

Построение единого информационного пространства системы управления производственным оборудованием в территориально распределенных энергетических компаниях

А. Р. Денисов[✉], А. Е. Никулин, Р. В. Михайлов, В. Миридаштаки

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)
197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф

Аннотация. Статья посвящена проблеме построения единого информационного пространства (ЕИП) для систем управления производственным оборудованием (УПО) в распределенных энергетических компаниях. Актуальность обусловлена необходимостью перехода от планово-реактивных моделей обслуживания к интеллектуальному управлению проактивными ремонтами на основе данных, что критически важно для повышения надежности, безопасности и экономической эффективности в условиях цифровой трансформации.

Цель исследования – проектирование архитектуры ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний с филиальной структурой и разнородным составом энергообъектов.

Методы исследования. В качестве методологической основы предлагается применение управления архитектурой предприятия (Enterprise Architecture, EA), обеспечивающей системный подход к интеграции бизнес-целей, данных, приложений и технологической инфраструктуры.

Результаты. Результатом исследования является адаптация эталонной модели архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0) для иерархических структур энергокомпаний. Авторы выявляют несоответствие стандартной последовательной модели RAMI 4.0 реальной практике и предлагают каскадную организацию архитектуры с обратными связями между уровнями. Проиллюстрирована практическая реализация модели, обеспечивающая сквозную интеграцию данных от датчиков до систем поддержки принятия решений.

Заключение. Предлагаемый подход позволяет создать интегрированную и адаптивную систему УПО, открывающую путь к внедрению предиктивной и прескриптивной аналитики, цифровых двойников и, как следствие, к переходу на управление, основанное на данных.

Ключевые слова: энергетические компании, территориально распределенные энергетические компании, территориальные сетевые организации, архитектура предприятия, техническое обслуживание и ремонт, RAMI 4.0

Поступила 22.01.2026, одобрена после рецензирования 15.04.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Денисов А. Р., Никулин А. Е., Михайлов Р. В., Миридаштаки В. Построение единого информационного пространства системы управления производственным оборудованием в территориально распределенных энергетических компаниях // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 34–48. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-34-48

Building a unified information space for the enterprise asset management system in distributed energy companies

A.R. Denisov, A.E. Nikulin, R.V. Mikhailov, V. Miridashtaki

Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia

Abstract. The paper addresses the problem of building a unified information space for production equipment management systems in distributed energy companies. The relevance is driven by the necessity to transition from planned-reactive maintenance models to intelligent, data-driven proactive maintenance management, which is critical for enhancing reliability, safety, and cost-effectiveness in the context of digital transformation.

Aim. The objective of the study is to design the architecture of a unified information space for production equipment management systems in geographically distributed, branch-structured energy companies with heterogeneous power facilities.

Research methods. As a methodological foundation, the application of Enterprise Architecture management is proposed, ensuring a systematic approach to integrating business goals, data, applications, and technological infrastructure.

Results. The research result is an adaptation of the Reference Architecture Model for Industry 4.0 (RAMI 4.0) for the hierarchical structures of energy companies. The authors identify a discrepancy between the standard sequential RAMI 4.0 model and real-world practice and propose a cascade organization of the architecture with feedback loops between levels. The practical implementation of the model is illustrated, ensuring end-to-end data integration from sensors to decision support systems.

Conclusion. The proposed approach enables the creation of an integrated and adaptive enterprise asset management system, paving the way for the implementation of predictive and prescriptive analytics, digital twins, and consequently, a transition to data-driven management.

Keywords: energy companies, distributed grid companies, territorial grid organizations, enterprise architecture, maintenance and repair, RAMI 4.0

Submitted 22.01.2026,

approved after reviewing 15.04.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Denisov A.R., Nikulin A.E., Mikhailov R.V., Miridashtaki V. Building a unified information space for the enterprise asset management system in distributed energy companies. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 34–48. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-34-48

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня энергетические компании переживают серьезные изменения, обусловленные растущим спросом на энергию, ужесточением экологических норм, развитием возобновляемых источников энергии и стремительным прогрессом в цифровых технологиях. В таких условиях существенно возрастает значимость цифровой трансформации, которая связана не только с внедрением новых цифровых технологий, но и с глубоким переосмыслением бизнес-моделей, операционных процессов, взаимодействия с заинтересованными сторонами [1]. Это позволяет не только оптимизировать текущую деятельность, обеспечивая безопасность и надежность энергоснабжения, но и получить новые конкурентные преимущества при формировании энергетического ландшафта будущего.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Ключевым аспектом цифровой трансформации является интеграция на всех уровнях управления энергетических компаний и их объединений (холдингов) [1]. В данной работе под территориально распределенными энергетическими компаниями понимаются организации, обладающие многоуровневой иерархической структурой управления, включающей холдинг, дочерние общества (в том числе территориальные сетевые организации¹), территориальные подразделения (филиалы) и непосредственно объекты энергетики. Данное определение применимо к любым энергетическим холдингам или корпорациям с разветвленной филиальной сетью и разнородными активами.

Одним из ключевых процессов в территориально распределенных энергетических компаниях является управление производственным оборудованием (УПО), цифровизация которого позволит как автоматизировать рутинные процессы (от удаленного мониторинга оборудования до автоматического сбора и обработки данных) [2], так и улучшить управление активами [3], когда соответствующие системы в сочетании с цифровыми двойниками [4] обеспечивают полный жизненный цикл производственного оборудования от планирования до вывода из эксплуатации, оптимизируя его использование и снижая затраты на владение. Важными процессами УПО являются техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) [5]. Рост сложности оборудования, ужесточение требований к безопасности и необходимость оптимизации затрат требуют перехода от планово-реактивного обслуживания к интеллектуальному управлению ремонтами по фактическому состоянию оборудования. Такой подход значительно повышает надежность и безопасность энергосистем, предотвращает критические отказы и оптимизирует финансовые затраты, обеспечивая устойчивое и бесперебойное энергоснабжение.

Решение задач УПО в первую очередь связано с внедрением систем поддержки принятия решений на основе прогнозной аналитики и искусственного интеллекта [5], что невозможно без качественных данных. Однако в процессе проектирования ИТ-инфраструктуры энергетических компаний данные о вспомогательных процессах, включая УПО, выводятся за рамки анализа и моделирования, что делает невозможным использование предиктивных методов аналитики [6]. Таким образом, для создания интеллектуальных систем УПО требуется формирование единого информационного пространства (ЕИП), обеспечивающего консолидацию и обмен данными по всем производственным процессам, включая задачи управления диагностическим обследованием и ТОиР [7–10]. Такое решение позволит преодолеть барьеры, характерные для территориально распределенных энергетических компаний. К информационным барьерам относится островная автоматизация, при которой данные изолированы в несвязанных системах (SCADA, EAM, ERP). Технологические барьеры проявляются в неоднородности существующих систем и отсутствии стандартизированных интерфейсов, что не позволяет сформировать единый унифицированный процесс подключения ко всему парку оборудования. На практике это часто означает, что даже на одной подстанции используются разнородные АСУ ТП и несвязанные базы данных оборудования, что делает невозможной автоматическую консолидацию информации без специализированных адаптеров. Организационные ограничения связаны с дефицитом междисциплинарных кадров и сложностью адаптации процессов. Нормативные требования (в первую очередь ФЗ № 187-ФЗ²) накладывают жесткие рамки на архитектуру и выбор средств защиты. Экономические барьеры определяются высокими первоначальными затратами и длительным сроком окупаемости.

¹Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 (ред. от 27.10.2025 с изм. от 08.08.2024)

²Федеральный закон от 26.07.2017 №187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (в ред. Федерального закона от 10.07.2023 № 312-ФЗ, от 07.04.2025 № 58-ФЗ)

В этих условиях особую значимость приобретает методология управления архитектурой предприятия (Enterprise Architecture Management, EA), которая обеспечивает системность при проектировании, планировании и реализации изменений в компании. Применение данной концепции EA при построении ЕИП УПО позволяет преодолеть указанные барьеры, эффективно интегрировать цифровые решения в единое информационное пространство, оптимизировать производственные процессы, реализовать стратегию импортозамещения и через это достичь максимальной эффективности, избежать рисков и обеспечить устойчивое развитие компании [11–13].

Цели и задачи исследования

Цель исследования: спроектировать архитектуру ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний с филиальной структурой и разнородным составом энергообъектов.

Задачи исследования:

1. Определить роль EA в процессах построения ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний.
2. Выбрать архитектурный фреймворк для ЕИП системы УПО территориально распределенных энергетических компаний.
3. Определить основные архитектурные блоки и взаимосвязи между ними в ЕИП системы УПО в соответствии с выбранным фреймворком.

Методы исследования

Интеграция методов EA в процессы УПО позволит перейти от разрозненных подходов к целостной, стратегически выверенной системе. EA становится связующим звеном, обеспечивая согласованность между бизнес-целями, данными, приложениями и технологической инфраструктурой.

На основе принципов EA упрощается решение следующих задач:

- **Стратегическое согласование**, где EA обеспечивает оптимизацию инвестиций в УПО и ТОиР согласно стратегическим целям компании, направленным на повышение надежности, снижение издержек и минимизацию рисков.

- **Цифровые двойники** (Digital Twins), где EA является основой для создания и управления цифровыми двойниками. Она определяет, какие данные необходимо собирать с физического оборудования (через IoT-датчики), как эти данные будут интегрироваться с моделями двойников и как результаты моделирования будут использоваться для оптимизации работы оборудования, прогнозирования отказов и планирования ТОиР.

- **Автоматизация ТОиР**, где EA обеспечивает сквозную автоматизацию процессов ТОиР – от планирования до выполнения и контроля, что приводит к повышению эффективности и снижению ошибок. При этом EA упрощает переход от планово-предупредительного обслуживания к предиктивному (прогнозирование отказов) и прескриптивному (рекомендации по действиям) путем интеграции данных IoT, систем контроля оборудования и технологий машинного обучения с системами управления активами. Это значительно сокращает время простоя оборудования и операционные затраты.

- **Интеграция систем УПО**. На начальном этапе обмен между SCADA, EAM, CMMS, ERP и аналитическим контуром организуется преимущественно через XML-макеты, стандартные протоколы, ETL/ELT-процессы и брокеры данных вне режима реального времени. Вынесение ETL/ELT-слоя в отдельный интеграционный контур позволит орга-

низовать информационное взаимодействие с любыми системами независимо от их протоколов и форматов данных, обеспечивая поддержку пользователей и решение аналитических задач. Это приведет к повышению качества решения задач ТОиР, поддержки надежности и формирования материально-технических ресурсов без усложнения процедур принятия решений на оперативно-диспетчерском уровне. На последующих этапах архитектура может быть расширена за счет использования отраслевых стандартов и моделей обмена, что создает основу для дальнейшего семантического согласования данных об объектах электроэнергетики.

Решить указанные задачи невозможно без внедрения специализированных под УПО элементов. Так, на уровне архитектуры приложений задействованы:

- система управления активами (EAM) – ядро архитектуры приложений для УПО, обеспечивающее управление полным жизненным циклом активов – от планирования и закупок до эксплуатации и вывода из эксплуатации;
- система управления техническим обслуживанием (CMMS), обеспечивающая планирование, выполнение и учет работ по ТОиР;
- системы диспетчерского и оперативного управления производственными процессами (SCADA, MES) для получения данных о состоянии оборудования и удаленного управления;
- аналитические платформы для обработки данных с применением алгоритмов машинного обучения для предиктивной и прескриптивной аналитики;
- система управления проектами для планирования капитальных ремонтов и модернизации оборудования как отдельных проектов;
- цифровые двойники оборудования для моделирования поведения критически важного оборудования, тестирования сценариев, прогнозирования отказов, оптимизации производительности и планирования ТОиР.

На уровне архитектуры данных могут быть созданы:

- каталог всего производственного оборудования и глоссарий специализированных для УПО терминов;
- справочники основных данных об оборудовании (паспорта, спецификации, история эксплуатации, данные датчиков, конфигурации);
- хранилище оперативных данных реального времени с датчиков (IoT), установленных на оборудовании, для мониторинга состояния оборудования, выявления аномалий и сбора информации для предиктивной аналитики;
- шина бесшовного извлечения и обмена данными между информационными системами (SCADA, ERP, EAM, CMMS);
- хранилище неструктурированных данных (ремонтные журналы, изображения, видео), содержащих ценную информацию о состоянии оборудования;
- хранилище исторических данных об отказах, ремонтах и производительности оборудования для выявления трендов и прогнозирования.

Применение методов ЕА в процессах УПО энергетических компаний позволяет создать интегрированную, интеллектуальную и адаптивную систему, которая не только повышает эффективность и надежность оборудования, но и способствует достижению стратегических целей компании в условиях цифровой трансформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При построении ЕИП системы УПО важно реализовать бесшовную и эффективную работу с данными, поступающими с различных устройств и информационных систем. Также важно обеспечить отсутствие «функционального колодца», чтобы данные по УПО не были изолированы от других производственных процессов. Решать эти задачи целесообразно на

основе модели эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (Reference architecture Model for Industry 4.0, RAMI4.0) [14], утвержденной ГОСТ Р 59799–2021¹, описывающей принципы интеграции данных в распределенных информационных системах (рис. 1).

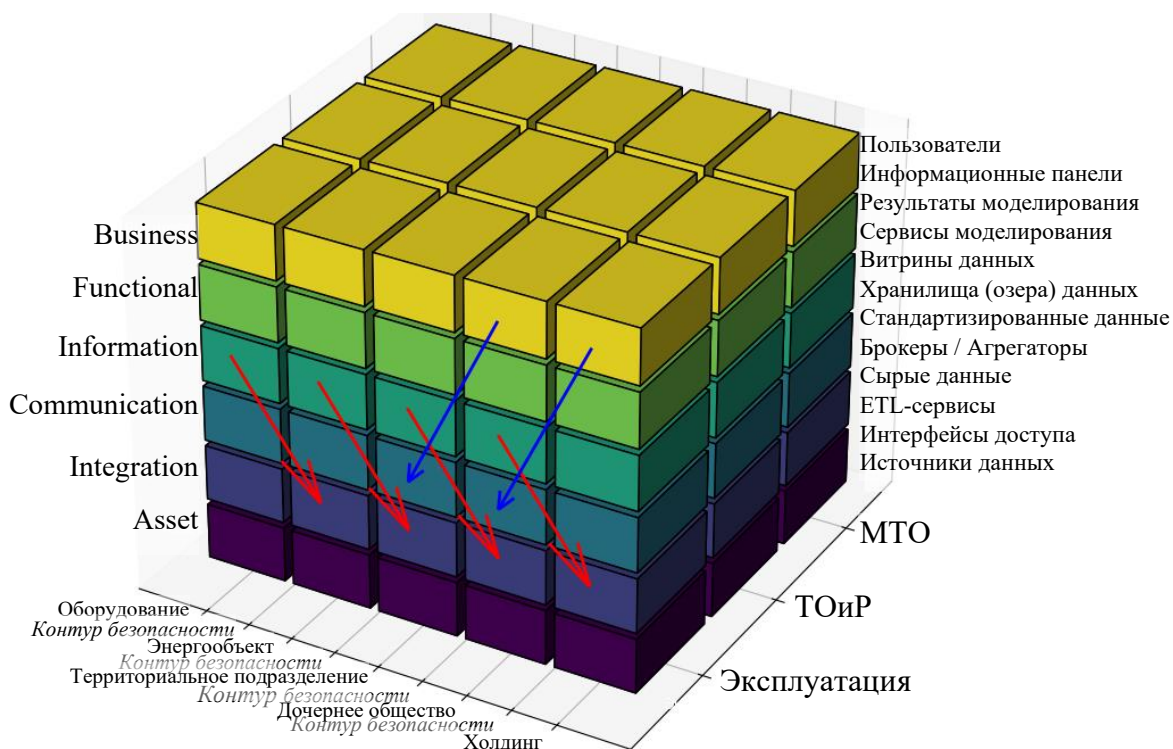


Рис. 1. Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI 4.0)

Fig. 1. Reference Architecture Model 4.0 (RAMI 4.0)

По оси «Жизненный цикл потока ценности» (Life Cycle Value Stream) необходимо указать все бизнес-процессы УПО. В упрощенном виде в работе были выделены процессы эксплуатации, ТОиР и материально-техническое обеспечение (МТО). При определении уровней иерархии следует придерживаться принятой в энергетических компаниях вертикально интегрированной модели информационных потоков, построенной на основе ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014² или ГОСТ Р 70841–2023³. При этом следует понимать, что в энергетических компаниях на уровне оборудования и ниже уже реализована полная автоматизация производственных процессов на базе SCADA-системы, поэтому эти уровни в работе рассматриваться не будут. Для описания слоев интеграции была использована принятая в RAMI4.0 последовательность от активов (Assets) до бизнес-процессов (Business). При этом было внесено уточнение, что каждый слой RAMI4.0 на практике разделяется на несколько подслоев. Так, слой активов разделяется на непосредственно источники данных (датчики, контроллеры, информационные системы) и интерфейсы доступа к ним (API, OPC UA, ODBC и др.). Слой интеграции (Integration) разделяется на слои ETL/ELT сервисов и сырых данных (Raw data). К слою интеграции при построении облачных систем также следует

¹ГОСТ Р 59799–2021. Умное производство. Модель эталонной архитектуры Индустрии 4.0 (RAMI4.0).

²ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014. Интеграция систем управления предприятием. Ч. 1. Модели и терминология.

³ГОСТ Р 70841–2023 Нефтяная и газовая промышленность. Сбор и обмен данными по надежности и техническому обслуживанию оборудования.

отнести слой «граничных вычислений» (Edge computing) [8, 10, 15]. Слой коммуникации (Communication) включает в себя систему брокеров, извлекающих и интегрирующих данные из разных источников, а также стандартизированные пакеты оперативных данных, подготовленных для хранения на информационном слое. К этому же слою следует отнести системы «туманных» вычислений (Fog computing), используемых для сбора и интеграции данных в распределенных облачных системах [15]. На информационном слое (Information) находятся как система хранения данных, созданная в соответствии со спецификой организации (Data Warehouse, Data Lakehouse, Data Mesh, Data Vault), так и слой витрин данных (DataMart), которые используются при моделировании и визуализации на последующих слоях. На функциональном слое (Functional) находятся сервисы моделирования, модели и результаты выполнения моделей. На бизнес-слое (Business) находятся лица, принимающие решения, и информационные панели (дашборды), реализующие поддержку принимаемых ими решений. При построении потоков данных на разных уровнях иерархии или для разных бизнес-процессов часть слоев может быть пропущена в зависимости от задачи.

При реализации RAMI4.0 архитектуры также было выявлено, что прописанный в стандарте последовательный переход между уровнями иерархии не соответствует практике построения корпоративных информационных систем в иерархических сетевых организациях, к которым относятся практически все энергетические компании. Иерархическое устройство таких компаний определяет, что обработанные и подготовленные данные функционального слоя предыдущего уровня иерархии являются источником данных для следующего, что показано красными стрелками на рис. 1. При этом в соответствии с требованиями информационной безопасности данные передаются не напрямую, а через специализированного брокера. Таким образом, информационный слой предыдущего уровня соответствует слою активов следующего уровня, что подразумевает не последовательное, а каскадное соединение, как это показано на рис. 2. Прямое воздействие с более высокого уровня на более нижний осуществляется в соответствии с синими стрелками на рис. 1 и 2, для чего, где это допустимо, также используются специализированные брокеры.

В соответствии с Федеральным законом от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»¹ и требованиями Приказа ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239² для систем управления производственным оборудованием, входящих в перечень объектов критической информационной инфраструктуры (п. 100, 101 Распоряжения Правительства РФ от 26.02.2026 № 360 р), необходимо обеспечить эшелонированную защиту, сегментирование сетей, организацию демилитаризованных зон и защиту информации при передаче по каналам связи.

В иерархической структуре территориально распределенной энергетической компании для этого создаются отдельные сегменты вычислительной сети для каждого уровня: энергообъект, территориальное подразделение, дочернее общество, холдинг. Для организации защищенного информационного взаимодействия между сегментами применяются брокеры, минимизирующие прямую коммуникацию подсистем, находящихся внутри и за пределами контуров безопасности. Для нисходящих потоков (передача управляющих воздействий, репликация справочников) используется брокер прямой связи, обеспечивающий контролируемую передачу данных в максимально защищенном режиме. Для восходящих

¹Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (в ред. Федерального закона от 10.07.2023 № 312-ФЗ, от 07.04.2025 № 58-ФЗ).

²Приказ ФСТЭК России от 25.12.2017 № 239.

потоков (сбор и агрегация оперативных данных) задействован брокер интеграции данных, осуществляющий прием, буферизацию, маршрутизацию и передачу информации на вышестоящие уровни. Контур безопасности на рисунках 3–5 показан серой оболочкой, охватывающей все слои архитектуры, что символизирует применение сертифицированных средств защиты на всех этапах передачи данных.

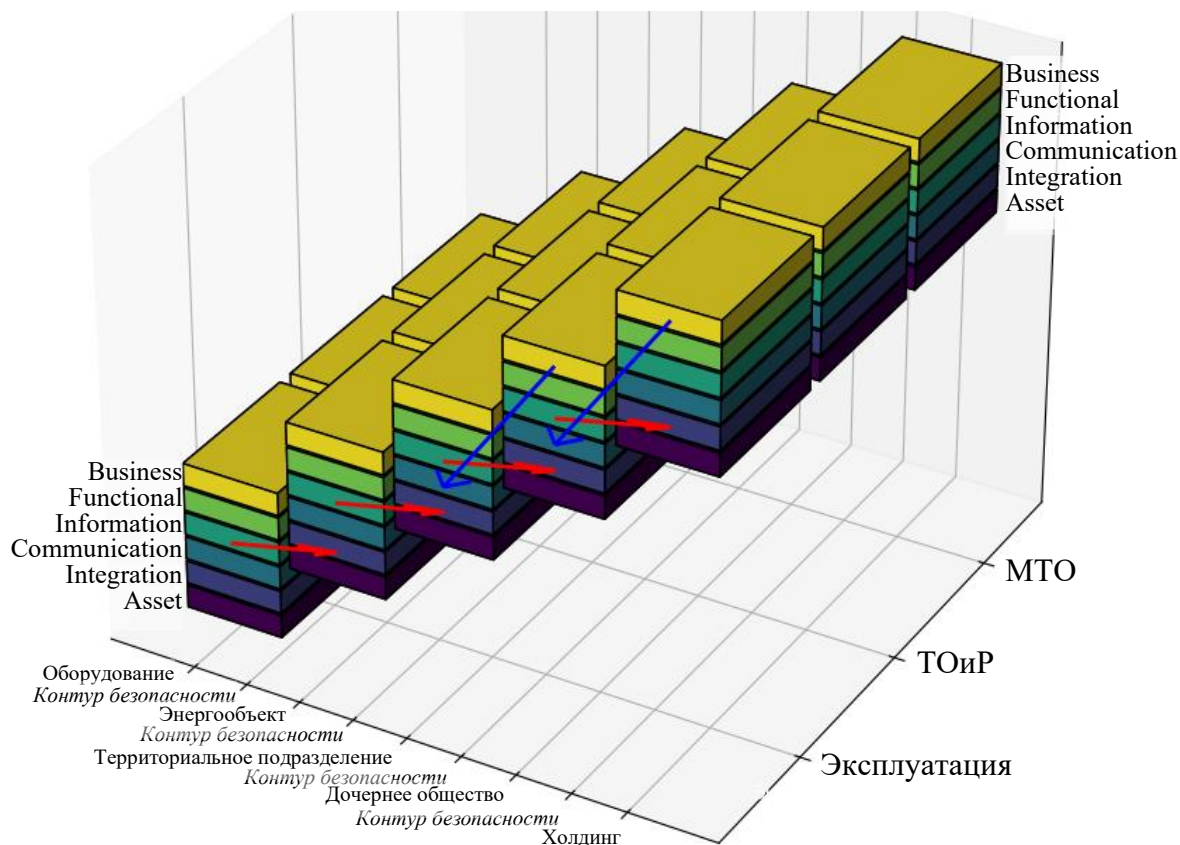


Рис. 2. Каскадная организация архитектуры RAMI4.0

Fig. 2. Cascaded architecture of the RAMI 4.0 model

Практическая реализация архитектуры рассматривается на примере пилотного объекта электрохозяйства – ЗРУ 10 кВ типовой подстанции 110/10 кВ. На пилотном уровне в контур интеграции включаются данные оперативного информационного комплекса (ОИК), подсистемы управления надежностью (паспортные данные, наработки на отказ, описания оборудования), автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) и рабочих мест оперативного персонала (данные с осмотров, выявленные дефекты и замечания к работе оборудования), что позволяет сформировать минимально жизнеспособный контур «данные – анализ – решение» для задач ТОиР. Ожидаемые эффекты включают снижение внеплановых простоев, повышение точности планирования ремонтов и рост информированности персонала. Полученная информация проходит первичную обработку и агрегацию, формируя информационную основу для управления на уровне технологического узла. Архитектура информационных потоков на уровне объекта приведена на рис. 3. Обеспечение качества данных реализуется на интеграционном слое архитектуры и дополняется организационными механизмами. В ETL/ELT-сервисах выполняются процедуры входной

валидации (проверка форматов, диапазонов, ссылочной целостности), нормализации (приведение к единым справочникам) и дедупликации. Для ключевых сущностей (оборудование, места установки, типы отказов) внедряется управление нормативно-справочной информацией (НСИ) с назначением ответственных владельцев. Контроль полноты, точности, своевременности и согласованности данных осуществляется через репозиторий метаданных, фиксирующий правила проверки и результаты валидации. При отклонении метрик ниже пороговых значений формируются уведомления для ответственных за данные на соответствующем уровне иерархии. Для обеспечения устойчивого качества данных также предусмотрены организационные мероприятия: назначение стюардов данных, ответственных за качество на местах; разработка и документирование политик, бизнес-правил и процедур контроля; регламентация процессов внесения изменений в справочники и оперативные данные. Сочетание технологических и организационных мер создает замкнутый контур управления качеством данных на всех этапах их жизненного цикла.

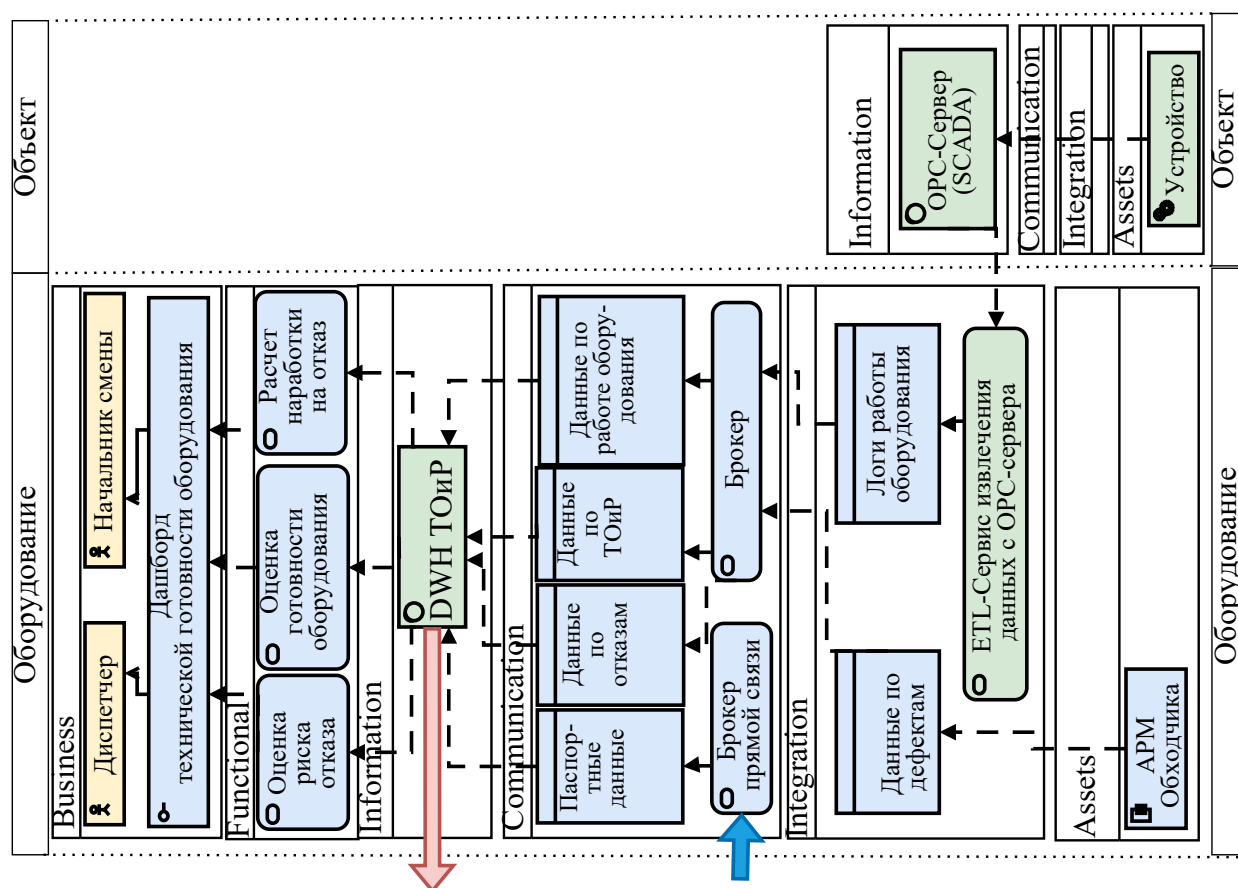


Рис. 3. Архитектура информационных потоков на уровне объекта

Fig. 3. Architecture of information flows within the object layer

При переходе на уровень территориального подразделения (ТП) данные от отдельных единиц оборудования объединяются в целостную картину состояния производственных активов. На этом уровне происходит не просто агрегация информации, а ее смысловое обогащение за счет выявления взаимосвязей между различными компонентами технологической системы. Именно на этом уровне происходит формирование опе-

ративных данных для планирования ТОиР. Интеграция с EAM и CMMS позволяет оптимизировать использование ресурсов и персонала, обеспечивая сбалансированное распределение рабочих мощностей и материальных запасов. На этом уровне особенно важным становится применение методов предиктивной аналитики и машинного обучения, позволяющих выявлять скрытые закономерности и прогнозировать развитие ситуаций на длительную перспективу. Архитектура информационных потоков на уровне ТП приведена на рис. 4.

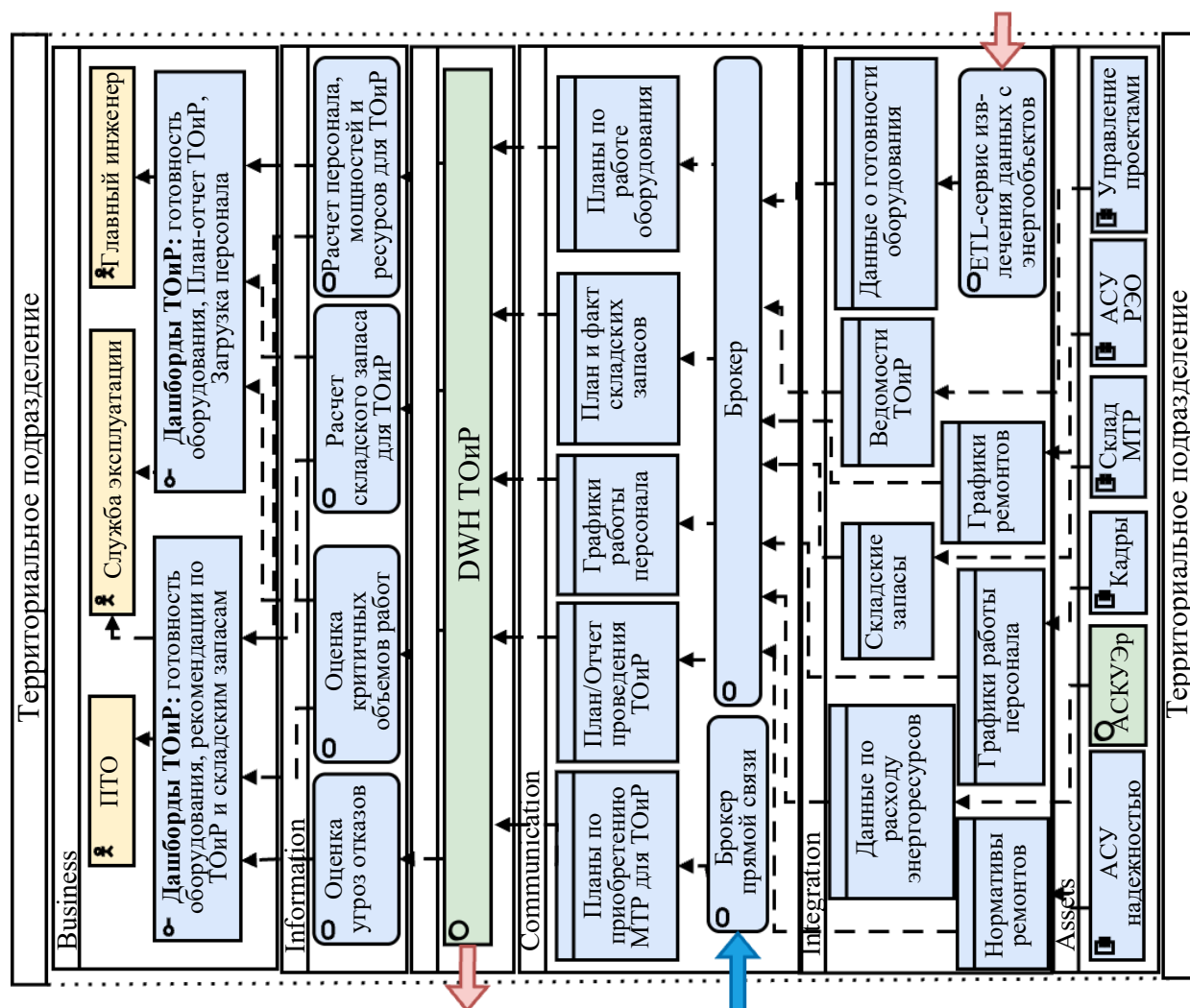


Рис. 4. Архитектура информационных потоков на уровне ТП

Fig. 4. Information flow architecture within the territorial division layer

На уровне дочернего общества (ДО) агрегированные данные с территориальных подразделений становятся основой для стратегического планирования и управления ТОиР и надежностью. Здесь осуществляется консолидация информации о наработке оборудования, истории отказов, затратах на техническое обслуживание, а также данных о качестве эксплуатации и соблюдении регламентов обслуживания. В соответствии с принципами ЕА эти данные используются для формирования производственных планов, бюджетов ТОиР и программ модернизации оборудования. Архитектура информационных потоков на уровне ДО и холдинга приведена на рис. 5.

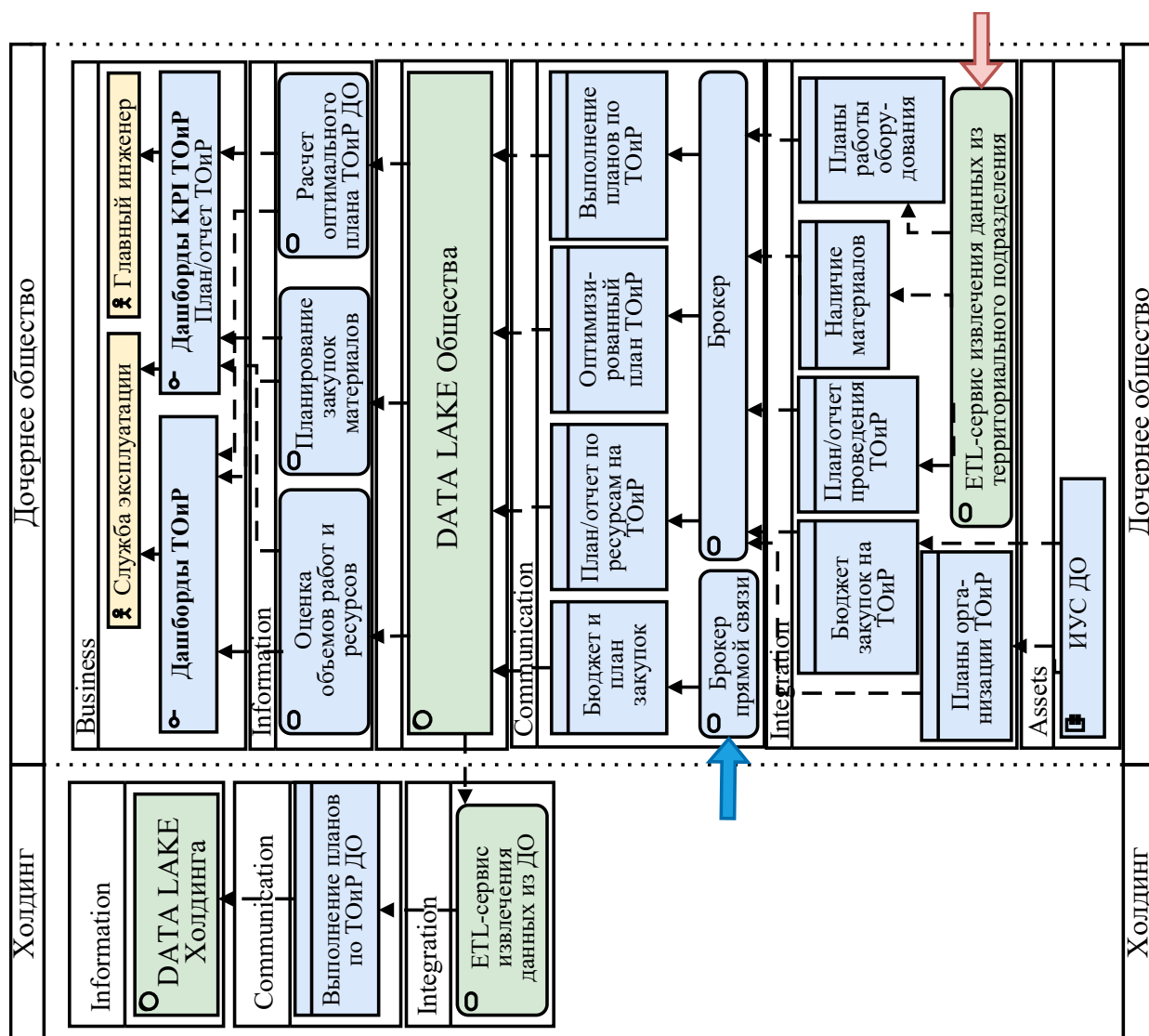


Рис. 5. Архитектура информационных потоков на уровнях ДО и холдинга

Fig. 5. Information flow architecture at the subsidiary and holding company layers

Особенностью предлагаемой архитектуры является наличие не только вертикальных, но и горизонтальных взаимодействий между уровнями управления. Вертикальные связи обеспечивают передачу данных, решений и управляющих воздействий между объектом, территориальным подразделением, дочерним обществом и холдингом. Горизонтальные связи реализуются через создание единого структурированного хранилища данных на каждом иерархическом уровне. В соответствии с логикой RAMI 4.0 хранилище консолидирует данные со всех источников, что обеспечивает пользователям одного уровня доступ к информации, необходимой для обмена практиками ТОиР, типовыми сценариями ремонтов, результатами диагностики, шаблонами аналитических моделей и сравнительными показателями эксплуатации. Такой подход позволяет, к примеру, сравнивать наработку на отказ однотипного оборудования в разных территориальных подразделениях и тиражировать наиболее эффективные методы диагностики и ремонта без дополнительных затрат на организацию специальных каналов обмена данными. При этом управленческие связи и организационная структура не изменяются, а предлагаемая архитектура создает лишь технологическую основу для информационного взаимодействия. Тактическая прямая связь

(от ДО к ТП) позволяет оптимизировать планы и графики обслуживания на среднесрочную перспективу. Оперативная прямая связь (от ТП к объекту) обеспечивает корректировку текущих процессов обслуживания на основе данных о фактическом состоянии оборудования. На уровне дочернего общества (территориальной сетевой организации) или холдинга формируются политики, приоритеты, модели и оптимизированные планы ТОиР, которые передаются на нижние уровни для исполнения и адаптации к текущей оперативной обстановке. При этом внедрение каскадной архитектуры не изменяет сложившиеся процессы принятия управленческих решений и организационную структуру; предлагаемая система оптимизирует исключительно информационные потоки – как вертикальные, так и горизонтальные. Оперативные решения и аварийные ремонты иницируются на уровне объекта или территориального подразделения в пределах установленных регламентов и лимитов. Благодаря сквозному характеру архитектуры данные о выполненных действиях и изменении состояния оборудования передаются на верхние уровни постфактум с минимальной задержкой, что позволяет корректировать модели и планы, но не подменяет существующие процедуры управления. При этом данные о выполнении планов и фактическом состоянии оборудования поступают обратно, создавая замкнутый контур управления. Такая организация информационного взаимодействия позволяет реализовать принцип непрерывного улучшения процессов ТОиР за счет адаптации моделей и алгоритмов на основе актуальных данных о реальной эксплуатации оборудования.

Важным аспектом информационного пространства является обеспечение интероперабельности компонентов системы через стандартизированные интерфейсы обмена данными. В соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 62264–1–2014 система должна поддерживать взаимодействие с существующими системами управления предприятием, включая ERP, EAM и MES-системы. Это обеспечивает согласованность данных и процессов на всех уровнях управления. Особое внимание уделяется вопросам кибербезопасности, учитывая критическую важность энергетической инфраструктуры. Реализация механизмов защиты информации соответствует требованиям регуляторов и обеспечивает безопасность передачи и хранения данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение предложенной архитектуры позволит перейти от традиционных методов обслуживания к интеллектуальным системам. В отличие от систем управления производственными активами (СУПА), которые ориентированы на корпоративное управление жизненным циклом активов (средне- и долгосрочное планирование, инвестиционные решения), предлагаемая архитектура формирует специализированный информационный контур оперативно-тактического уровня. Через интеграцию разнородных информационных потоков она преодолевает ключевые барьеры (островную автоматизацию, неполноту данных), наполняя существующие EAM-решения интеллектуальной аналитикой на основе телеметрии, машинного обучения и цифровых двойников. Таким образом, она выступает не заменой СУПА, а развитием аналитического и интеграционного уровня, обеспечивающим переход к предиктивному управлению.

Использование машинного обучения для прогнозирования остаточного ресурса оборудования в сочетании со сквозной интеграцией данных создает основу для существенного повышения эксплуатационной эффективности энергетических предприятий. Система обеспечит не только прогнозирование отказов, но и формирование оптимальных сценариев обслуживания, учитывающих как технические параметры оборудования, так и экономические аспекты эксплуатации.

Предложенное решение позволит не только снизить эксплуатационные риски, но и оптимизировать затраты на обслуживание инфраструктуры. Создание ЕИП предприятия и внедрение интеллектуальных систем поддержки принятия решений соответствует стратегическим целям цифровой трансформации в энергетике и создает основу для перехода к управлению на основе данных. Это открывает возможности для дальнейшего развития системы в направлении создания цифровых двойников производства и внедрения предиктивной аналитики, что позволит не только прогнозировать развитие событий, но и автоматически формировать оптимальные рекомендации по управлению техническим состоянием оборудования.

При этом энергетические компании, успешно интегрировавшие принципы ЕА в процессы цифровой трансформации, будут лучше подготовлены к вызовам будущего и обеспечат свое устойчивое развитие в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузовкова Т. А., Алмаева О. П., Сибейкин О. Ю., Чернышова П. С. Характер и компоненты цифровой трансформации мировой и национальной энергетики // Экономика и качество систем связи. 2023. № 4(30). С. 29–36. EDN: NAGEXG

Kuzovkova T.A., Almaeva O.P., Sibeikin O.Yu., Chernyshova P.S. The nature and components of the digital transformation of global and national energy. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi* [Economics and Quality of Communication Systems]. 2023. No. 4(30). Pp. 29–36. EDN: NAGEXG (In Russian)

2. Lindner M., Bank L., Schilp J., Weigold M. Digital Twins in manufacturing: A RAMI 4.0 Compliant Concept. *Sci.* 2023. Vol. 5(4). No. 40. DOI: 10.3390/sci5040040

3. Al-Fedaghi S., Al-Huwais N. Enterprise asset management as a flow machine. *International Journal of Modeling and Optimization.* 2018. Vol. 8. No. 5. Pp. 290–300. DOI: 10.7763/IJMO.2018.V8.667

4. Khalyasmaa A.I., Stepanova A.I., Eroshenko S.A., Matrenin P.V. Review of the digital twin technology applications for electrical equipment lifecycle management. *Mathematics.* 2023. No. 11. P. 1315. DOI: 10.3390/math11061315

5. Щербатов И. А. Система поддержки принятия решений при управлении ремонтами теплоэнергетического оборудования // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 3. Pp. 34–39. EDN: GIOXDI

Shcherbatov I.A. Decision support system for managing repairs of thermal power equipment. *International Journal of Open Information Technologies.* 2023. Vol. 11. No. 3. Pp. 34–39. (In Russian)

6. Milošević D.A., Ilić D., Vulić M. Machine learning for predictive maintenance in Industry 4.0: current trends and challenges. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering.* 2024. Vol.17. No.1. Pp. 19–24.

7. Гвоздяный С. Е., Мясков А. В. Российский и зарубежный опыт использования цифровых двойников в энергетике // Экономика промышленности. 2024. Т. 17. № 4. С. 378–387. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-4-1368

Gvozdyany S.E., Myaskov A.V. Russian and foreign experience of using digital twins in the energy sector. *Russian Journal of Industrial Economics.* 2024. Vol. 17. No. 4. Pp. 378–387. (In Russian)

8. Колосок И. Н., Коркина Е. С. Применение технологии граничной аналитики (EDGE ANALYTICS) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3(23). С. 28–39. DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.003

Kolosok I.N., Korkina E.S. Application of edge analytics technology to develop digital twins of Russia's united electric power system facilities. *Information and Mathematical Technologies in Science and Management.* 2021. No. 3(23). Pp. 28–39. (In Russian)

9. Плеханова А. Ф., Сухарев Д. Ю. Проблемы внедрения риск-ориентированного подхода к управлению активами электроэнергетической инфраструктуры промышленного предприятия с целью повышения его эффективности // *Modern Economy Success*. 2024. № 6. С. 166–174. DOI: 10.58224/2500-3747-2024-6-166-174

Plekhanova A.F., Sukharev D.Yu. Problems of implementing a risk-oriented approach to asset management of an industrial enterprise's electric power infrastructure in order to increase its efficiency. *Modern Economy Success*. 2024. No. 6. Pp. 166–174. DOI: 10.58224/2500-3747-2024-6-166-174. (In Russian)

10. Chen Ch., Fu H., Zheng Yu et al. The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning. *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. No. 71. Pp. 581–594. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.10.010

11. Hindarto D., Indrajit R. Eko, Dazk E. Sustainability of implementing enterprise architecture in the solar power generation manufacturing industry. *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*. 2021. Vol. 6. No. 1. Pp. 13–24. DOI: 10.33395/sinkron.v6i1.11115

12. Matharoo S. The role of enterprise architecture in the digital transformation of energy companies. *American Research Journal of Business and Management*. 2024. Vol. 10. No. 1. Pp. 65–69. DOI: 10.21694/2379-1047.24010

13. Zhao X. Research on management informatization construction of electric power enterprise based on big data technology. *Energy Reports*. 2022. No. 8. Pp. 535–545. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.05.124

14. Baptista L.F., Barata J. Piloting Industry 4.0 in SMEs with RAMI 4.0: an enterprise architecture approach. *Procedia Computer Science*. 2021. No. 19. Pp. 2826–2835. DOI: 10.1016/j.procs.2021.09.053

15. Ganguly B., Kodgire D., Ajani S.N. et al. Navigating Industry 4.0 frontiers: a scalable and resilient next-generation IoT Framework to implement future advancements in smart and adaptive industrial systems. *Journal of Electrical Systems*. 2024. No. 20-1s. Pp. 444–454.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Денисов А. Р. – общее руководство, определение плана и структуры статьи, анализ архитектуры RAMI 4.0;

Никулин А. Е. – определение архитектуры системы технического обслуживания и ремонта для распределенных энергетических компаний;

Михайлов Р. В. – определение требований к архитектуре энергетических компаний;

Миридаштаки В. – описание принципов создания единого информационного пространства с использованием методологии ЕА.

Contribution of the authors:

Denisov A.R. – general guidance, definition of the plan and structure of the article, analysis of the architecture of RAMI 4.0;

Nikulin A.E. – definition of the architecture of the maintenance and repair systems for distributed energy companies;

Mikhailov R.V. – definition of requirements for the architecture of energy companies;

Miridashtaki V. – description of the principles of creating a unified information space using the EA methodology.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Денисов Артем Руфимович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
iptema@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3359-4103>, SPIN-код: 2409-4547

Никулин Анатолий Евгеньевич, аспирант кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
nikulin.a.e@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2352-5869>, SPIN-код: 8739-6794

Михайлов Руслан Викторович, аспирант кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
rv.mikhailov@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7454-3119>, SPIN-код: 7258-5082

Миридаштаки Вахид, аспирант кафедры инноватики и технологического предпринимательства, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина);

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, литера Ф;
vahidmiri7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6619-1880>, SPIN-код: 1852-4591

Information about the authors

Artem R. Denisov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;
5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;

iptema@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3359-4103>, SPIN-code: 2409-4547

Anatoliy E. Nikulin, Postgraduate Student, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;

5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;
nikulin.a.e@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2352-5869>, SPIN-code: 8739-6794

Ruslan V. Mikhailov, Postgraduate Student, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;

5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;
rv.mikhailov@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7454-3119>, SPIN-code: 7258-5082

Vahid Miridashtaki, Postgraduate Student, Department of Innovatics and Technological Entrepreneurship, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”;

5, Lit. F, Professor Popov street, Saint Petersburg, 197376, Russia;
vahidmiri7@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6619-1880>, SPIN-code: 1852-4591