Контур подготовки и верификации данных для проактивного ТОиР на объектах энергетики

Никулин А.Е.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

nikulin.a.e@bk.ru

Денисов А.Р.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

iptema@yandex.ru

Аннотация. **В статье рассматривается проблема подготовки и верификации разнородных данных для систем проактивного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) в территориально-распределенных энергокомпаниях. Показано, что наличие автоматизированного сбора не гарантирует пригодности данных для совместного анализа из-за пропусков, неоднозначной интерпретации направлений энергии и противоречий между измерениями и состоянием оборудования. Предлагается обеспечивающий контур на основе методологии D-I-K-W, объединяющий данные автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) и оперативно-информационного комплекса (ОИК). Описаны методы нормализации направлений потоков энергии (Ц-01), проверки оперативных данных на наличие ошибок (Ц-07) и контроля согласованности коммерческого учета (Ц-02). Приведены результаты апробации на подстанции 110/10 кВ. В результате получены верифицированные данные, готовые для дальнейшего анализа в системе проактивного ТОиР, а также сформированы пользовательские статусы и информация об ограничениях использования данных, что позволяет снизить риски ошибочных диагностических выводов.**

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт; ТОиР; цифровая экосистема; DIKW; коммерческий учёт; АИИС КУЭ; АСКУ ЭР; оперативно-информационный комплекс; ОИК; верификация данных

I. Введение

Цифровая трансформация энергетического сектора формирует устойчивый запрос на переход от реактивной модели технического обслуживания и ремонта (ТОиР) к проактивной. В основе такой модели лежит предиктивная аналитика, позволяющая предупреждать отказы оборудования и оптимизировать эксплуатационные затраты на территориально-распределенных объектах [1, 2]. Однако эффективность любых прогнозных алгоритмов и диагностических моделей напрямую ограничена качеством и достоверностью исходных данных, циркулирующих в информационных системах энергокомпании [3].

В современной практике на подстанциях активно применяются автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) и оперативно-информационные комплексы (ОИК). Несмотря на высокую степень автоматизации сбора, сам факт наличия данных не гарантирует их пригодности для совместного анализа. Разрозненность информационных систем и отсутствие согласованных информационных потоков затрудняют совместное использование данных на разных уровнях управления энергокомпании [4]. Игнорирование этих факторов приводит к накоплению ошибок в аналитических моделях и, как следствие, к снижению доверия к результатам проактивного ТОиР.

Подготовка и контроль качества данных должны предшествовать их использованию в прикладных аналитических моделях [3, 5]. Для решения указанной проблемы необходим специализированный обеспечивающий контур, который выступает связующим звеном между первичными системами сбора и прикладными модулями диагностики. В данной работе рассматривается архитектура подготовки и верификации данных, объединяющая три взаимосвязанные цепочки обработки. Первая цепочка (Ц-01) отвечает за семантическую нормализацию направлений потоков энергии, устраняя неопределенность каналов. Вторая (Ц-07) выполняет верификацию оперативных данных, выявляя несоответствия между токовыми измерениями и состояниями оборудования. Третья (Ц-02) обеспечивает кросс-проверку согласованности данных коммерческого учета, определяя временные интервалы, пригодные для достоверных расчетов.

Целью исследования является разработка и апробация методов подготовки и верификации разнородных данных, обеспечивающих формирование «слоя доверия» для последующего анализа в системах проактивного ТОиР. В рамках работы решаются задачи формализации процедур нормализации энергопотоков, оперативной проверки состояний оборудования и контроля полноты данных коммерческого учета без изменения исходных значений. Апробация предложенного контура выполнена на реальном объекте электроснабжения – подстанции 110/10 кВ, что позволило оценить работоспособность методов и определить ограничения их применения в производственных условиях.

II. Методы и алгоритмы подготовки данных в контуре проактивного ТОиР

A. *Архитектура контура подготовки и верификации данных (D-I-K-W)*

Методологической основой предлагаемого решения выступает иерархическая модель преобразования информации (Data–Information–Knowledge–Wisdom), адаптированная для задач верификации энергетических данных [6]. Ее применение обеспечивает сквозную прослеживаемость от первичного числового значения до обоснованного решения специалиста.

На уровне данных (Data) рассматриваются разнородные исходные данные из АИИС КУЭ, ОИК и внутренних реестров, которые еще не имеют однозначной трактовки. Переход к уровню информации (Information) сопровождается нормализацией, при котором значения привязываются к объектам и временным интервалам через единый идентификатор, согласуются единицы измерения, а измеренный нуль строго отделяется от отсутствующего значения. На уровне знаний (Knowledge) применяются предметные алгоритмы верификации, которые присваивают статус проверки с указанием основания («норма», «противоречие» или «недостаточно данных»). Завершающий уровень (Wisdom) предполагает рассмотрение результата пользователем, который принимает решение, не изменяя при этом исходные измерения.

Разделение функций получения, обработки и представления диагностических данных согласуется с общими рекомендациями по построению информационного обеспечения контроля состояния оборудования [7].

Архитектурно контур реализован как взаимосвязанная сеть из трех обеспечивающих цепочек (Ц-01, Ц-07 и Ц-02). Они функционируют параллельно, агрегируя результаты в единый слой доверия. Это гарантирует, что в прикладные модули диагностики и анализа передаются сведения с четко обозначенным физическим смыслом, известной полнотой и зафиксированными ограничениями использования. Общая логическая структура контура представлена на рис. 1.

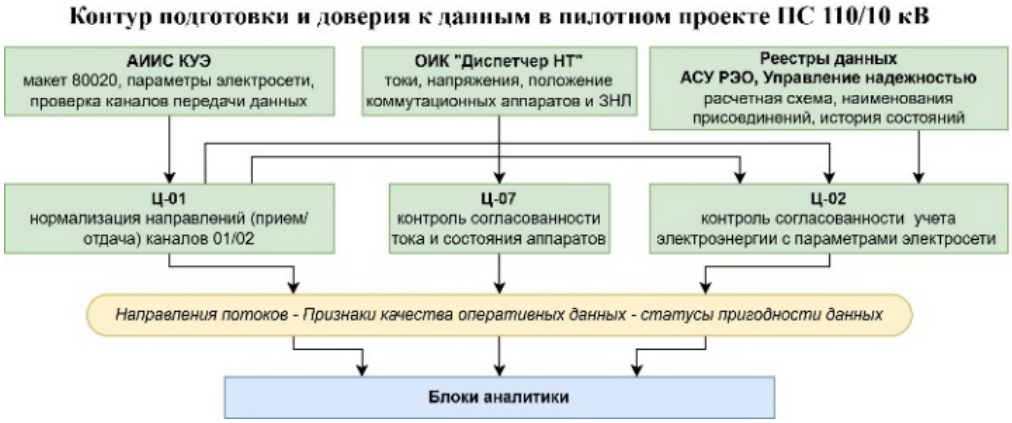


Рис. 1. Функциональная схема контура подготовки и верификации данных в архитектуре проактивного ТОиР

B. Нормализация направлений потоков энергии (Ц-01)

Первым этапом формирования слоя доверия выступает семантическая нормализация энергетических потоков. В практике коммерческого учета данные XML-макета 80020 (макет передачи данных для оптового рынка электроэнергии и мощности) содержат числовые значения энергии, привязанные к техническим номерам каналов (01 и 02). Однако физическая интерпретация этих значений не является универсальной, так для одного присоединения (например, ввода от силового трансформатора) канал 01 может означать прием энергии из сети, тогда как для отходящего фидера или цепи трансформатора собственных нужд тот же номер канала будет соответствовать отдаче. Прямое использование номеров каналов в балансовых расчетах без учета роли объекта неизбежно приводит к искажению знака энергетического соотношения.

Для устранения этой неоднозначности в контуре реализован механизм привязки к единому идентификатору присоединения, который связывает данные коммерческого учета с физической ролью объекта и подтвержденным правилом направления. На уровне обработки энергии каналов 01/02 сохраняются раздельно, после чего к ним применяется семантическая аннотация «прием» или «отдача» в соответствии с действующим правилом. Принципиально важным является то, что при выявлении расхождения между расчетным предложением и действующей настройкой формируется диагностический статус «Проверить каналы», требующий участия специалиста. Изменение этого параметра без подтверждения пользователя может привести к ошибкам в дальнейших расчетах, что не приемлемо (рис. 2).

Отдельного внимания требует ситуация, когда в анализируемом срезе энергия по обоим направлениям равна нулю. В этом случае отсутствует энергетическое основание для вывода о направлении потока, и алгоритм не имеет права экстраполировать правило, установленное для другого присоединения. Для таких наблюдений формируется статус «направление не определено», который сигнализирует о невозможности обоснованного суждения в рамках имеющихся данных. Данный статус фиксирует ограничение на использование данного наблюдения в балансовых расчетах до получения дополнительных данных при последующем анализе.

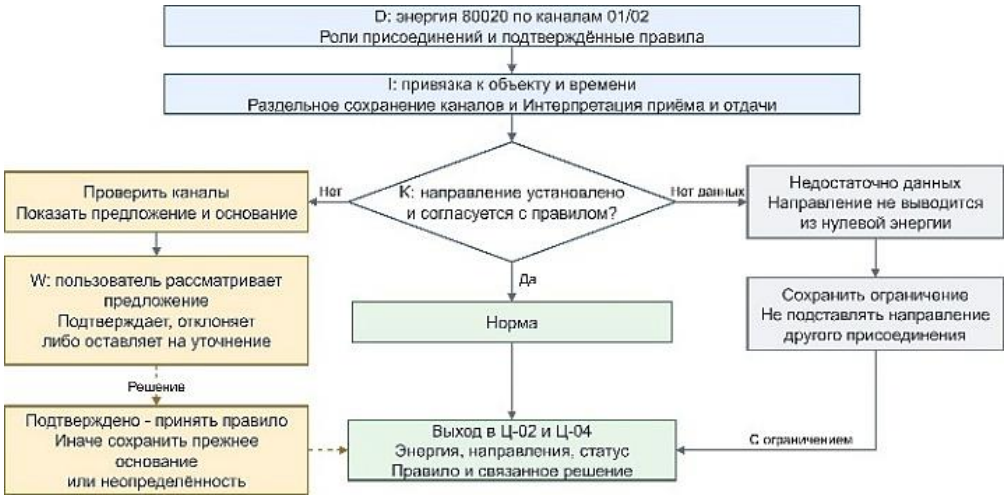


Рис. 2. Функциональная схема нормализации направлений потоков энергии (Ц-01) в нотации D-I-K-W

Результатом работы цепочки (рис. 3) является нормализованный слой направлений, в котором каждое значение энергии снабжено ссылкой на примененное правило и статусом проверки. Именно этот слой в дальнейшем используется для корректного отнесения потоков к поступлению или расходу.

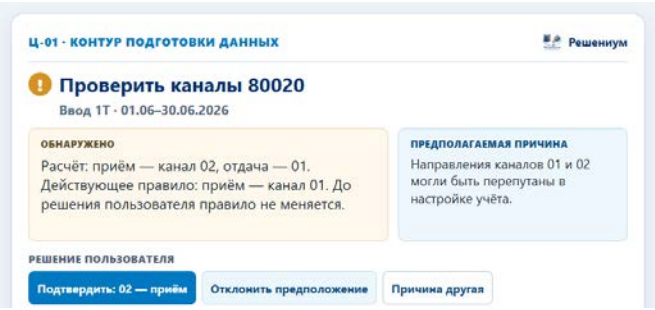


Рис. 3. Экранная форма карточки Ц-01 предупреждения несогласованности данных со схемой

C. Верификация оперативных данных ОИК (Ц-07)

Следующим звеном обеспечивающего контура выступает верификация оперативной информации, поступающей из комплекса «ОИК Диспетчер НТ». Если цепочка Ц-01 обеспечивает однозначную трактовку направлений энергии, то задача Ц-07 заключается в выявлении логических несоответствий между измерительными и коммутационными признаками режима работы присоединения. Источник данных объединяет два принципиально разных типа сведений: телеизмерения (ТИ), содержащие числовые значения тока, и телесигнализации (ТС), фиксирующие положения выключателей и заземляющих ножей (ЗНЛ).

Ключевым этапом подготовки данных является временная привязка и восстановление состояний оборудования. В отличие от телеизмерений, которые считываются с заданной периодичностью, телесигнализации фиксируют только факты изменения состояния. Поскольку такие события происходят реже, система использует метод восстановления состояния по последнему известному событию. В случае отсутствия подтвержденных данных о статусе ТС формируется статус неопределенности (рис. 4).

Логическая проверка на уровне знаний сопоставляет наличие тока с зарегистрированным положением коммутационных аппаратов. Согласованным по проверяемому признаку считается сочетание, при котором наличие тока наблюдается при включенном выключателе и отключенном заземляющем ноже. Ситуации, требующие дополнительного разбора, возникают при наличии тока на отключенном выключателе либо при зарегистрированном включении заземляющего ножа, что может свидетельствовать о некорректности телеметрии или о специфическом режиме, требующем внимания специалиста.

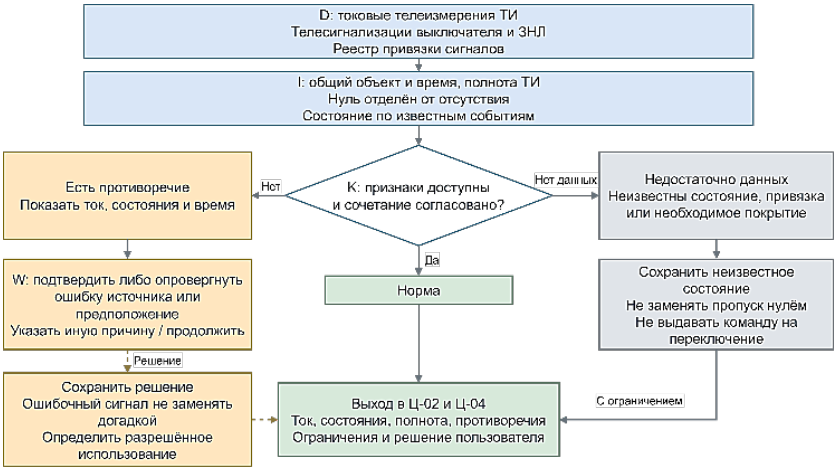


Рис. 4. Функциональная схема верификации оперативных данных ОИК (Ц-07) в нотации D-I-K-W

На уровне пользовательского рассмотрения специалисту предъявляются объект, временной интервал, фактические значения тока, состояния аппаратов и время последнего события. Пользователь может подтвердить ошибку источника, признать данные корректными или указать иную причину (рис. 5).

Результатом работы цепочки является сформированный оперативный контекст, содержащий признаки качества данных, перечень выявленных противоречий и зафиксированные пользовательские решения. При этом данный факт так же помогает выявить неучтённую генерацию или потребление.

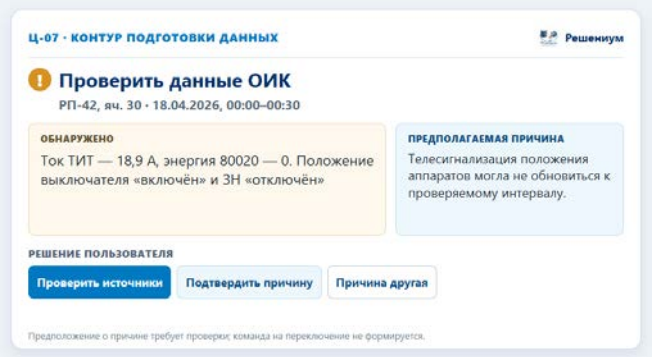


Рис. 5. Экранная форма карточки Ц-07 предупреждения несогласованности данных со схемой

D. Контроль согласованности данных коммерческого учета (Ц-02)

Завершающим этапом формирования слоя доверия является оценка согласованности данных коммерческого учета (рис. 6). Система сопоставляет энергию, полученную из макета 80020, с расчетной энергией, вычисленной по параметрам электросети. Если эти два независимых числовых источника дают согласованные результаты, данные 80020 признаются пригодными для дальнейшей балансовой диагностики. Таким образом, Ц-02 выступает фильтром доверия и отсекает явно ошибочные или неполные данные.

При этом для корректной интерпретации результатов сравнения цепочке необходимы данные Ц-01 и Ц-07. От Ц-01 поступают нормализованные направления энергии. От Ц-07 поступает оперативный контекст, для подтверждения того, что проверяемое присоединение корректно привязано к работающему объекту, и для контекстного объяснения возможных расхождений (например, если расхождение совпало с событием переключения).

На этапе подготовки информации ключевым критерием пригодности выступает полнота данных. В текущей реализации задан порог суточной полноты в 80 %. При условии, что пропуски превышают этот уровень, сутки не включаются в анализ и указываются в отчете с обоснованием исключения. По итогам сравнения формируется один из статусов: «Проверка пройдена» (источники согласованы), «Требуется проверка» (выявлено расхождение) или «Недостаточно данных» (сверка невозможна из-за отсутствия или неполноты одного из источников). Что согласуется со стандартом сбора и обмена данными по надёжности и техническому обслуживанию оборудования [8].

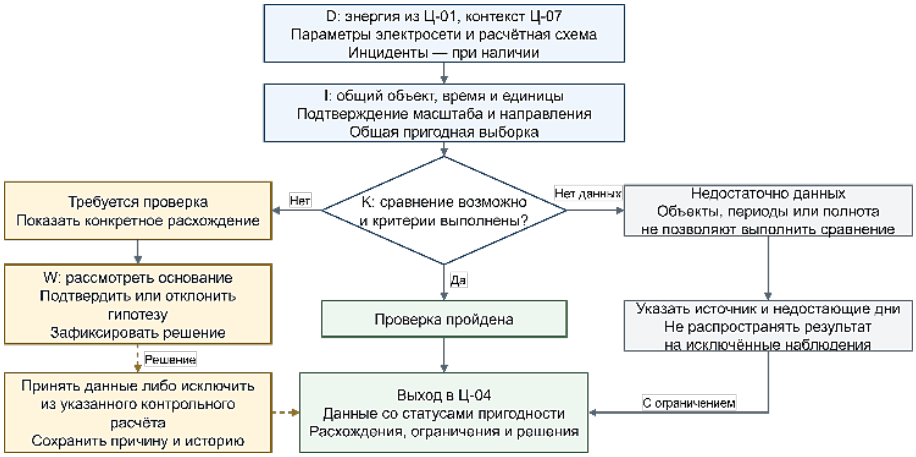


Рис. 6. Функциональная схема контроля согласованности данных коммерческого учета (Ц-02) в нотации D-I-K-W

Практическая апробация подхода на примере ввода 2Т (рис. 7) наглядно иллюстрирует обработку краевого случая. За период 08.04–03.05.2026 в источнике «Параметры электросети» отсутствуют значения активной мощности, фазных токов и напряжений. Без этих данных расчетная энергия не может быть сформирована, поэтому сверка с макетом 80020 за указанный период физически невозможна. Система не подставляет нулевые значения, а обоснованно присваивает периоду статус «Недостаточно данных», указывая предполагаемую причину – отсутствие загруженных суточных файлов. В интерфейсе пользователю предлагается загрузить недостающие файлы, продолжить работу без сверки за этот период (с явным сохранением статуса непроверенного) или указать иную причину. Такой подход гарантирует, что в последующие цепочки не попадут данные с ложной уверенностью в их достоверности.

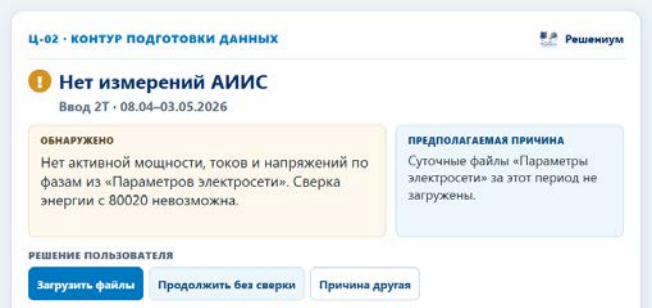


Рис. 7. Экранная форма карточки присоединения с результатами сверки энергии и указанием ограничений сравнения

III. Заключение

Переход к проактивной модели технического обслуживания на территориально-распределенных энергообъектах невозможен без надежного информационного фундамента. Проведенное исследование показало, что автоматизация сбора данных из систем АИИС КУЭ и ОИК сама по себе не решает проблему их пригодности для совместного анализа. Числовые значения сами по себе не дают уверенности в том, что их смысл однозначен, что временные ряды согласованы и что между измерениями и состоянием оборудования нет логических противоречий.

Предложенный в работе обеспечивающий контур, построенный на методологии D-I-K-W, позволяет сформировать «слой доверия» между первичными источниками и прикладными модулями диагностики. В рамках цепочки Ц-01 устраняется семантическая неоднозначность направлений потоков энергии, а для ситуаций с нулевой энергией обоснованно формируется статус неопределенности вместо ложного вывода о направлении. Цепочка Ц-07 обеспечивает верификацию оперативных данных, выявляя противоречия между токовыми измерениями и зарегистрированными положениями коммутационных аппаратов, что позволяет отделить ошибочные сигналы от реальных режимных особенностей. В свою очередь, цепочка Ц-02 устанавливает критерии пригодности коммерческого учета, применяя пороги полноты данных и ограничивая область действия положительных результатов проверки только теми периодами, которые обладают достаточным объемом наблюдений.

Принципиально важным результатом является то, что исходные данные не подвергаются произвольной модификации. Все выявленные ограничения и статусы сохраняются как атрибуты производного слоя. На уровне пользовательского интерфейса специалист получает не просто итоговый статус, но и полное обоснование по объему пригодных наблюдений, величине расхождения и явные ограничения проверки.

Ценность данного решения заключается в формировании прозрачного и воспроизводимого основания для последующей диагностики небалансов. Дальнейшее развитие данного подхода связано с масштабированием семантических реестров на другие объекты энергокомпании и накоплением истории подтвержденных пользовательских решений, что создаст предпосылки для перехода к адаптивным моделям проактивного ТОиР.

Список литературы

[1] Яковлева М.В., Шалина А.И. Алгоритм принятия решений о внедрении предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятиях // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 1. С. 159–172. DOI: 10.18334/vinec.13.1.117426

[2] Chen C., Fu H., Zheng Y., Tao F., Liu Y. The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning // Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 71. P. 581–594. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.10.010.

[3] Ciliberti T. Use ISO 14224 Methods to Optimize Equipment Performance Data Quality and Results from Artificial Intelligence and Machine Learning // ANSI Blog. 2020. February 19. URL: https://blog.ansi.org/ansi/iso-14224-equipment-performance-data-quality/ (дата обращения: 26.10.2026).

[4] 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.

[5] Понкратов-Вайсман Б.Д. Качество данных в процессах материально-технического обеспечения и адаптация методологии CRISP-DM // Экономика и управление. 2025. Т. 31. № 4. С. 538–552. DOI: 10.35854/1998-1627-2025-4-538-552.

[6] Никулин А.Е., Денисов А.Р. Создание робастной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) в энергетических компаниях // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Сб. трудов 19-й Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 23 апр. 2026. Т. 2. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2026. С. 202–211.

[7] ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство.

[8] ГОСТ Р 70841-2023 (ИСО 14224:2016). Нефтяная и газовая промышленность. Сбор и обмен данными по надежности и техническому обслуживанию оборудования.