Формальная модель прослеживаемости данных для поддержки принятия решения о готовности системы АЭС на этапе пусконаладочных работ

А.И. Соцкий, М.Г. Жабицкий, А.А. Хан, В.А. Огнева

***Аннотация*— В статье рассматривается задача формирования информационных оснований для поддержки принятия решения о готовности технологической системы АЭС на этапе пусконаладочных работ в условиях фрагментации сведений о физических объектах, выполненных работах, требованиях, результатах испытаний, подтверждающих документах и замечаниях. Предложен подход, объединяющий онтологический фундамент предметной области, формальную модель прослеживаемости, прикладную модель данных и алгоритмическую проверку формализуемых условий готовности. Определены ключевые сущности и отношения, позволяющие проследить связи от технологического объекта и требования через работы, испытания и результаты к подтверждающим документам, замечаниям и основаниям решения. Предложен алгоритм, различающий подтверждённые, нарушенные и неопределённые условия и формирующий объяснимый перечень препятствующих факторов. На модельном представлении технологической системы показана возможность выявления нарушений полноты, связности и допустимости информационных оснований с сохранением трассы от результата анализа до исходных данных. Полученные результаты конструктивно обосновывают возможность переноса формализуемой части экспертно-восстанавливаемого контекста ПНР в вычислимую информационно-знаниевую модель, предназначенную для повышения прослеживаемости и объяснимости оснований инженерных решений.**

***Ключевые слова*—атомная электростанция, пусконаладочные работы, информационно-знаниевая модель, прослеживаемость данных, поддержка принятия решений, готовность технологической системы, интеграция данных, онтологическое моделирование.**

1. ВВЕДЕНИЕ

Пусконаладочные работы (ПНР) являются одним из наиболее ответственных этапов создания атомной электростанции, в ходе которого осуществляется переход от завершения строительно-монтажных работ к подтверждению работоспособности отдельных систем и энергоблока в целом. На данном этапе выполняются проверки и испытания оборудования и технологических систем, фиксируются и устраняются выявленные замечания, формируется отчётная документация и принимаются решения о готовности систем к последующим этапам ПНР и ввода энергоблока в эксплуатацию. Обоснованность таких решений зависит от возможности своевременно получить и совместно проанализировать сведения о физическом состоянии объекта, выполненных работах, установленных требованиях, результатах испытаний, подтверждающих документах и существующих замечаниях [1, 2, 5–12].

В современной практике данные, необходимые для управления ПНР, формируются и хранятся в различных организационных и информационных контурах. Сведения о составе и идентификации оборудования, выполнении работ, календарных сроках, результатах испытаний, движении документов и выявленных замечаниях могут находиться в специализированных информационных системах разных участников проекта, системах электронного документооборота, календарно-сетевых графиках, реестрах, электронных таблицах, файловых хранилищах и документах, не имеющих структурированного цифрового представления. Результаты ПНР нередко представлены в виде отдельных файлов, слабо связанных со структурой проекта и объектной моделью, а связи между работами, оборудованием, результатами испытаний и подтверждающими документами не всегда выражены явно и в машинообрабатываемой форме. Вследствие этого наличие значительного объёма цифровых данных само по себе не обеспечивает информационной целостности процесса и возможности их непосредственного использования для алгоритмической поддержки управленческих решений.

При такой информационной фрагментации существенная часть контекста, необходимого для оценки готовности системы, восстанавливается специалистами экспертным путём. Для подготовки решения требуется установить, какое оборудование входит в рассматриваемую систему, какие работы должны быть и фактически выполнены, какие требования подлежат проверке, какие испытания проведены и с каким результатом, какими документами подтверждаются соответствующие факты, имеются ли незакрытые замечания и какие из них препятствуют переходу к последующему этапу. Таким образом, специалист

Статья получена 12 июля 2026
А. И. Соцкий — магистрант Высшей инжиниринговой школы НИЯУ МИФИ (e-mail: annord@yandex.ru);
М. Г. Жабицкий — заместитель директора Высшей инжиниринговой школы НИЯУ МИФИ (e-mail: jabitsky@mail.ru)
А. А. Хан — директор по цифровизации АО «АСЭ» (e-mail: arina.suffi@yandex.ru);
В. А. Огнева — аспирант Высшей инжиниринговой школы НИЯУ МИФИ (e-mail: annord@yandex.ru).

вынужден выполнять не только собственно инженерную оценку, но и значительный объём операций по поиску, сопоставлению и смысловому связыванию сведений из разнородных источников. Это увеличивает трудоёмкость подготовки решений, затрудняет прослеживаемость их оснований и создаёт зависимость от неявного знания и опыта отдельных специалистов.

Современное состояние науки и техники предоставляет ряд подходов к преодолению указанных ограничений. В атомной энергетике управление конфигурацией основывается на поддержании согласованности между проектными требованиями, физической конфигурацией объекта и информацией о ней; при этом информационные технологии рассматриваются как средство организации и связывания требований, конфигурационных данных, документов и других сведений жизненного цикла [3, 4]. Концепция сквозной интеграции данных жизненного цикла (digital thread) направлена на обеспечение связности и прослеживаемости информации, распределённой между различными стадиями жизненного цикла, информационными системами и участниками проекта [13]. Методы прослеживаемости требований (requirements traceability) позволяют явно представлять, поддерживать и использовать связи между требованиями и инженерными артефактами, однако вопросы автоматизации, достоверности, масштабируемости и сопровождения таких связей продолжают оставаться самостоятельными научно-техническими задачами [14].

Развитие онтологического моделирования и графов знаний создаёт дополнительные возможности для явного представления семантики инженерных объектов и отношений между ними. В частности, графы знаний применяются для структурирования и навигации по контексту инженерных решений, ранее распределённому между многочисленными неструктурированными документами [15], а онтологически основанные модели системной инженерии позволяют формализовать связи между инженерными моделями, версиями, артефактами и процессами, обеспечивая выполнение запросов, проверки согласованности и логический вывод [16]. В предыдущей работе авторского коллектива была предложена концепция использования онтологической модели для управления жизненным циклом сложного инженерного объекта на этапе строительства АЭС, предусматривающая представление физических объектов, процессов, документов, участников и событий в рамках единой семантически связанной предметной модели [17].

Вместе с тем перечисленные направления преимущественно решают отдельные составляющие рассматриваемой проблемы: управление согласованностью конфигурации, сквозную интеграцию данных жизненного цикла, прослеживаемость требований и инженерных артефактов, семантическое представление знаний или информационную поддержку инженерных решений. Применительно к ПНР АЭС представляет интерес исследование возможности объединения сведений о физической системе и входящем в неё оборудовании, выполняемых работах, требованиях, результатах испытаний, подтверждающих документах и замечаниях в формализованную систему связей, пригодную для алгоритмического анализа и использования при подготовке решения о готовности системы.

Настоящая работа развивает ранее предложенную онтологическую концепцию [17], но переносит центр исследования с общего семантического представления жизненного цикла сложного инженерного объекта на исследование механизма поддержки конкретного класса решений на этапе ПНР. Онтологическое представление при этом сохраняет роль концептуального фундамента, определяющего состав сущностей предметной области и семантику отношений между ними, тогда как предлагаемая реализация подхода основывается на формальной модели прослеживаемости, интеграции данных из разнородных источников и алгоритмической проверке формализуемых условий готовности.

Целью исследования является разработка и анализ подхода к формированию прослеживаемой информационной основы для поддержки принятия решения о готовности системы АЭС на этапе ПНР посредством формализации связей между технологическими объектами, работами, требованиями, результатами испытаний, подтверждающими документами и замечаниями и интеграции соответствующих данных из разнородных источников.

Рабочая гипотеза исследования состоит в том, что формализуемая часть связей между физическими объектами и процессами ПНР, их представлением в разнородных данных и документах, нормативными требованиями и предметными знаниями может быть перенесена из преимущественно экспертно восстанавливаемого контекста в вычислимую информационно-знаниевую модель, что создаёт предпосылки для повышения прослеживаемости и объяснимости информационных оснований решений о ходе и результатах ПНР.

Для исследования данной гипотезы предлагается механизм, включающий онтологический фундамент предметной области, формальную модель прослеживаемости, прикладную модель данных, средства интеграции разнородных источников и алгоритмическую проверку формализуемых условий готовности. Возможности предлагаемого подхода рассматриваются на задаче подготовки решения о готовности системы АЭС. При этом алгоритмический анализ не подменяет инженерное или комиссионное решение, а направлен на структурирование и проверку доступных информационных оснований, установление связей между ними и выявление факторов, которые могут препятствовать положительному решению.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ АЭС НА ЭТАПЕ ПНР.

Решение о готовности технологической системы к переходу на последующий этап пусконаладочных работ является одним из ключевых элементов управления ПНР. Оно определяет возможность продолжения испытаний,

включения оборудования в предусмотренный технологический режим, формирования пакета документов для рассмотрения комиссией либо передачи системы в следующий организационно-технологический статус. Такое решение относится к реально существующей системе и её оборудованию, однако принимается не на основании непосредственного наблюдения физического объекта как такового, а на основании доступных сведений о выполненных работах, результатах испытаний, подтверждающих документах, замечаниях и установленных требованиях.

Готовность при этом не является универсальной характеристикой объекта. Одна и та же система может быть готова к индивидуальным испытаниям, но не готова к комплексному опробованию; комплект документов может быть подготовлен для внутренней проверки, но не готов для передачи комиссии. Поэтому оценка должна относиться не только к системе, но также к определённой цели или стадии ПНР и к моменту, на который актуализированы исходные данные.

Обозначим через $s \in S$ рассматриваемую систему АЭС, через $g \in G$ - цель или стадию, относительно которой оценивается готовность, а через τ - момент актуальности данных. Тогда решение о готовности следует рассматривать как результат анализа $A(s,g,\tau)$, а не как постоянное свойство системы s. Результат анализа может включать оценку выполнения формализуемых условий и перечень факторов, препятствующих положительному решению:

$$A(s,g,\tau)=\langle q(s,g,\tau), B(s,g,\tau)\rangle,$$

где $q(s,g,\tau)$ характеризует степень выполнения проверяемых условий, а $B(s,g,\tau)$ представляет множество выявленных препятствующих факторов. Итоговое управленческое решение принимается уполномоченным специалистом или комиссией с учётом результата анализа, нормативных требований и экспертной оценки неформализуемых обстоятельств.

2.1. МЕСТО РЕШЕНИЯ О ГОТОВНОСТИ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ ПНР

Процесс управления ПНР может быть представлен как последовательность взаимосвязанных стадий:

требования и планирование
→ выполнение работ
→ испытания
→ фиксация результатов
→ анализ
→ решение
→ управляющее воздействие

Решение о готовности располагается между анализом фактической ситуации и выбором последующих действий. Положительный результат анализа может служить основанием для продолжения работ или передачи системы, отрицательный — для формирования корректирующих действий: выполнения недостающей работы, повторения испытания, устранения замечания, доработки документации или изменения организационного плана.

В существующем контуре значительная часть информации о ПНР формируется в системах субподрядных организаций, в системах электронного документооборота, календарно-сетевого планирования, реестрах и файловых хранилищах. В информационную среду генерального подрядчика результаты могут поступать преимущественно как документы и отдельные реестры, а не как связанные структурированные данные. В результате оценка готовности нередко осуществляется после формирования очередного пакета документов и требует ручного восстановления связей между объектами, работами и подтверждающими материалами. В исходной работе эта ситуация характеризуется как переход от фактически выполненных работ к пакетам документов и решениям комиссий при отсутствии непрерывной структурированной связи между соответствующими данными.

Таким образом, проблема заключается не только в скорости проверки документов. Более существенным ограничением является задержка выявления несоответствий. При отсутствии связанной информационной модели ошибка в идентификации объекта, отсутствие подтверждающего документа или незакрытое замечание могут быть обнаружены лишь на поздней стадии подготовки решения. Предлагаемый подход должен способствовать переходу от преимущественно реактивной проверки к более раннему выявлению информационных и организационных препятствий.

2.2. ФИЗИЧЕСКИЙ, ИНФОРМАЦИОННЫЙ И ЗНАНИЕВЫЙ СЛОИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Для постановки задачи целесообразно выделить три взаимосвязанных слоя предметной области: физический, информационный и знаниевый.

Физический слой P включает реально существующие объекты, выполняемые работы, испытания, измеряемые параметры, физические дефекты и изменения состояния оборудования:

$$P \Rightarrow /I$$

где O— множество физических объектов и единиц оборудования, W— множество фактически выполняемых работ, T— множество испытаний, M— множество фактически полученных результатов измерений, F_p— множество физических дефектов и несоответствий.

Информационная система не имеет непосредственного доступа ко всему множеству P. Она оперирует информационным представлением физического процесса:

$$I = \langle O_i, W_i, T_i, M_i, D, F_i, V\rangle$$

где O_i, W_i, T_i, M_i— зарегистрированные данные об объектах, работах, испытаниях и измерениях; D— множество подтверждающих документов; F_i— зарегистрированные замечания; V— сведения о версиях, статусах, датах, авторах и иных атрибутах данных. Между физическим и информационным слоями действует отображение $\varphi: P \to I$. Оно не является полным и безошибочным. Физическое событие может быть отражено с задержкой, неполно, неоднозначно или противоречиво. Работа может быть выполнена, но её

статус не обновлён; измерение может содержаться только в тексте протокола; устранённое замечание может оставаться открытым в реестре; один и тот же объект может быть обозначен различными кодами в разных источниках.

Анализ исходных данных ПНР выявляет типовые нарушения такого отображения: неоднородность KKS-идентификации, объединение нескольких объектов или работ в одной записи, отсутствие явной связи между работой и подтверждающим документом, различия в обозначении статусов и хранение результатов измерений в неструктурированной форме.

Знаниевый слой K определяет смысл данных и условия их использования: $K = \langle C, R, Q, N, E \rangle$, **г**де C - система понятий и классификаций предметной области, R - отношения между сущностями, Q - формализованные правила и критерии, N - нормативные требования, E - экспертные знания и интерпретации.

К знаниевому слою относятся, например:

- правила отнесения оборудования к системе;
- требования к составу работ;
- правила связи работы и документа;
- перечни обязательных документов;
- допустимые статусы;
- критерии приемлемости результатов испытаний;
- классификация замечаний по критичности;
- условия перехода между этапами;
- экспертные оценки нестандартных ситуаций.

Не всё содержание K может быть представлено в полностью формализованной форме. Поэтому целесообразно выделить формализуемую часть знаниевого слоя $K_f \subseteq K$, которая может быть выражена через классы, отношения, ограничения и алгоритмические правила, и неформализуемую или частично формализуемую часть K_e, остающуюся в сфере экспертного суждения:

$$K = K_f \cup K_e, K_f \cap K_e \neq \emptyset$$

Пересечение указывает на то, что некоторые правила могут быть формализованы только частично и требуют экспертной верификации.

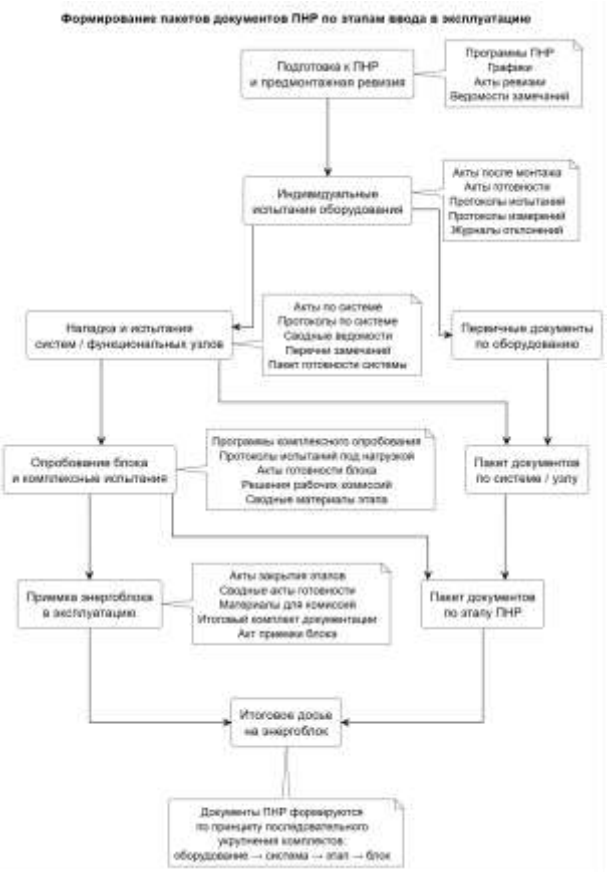

Рис. 1. Формирование пакетов документов ПНР по этапам ввода в эксплуатацию (по материалам ВКР А. И. Соцкого)

2.3. РАЗРЫВЫ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ, ДАННЫМИ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ

Проблема поддержки решений возникает не только из-за распределения данных между информационными системами, но и вследствие нарушения переходов между указанными слоями.

Первый тип разрыва относится к отображению физического факта в информационную запись:

$$P \Rightarrow / I.$$

Он проявляется в неполноте, задержке или ошибке регистрации. Физическое состояние объекта и отражённое в системе состояние могут не совпадать.

Второй тип разрыва возникает внутри информационного слоя, когда отдельные данные существуют, но отношения между ними не заданы явно:

$$I = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, L_I = \emptyset \text{ или } L_I \text{ неполно.}$$

Например, в системе могут одновременно присутствовать запись о выполненной работе и утверждённый протокол, но отсутствовать формальная связь, указывающая, что именно этот протокол подтверждает именно эту работу.

Третий тип разрыва связан с отсутствием формализованного перехода от данных к условию решения:

$$(I, K) \Rightarrow / Q.$$

Наличие документа ещё не означает выполнения требования, если неизвестно, является ли документ обязательным, актуальным, утверждённым и связанным

с нужной работой. Наличие результата измерения не позволяет сделать вывод без критерия допустимости. Наличие замечания не определяет его влияние на решение без классификации критичности.

Четвёртый тип разрыва относится к интерпретации результата формальной проверки:

$$Q \Rightarrow / Dec.$$

Алгоритм может установить невыполнение формального условия, однако окончательное решение Decтребует учёта полномочий, исключений, компенсирующих мероприятий и инженерного контекста.

В совокупности указанные переходы образуют цепочку:

физический факт
→ информационная запись
→ предметная связь
→ формализованный критерий
→ решение

В существующей практике значительная часть недостающих переходов восстанавливается специалистом вручную.

2.4. ФОРМАЛИЗУЕМАЯ И ЭКСПЕРТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОДГОТОВКИ РЕШЕНИЯ

Деятельность специалиста при подготовке решения о готовности условно может быть представлена как совокупность четырёх групп операций:

$$H = H_s + H_l + H_q + H_e,$$

где H_s- поиск сведений, H_l - установление связей между ними, H_q - применение формализуемых правил, H_e - инженерная и экспертная интерпретация.

К операциям H_s и H_lотносятся поиск документов, проверка версий, сопоставление KKS-кодов, восстановление связей между работами, результатами и документами, анализ статусов и выявление открытых замечаний. К H_qотносятся проверки обязательных реквизитов, статуса документа, наличия обязательной позиции и соответствия измеренного значения установленному диапазону. К H_e относятся оценка нетиповых ситуаций, допустимости отклонений, достаточности компенсирующих мер и принятие ответственности за решение.

Предлагаемый механизм не направлен на исключение H_e. Его задача состоит в переносе операций H_s, H_lи части H_qв формализованную информационную среду:

$$H_s + H_l + H_q^f \rightarrow M_c,$$

где M_c - вычислимый механизм поиска, связывания и проверки данных, а H_q^f - формализуемая часть правил.

За специалистом остаются:

$$H_e + H_q^e,$$

где H_q^e— правила и условия, требующие экспертного толкования.

Такое распределение функций позволяет сформировать более полное и структурированное представление доступных сведений, не подменяя ответственного субъекта принятия решения.

2.5. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть для системы s с целями g и в момент τ заданы множества:$O_s \subseteq O$ - объекты и оборудование системы, $W_{s,g}$ - работы, относящиеся к системе и рассматриваемой стадии,$R_{s,g}$ - применимые требования, $T_{s,g}$ – испытания, $M_{s,g}$ - зарегистрированные результаты, $D_{s,g}$ - подтверждающие документы, $F_{s,g}$ - замечания и несоответствия.

Необходимо определить множество отношений

$$L_{s,g} \subseteq (O_s \times W_{s,g}) \cup (W_{s,g} \times R_{s,g}) \cup (W_{s,g} \times T_{s,g}) \cup (T_{s,g} \times M_{s,g}) \cup (W_{s,g} \times D_{s,g}) \cup (F_{s,g} \times (O_s \cup W_{s,g} \cup D_{s,g} \cup M_{s,g}))$$

Эти отношения должны обеспечивать возможность проследить переход от объекта и требования к работе, испытанию, результату, подтверждающему документу и связанным замечаниям.

Информационное основание анализа готовности представим как структуру

$$I_{s,g,\tau} = \langle O_s, W_{s,g}, R_{s,g}, T_{s,g}, M_{s,g}, D_{s,g}, F_{s,g}, L_{s,g} \rangle.$$

К этой структуре применяется множество формализованных правил

$$Q_{s,g} = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}.$$

Каждое правило отображает доступные данные и связи в результат проверки:

$$q_j(I_{s,g,\tau}) \in \{1, 0, \emptyset\},$$

где:

- 1- условие подтверждено;
- 0- условие не выполнено;
- ∅- данных недостаточно для проверки.

Последнее значение принципиально важно. Отсутствие подтверждения не всегда тождественно установленному нарушению. Модель должна различать:

- отрицательный результат проверки;
- отсутствие необходимого информационного основания;
- противоречивость исходных данных.

Результат анализа определяется как

$A(s, g, \tau) = \langle Q^+, Q^-, Q^?, B \rangle$, где:

- Q^+- множество подтверждённых условий;

- Q^{-}- множество невыполненных условий;
- $Q^{?}$- множество условий, которые невозможно проверить по доступным данным;
- B- множество выявленных факторов, требующих устранения или экспертного рассмотрения.

Таким образом, задача исследования формулируется как разработка механизма

$$\Psi: \left(I_1, I_2, \dots, I_n, K_f\right) \to A(s, g, \tau),$$

который обеспечивает:

1. интеграцию данных из разнородных источников $I_1, \dots, I_n$;
2. идентификацию и нормализацию сущностей;
3. установление отношений прослеживаемости $L_{s,g}$;
4. применение формализуемых правил $Q_{s,g}$;
5. формирование воспроизводимого результата анализа с указанием исходных данных и сработавших условий;
6. выявление факторов, требующих корректирующих действий или экспертной оценки.

При этом функция окончательного решения

$$Dec(s, g, \tau) = \delta(A(s, g, \tau), K_e, U)$$

остаётся за уполномоченным субъектом, где K_e - экспертные знания, а U - дополнительные обстоятельства и ограничения, не представленные полностью в формальной модели.

Предлагаемая постановка не предполагает автоматического установления физической готовности системы. Речь идёт о формировании структурированной и прослеживаемой информационной основы, позволяющей проверить формализуемые условия, выявить недостаточность или противоречивость сведений и представить специалисту факторы, существенные для подготовки решения.

Для реализации такого механизма необходимо определить состав сущностей предметной области и формализовать отношения между технологическими объектами, работами, требованиями, испытаниями, результатами, подтверждающими документами и замечаниями. Соответствующая формальная модель прослеживаемости рассматривается в следующем разделе.

3. ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ И ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ДАННЫХ ПНР

Предлагаемый подход развивает ранее сформулированную концепцию онтологического представления жизненного цикла сложного инженерного объекта [17] применительно к этапу ПНР АЭС. В предыдущей работе были выделены общие категории предметной области — объект, процесс, событие, документ, ресурс, роль и решение. Для решения задачи, поставленной в разделе 2, эти категории необходимо конкретизировать до уровня сущностей и отношений, позволяющих связать физическую структуру системы, выполняемые работы, применимые требования, результаты испытаний, подтверждающие документы, замечания и принимаемые решения.

В настоящей работе онтология рассматривается как концептуальный фундамент, определяющий семантику предметной области. Она отвечает на вопрос, какие сущности существуют в процессе ПНР и каков смысл отношений между ними. Прикладная модель данных, в свою очередь, обеспечивает операциональное представление этих сущностей и связей в информационной системе. Такое разграничение позволяет не отождествлять онтологическую модель с конкретной реляционной схемой: одна и та же предметная структура может быть реализована в реляционной базе данных, графе знаний либо иной вычислимой форме.

Предлагаемая модель не претендует на построение универсальной онтологии всего жизненного цикла АЭС. Её назначение состоит в выделении минимального предметно достаточного набора классов и отношений, необходимых для поддержки анализа готовности системы на этапе ПНР.

3.1. СОСТАВ СУЩНОСТЕЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Множество классов предметной области обозначим через $C = \{Project, Unit, PBSNode, System, Equipment, Program,\}$ Классы можно объединить в несколько взаимосвязанных групп.

К объектной группе относятся Project, Unit, PBSNode, System и Equipment. Они задают иерархию физического и проектного представления объекта:

$$Project \to Unit \to PBSNode \to System \to Equipment.$$

При этом PBS и KKS выполняют различные функции. PBS отражает место объекта в структуре проекта и используется для декомпозиции, агрегирования и распределения ответственности. KKS обеспечивает функционально-технологическую идентификацию систем и оборудования. Поэтому KKS рассматривается как важный атрибут сопоставления сущностей, но не как замена отношениям модели.

К процессной группе относятся Program, Stage, Work и Test. Они отражают структуру ПНР:

$$Program \to Stage \to Work \to Test.$$

В базовой модели испытание может рассматриваться как специализированный вид работы, однако его выделение в самостоятельный класс необходимо в тех случаях, когда одна работа включает несколько испытаний, повторные проверки или отдельные наборы измерений.

К нормативно-знаниевой группе относится класс Requirement. Он вводится как самостоятельная сущность, поскольку без него невозможно формально установить, почему конкретная работа, испытание или документ являются обязательными. Требование может происходить из программы ПНР, нормативного

документа, проектной документации, методики испытаний, решения комиссии либо корпоративного регламента. Для требования должны быть заданы источник, область применимости, версия и период действия.

К информационно-подтверждающей группе относятся Result, Document, Finding и Package. Класс Result представляет структурированные результаты испытаний и измерений. Класс Document описывает подтверждающие документы: акты, протоколы, журналы, реестры и иные материалы. Класс Finding фиксирует замечания и несоответствия, а Package представляет комплект документов, сформированный относительно определённой системы, этапа и состава требований.

Класс Decision описывает результат рассмотрения доступной информации уполномоченным специалистом или комиссией. Решение должно быть связано не только с отдельным замечанием, но и с системой, этапом, комплектом, субъектом принятия решения и актуальной версией информационных оснований.

Выделенный состав развивает структуру дипломной модели, включавшую проект, энергоблок, PBS, системы, оборудование, программу, этапы и работы ПНР, документы, результаты измерений, замечания, комплекты и решения комиссий. В исходной модели особо подчёркивалась необходимость явных связей между работами, документами, пакетами и замечаниями.

3.2. ТИПИЗИРОВАННОЕ ГРАФОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Формальную модель предметной области представим в виде типизированного ориентированного графа

$$\mathcal{G}(\tau) = (V, E, \lambda_V, \lambda_E, A, \tau),$$ где:

- V — *множество экземпляров сущностей;*
- $E \subseteq V \times V$ — *множество отношений между ними;*
- $\lambda_V : V \to C$ — *функция типизации вершин;*
- $\lambda_E : E \to R$ — *функция типизации отношений;*
- A — *множество атрибутов сущностей и отношений;*
- τ — *момент или интервал актуальности рассматриваемой версии графа.*

Множество типов отношений может быть представлено как

$$R = \{\text{partOf, contains, concerns, requires, implements, verifies, produces, records, confirms, includedIn, hasFinding, blocks, supports}\}.$$

Примеры отношений: $e \xrightarrow{partOf} s$, где оборудование e входит в систему s $r \xrightarrow{concerns} e$, где требование r относится к оборудованию e; $w \xrightarrow{implements} r$, где работа wвыполняется для реализации или проверки требования r; $t \xrightarrow{verifies} r$, где испытание tпроверяет выполнение требования; $m \xrightarrow{producedBy} t$, где результат mполучен в ходе испытания t; $d \xrightarrow{records} m$, где документ dсодержит зафиксированный результат; $d \xrightarrow{confirms} w$, где документ подтверждает выполнение работы; $d \xrightarrow{includedIn} p$, где документ включён в комплект p; $p \xrightarrow{supports} c$, где комплект используется при подготовке решения c. Замечания могут относиться к различным элементам цепочки: $f \xrightarrow{concerns} \{e, w, t, m, d, p\}$.

Такое представление позволяет отразить не только иерархию объекта, но и предметные отношения между работами, требованиями, результатами и подтверждающими документами.

В модели учитывается временная изменчивость данных. Документы имеют версии, статусы работ изменяются, замечания открываются и закрываются, а требования могут уточняться. Поэтому прослеживаемость должна определяться относительно момента τ. Для сущностей и связей необходимо хранить по меньшей мере источник, время создания, период действия, версию и статус актуальности. В дипломной модели эта задача частично поддерживается атрибутами версии документа и аудитными полями createdBy, createdAt, updatedBy, updatedAt.

Не менее важно происхождение данных. Для каждого элемента $v \in V$задаётся функция $source(v) \in \{IS_{PNR}, EDMS, Schedule, Registry, PDF, ManualInput, AutomaticExtraction\}$. Для автоматически извлечённых или вычисленных значений дополнительно должны фиксироваться метод получения и факт экспертной верификации. Это позволяет различать исходные, нормализованные, автоматически извлечённые и подтверждённые специалистом сведения.

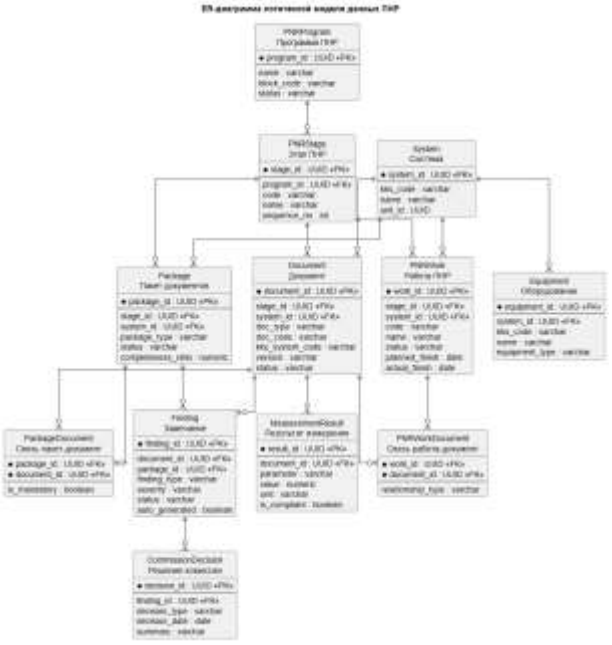

Рис. 2. ER-диаграмма онтологической модели данных ПНР (по материалам ВКР А. И. Соцкого)

3.3. ОТНОШЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ

Прослеживаемость определяется как возможность установить допустимый путь между сущностями модели. Пусть $v_i, v_j \in V$. Сущность v_jпрослеживается до сущности v_i, если в графе существует путь

$$\pi(v_i, v_j) = (v_i, e_1, v_1, e_2, \dots, e_k, v_j),$$

типы вершин и отношений которого соответствуют заданной схеме прослеживаемости.

В модели выделяются несколько взаимодополняющих видов прослеживаемости.

Объектная прослеживаемость связывает данные с физической структурой объекта: $Project \to Unit \to System \to Equipment$. Она позволяет установить, к какому объекту относятся работа, результат, документ или замечание.

Процессная прослеживаемость задаёт место работы в программе ПНР: $Program \to Stage \to Work \to Test$.

Прослеживаемость требований связывает требование с объектом и способом его проверки: $Requirement \to Equipment \to Work \to Test \to Result$.

Документальная прослеживаемость отражает связь выполненной работы и результата с подтверждающим документом: $Work \leftrightarrow Document \leftrightarrow Result$. Отсутствие явной связи «работа — документ» было выявлено в исходных данных как одно из основных препятствий для автоматизированного контроля комплектности; в дипломной модели для её представления предусмотрена отдельная связующая таблица PNRWork_Document.

Прослеживаемость замечаний позволяет установить объект возникновения несоответствия, его влияние на связанные работы, документы и комплект, а также факт устранения.

Прослеживаемость оснований решения объединяет перечисленные виды в двунаправленную цепочку: $System \to Requirement \to Work \to Test \to Result \to Document \to Package \to Decision,$ и в обратном направлении: $Decision \to Package \to Document \to Result \to Work \to Requirement \to System.$ Обратная трассировка позволяет установить, на каких данных и связях основывался результат анализа, а прямая - определить, какие документы, результаты и решения относятся к конкретному объекту или требованию.

Однако одного существования пути недостаточно. Для использования связи при анализе готовности необходимо, чтобы путь был актуальным и удовлетворял установленным ограничениям. Введём предикат валидности пути:

$$ValidPath(\pi, \tau) = \begin{cases} 1 & - \text{если все вершины и пути существуют в момент } \tau \text{ и удовлетворяют ограничениям} \\ 0 & - \text{в противном случае} \end{cases}$$

Например, документ может формально быть связан с работой, но не рассматриваться как допустимое подтверждение, если он имеет устаревшую версию, не утверждён, относится к иной стадии или содержит незакрытое критическое замечание. Тогда условие наличия прослеживаемого подтверждения требования rможно представить как $Evidence(r, \tau) = 1 \iff \exists \pi(r, d): ValidPath(\pi, \tau) = 1$, где путь $\pi(r, d)$ связывает требование r с подтверждающим документом d через соответствующую работу, испытание и результат.

Следует различать два уровня прослеживаемости.

- Структурная прослеживаемость показывает наличие требуемых сущностей и связей: $Trace_{str}(v_i, v_j) = 1 \iff \exists \pi(v_i, v_j)$.
- Содержательная прослеживаемость дополнительно учитывает соответствие связей предметным условиям: $Trace_{sem}(v_i, v_j, \tau) = 1 \iff \exists \pi(v_i, v_j): ValidPath(\pi, \tau) = 1$.

На текущем этапе исследования модель обеспечивает прежде всего структурную прослеживаемость и отдельные формализуемые элементы содержательной проверки: актуальность версии, допустимость статуса, корректность идентификации, наличие обязательной связи и отсутствие блокирующего замечания. Полная содержательная интерпретация инженерной ситуации остаётся за ответственным специалистом.

3.4. РОЛЬ МОДЕЛИ В ПРЕДЛАГАЕМОМ ПОДХОДЕ

Формальная модель прослеживаемости является обеспечивающей конструкцией исследования. Выделение сущностей и построение отношений между ними само по себе не рассматривается как основной новый результат работы. Значение модели состоит в том, что она создаёт единый семантический каркас для последующих операций:

- интеграции данных из различных источников;
- нормализации идентификаторов и статусов;
- связывания объектов, работ, результатов и документов;
- применения формализуемых правил;
- выявления отсутствующих, противоречивых или неактуальных связей;
- формирования объяснимого результата анализа готовности.

Таким образом, онтологический фундамент определяет смысл сущностей и отношений, формальная модель прослеживаемости задаёт вычислимую структуру этих отношений, а прикладная модель данных обеспечивает их техническое представление и наполнение фактическими сведениями. Механизм интеграции разнородных источников и реализация модели в информационной среде рассматриваются в следующем разделе.

4. МОДЕЛЬ ДАННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Формальная модель прослеживаемости определяет состав сущностей и отношений, но для её применения необходимо сопоставить эти сущности с фактическими данными ПНР. В настоящей работе это сопоставление реализовано на уровне прототипа реляционной модели данных; интеграционный контур с промышленными информационными системами и интеллектуальное извлечение сведений из документов рассматриваются как последующие этапы внедрения.

Пусть $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ - множество источников данных, а $\mathcal{D}(\tau)$— интегрированное представление

данных, актуальное на момент τ. Общая схема преобразования имеет вид

$$\Theta: S \to D(\tau), \{S_1, \dots, S_n\} \xrightarrow{\text{извлечение}} D_{\text{raw}} \xrightarrow{\text{нормализация}} D_{\text{norm}} \xrightarrow{\text{идентификация и связывание}} \mathcal{D}(\tau).$$

Задача преобразования состоит не только в переносе записей в общее хранилище, но и в установлении соответствия между различными представлениями одного объекта, работы или документа.

4.1. ИСТОЧНИКИ И АРХИТЕКТУРНЫЙ ПРИНЦИП ИНТЕГРАЦИИ

Предлагаемый подход не предусматривает замену действующих информационных систем участников ПНР. Специализированная ИС ПНР, электронный документооборот и система календарно-сетевого планирования сохраняют роль источников первичных данных, а согласованная модель формируется в информационном контуре генерального подрядчика.

Основными источниками являются:

- ИС ПНР субподрядчика — реестры работ, фактические статусы, даты и ссылки на документы;
- система электронного документооборота — шифры, версии, статусы и ссылки на юридически значимые файлы;
- система календарно-сетевого планирования — этапы, вехи и плановые сроки;
- реестры и электронные таблицы — накопительные перечни работ, документов и замечаний;
- файловые документы — акты, протоколы, журналы и содержащиеся в них результаты испытаний;
- справочники PBS и KKS — структура проекта и идентификация технологических объектов.

При этом следует различать файл документа, его метаданные и структурированные сведения, содержащиеся в документе: файл ≠ метаданные ≠ извлечённые данные. Такое разделение позволяет сохранить юридически значимый документ во внешней системе и одновременно представить необходимые для анализа сведения в прикладной модели.

В прототипе разработана реляционная схема PostgreSQL, содержащая объектную структуру, работы ПНР, документы, результаты измерений, замечания, комплекты и отношения «работа — документ» и «комплект — документ». Модель проверена на демонстрационном наборе данных условной технологической системы. Промышленный обмен с ИС ПНР, ЭДО и КСП в работе специфицирован, но не реализован в действующем производственном контуре.

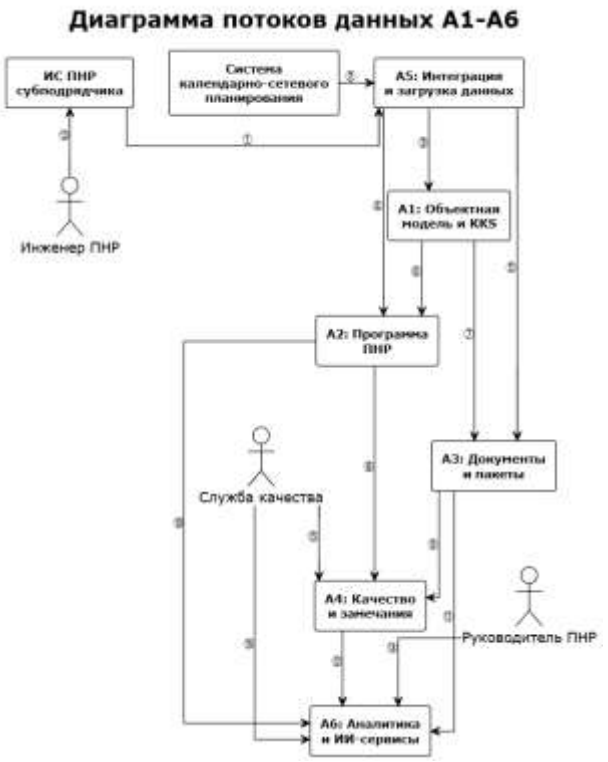

Рис. 3. Диаграмма потоков данных A1-A6 интеграционного контура ПНР (по материалам ВКР А. И. Соцкого)

4.2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ, НОРМАЛИЗАЦИЯ И СВЯЗЫВАНИЕ ДАННЫХ

Для каждого класса формальной модели задаётся реляционное представление $\mu: \mathcal{G} \to \mathcal{D}_{rel}$, где классу cсоответствует таблица T_c, а отношению - внешний ключ либо связующая таблица:

$$\mu(r) = \begin{cases} FK, & 1{:}N, \\ T_{\text{link}}, & N{:}M. \end{cases}$$

Для сопоставления сведений с объектной структурой используется KKS. Исходный код может поступать как отдельный реквизит либо как фрагмент шифра документа. Процедура сопоставления представляется последовательностью $k_{\text{raw}} \xrightarrow{\text{выделение}} k_{\text{norm}} \xrightarrow{\text{проверка}} k_{\text{valid}} \xrightarrow{\text{сопоставление}} o$, где o— внутренний идентификатор объекта. В модели KKS хранится отдельно от полного шифра документа и проверяется по справочнику. Такой механизм предусмотрен и отражён в структуре прототипа.

Нормализация применяется также к статусам работ и документов, типам документов, датам и уровням критичности замечаний. Для источника S_iона задаётся отображением $N_i: X_i \to X^*$, где X_i— значения исходной системы, а X^*- канонический справочник модели. Например, обозначения «согл.», «СОГЛАСОВАН» и approved приводятся к единому статусу approved. После нормализации устанавливаются связи между сущностями. В базовом варианте они формируются:

- по явным ссылкам исходных реестров;
- по KKS и внутренним идентификаторам;
- по шифру, версии и типу документа;
- по заданным таблицам соответствия.

Автоматическое семантическое сопоставление по содержанию документов, оценка достоверности связи и её последующая экспертная верификация в прототипе не реализованы и относятся к развитию модели.

4.3. ETL-ПРОЦЕСС И ГРАНИЦЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Предложенная спецификация ETL включает:

1. получение реестров работ и документов из ИС ПНР через REST API либо регламентные табличные выгрузки;
2. получение метаданных документов из ЭДО;
3. загрузку плановых дат из системы КСП;
4. нормализацию статусов и KKS-кодов;
5. дедупликацию документов;
6. транзакционную загрузку сущностей и связей;
7. выполнение ограничений целостности и формирование замечаний;
8. пересчёт показателя комплектности затронутых пакетов.

Формально преобразование исходной записи можно представить как

$$T(x_{\text{raw}}) \rightarrow \begin{cases} x_{\text{norm}}, & \text{если запись однозначно преобразована;} \\ f, & \text{если обнаружено нарушение или неоднозначность} \end{cases}$$

где f— замечание, требующее исправления либо проверки специалистом.

В рамках выполненной работы реализованы:

- логическая и физическая реляционная схема;
- справочники и основные ограничения целостности;
- представление KKS-привязки;
- связи между работами, документами и комплектами;
- правила нормализации статусов;
- спецификация ETL-потока;
- демонстрационное наполнение модели.

Предложены, но требуют промышленной реализации и опытной эксплуатации:

- регулярный автоматизированный обмен с ИС ПНР, ЭДО и КСП;
- расчёт показателей на реальных производственных данных;
- двусторонняя синхронизация статусов и замечаний.

К перспективным компонентам относятся:

- извлечение результатов измерений из PDF;
- автоматическое распознавание реквизитов и подписей;
- семантическое сопоставление документов и объектов;
- прогнозирование сроков и рисков с использованием моделей машинного обучения.

5. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ

Формальная модель прослеживаемости и интегрированное представление данных создают возможность алгоритмической проверки условий, учитываемых при подготовке решения о готовности системы. При этом алгоритм не устанавливает физическую готовность объекта и не заменяет решение уполномоченного специалиста или комиссии. Его назначение состоит в проверке формализуемой части доступной информации и выявлении факторов, которые подтверждают либо препятствуют принятию положительного решения. Анализ выполняется относительно заданного контекста $\kappa = \langle s, g, \tau \rangle$, где s— рассматриваемая система, g— стадия или цель, относительно которой оценивается готовность, τ— момент актуальности данных. Для данного контекста формируется информационная структура $I_\kappa = \langle O, W, R, T, M, D, F, P, L \rangle$, включающая относящиеся к системе объекты и оборудование O, работы W, применимые требования R, испытания T, результаты M, подтверждающие документы D, замечания F, комплект документов Pи отношения прослеживаемости L.

Алгоритм применяет к этой структуре множество формализованных условий $Q_\kappa = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. В базовом варианте условия определяются эталонными перечнями обязательных работ и документов, правилами проверки их статусов и связей, требованиями к KKS-идентификации и ограничениями по наличию открытых критических замечаний. Самостоятельная модель нормативных требований рассматривается как дальнейшее развитие; в реализованном прототипе её функцию частично выполняют заданные перечни обязательных работ, типов документов и реквизитов. Для каждого условия используется трёхзначный результат: $q_j(I_\kappa) \in \{1, 0, \emptyset\}$, где 1означает, что условие подтверждено доступными данными; 0— что установлено его невыполнение; $\emptyset$— что проверка невозможна вследствие отсутствия, неоднозначности или противоречивости данных. Такое различие необходимо, поскольку отсутствие информационного подтверждения не всегда означает установленное невыполнение работы или физическую неготовность объекта.

Проверка выполняется по четырём взаимосвязанным группам условий. Во-первых, анализируется выполнение обязательных работ. Для каждой работы w, относящейся к заданной системе и стадии, проверяются её наличие в актуальной программе, нормализованный статус, фактическая дата выполнения и наличие необходимых связей с результатами и документами: $WorkConfirmed(w, \tau) = Status(w, \tau) \in S_{\text{complete}} \wedge Trace_{str}(w, s) = 1$. Статус выполнения работы при этом не отождествляется со статусом её документального оформления. Работа может быть завершена физически, но не иметь допустимого подтверждающего документа; наоборот, наличие документа не должно автоматически изменять производственный статус работы.

Во-вторых, проверяется наличие и допустимость подтверждающих документов. Для документа dвводится предикат $ValidDocument(d, \tau) = Current(d, \tau) \wedge AllowedStatus(d) \wedge CorrectType(d) \wedge ValidKKS(d) \wedge RequiredFields(d) \wedge NoBlockingFinding(d, \tau)$. Работа считается документально подтверждённой, если существует хотя бы один связанный с ней допустимый документ: $DocConfirmed(w, \tau) = 1 \iff \exists d \in D_w : ValidDocument(d, \tau) = 1$. В прототипе предусмотрены формальные проверки обязательных реквизитов, шифра, версии, даты и связи документа с работой, а также структурные проверки наличия документа в эталонном перечне, соответствия ожидаемому типу, допустимого статуса и отсутствия открытого критического замечания. Содержательный анализ текста документа и автоматическое извлечение

его реквизитов относятся к перспективному этапу развития решения.

В-третьих, для имеющихся структурированных результатов испытаний проверяется их связь с работой и документом, а при наличии формализованного допустимого диапазона — соответствие установленному критерию. Для числового результата m

$$ResultCompliant(m) = \begin{cases} 1, & a_m \le value(m) \le b_m, \\ 0, & value(m) < a_m \vee value(m) > b_m, \\ \emptyset, & \text{если значение или границы отсутствуют.} \end{cases}$$

Модель данных предусматривает хранение результата, единицы измерения, допустимых границ, признака соответствия, метода получения и сведений о верификации. Однако автоматическое извлечение таких значений из файлов протоколов в рамках текущего прототипа не реализовано.

В-четвёртых, анализируются замечания, связанные с системой, работами, результатами и документами. Множество блокирующих факторов определяется как $F_к^{block} = \{f \in F: Open(f, \tau) = 1 \wedge Severity(f) = critical\}$. Использование критичности как признака блокировки представляет базовое формализованное правило. В промышленной реализации оно должно уточняться с учётом стадии ПНР, объекта замечания и полномочий принимающего решение лица.

По результатам проверок множество условий разделяется на три подмножества:

$$Q_k = \begin{cases} Q_к^+\{q_j: q_j(I_к) = 1\} \\ Q_к^-\{q_j: q_j(I_к) = 0\}, \\ Q_к^?\{q_j: q_j(I_к) = \emptyset\} \end{cases}$$

Для количественной характеристики может использоваться показатель полноты информационного подтверждения

$$C(к) = \frac{\mid Q_к^+ \mid}{\mid Q_к^+ \mid + \mid Q_к^- \mid + \mid Q_к^? \mid}.$$

Этот показатель не является самостоятельным критерием готовности. Высокая степень полноты не компенсирует наличие хотя бы одного критического невыполненного условия или блокирующего замечания. Поэтому наряду с количественной оценкой формируется категориальный результат:

$$Support(к) = \begin{cases} supported, & Q_{к,crit}^- = \emptyset,\ Q_{к,crit}^? = \emptyset,\ F_к^{block} = \emptyset; \\ not\_supported, & Q_{к,crit}^- \neq \emptyset \vee F_к^{block} \neq \emptyset; \\ undetermined, & Q_{к,crit}^? \neq \emptyset. \end{cases}$$

Таким образом, алгоритм различает три ситуации: доступные данные поддерживают положительное решение; выявлены формализованные препятствия; информации недостаточно для определённого вывода.

Итог анализа представляется структурой $A(к) = \langle C(к), Q_к^+, Q_к^-, Q_к^?, B_к, Support(к)\rangle$, где $B_к$— перечень факторов, требующих устранения либо экспертного рассмотрения. Каждый фактор связывается с проверяемым условием, объектом, исходными данными и применённым правилом: $b = \langle criterion, object, source, reason, severity\rangle$.

Благодаря отношениям прослеживаемости результат может быть раскрыт до конкретной работы, подтверждающего документа, результата испытания или замечания. Объяснимость в данном случае обеспечивается не построением произвольного текстового заключения, а сохранением цепочки результат проверки → применённое правило → связанные сущности → исходные данные.

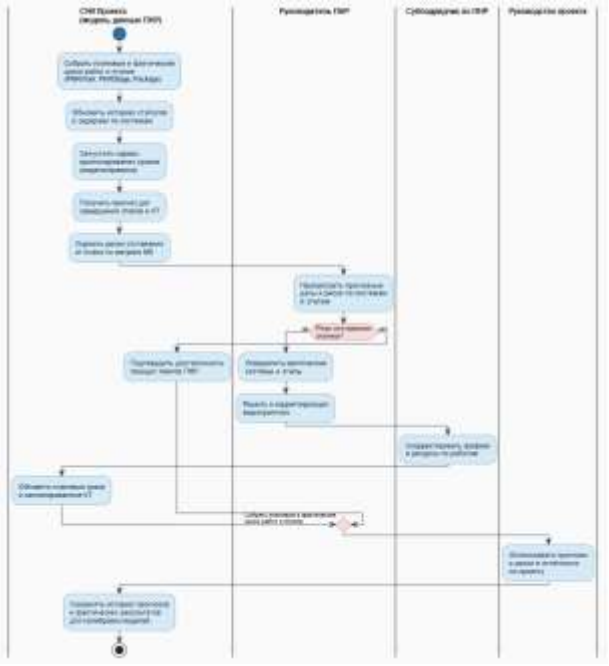

Рис. 4. BPMN-диаграмма контроля готовности систем и этапов ПНР (по материалам ВКР А. И. Соцкого)

На текущем этапе в прототипе представлены эталонные перечни работ и документов, связи между ними, нормализация статусов, проверка KKS, формальные и структурные проверки документов, учёт критических замечаний и расчёт комплектности пакета. Трёхзначная логика результата, самостоятельное представление требований и полная трассировка каждого алгоритмического вывода являются формальным развитием прототипа и требуют дальнейшей программной реализации и проверки на производственных данных.

Предлагаемый алгоритм, таким образом, не подменяет инженерную оценку готовности системы, а преобразует интегрированные данные в структурированный результат, показывающий, какие формализуемые условия подтверждены, какие нарушены и для каких отсутствуют достаточные сведения. Этот результат используется как информационная основа последующего решения уполномоченного специалиста или комиссии.

6. ДЕМОНСТРАЦИЯ МЕХАНИЗМА НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ АЭС

Для демонстрации предлагаемого механизма рассмотрим модельное представление условной системы технического водоснабжения с KKS-кодом 01PA. Выбор системы соответствует прототипу модели данных, разработанному на предыдущем этапе исследования. Рассматриваемый пример не содержит производственных данных конкретного энергоблока и предназначен для демонстрации того, каким образом сведения о физических объектах, работах ПНР,

результатах испытаний, подтверждающих документах и замечаниях объединяются отношениями прослеживаемости и преобразуются в информационные основания для принятия решения о готовности.

Пусть для рассматриваемой системы задан контекст $\kappa = \langle s, g, \tau \rangle$, где s— система 01PA, g— рассматриваемая стадия готовности, τ— момент актуальности данных. Информационное представление системы включает оборудование, относящиеся к нему работы ПНР, результаты испытаний, подтверждающие документы, замечания и сформированный комплект: $I_\kappa = \langle O, W, T, M, D, F, P, L \rangle$, где L— множество отношений прослеживаемости между перечисленными сущностями. На текущем этапе самостоятельный реестр нормативных требований в прототипе не реализован. Формализуемые условия готовности задаются посредством эталонных перечней обязательных работ и подтверждающих документов, требований к их реквизитам и статусам, допустимых диапазонов измеряемых параметров и правил учёта замечаний. Таким образом, в демонстрационной модели применимое условие q_j задаёт требуемую конфигурацию сущностей и отношений, например $System \to Equipment \to Work \to Document \to Package$, а для работы, предусматривающей количественную оценку результата испытания $System \to Equipment \to Work \to Test \to Result \to Document$. Наличие всех требуемых сущностей само по себе не является достаточным основанием для положительной оценки. Существенны также корректность отношений между ними и допустимость их состояний. Поэтому в рамках модели различаются три основных типа препятствий: нарушение полноты, нарушение связности и нарушение допустимости.

Нарушение полноты возникает при отсутствии элемента, обязательного для рассматриваемого условия. Например, работа включена в применимый перечень и имеет статус завершённой, однако связанный с ней подтверждающий документ отсутствует: $w \in W_\kappa^{req}, Completed(w, \tau) = 1, D_w = \emptyset$. В этом случае физическое выполнение работы не отрицается, однако доступные данные не обеспечивают её документального подтверждения $DocConfirmed(w, \tau) = 0$.

Нарушение связности возникает, когда необходимые информационные объекты присутствуют, но не образуют требуемую цепочку прослеживаемости. Например, в комплекте имеется документ требуемого типа и допустимого статуса, однако его KKS-код соответствует другой технологической системе $Exists(d) = 1, AllowedStatus(d) = 1, KKS(d) \neq KKS(s)$. Формальное наличие документа в этом случае не позволяет использовать его как подтверждение готовности рассматриваемой системы, поскольку $Trace_{sem}(d, s, \tau) = 0$. Этот пример показывает принципиальное отличие предлагаемого подхода от простой проверки количества документов: комплект может быть формально полным по числу позиций, но не обеспечивать требуемую прослеживаемость к объекту оценки.

Нарушение допустимости имеет место, если необходимые сущности и связи существуют, но хотя бы один элемент не удовлетворяет установленному критерию. Например, подтверждающий документ связан с требуемой работой и системой, однако имеет статус, не входящий в множество допустимых: $d \in D_w, Trace_{sem}(w, d, \tau) = 1, Status(d, \tau) \notin S_D^{allowed}$. Тогда $ValidDocument(d, \tau) = 0$, и документ не может рассматриваться как допустимое подтверждение выполнения условия.

Аналогичным образом обрабатывается структурированный результат испытания. Если для параметра m задан допустимый диапазон $[a_m, b_m]$, то при $value(m) > b_m$ условие соответствия результата не выполняется: $ResultCompliant(m) = 0$. При этом результат сохраняет прослеживаемость к испытанию, работе, оборудованию и подтверждающему документу, что позволяет установить не только сам факт отрицательной проверки, но и её предметное основание.

Отдельный класс препятствий образуют открытые замечания. Если замечание f связано с элементом рассматриваемой цепочки, имеет статус open и критичность critical, то в базовой модели оно рассматривается как блокирующий фактор: $Open(f, \tau) = 1 \wedge Severity(f) = critical \Rightarrow f \in F_\kappa^{block}$. Таким образом, даже при наличии всех обязательных работ и документов положительное решение не поддерживается моделью до устранения соответствующего блокирующего фактора. При промышленном применении это правило должно уточняться с учётом стадии ПНР, предмета замечания и установленной процедуры принятия решения.

Таблица I. Результаты проверки модельных ситуаций

Модельная ситуация	**Проверяемое свойство**	**Формальный результат**
Отсутствует обязательный подтверждающий документ	Полнота	Условие не подтверждено
Документ имеет KKS другой системы	Связность	Нарушена прослеживаемость
Документ имеет недопустимый статус	Допустимость	Документ не принимается как подтверждение
Результат испытания находится вне заданного диапазона	Допустимость результата	Условие не выполнено
Имеется открытое критическое замечание	Отсутствие блокирующих факторов	Положительное решение не поддерживается
Данных недостаточно для однозначной проверки	Определённость	Недостаточно данных

Принципиально иной результат формируется при недостаточности данных. Например, результат испытания зарегистрирован, но допустимые границы параметра отсутствуют, либо KKS-код документа не позволяет однозначно установить его принадлежность объекту. В такой ситуации модель не должна автоматически интерпретировать неопределённость как нарушение: $q_j(I_\kappa) = \emptyset$. Тем самым различаются установленное невыполнение условия и невозможность

сделать определённый вывод на основании доступной информации. Рассмотренные ситуации сведены в таблицу 1.

Для каждого условия q_j формируется один из трёх результатов: $q_j(I_к) \in \{1,0,\emptyset\}$, что позволяет разделить множество проверяемых условий на $Q_к = Q_к^+ \cup Q_к^- \cup Q_к^?$. При этом модель обеспечивает возможность раскрытия результата до исходных информационных объектов. Например, отрицательный результат может быть представлен трассой $q_j \to w \to d \to f$, показывающей, что условие q_j относится к работе w, работа подтверждается документом d, а с документом связано открытое блокирующее замечание f. Для другой ситуации трасса может иметь вид $q_k \to w \to t \to m \to d$, где основанием отрицательного результата является выход измеренного значения m за установленный допустимый диапазон.

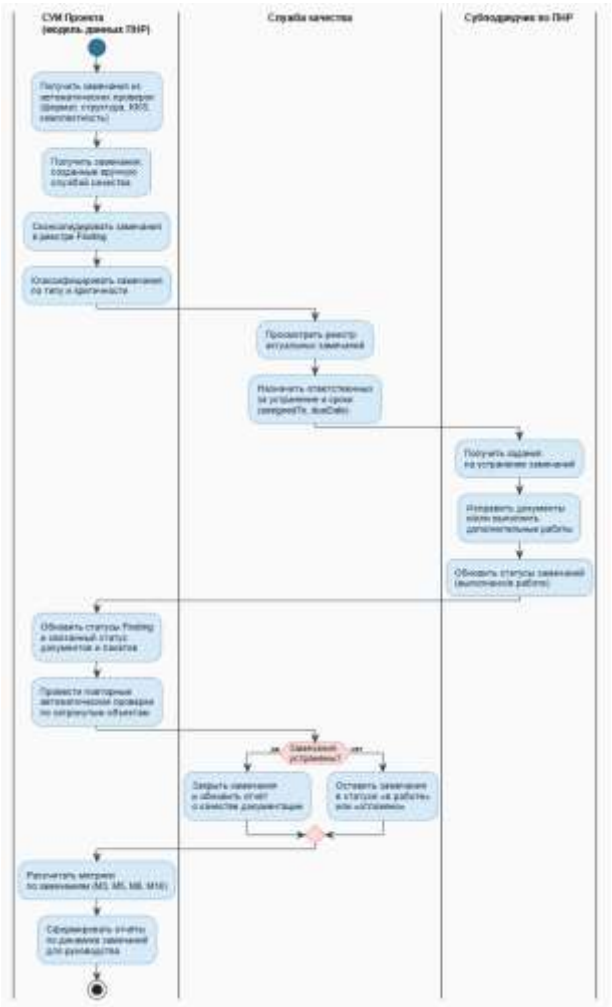

Рис. 5. BPMN-диаграмма мониторинга и обработки замечаний (по материалам ВКР А. И. Соцкого)

Результатом применения формальной модели к рассматриваемому сценарию является структура $A(к) = \langle C(к), Q_к^+, Q_к^-, Q_к^?, B_к, Support(к)\rangle$, объединяющая оценку полноты информационного подтверждения, множества подтверждённых, нарушенных и неопределённых условий, перечень препятствующих факторов и категориальный статус поддержки решения.

Представленная демонстрация имеет модельный характер и не является результатом опытной эксплуатации на производственных данных. Её назначение состоит в проверке логической применимости предложенной конструкции: модель позволяет представить различные виды информационных препятствий, отличить отсутствие обязательного элемента от нарушения его связности или допустимости, отделить установленное невыполнение условия от недостаточности данных и сохранить объясняющую трассу от результата анализа до исходных сущностей.

Таким образом, на уровне предложенной модели показан механизм перехода {объекты и работы ПНР → связанные результаты, документы и замечания → проверка формализуемых условий → структурированные основания решения} без утверждения о промышленной верификации или фактической эффективности алгоритма на реальных данных. Именно такая граница соответствует текущему этапу исследования: **работоспособность обосновывается на уровне формальной модели и её применения к характерным предметным ситуациям, а проверка на производственных данных относится к следующему этапу работы**.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ОГРАНИЧЕНИЯ И РИСКИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Полученные результаты обосновывают принципиальную возможность переноса части контекста, который в существующей практике восстанавливается специалистами вручную, в формализованную информационно-знаниевую модель. В вычислимой форме могут быть представлены сущности ПНР, отношения между ними, правила проверки, типы нарушений и трассы от результата анализа к исходным данным. Тем самым рабочая гипотеза получает конструктивное обоснование на уровне модели. Вместе с тем проведённое исследование не подтверждает полноту такой формализации для всех ситуаций ПНР и не заменяет опытной проверки на производственных данных.

Предлагаемый механизм охватывает прежде всего операции поиска, идентификации, связывания и формальной проверки данных. Он позволяет установить наличие обязательной работы или документа, проверить статус и версию, сопоставить сведения по KKS, определить отсутствие требуемой связи, проверить числовой результат относительно заданного диапазона и выявить открытое замечание установленной критичности. За пределами модели остаются оценка достаточности испытаний, интерпретация нетиповых отклонений, анализ компенсирующих мероприятий, учёт совокупного риска и ответственное решение о переходе системы к следующему этапу.

Поэтому результат алгоритма $A(к)$ не тождествен итоговому решению $Dec(к)$. Последнее формируется уполномоченным специалистом или комиссией с учётом результата формальной проверки, экспертных знаний, неформализованных обстоятельств и установленных процедур: $Dec(к) = \delta(A(к), K_e, U, P)$, где K_e— экспертное знание, U— дополнительные обстоятельства, P— полномочия и регламент принятия решения. Фундаментальное ограничение подхода связано с тем,

что алгоритм работает не с физическим состоянием системы непосредственно, а с его информационным представлением. Пусть $P(\tau)$обозначает фактическое состояние объекта, а $I(\tau)$— сведения о нём. В общем случае $I(\tau) = \varphi(P(\tau)), I(\tau) \neq P(\tau)$, поскольку данные могут быть неполными, запаздывающими, противоречивыми или ошибочными. Даже корректный алгоритм не может компенсировать неверное отражение физической реальности в исходных данных.

К основным ограничениям относятся неполнота сведений, несвоевременное обновление статусов, конфликты между источниками, ошибки идентификации, неверный выбор актуальной версии документа и отсутствие информации о происхождении записи. Такие ситуации должны приводить не к принудительному положительному или отрицательному выводу, а к состоянию неопределённости. Использование трёхзначной логики $\{1, 0, \emptyset\}$позволяет различать подтверждённое условие, установленное нарушение и недостаточность данных.

Отдельный риск связан с ошибочным формированием отношений прослеживаемости. Возможны ложные связи$\hat{L}(x, y) = 1, L^*(x, y) = 0,$ и пропущенные связи $\hat{L}(x, y) = 0, L^*(x, y) = 1.$ Ложная связь особенно опасна, поскольку может создать видимость подтверждения работы или требования неподходящим документом. Для снижения этого риска требуется сохранять источник и способ установления связи, а автоматически сформированные или неоднозначные соответствия передавать на экспертную проверку.

Систематическая ошибка возможна и при неверной формализации правил. Упрощение нормативного требования, ошибочная область применимости, устаревшая редакция, неверно заданная критичность замечания или неполный критерий допустимости могут привести к воспроизводимому, но предметно ошибочному результату. Поэтому правила должны иметь источник, версию, период действия и процедуру экспертного согласования.

Сочетание ошибок данных, связей и правил создаёт риск ложноположительных и ложноотрицательных результатов. Ложноположительный результат означает, что модель поддерживает положительное решение при фактическом невыполнении условий; ложноотрицательный — что положительное решение не поддерживается вследствие неполных или несвоевременно обновлённых данных. Первый риск более критичен с точки зрения безопасности, второй может приводить к необоснованным задержкам и повторным работам. Выделение состояния undetermined снижает вероятность ложной определённости, но не устраняет необходимость проверки исходных сведений.

Не менее существенен риск некритического использования результата человеком. Показатель полноты не должен интерпретироваться как процент физической готовности, а статус supported — как автоматическое разрешение на переход. Отсутствие замечания в информационной системе не является доказательством отсутствия проблемы в физическом объекте. Поэтому в представлении результата должны быть явно указаны момент актуальности данных, использованные источники, применённые правила, неопределённые условия и границы проведённой проверки.

Основные риски и меры их снижения сведены в таблицу 2.

Таблица II. Основные риски и меры их снижения

Источник риска	Возможное последствие	Механизм снижения
Неполные или устаревшие данные	Неопределённый либо ошибочный вывод	Контроль актуальности, трёхзначная логика
Ошибочная идентификация или связь	Ложное подтверждение либо потеря прослеживаемости	Валидация KKS, хранение происхождения, экспертная проверка
Неверное или неполное правило	Систематическая ошибка анализа	Версионность, указание источника, предметное согласование
Противоречие источников	Неоднозначность результата	Правила приоритета и передача конфликта специалисту
Ошибка извлечения из документа	Искажение реквизита или результата	Статус «не верифицировано», ручное подтверждение
Некритическое использование оценки	Подмена инженерного решения алгоритмом	Регламент применения и сохранение ответственности специалиста

Таким образом, качество результата определяется не только корректностью алгоритма, но и всей цепочкой формирования основания решения: $Quality(A) = f(Quality(P \rightarrow I), Quality(L), Quality(Q), Quality(Interpretation))$, где учитываются качество отображения физического состояния в данные, корректность отношений прослеживаемости, адекватность правил и ответственная интерпретация результата.

Предлагаемый подход не устраняет экспертность, а изменяет распределение функций между специалистом и информационной системой. Формализуемые операции поиска, сопоставления и проверки могут выполняться вычислительным механизмом, тогда как за экспертом сохраняются оценка применимости правил, анализ исключений и принятие ответственного решения. Именно в таком качестве модель может рассматриваться как средство повышения прослеживаемости и обоснованности управления ПНР, а не как средство автоматической замены инженерного суждения.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе рассмотрена задача формирования информационных оснований для принятия решения о готовности технологической системы АЭС на этапе пусконаладочных работ в условиях фрагментации сведений о физических объектах, выполненных работах, результатах испытаний, подтверждающих документах и

замечаниях. Предложенный подход развивает ранее сформулированную концепцию онтологического представления жизненного цикла сложного инженерного объекта и переводит её применительно к ПНР в плоскость вычислимой формальной модели.

Основным результатом исследования является механизм перехода от разрозненных информационных свидетельств к структурированному, прослеживаемому и объяснимому представлению оснований инженерного решения. Для этого определены ключевые сущности предметной области и отношения между ними, предложена формальная модель прослеживаемости, рассмотрен механизм её операционализации в прикладной модели данных и сформулирован алгоритм проверки формализуемых условий готовности. Результат такой проверки включает подтверждённые, нарушенные и неопределённые условия, препятствующие факторы и трассы, связывающие каждый вывод с применённым правилом и исходными данными.

Тем самым рабочая гипотеза о возможности переноса формализуемой части экспертно восстанавливаемого контекста в вычислимую информационно-знаниевую модель получает конструктивное обоснование на уровне предложенной формальной модели и её применения к характерным предметным ситуациям. При этом результат алгоритмической проверки не отождествляется ни с физической готовностью системы, ни с итоговым инженерным решением. Полнота формализации, устойчивость механизма к качеству реальных данных и его практическая эффективность требуют последующей апробации в производственной среде с участием профильных специалистов.

Первоочередным направлением дальнейших исследований является апробация предложенной модели на производственных данных, позволяющая оценить полноту представления предметной области, качество идентификации и связывания сущностей, адекватность формализованных правил, причины возникновения неопределённых результатов, а также риски ложноположительных и ложноотрицательных выводов. Одновременно необходимо расширение модели на другие технологические системы и этапы ПНР с развитием типологии условий готовности, правил их применимости и зависимостей между различными стадиями испытаний.

Дальнейшее развитие онтологического представления связано с переходом от его использования преимущественно как концептуального фундамента к формированию исполняемого семантического слоя. Такой слой может обеспечить формальное задание семантики сущностей и отношений, вывод производных связей, выявление логических противоречий и проверку применимости правил. При этом для каждого автоматически полученного вывода должны сохраняться его происхождение, использованные исходные факты и применённое правило, что является необходимым условием объяснимости и экспертной верификации.

Отдельное направление исследований связано с извлечением и структурированием сведений из слабоструктурированных и файловых документов. Перспективным является автоматизированное выделение KKS-идентификаторов, реквизитов документов, результатов измерений, единиц и допустимых диапазонов, замечаний и других значимых сущностей с их последующим включением в общую модель прослеживаемости. Для критически значимых сведений автоматическое извлечение должно сопровождаться сохранением происхождения данных и процедурой верификации специалистом.

Следующим уровнем развития предлагаемого подхода является переход от анализа готовности отдельной технологической системы к поддержке управления взаимозависимым комплексом ПНР. Реальный процесс испытаний представляет собой систему технологических, временных, ресурсных, организационных и информационных зависимостей, вследствие чего готовность одной системы может являться условием начала работ на другой, а отдельное замечание, документ или результат испытания — влиять на достижимость нескольких последующих состояний. Расширение модели на такие зависимости позволит перейти от вопроса о достаточности информационных оснований отдельного решения к анализу влияния текущего состояния работ, документов и замечаний на достижение последующих вех ПНР.

Стратегической перспективой исследования является формирование накопительной информационно-знаниевой модели ПНР, в которой физические объекты, выполняемые работы, требования, результаты испытаний, подтверждающие документы, замечания, принятые решения и их последствия образуют единое прослеживаемое пространство. Накопление таких данных создаёт предпосылки для выявления критических зависимостей, анализа причин задержек, прогнозирования проблемных ситуаций и исследования возможностей оптимизации последовательности работ и использования ресурсов.

Таким образом, предлагаемая исследовательская траектория может быть представлена как последовательный переход

разрозненные данные
→ прослеживаемая информационно
– знаниевая модель
→ объяснимые основания решения
→ анализ взаимозависимых процессов
→ прогнозирование и оптимизация ПНР

от информационной поддержки отдельного решения о готовности системы — к повышению управляемости процесса ПНР сложного инженерного объекта в целом.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] International Atomic Energy Agency. Commissioning for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-28. Vienna: IAEA, 2014.
[2] International Atomic Energy Agency. Commissioning Guidelines for Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.10. Vienna: IAEA, 2018.
[3] International Atomic Energy Agency. Configuration Management in Nuclear Power Plants. IAEA-TECDOC-1335. Vienna: IAEA, 2003.

[4] International Atomic Energy Agency. Information Technology for Nuclear Power Plant Configuration Management. IAEA-TECDOC-1651. Vienna: IAEA, 2010.
[5] НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.
[6] Жуков А. Г. и др. Ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС-2006: монография. Москва, 2021.
[7] ОСТ 34-37-796-85. Атомные станции. Организация и проведение пусконаладочных работ. Общие положения.
[8] ОСТ 34-37-808-85. Атомные станции. Пусконаладочные работы. Состав и оформление отчётной документации.
[9] СТО 1.1.1.03.003.0879-2018. Пусконаладочные работы на атомных станциях. Приёмка пусконаладочных работ на технологических системах и оборудовании.
[10] СТО 1.1.1.03.003.0880-2017. Пусконаладочные работы на атомных станциях. Основные положения. Объём и последовательность проведения пусконаладочных работ.
[11] СТО 1.1.1.03.003.0907-2018. Пусконаладочные работы на атомных станциях. Отчётная документация.
[12] СТО 1.1.1.03.003.0916-2018. Правила ввода блоков атомных станций в эксплуатацию.
[13] Abdel-Aty T. A., Negri E. Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: a systematic literature review // Journal of Intelligent Manufacturing. 2024. DOI: 10.1007/s10845-024-02407-1.
[14] Wang B. et al. Requirements traceability technologies and technology transfer decision support: A systematic review. 2018.
[15] Hao J. et al. Integrating and navigating engineering design decision-related knowledge using decision knowledge graph // Advanced Engineering Informatics. 2021. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101366.
[16] Ryś A. et al. Model management to support systems engineering workflows using ontology-based knowledge graphs. 2024.
[17] Ekimovskaya V. A., Barsukov I. A., Ekimenko A. A., Litvin S. L., Sotsky A. I., Zhabitsky M. G. Concept of the use of ontological model in nuclear power to manage the life cycle of a complex engineering object during the construction phase // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Vol. 13, no. 8. P. 28–40. ISSN 2307-8162.

Formal Data Traceability Model to Support Decision-Making on NPP System Readiness During Commissioning

A.I. Sotsky, M.G. Zhabitskii, A.A. Khan, V.A. Ogneva

Abstract—This paper addresses the problem of establishing an information basis for decision support regarding the readiness of a nuclear power plant technological system during commissioning, where data on physical assets, completed work, requirements, test results, supporting documents, and findings are fragmented. An approach is proposed that combines an ontological foundation of the domain, a formal traceability model, an application data model, and algorithmic verification of formalizable readiness conditions. The key entities and relations are defined to trace links from a technological object and a requirement through work activities, tests, and results to supporting documents, findings, and decision grounds.

An algorithm is proposed that distinguishes confirmed, violated, and indeterminate conditions and produces an explainable list of blocking factors. Using a model representation of a technological system, the approach demonstrates the ability to identify deficiencies in the completeness, connectivity, and admissibility of the information basis while preserving a trace from each analysis result to the source data. The findings provide a constructive justification for transferring the formalizable part of the expert-reconstructed commissioning context into a computable information and knowledge model intended to improve the traceability and explainability of engineering decision grounds.

Keywords—commissioning, data integration, data traceability, decision support, information and knowledge model, nuclear power plant, ontological modeling, technological system readiness.

REFERENCES

[1] International Atomic Energy Agency, Commissioning for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-28. Vienna, Austria: IAEA, 2014.

[2] International Atomic Energy Agency, Commissioning Guidelines for Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.10. Vienna, Austria: IAEA, 2018.

[3] International Atomic Energy Agency, Configuration Management in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1335. Vienna, Austria: IAEA, 2003.

[4] International Atomic Energy Agency, Information Technology for Nuclear Power Plant Configuration Management, IAEA-TECDOC-1651. Vienna, Austria: IAEA, 2010.

[5] NP-001-15, General Safety Provisions for Nuclear Power Plants. Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia, 2015 (in Russian).

[6] A. G. Zhukov et al., Commissioning of AES-2006 Nuclear Power Units. Moscow, Russia, 2021 (in Russian).

[7] OST 34-37-796-85, Nuclear Power Plants: Organization and Performance of Commissioning Works. General Provisions (in Russian).

[8] OST 34-37-808-85, Nuclear Power Plants: Commissioning Works. Composition and Preparation of Reporting Documentation (in Russian).

[9] STO 1.1.1.03.003.0879-2018, Commissioning Works at Nuclear Power Plants: Acceptance of Commissioning Works on Process Systems and Equipment (in Russian).

[10] STO 1.1.1.03.003.0880-2017, Commissioning Works at Nuclear Power Plants: Basic Provisions. Scope and Sequence of Commissioning Works (in Russian).

[11] STO 1.1.1.03.003.0907-2018, Commissioning Works at Nuclear Power Plants: Reporting Documentation (in Russian).

[12] STO 1.1.1.03.003.0916-2018, Rules for Commissioning Nuclear Power Units (in Russian).

[13] T. A. Abdel-Aty and E. Negri, “Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: A systematic literature review,” Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, doi: 10.1007/s10845-024-02407-1.

[14] B. Wang et al., “Requirements traceability technologies and technology transfer decision support: A systematic review,” 2018.

[15] J. Hao et al., “Integrating and navigating engineering design decision-related knowledge using decision knowledge graph,” Advanced Engineering Informatics, 2021, doi: 10.1016/j.aei.2021.101366.

[16] A. Ryś et al., “Model management to support systems engineering workflows using ontology-based knowledge graphs,” 2024.

[17] V. A. Ekimovskaya, I. A. Barsukov, A. A. Ekimenko, S. L. Litvin, A. I. Sotsky, and M. G. Zhabitsky, “Concept of the use of ontological model in nuclear power to manage the life cycle of a complex engineering object during the construction phase,” International Journal of Open Information Technologies, vol. 13, no. 8, pp. 28-40, 2025.