. В частности, можно выделить 3 ключевых ограничения:

1. Низкая частота опроса данных, составляющая обычно 2-10 секунд, совершенно недостаточна для контроля быстропротекающих процессов, характерных для современных энергосистем с распределённой генерацией

(включая возобновляемые источники энергии). Например, переходные процессы при работе солнечных электростанций требуют частоты опроса не менее 100-500 мс;

2. Каналы связи, рассчитанные на значительно меньшие объёмы передаваемой информации, становятся «узким горлом» системы. При увеличении количества подключённых устройств до десятков тысяч (умные счётчики, датчики состояния оборудования и т.д.) возникают коллизии и существенные задержки в передаче данных;

3. Отсутствие возможностей предварительной обработки данных на местах их сбора приводит к передаче избыточных объёмов «сырой» информации, что дополнительно нагружает каналы связи и центральный сервер;

Ярким примером данных проблем может служить сравнение производительности: традиционная SCADA-система начала 2000-х годов при работе с 10 тыс. умными счётчиками могла обрабатывать около 500 тыс. показаний в час, в то время как современные Smart Grid требуют обработки до 50 млн показаний в час (т.е. на 2 порядка больше).

Эти ограничения становятся особенно критичными в свете новых требований к энергосистемам, включающих:

- Необходимость мониторинга быстропротекающих переходных процессов;
- Обеспечение высокой точности измерений в реальном времени;
- Поддержку значительно большего количества точек мониторинга;
- Требования к кибербезопасности и отказоустойчивости.

Следовательно, классические SCADA-системы, сыгравшие важную роль в автоматизации энергетики XX века, сегодня требуют принципиальной модернизации или замены на более современные решения, способные соответствовать новым вызовам цифровой трансформации отрасли.

На рисунке 1 представлена централизованная SCADA-система, которая наглядно показывает работу данной системы. Данная многоуровневая архитектура является стандартом для построения систем диспетчеризации и автоматизации промышленных процессов.

На верхнем уровне системы расположены операторские станции, оснащённые человеко-машинным интерфейсом (HMI). Эти рабочие станции обеспечивают визуализацию технологических процессов в реальном времени с частотой обновления 1-5 секунд. Для связи между компонентами используется протокол Ethernet (TCP/IP), обеспечивающий скорость передачи данных до 1 Гбит/с с задержкой не более 100 мс. Особенностью современных реализаций является применение web-технологий (HTML5, WebGL), позволяющих осуществлять удалённый мониторинг через стандартные браузеры [3].

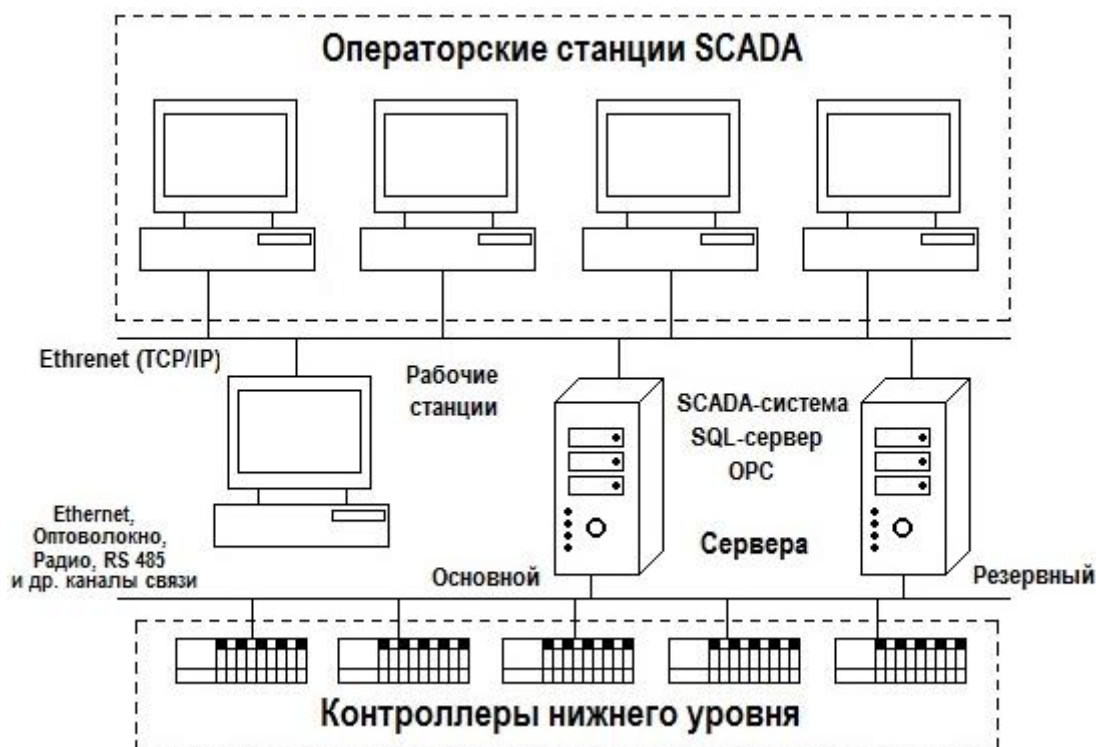


Рисунок 1 – Централизованная SCADA-система

Промежуточный уровень включает серверную инфраструктуру, состоящую из нескольких ключевых компонентов. SCADA-сервер выполняет функции сбора и первичной обработки данных, используя такие протоколы как OPC UA (Unified Architecture) с поддержкой механизма подписок (PubSub). SQL-сервер обеспечивает хранение исторических данных в реляционной базе с возможностью временной привязки измерений (time-series data). Важной особенностью является реализация механизма горячего резервирования (hot-standby) с автоматическим переключением при отказе основного сервера за время менее 500 мс.

Для обеспечения надёжности связи применяются разнородные каналы передачи данных:

- Оптоволоконные линии (до 40 км) с иммунитетом к электромагнитным помехам;
- Беспроводные технологии (LoRaWAN, Wi-SUN) для удалённых объектов;
- Проводные промышленные сети (RS-485 с протоколом Modbus RTU) для подключения устаревшего оборудования.

Низкий уровень системы представлен программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) и удалёнными терминальными устройствами (RTU). Эти устройства осуществляют:

- Дискретный и аналоговый ввод/вывод с частотой опроса 10-100 мс;

- Локальное выполнение алгоритмов управления в соответствии со стандартом IEC 61131-3;
- Предварительную обработку данных (фильтрацию, масштабирование) перед передачей на верхний уровень.

Принцип работы системы основан на двунаправленном потоке данных. Восходящий поток включает передачу измерений от датчиков через ПЛК на сервер с последующей записью в базу данных и отображением на операторских станциях. Нисходящий поток представляет собой команды управления от оператора через НМІ к исполнительным механизмам.

Гибридные облачные платформы (2010-2020 гг.)

Гибридные облачные платформы стали одним из ключевых технологических трендов в период с 2010 по 2020 годы, трансформируя подходы к развертыванию, управлению и масштабированию ИТ-инфраструктуры. Их появление было обусловлено необходимостью совмещения преимуществ публичных и частных облаков, что позволило организациям оптимизировать затраты, повысить гибкость и обеспечить соответствие жестким требованиям регуляторов. В отличие от традиционных моделей, гибридное облако предоставляет возможность распределять загрузку между локальными дата-центрами и публичными облачными сервисами, такими как AWS (Amazon Web Services), Microsoft Azure или Google Cloud Platform, с возможностью динамического перераспределения ресурсов в зависимости от текущих бизнес-потребностей.

Одним из ключевых драйверов распространения гибридных облачных решений стала проблема data sovereignty и требований к локализации данных, особенно актуальных для финансового сектора и государственных учреждений. Организации получили возможность хранить критически важные или чувствительные данные в приватных зонах, одновременно используя публичные облака для обработки менее конфиденциальной информации или для масштабируемых вычислений. Технологии виртуализации и программно-определяемых дата-центров (SDDC) сыграли важную роль в обеспечении совместимости между разнородными средами, а появление контейнеризации (Docker, Kubernetes) значительно упростило оркестрацию загрузки в гибридных сценариях.

Архитектурно гибридные облака базируются на принципах единого управления ресурсами через унифицированные API и системы мониторинга, такие как VMware vRealize, Red Hat CloudForms или OpenStack. Это позволяет администраторам контролировать распределенные инфраструктуры как единое целое, минимизируя операционные накладные расходы. Кроме того, развитие технологий гибридных сетей, включая SD-WAN и приватные каналы подключения (AWS Direct Connect, Azure ExpressRoute), обеспечило доста-

точную пропускную способность и низкие задержки для межоблачного взаимодействия.

На рисунке 2 представлен список ключевых технологий и концепций, связанных с современными IT-тенденциями и инфраструктурой. Данный рисунок отражает эволюцию IT-инфраструктуры, переход от локальных решений к облачным технологиям и распределённым системам.



Рисунок 2 – Работа с облаком данных

С точки зрения экономики, гибридные модели позволили предприятиям избежать привязки к поставщику и снизить TCO (Total Cost of Ownership) за счет оптимизации лицензионных расходов и более рационального использования вычислительных мощностей. Однако внедрение таких решений потребовало значительных инвестиций в перепроектирование legacy-систем и обучение персонала, а также породило новые вызовы в области кибербезопасности, поскольку периметр защиты становился более распределенным и сложным для контроля.

К 2020 году гибридные облака перешли из категории экспериментальных технологий в mainstream, став стандартом для крупных корпораций и государственных структур. Развитие передовых вычислений и 5G-сетей дополнительно ускорило этот процесс, так как гибридные архитектуры оказались идеальным решением для распределенных сценариев с требованиями к низкой латентности. Таким образом, данный период можно охарактеризовать как этап зрелости гибридных облачных платформ, заложивших основы для

последующей эволюции в направлении мультиоблачных и распределенных cloud-native (облачный интерфейс) решений.

Распределённые edge-архитектуры (2020-н.в.)

С начала 2020-х годов в IT-инфраструктурах наблюдается стремительный рост интереса к распределённым edge-архитектурам, что обусловлено необходимостью обработки данных ближе к их источнику — IoT-устройствам, промышленным датчикам, автономным системам и мобильным приложениям. Этот подход кардинально отличается от традиционных централизованных облачных моделей, где вычисления происходят в удалённых дата-центрах, вызывая задержки и повышенную нагрузку на сети. Edge-вычисления переносят вычислительные мощности на периферию сети, сокращая latency до минимума и обеспечивая работу в режиме реального времени, что критически важно для таких сфер, как телемедицина, беспилотный транспорт, умные города, интернет вещей (IoT) и промышленный интернет вещей (IIoT).

Технологической основой edge-архитектур стали микросервисы и контейнеризация (Kubernetes, Docker), позволяющие развертывать и масштабировать приложения на распределённых узлах с минимальными накладными расходами. Параллельно развитие lightweight-виртуализации (Firecracker, Kata Containers) и unikernel-решений позволило оптимизировать выполнение загрузки на ресурсоограниченных устройствах. Важную роль сыграло появление специализированных edge-серверов и микро-дата-центров, размещаемых непосредственно на предприятиях, в телеком-узлах или даже в транспортных хабах. Такие устройства, как AWS Outposts, Azure Stack Edge и частные решения на базе OpenStack или KubeEdge, обеспечивают гибридную интеграцию между облачными платформами и локальными edge-узлами [4].

Сетевые технологии также претерпели значительные изменения: развёртывание 5G-сетей с сверхнизкой задержкой и network slicing (нарезка сети) позволило edge-системам получать гарантированную пропускную способность и приоритезацию трафика. Одновременно развитие SDN (Software-Defined Networking) и intent-based networking упростило управление сложными распределёнными топологиями, обеспечивая автоматическое перераспределение ресурсов в зависимости от текущих потребностей. Особое внимание уделяется безопасности: zero-trust-архитектуры и децентрализованные системы аутентификации (на основе блокчейна или распределённых PKI) минимизируют риски, связанные с увеличением числа потенциальных точек атаки.

На рисунке 3 представлена схематично архитектура edge-решения для микросетей. Данная схема отражает современный подход к построению промышленных IoT-систем, где важна интеграция аппаратного мониторинга, высокопроизводительных вычислений, аналитических инструментов и масшта-

бируемого хранилища. Архитектура демонстрирует принцип модульности, позволяющий гибко адаптировать систему под конкретные задачи (например, предиктивная аналитика, управление энергопотреблением, киберфизические системы).



Рисунок 3 – Архитектура edge-решения для микросетей

С экономической точки зрения edge-вычисления снижают затраты на передачу и хранение данных, поскольку значительная часть информации обрабатывается локально, а в облака отправляются лишь агрегированные результаты или критически важные метрики. Однако внедрение таких систем требует значительных инвестиций в инфраструктуру, перепроектирование legacy-приложений под edge-модель и подготовку кадров, способных работать с распределёнными гетерогенными средами. Кроме того, остаются нерешёнными вопросы стандартизации: отсутствие единых протоколов взаимодействия между edge-устройствами разных вендоров может создавать проблемы совместимости.

К 2024 году edge-архитектуры стали неотъемлемой частью стратегий цифровой трансформации, особенно в отраслях с высокими требованиями к скорости и автономности. Развитие квантовых вычислений и нейроморфных процессоров в будущем может ещё больше ускорить этот тренд, обеспечив выполнение сложных алгоритмов ИИ непосредственно на edge-устройствах. Таким образом, распределённые edge-системы представляют собой не просто эволюцию облачных технологий, а принципиально новый этап в развитии вычислительных инфраструктур, ориентированных на децентрализацию и мгновенную обработку данных.

Современные энергосистемы требуют принципиально новых подходов к сбору и обработке данных, что обусловлено ростом распределённой генерации, внедрением интеллектуальных сетей (Smart Grid) и необходимостью перехода к цифровым подстанциям. В таблице 1 представлен детальный сравнительный анализ 3-ёх поколений технологий, описанных выше.

Представленная таблица 1 демонстрирует 3 ключевых этапа развития систем управления и мониторинга в промышленности и энергетике:

А) *Централизованные SCADA-системы* (архаичная иерархическая модель) основаны на жёсткой привязке к проводной инфраструктуре и единой точке сбора данных, что обуславливает высокую латентность (100-1000 мс) и ограниченную масштабируемость;

Таблица 1 – Сравнительная таблица 3-ёх поколений технологий сбора данных в электроэнергетике

№ п/ п	Критерий	Централизо- ванные SCADA- системы	Гибридные облачные платформы	Распределённые edge- архитектуры
1	Архитектура	Иерархическая (RTU/PLC -> Центральный сервер	Гибридная (локальные серверы + публичное облако)	Децентрализованная (edge-узлы + fog-компьютинг)
2	Частота опроса данных	2-10 с	0,5-2 с	10-500 мс (режим реального времени)
3	Латентность	Высокая (100-1000 мс)	Средняя (50-200 мс)	Ультранизкая (< 10 мс)
4	Обработка данных	Только на центральном сервере	Частичная предобработка в облаке	Локальная аналитика (TinyML, edge-аналитика)
5	Масштабируемость	Ограничена пропускной способностью каналов связи	Высокая за счёт облачных ресурсов	Экспоненциальная (горизонтальное масштабирование edge-узлов)
6	Энергоэффективность	Низкая (высокое энергопотребление RTU и серверов)	Средняя (оптимизация через виртуализацию)	Высокая (RISC-архитектуры, нейроморфные чипы)
7	Кибербезопасность	Уязвима (единая точка отказов)	Улучшена (гибридные модели, сегментация сети)	Zero-trust-архитектура, блокчейн для аутентификации
8	Стоимость развёртывания	Высокая (проводная инфраструктура)	Средняя (CAPEX на облако, OPEX на поддержку)	Гибкая (модульные edge-устройства, снижение затрат на передачу данных)

№ п/ п	Критерий	Централизо- ванные SCADA- системы	Гибридные облачные платформы	Распределённые edge- архитектуры
9	Примеры техноло- гий	Modbus, DNP3, OPC	AWS IoT Greengrass, Azure IoT Edge	KubeEdge, NVID- IA Jetson, Lo- RaWAN
10	Применения в энергетике	Мониторинг ЛЭП, базовый сбор телеметрии	Умные счёт- чики, про- гнозная ана- литика	Автономные микросети, пре- диктивное об- служивание обо- рудования
11	Главные ограни- чения	Низкая скорость, перегрузка кана- лов связи	Зависимость от облачных провайдеров	Сложность управления рас- пределённой ин- фраструктурой

Б) *Гибридные облачные платформы* представляют собой переходный этап, сочетающий локальные вычислительные ресурсы с облачной аналитикой, однако сохраняющий зависимость от интернет-провайдеров и облачных сервисов;

В) *Распределённые edge-архитектуры* реализуют принцип децентрализации, перенося обработку данных на периферийные узлы, что обеспечивает ультранизкую задержку (< 10 мс) и устойчивость к отказам за счёт fog-компьютинга.

При этом необходимо отметить, что централизованные системы страдают от фундаментального ограничения пропускной способности каналов связи (2-10 с на опрос), что делает их непригодными для задач реального времени. Edge-архитектуры, напротив, обеспечивают детерминированную задержку (10-500 мс) благодаря локальной обработке на RISC-архитектурах (например, NVIDIA Jetson) и минимизации передачи данных.

Таким образом, настоящее исследование посвящено анализу эволюции технологий автоматизированного сбора данных в электроэнергетике, начиная с централизованных SCADA-систем и заканчивая современными распределёнными edge-архитектурами. Проведённый сравнительный анализ позволил выявить ключевые тенденции, преимущества и ограничения каждого из 3-ёх поколений технологий, а также определить их соответствие требованиям цифровой трансформации энергетического сектора.

Проведённое исследование демонстрирует, что переход от централизованных SCADA-систем к распределённым edge-архитектурам является зако-

номерным этапом цифровой трансформации энергетики. Современные edge-решения не только устраняют недостатки предыдущих поколений технологий, но и открывают новые возможности для управления сложными, распределёнными энергосистемами. Результаты работы могут быть использованы как научным сообществом для дальнейших исследований, так и инженерами-практиками при проектировании и модернизации инфраструктуры. Внедрение edge-технологий позволит обеспечить устойчивое развитие энергетического сектора в условиях роста доли ВИЭ и повышения требований к надёжности и безопасности.

При этом стоит выделить замечания и перспективы для будущих исследований:

1. Внедрение edge-технологий требует решения проблем стандартизации и совместимости, что отмечено в работе. Для дальнейших исследований актуальным будет анализ конкретных отраслевых стандартов и их адаптации под edge-среду.

2. Несмотря на преимущества edge-архитектур, их массовое применение сдерживается необходимостью перепроектирования legacy-систем и подготовки кадров. Эти аспекты могут стать темой отдельного исследования.

3. Перспективным направлением является интеграция edge-вычислений с перспективными технологиями (например, квантовые вычисления и ИИ), что позволит увеличить эффективность энергосистем [5-11].

Список литературы:

1. Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., et al. (2011). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), 529–539. DOI: 10.1109/TII.2011.2166794.
2. Farhangi, H. (2014). The Path of the Smart Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18–28. DOI: 10.1109/MPE.2009.934876.
3. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., et al. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
4. Khan, R. H., Khan, J. Y. (2013). A Comprehensive Review of the Application Characteristics and Traffic Requirements of a Smart Grid Communications Network. *Computer Networks*, 57(3), 825–845. DOI: 10.1016/j.comnet.2012.11.002.
5. Khan, R. H., Khan, J. Y. (2013). A Comprehensive Review of the Application Characteristics and Traffic Requirements of a Smart Grid Communications Network. *Computer Networks*, 57(3), 825–845. DOI: 10.1016/j.comnet.2012.11.002.
6. Четвёртая промышленная революция / [Электронный ресурс] //

Википедия : [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D1%82%D0%B2%D1%91%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%86%D0%B8%D1%8F (дата обращения: 13.07.2025).

7. Общие понятия и структура SCADA-систем / [Электронный ресурс] // Кафедра технологии бетона и строительных материалов : [сайт]. — URL: <https://tbsm.bstu.by/wp-content/uploads/2021/03/SCADA.pdf> (дата обращения: 13.07.2025).

8. Гвоздева, В.А. Информатика, автоматизированные информационные технологии и системы. / В.А. Гвоздева. — М.: ИНФРА-М, 2018. — 544 с.

9. МЭК 61850-7-420:2021. Коммуникационные сети и системы для автоматизации электростанций и подстанций. Женева: Международная электротехническая комиссия.

10. Хальясмаа А. И. Оценка состояния силовых трансформаторов на основе анализа данных технической диагностики / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, М. В. Осотова // Вестник ЮУрГУ. 2013. Т. 13. № 2. С. 114 – 120.

11. Системы автоматизации учета энергоресурсов // ПРОАГРЕГАТ URL: <https://proagregat.com/energetika/sistemy-avtomatizatsii-ucheta-energoresursov/> (дата обращения: 12.07.2025).