

ПРИКЛАДНЫЕ ОНТОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.04

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39

**Онтологическая модель профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия**© 2026, М.А. Насонов¹✉, С.А. Манцеров²¹ Группа компаний «Синтез-ОКА», Дзержинск, Россия² Нижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия**Аннотация**

Рассматривается задача формализации экспертных знаний в области профилактического технического обслуживания промышленного оборудования, возникающая при интерпретации результатов визуальных осмотров с учётом условий эксплуатации. Предметом исследования является построение онтологической модели, обеспечивающей логически обоснованный переход от неструктурированных описаний признаков технического состояния к конкретным действиям по обслуживанию оборудования. Предложена многоуровневая онтологическая модель, включающая уровни: осмотр, признаки, контекст эксплуатации, техническое состояние, действие. Областью применения результатов являются системы поддержки принятия решений в техническом обслуживании оборудования. Новизна заключается в объединении параметров контекста (возраст объекта, уровень критичности, агрессивность рабочей среды и др.) с механизмом логического вывода, а также в применении метода структурирования рекомендаций как композиции базового действия и уточнений по условиям эксплуатации. Модель построена в среде *Python* и проверена на конкретной выборке данных: автоматически определены состояния оборудования, выработаны адаптивные рекомендации, сформированы отчёты. Модель показала устойчивость к неполноте информации. Применённый онтологический подход в технической диагностике способствовал получению практически значимых результатов для цифровизации процессов профилактического технического обслуживания оборудования в промышленности.

Ключевые слова: онтология, профилактическое обслуживание, осмотр оборудования, техническое состояние, контекст эксплуатации, логический вывод, экспертные знания.

Цитирование: Насонов М.А., Манцеров С.А. Онтологическая модель профилактического обслуживания оборудования промышленного предприятия. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.25-39. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39.

Вклад авторов: Насонов М.А. – постановка задачи, разработка концепции, формализация модели, разработка программного кода; Манцеров С.А. – экспертиза материалов, проверка результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В условиях повышенных требований к надёжности, безопасности и эффективности технологических процессов промышленных предприятий возрастает значимость профилактического технического обслуживания (ПТО) оборудования [1]. Переход от планово-предупредительных ремонтов к модели ПТО на предприятии рассматривается как комплексный, многоаспектный, эволюционный процесс. Для этого требуются изменения в организационной структуре и методах представления знаний о техническом состоянии (ТС) оборудования, особенно в условиях цифровизации производственной среды.

Эффективность принимаемых решений во многом определяется не только технической оснащённостью предприятия, но и доступностью, полнотой и структурированностью знаний о фактическом ТС оборудования [2–5]. Значительная часть информации формируется в процессе проведения осмотров оборудования и опросов персонала, а также фиксируется в документах (актах, журналах, отчётах и др.). Эти данные включают конкретные наблюдаемые явления (например, потёки масла, следы коррозии, повышенные люфты и др.) и характеристики условий эксплуатации оборудования (интенсивность нагрузок, температурные колебания, агрессивность рабочей среды и др.). Большинство подобных сведений представлены в виде неструктурированных текстов и описаний с использованием профессионального жаргона и субъективных оценок, что делает их малоприспособленными для автоматической обработки и включения в цифровые платформы. Формализованные источники знаний (регламенты эксплуатации, паспорта оборудования, отраслевые и межотраслевые стандарты), как основа для нормативного подхода к обслуживанию, обычно лишены гибкости. Они не учитывают особенности эксплуатации отдельно взятого экземпляра оборудования, изменения его ТС между проверками, нарастающие эффекты усталости, историю отказов и редко содержат предписания, адаптируемые к текущей ситуации на объекте. С одной стороны, имеется обширный, но слабо формализованный набор эмпирических и экспертных данных, с другой, – формально полная, но жёсткая и неиндивидуализированная нормативная база. Это затрудняет формирование общей картины ТС оборудования, и требуется разработка подхода, способного включать разнородные источники в единую формальную модель, пригодную для использования в цифровой среде.

В этой связи актуальна задача объединения разнородных знаний, вовлечённых в процессы ПТО: *формализованных* в виде технической документации, инструкций по эксплуатации, стандартов обслуживания; *неформализованных*, включая наблюдения специалистов, текстовые описания результатов осмотров, прецеденты из истории ремонтов и индивидуальные особенности условий эксплуатации оборудования. Для решения этой задачи требуется создание формальной модели, способной выразить сущности, отношения и контекст ПТО в целостной и связной форме. Подобную модель можно создать в виде онтологии, позволяющей объединить и формализовать знания различной природы. Для этого необходимо формализовать предметную область (ПрО) ПТО с учётом её многоуровневой природы [6], выделить ключевые сущности и связи на основе анализа технической документации, стандартов, результатов осмотров и экспертных заключений, описать онтологическую структуру, построить полученную модель в *OWL*-формате [7] и проверить её применимость на реальных данных. Онтологическая модель (ОМ) предназначена для использования в цифровой среде и ориентируется на поддержку принятия решений (ППР), связанных с выбором и приоритизацией профилактических действий.

1 Обзор существующих подходов

В различных отраслях накоплен опыт применения онтологий для представления структурированных и неструктурированных данных, диагностики ТС, прогнозирования отказов и выбора обслуживающих воздействий.

Вопросы общей структуры и принципов построения онтологий рассмотрены в работе [8]. В контексте технических систем онтологии обеспечивают основу для семантической интероперабельности и повторного использования знаний. В [9] предложена гибкая методология инжиниринга онтологий, включающая поэтапное уточнение требований, итеративное построение онтологической структуры и валидацию с участием экспертов. Особое внимание уделяется прототипированию и адаптации к изменяющимся требованиям, что важно в усло-

виях промышленной эксплуатации оборудования. В [10] описаны онтологии, интегрированные в процессы проектирования, эксплуатации и обслуживания. Такой подход предполагает тесную связь между инженерными моделями, цифровыми двойниками и онтологическими представлениями. Важным является использование онтологии как структуры, объединяющей проектные, эксплуатационные и ремонтные данные. Анализ методологий, представленный в [11], сопоставляет распространённые подходы и выделяет критерии выбора методологии в зависимости от ПрО. Такой анализ важен при разработке онтологий для промышленных систем, где требуются адаптивность и итеративная валидация знаний.

Одно из направлений применения онтологий в технических системах связано с оценкой состояния оборудования и диагностикой отказов. В работах [12-14] ОМ используются как основа для представления признаков деградации, состояний объектов и правил принятия решений о необходимых воздействиях. ОМ позволяет формализовать причинно-следственные связи между наблюдаемыми аномалиями, факторами эксплуатации и потенциальными неисправностями. В [12] онтология дополняется предиктивным механизмом вывода и модулем интеллектуального слияния данных, что позволяет учитывать как текущие параметры состояния, так и историческую информацию о неисправностях, создавая предпосылки для более точного прогнозирования и раннего предупреждения отказов. Работа [15] посвящена оценке ТС электрооборудования с использованием нечётких весовых правил, разработке структуры признаков, состояний и воздействий, показана возможность гибкой интерпретации данных, поступающих из различных источников. В [16] предложено использовать иерархию продукционных правил, основанных на онтологической структуре объекта, для автоматизации диагностических процедур и принятия решений в условиях неполной информации. В [17] онтология используется как каркас для сопоставления цифровых моделей разрушенных стержневых систем с реальными объектами. Это позволяет формировать обоснованные предложения по техническому воздействию, учитывая различные источники информации о повреждениях и обстановке в эксплуатации. В [18] рассмотрен подход к построению ОМ на примере мостовых конструкций и приводятся конкретные правила, что позволяет оценивать ТС объекта на основе наблюдаемых признаков (например, трещин).

Для задач ППР в ПТО онтологии позволяют структурировать знания о типовых ситуациях, обслуживающих действиях, нормативных ограничениях и предпочтительных стратегиях ремонта. Архитектура цифрового двойника для диагностики неисправностей в производственных системах рассмотрена в [19] и предложено расширить когнитивные свойства цифровых двойников, где знания экспертов, семантическая совместимость и логический вывод используются в принятии решений в области обслуживания оборудования.

Онтологии находят широкое применение в моделировании жизненного цикла (ЖЦ) оборудования. Методология, предложенная в [20], дополняет рассмотренные подходы введением многоуровневой структуры онтологий, в которой различаются уровни концептов – от общих понятий до конкретных объектов оборудования. Таким образом, ОМ, учитывающие ЖЦ и контекст эксплуатации, обеспечивают точность, адаптивность и применимость в условиях промышленной эксплуатации оборудования.

Таким образом, актуальной задачей становится разработка ОМ, способной объединить различные уровни знаний – от описания объекта и признаков до определения действия и обеспечить их формализованное, логически связанное представление в цифровой среде.

2 Постановка задачи

Система ПТО на многих предприятиях строится на основе нормативно-справочной информации (перечни оборудования, классификаторы типовых работ, нормы ремонтных цик-

лов, методы контроля и др.). Эти данные в большинстве своём формализованы, что позволяет автоматизировать планирование ремонтов и документооборот. Однако действующие модели остаются ограниченными в части представления знаний о реальном ТС оборудования.

Практика эксплуатации оборудования на предприятии показывает, что информация о деградации оборудования и отклонениях от нормального ТС обычно содержится в текстовых описаниях актов осмотров, дефектных ведомостей, отчётов и оперативных журналах. Анализ описаний показывает, что в одном фрагменте текста могут одновременно присутствовать элементы различных уровней: описание физического объекта (например, «шток клапана»), наблюдаемый признак (например, «большой люфт»), оценка ТС (например, «допустимо, но требует наблюдения») и условия эксплуатации (например, «агрессивная среда»). Как правило, системы ПТО не обладают средствами формального представления таких многоуровневых знаний и не обеспечивают логических связей между условиями, признаками, состояниями и действиями. Это затрудняет автоматический анализ повторяющихся ситуаций, обобщение опыта, а также исключает возможность создания конкретизированных рекомендаций, учитывающих условия эксплуатации каждого экземпляра оборудования.

В условиях перехода к цифровым контурам управления и системам ППР ставится задача разработки ОМ экспертных знаний в ПТО, объединяющей результаты осмотров и условий эксплуатации и обеспечивающей ППР в ПТО.

3 Построение онтологической модели экспертных знаний

Предлагаемый подход основан на положениях стандартов, регламентирующих надёжно-ориентированное техническое обслуживание [21] и устанавливающих правила мониторинга ТС оборудования [22], а также принципах онтологического проектирования [23, 24].

3.1 Источники знаний

Классификация источников знаний представлена на рисунке 1.

Среди структурированных источников выделяются: нормативно-техническая документация, техническая и эксплуатационная документация (например, руководства по эксплуатации), классификаторы дефектов и др. (например, справочники технических характеристик оборудования). К числу неструктурированных источников относятся результаты осмотров, содержащие текстовые описания визуальных признаков, записи в различных учётных оперативных журналах, включающие экспертные оценки ТС и параметры условий эксплуатации.



Рисунок 1 – Источники знаний для использования в онтологической модели

3.2 Характеристика предметной области (пример)

Про исследования охватывает процессы ПТО запорной и регулирующей арматуры, эксплуатируемой в технологических системах химического производства. К данному классу оборудования относятся проходные седельные клапаны, предохранительные клапаны, регулирующие клапаны и электромагнитные клапаны различных типоразмеров. Эти изделия различаются по функциональному назначению, однако, обладают общими

конструктивными признаками и схожей структурой данных, что позволяет рассматривать их в едином онтологическом контексте.

Каждый клапан представляет собой техническую систему, включающую корпус, седло, запорный элемент (золотник, плунжер), пружинный механизм, уплотнительные элементы и привод. В процессе эксплуатации наибольшие нагрузки и износ испытывают запорные и уплотняющие детали, взаимодействующие со средой под давлением. В документации и данных осмотров выделяются типовые детали и узлы, формирующие основу для описания онтологических классов (корпус, седло, шток, пружина, уплотнение и др). В профилактическом обслуживании выявляются характерные дефекты и повреждения, связанные с коррозией, износом, деформацией и нарушением герметичности. Распространённые признаки, фиксируемые в результатах осмотров, включают, например: коррозионные повреждения корпуса или седла; износ уплотнительных элементов; ослабление пружины; загрязнение внутренних полостей; и др.

Для проведения анализа результатов осмотров выделяются следующие параметры условий эксплуатации: агрессивность среды (условно нормальная, повышенная или высокая); критичность оборудования (значимость отказа для технологического процесса); год изготовления (возраст оборудования); наработка (время) от предыдущего осмотра; история отказов.

Эти параметры образуют контекст, в рамках которого выполняется интерпретация признаков и формируются рекомендации по обслуживанию. Например, для клапанов с высокой критичностью и агрессивной средой даже незначительные признаки износа могут служить основанием для досрочной замены или внеочередного обслуживания, тогда как для клапанов нормальной категории допускается плановое устранение дефектов в рамках очередного цикла. График ПТО определяет периодичность осмотров, виды технических воздействий (очистка, регулировка, замена уплотнений, проверка герметичности и т.п.), а также позволяет согласовать загрузку ремонтных бригад и минимизировать простои технологического оборудования [25].

3.3 Структура знаний

Анализ источников позволяет выделить пять взаимосвязанных онтологических уровней, обеспечивающих полноту представления экспертных знаний (см. рисунок 2).

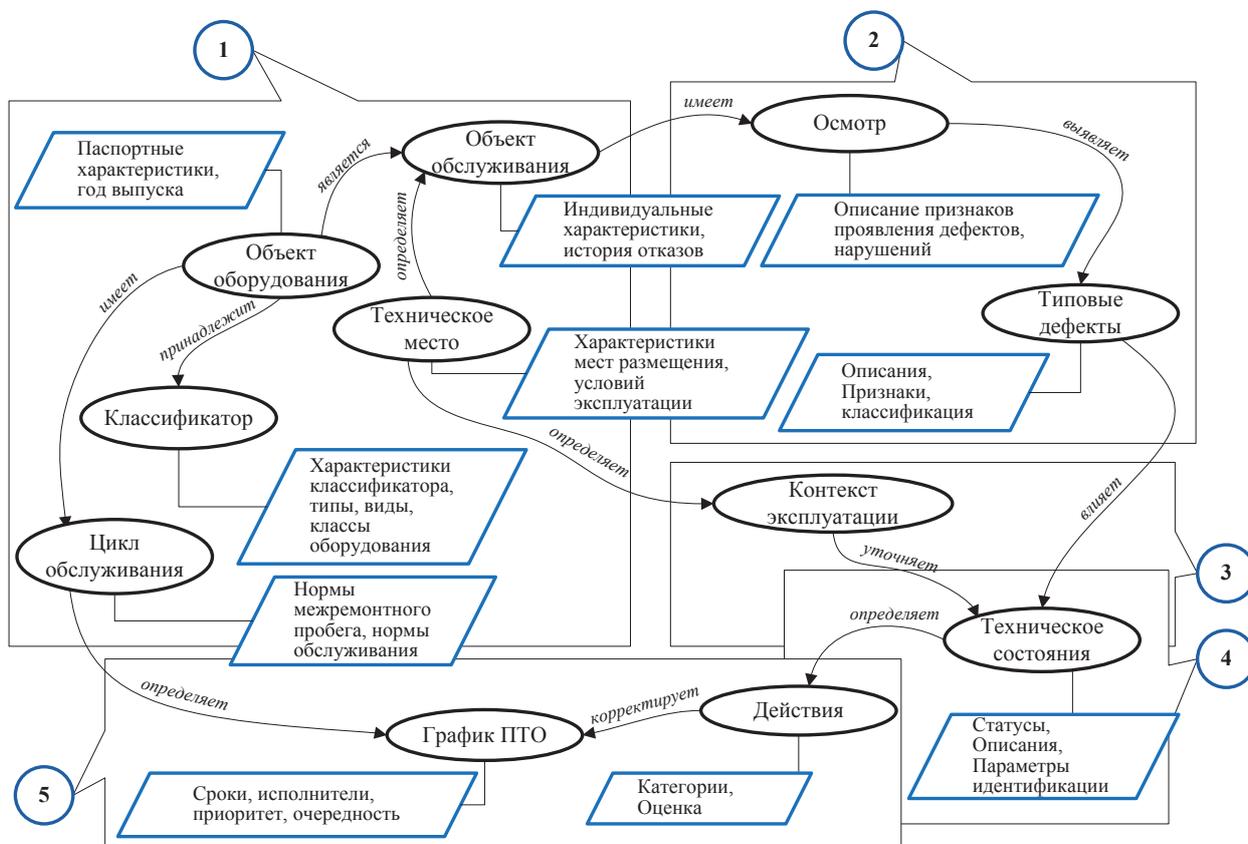


Рисунок 2 – Концептуальная схема онтологии профилактического технического обслуживания (ПТО)

- 1) *объектный уровень* представляет оборудование и его составные части (например, корпус, шток, седло и др.), обладающие конструктивными, функциональными и материальными характеристиками.
- 2) *признаковый уровень* содержит наблюдаемые признаки отклонений, выявляемые в процессе осмотров (например, коррозия, потёки, деформация, люфт и др.).
- 3) *контекстный уровень* описывает условия эксплуатации (например, температура, агрессивность среды, режимы нагрузки и др.), влияющие как на появление признаков, так и на допустимость определённого ТС.
- 4) *оценочный уровень* содержит экспертные суждения о ТС объекта (например, исправно, требует наблюдения, неисправно и др.).
- 5) *рекомендательный уровень* связывает оценки и контекст с типовыми действиями по обслуживанию, регламентными мероприятиями или дополнительными осмотрами.

Выделены сущности ПрО и их отношения и проведена формализация уровней в виде классов и свойств. ОМ позволяет учитывать обнаруженные дефекты и условия, в которых эксплуатируется объект.

3.4 Взаимодействие между уровнями онтологической модели

Переходы между уровнями ОМ формализованы следующими отображениями. Из множества результатов осмотров I извлекается множество признаков S с помощью функции $f_1: I \rightarrow S$. На основе множества признаков S и параметров контекста C определяется предполагаемое состояние объекта T функцией $f_2: S \times C \rightarrow T$. Каждому состоянию сопоставляется действие по обслуживанию A функцией $f_3: T \rightarrow A$.

Таким образом, сложная функция принятия решения имеет вид: $f(O) = f_3(f_2(f_1(I_O), C_O))$, где: I_O – результаты осмотров объекта O , C_O – параметры контекста эксплуатации объекта O , *результат* — действие A , учитывающее признаки дефектов и условия эксплуатации.

3.5 Компоненты онтологической модели

В таблице 1 приведён перечень компонентов ОМ с пояснениями их назначения, где представленные классы формируют концептуальную основу ОМ, определяя её предметную структуру. Каждый класс отражает отдельный аспект знаний о ТС оборудования – от первичных наблюдений до формализованных решений.

Таблица 1 – Классы модели

Наименование	Обозначение	Описание
Технический объект	<i>TechnicalObject</i>	Описывает технический объект (единицу оборудования), к которому относятся осмотры и параметры контекста
Результат осмотра	<i>Inspection</i>	Начальный источник информации, содержащий текстовое описание визуального состояния объекта. Представляет собой фактические наблюдения, зафиксированные экспертами или операторами
Признак	<i>ObservedSign</i>	Потенциально свидетельствует о нарушениях и является промежуточным звеном между неструктурированной информацией и её формализованным описанием
Контекст эксплуатации	<i>ContextParameter</i>	Включает параметры, влияющие на допустимые отклонения и требования к обслуживанию: критичность объекта, агрессивность среды эксплуатации. Эти параметры участвуют в логике определения состояния и приоритизации рекомендаций
Техническое состояние	<i>TechnicalState</i>	Формализованная категория, обобщающая совокупность признаков с учётом условий эксплуатации. Позволяет систематизировать объекты по степени отклонения от нормы и потенциальной угрозе отказа
Действие по обслуживанию	<i>MaintenanceAction</i>	Заключительное звено в цепочке вывода — конкретная рекомендация по вмешательству, обслуживанию или наблюдению

ОМ дополняется атрибутами, определяющими свойства экземпляров классов и обеспечивающими возможность логического вывода.

3.6 Инструментальные средства

ОМ построена с использованием библиотеки *Owlready2*¹, предназначенной для работы с онтологиями в формате *OWL (Web Ontology Language)*² в среде *Python*, что позволило обеспечить объединение онтологической структуры с процедурной логикой обработки технических осмотров и выработки рекомендаций. Выбор инструментария обусловлен функциональными возможностями библиотеки *Owlready2* и технологической совместимостью с инфраструктурой информационной системы³. Преимуществом данного инструментария является наличие поддержки классов *OWL*, объектных и атрибутивных свойств, механизмов логического вывода, а также возможность выполнения *SPARQL*⁴-запросов.

Интерактивная среда *Jupyter Notebook*⁵ позволила обеспечить пошаговую проверку логики модели и визуализацию промежуточных и итоговых результатов. Для предварительной обработки данных, загрузки таблиц, формирования отчётов и выполнения диагностических проверок применены инструменты библиотеки *pandas*⁶. Модули визуализации основаны на библиотеке *matplotlib*⁷. Структура модулей проекта представлена в таблице 2. Онтология сохраняется в формате *RDF/XML* и может быть экспортирована в другие системы.

Таблица 2 – Модули проекта

Модуль	Описание
<i>ontology_builder.py</i>	Построение и наполнение онтологии на основе исходных данных
<i>ontology_keywords.py</i>	Словари признаков, состояний и контекстных правил
<i>ontology_logic.py</i>	Логика вывода состояний и действий
<i>out_report.py</i>	Экспорт и форматирование отчётов в электронные таблицы
<i>ontology_visualizations.py</i>	Визуализация распределения признаков и состояний

3.7 Атрибуты классов

Для работы логики вывода требуется использование не только онтологических классов, но и их атрибутов – свойств, формализующих конкретные значения, описывающие состояние объекта (см. таблицу 3). Эти свойства позволяют модели структурировать информацию и выполнять над ней логические действия, например, фильтрация по возрасту объекта, по типу среды, по уровню критичности, получение итоговых рекомендаций и др.

Таблица 3 – Атрибуты классов модели

Класс	Атрибут	Тип	Назначение
<i>TechnicalObject</i>	<i>name</i>	Строка	Идентификатор объекта обслуживания
	<i>obj_type</i>	Строка	Тип оборудования
	<i>manufactureYear</i>	Целое число	Год выпуска оборудования (ввода в эксплуатацию)
	<i>criticality</i>	Строка	Уровень критичности отказов
	<i>environment</i>	Строка	Характеристика среды эксплуатации
<i>Inspection</i>	<i>inspection_date</i>	Дата	Дата проведения осмотра
	<i>inspection_text</i>	Строка	Текстовое описание результата осмотра
<i>ObservedSign</i>	<i>sign_name</i>	Строка	Наименование признака
<i>TechnicalState</i>	<i>state_description</i>	Строка	Описание состояния
<i>MaintenanceAction</i>	<i>action_description</i>	Строка	Текст рекомендуемого действия

¹ <https://pypi.org/project/owlready2>.

² <https://www.w3.org/OWL>.

³ Свидетельство о гос. регистр. пр. для ЭВМ № 2025612152 Росс. Ф. Система управления техническим обслуживанием и ремонтами оборудования (СММС) : заявл. 23.01.2025 : опубли. 28.01.2025 / М.А. Насонов.

⁴ <https://www.w3.org/TR/sparql11-query>.

⁵ <https://jupyter.org>.

⁶ <https://pandas.pydata.org>.

⁷ <https://matplotlib.org>.

3.8 Схема логического вывода

Логика работы модели выполняет поэтапный переход от результатов осмотра к формированию обоснованной рекомендации по ПТО (см. рисунок 3).

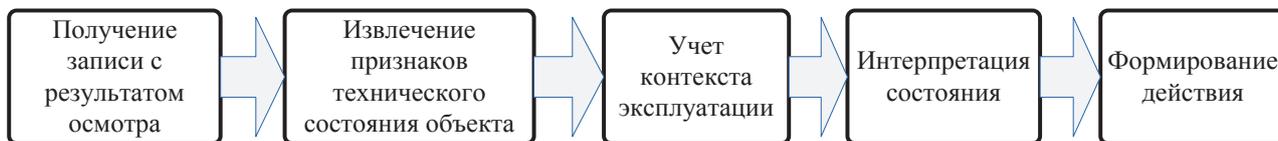


Рисунок 3 – Схема логического вывода

После получения результатов осмотра производится выделение признаков из текстового описания. Для этого используется словарь признаков, в котором каждому ключевому слову сопоставлен формализованный признак, а также связанное с ним возможное ТС. Анализ текста осмотра осуществляется по правилу полного или частичного совпадения с ключевыми словами. Один результат осмотра может содержать несколько признаков, каждый из которых учитывается при определении ТС. Для каждого технического объекта учитываются параметры, определяющие контекст эксплуатации (год выпуска оборудования, уровень критичности отказов, характеристика среды эксплуатации). Контекст оказывает непосредственное влияние на оценку выявленных признаков. Например, наличие потёков на объекте, эксплуатирующемся в агрессивной среде и с высокой критичностью, оценивается как более значимое отклонение, чем на объекте с низкой критичностью в нормальной среде. На основе совокупности признаков и контекстных факторов определяется предполагаемое ТС. Функция модуля *ontology_logic.py* реализует правила сопоставления признаков и состояний:

- приоритет состояний (например, ремонт имеет больший вес, чем вмешательство);
- диагностика в случае отсутствия признаков – объекту присваивается ТС «в норме»;
- обработка неопределённости (например, наличие противоречивых признаков или недостаточной информации приводит к присвоению ТС «не определено»).

После определения ТС формируется рекомендация по обслуживанию, при этом модулем *ontology_logic.py* учитываются:

- базовое действие, соответствующее ТС (например, ремонт → провести ремонт);
- модификации действия в зависимости от критичности (например, при высокой критичности добавляется указание на срочность);
- уточнение по агрессивности среды (например, добавляется требование полной разборки или усиленного контроля).

3.9 Обработка неполной информации

Особенностью построенной ОМ является способность системно обрабатывать неопределённость в исходной информации. Если в тексте осмотра не обнаружено ни одного ключевого слова, соответствующего признаку из словаря модуля *ontology_keywords.py*, то это может означать либо отсутствие технических замечаний (в случае, если текст явно указывает на норму, например, «замечаний нет»), либо неполноту или ошибку в описании результатов осмотра (например, слишком краткий или непонятный текст). Для различения этих случаев в ОМ введено правило: если текст содержит маркеры типа «замечаний нет», объекту присваивается ТС «в норме» и формируется рекомендация «не требует обслуживания». Если таких маркеров нет и признаки не найдены, то ТС объекта описывается как «не определено», а рекомендация — как «недостаточно данных для заключения».

Если в одном осмотре одновременно присутствуют признаки, которые при обычной логике вывода соответствуют различным ТС (например, и «коррозия» → ремонт, и «потёки» → вмешательство), то используется иерархия приоритетов:

- каждому признаку соответствует базовое состояние;
- ТС упорядочены по степени важности (например: норма < вмешательство < ремонт);
- выбирается наиболее жёсткое из возможных ТС.

Это позволяет гарантировать, что возможные риски не будут недооценены.

Если по объекту отсутствует информация о контексте эксплуатации (например, не указан год выпуска или критичность), то: возраст считается равным 0; критичность по умолчанию считается средней; агрессивность среды — нормальной. Эти значения используются как консервативная база, позволяющая продолжить формирование ТС и рекомендации, но с пометкой о необходимости уточнения данных.

Когда невозможно ни по признакам, ни по контексту достоверно определить ТС объекта, он классифицируется в специальную категорию «не определено». Это важно для:

- оценки качества входных данных;
- дополнительного контроля полноты осмотров;
- приоритизации повторных проверок.

Таким образом, ОМ позволяет выявлять явно заданные случаи, зоны информационной неопределённости и обрабатывать их в рамках общей логики.

4 Пример работы модели

В качестве источника данных использовались результаты осмотров оборудования, фрагмент с описанием которых представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Информация о результатах осмотров (фрагмент)

Объект	Содержание результата осмотра
Клапан №7	Обнаружены потёки из-под уплотнения
Клапан №8	Обнаружены следы подтекания рабочей жидкости, есть течь
Клапан №9	На корпусе обнаружены следы выдавливания смазки
Клапан №36	Наблюдается заедание штока при работе клапана
Клапан №31	Наблюдается растрескивание изоляции проводов на узле управления
Клапан №55	Замечания отсутствуют
Клапан №32	Следы коррозии на крепёжных соединениях трубопровода и клапана

Результаты осмотров были зафиксированы в условиях различной критичности и агрессивности среды эксплуатации. Фрагмент информационного представления условий эксплуатации оборудования представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Информация о контексте эксплуатации оборудования (фрагмент)

Объект	Год выпуска	Критичность отказа	Агрессивность среды	Вероятность безотказной работы в течение срока службы	Количество циклов работы до отказа
Клапан №7	2017	Средняя	Слабо агрессивная	0,99	4000
Клапан №8	2018	Средняя	Агрессивная	0,99	4000
Клапан №9	1998	Низкая	Агрессивная	0,98	3000
Клапан №36	2015	Высокая	Агрессивная	0,97	2000
Клапан №31	2011	Средняя	Высоко агрессивная	0,99	4000
Клапан №55	2022	Средняя	Агрессивная	0,99	4000
Клапан №32	2014	Низкая	Высоко агрессивная	0,98	3000

В таблице 6 приведены обобщённые тексты осмотров и признаки, автоматически извлечённые из неструктурированных описаний с использованием словаря. Признаки могут включать как единичные термины, так и их сочетания, что влияет на дальнейшую интерпретацию.

Таблица 6 – Результаты осмотров и извлечённые признаки (пример)

Объект	Год выпуска	Результат осмотра	Извлечённые признаки
Клапан_№7	2017	Обнаружены потёки	Потёки
Клапан_№8	2018	Утечка и потёки на корпусе	Утечка, потёки
Клапан_№9	1998	Признаки разрушения уплотнения	Разрушение
Клапан_№36	2015	Нарушение нормальной работы штока	Повреждение
Клапан_№31	2011	Корпус частично разрушен	Разрушение
Клапан_№55	2022	Замечаний нет	(нет признаков)
Клапан_№32	2014	Коррозия элементов	Коррозия

В таблице 7 приведены признаки и контекст эксплуатации к формализованному ТС. В логике модели учитывается приоритет критичных признаков, возраст объекта, а также отсутствие информации. Например, в случае объекта Клапан_№55 ТС определено как «норма» на основании отсутствия замечаний.

Таблица 7 – Интерпретированные состояния по признакам и контексту (пример)

Объект	Признак	Состояние	Основание интерпретации
Клапан_№7	Потёки	Вмешательство	выявлен признак средней важности
Клапан_№8	Утечка, потёки	Вмешательство	множественные признаки
Клапан_№9	Разрушение	Ремонт	критичный признак + давний год выпуска
Клапан_№36	Повреждение	Ремонт	критичный признак
Клапан_№31	Разрушение	Ремонт	критичный признак
Клапан_№55	(нет признаков)	Норма	отсутствуют признаки, указано «нет замечаний»
Клапан_№32	Коррозия	Наблюдение	выявлен признак средней важности

Таблица 8 содержит пример итоговых рекомендаций по ПТО, сформированных с учётом всех факторов. Например, для Клапана №9 сформулирована жёсткая мера — «замена» – ввиду критичного признака разрушения и истекшего срока службы, а для Клапана №55, эксплуатируемого в нормальной среде с низкой критичностью, указано отсутствие необходимости вмешательства. Пример иллюстрирует полноту и адаптивность онтологического вывода, демонстрируя как прямые логические зависимости (признак → действие), так и влияние контекста эксплуатации на итоговую рекомендацию.

Таблица 8 – Итоговые рекомендации по техническому обслуживанию (пример)

Объект	Состояние	Рекомендация
Клапан_№7	Вмешательство	Провести техническое обслуживание в плановом порядке
Клапан_№8	Вмешательство	Провести техническое обслуживание в плановом порядке
Клапан_№9	Ремонт	Заменить из-за истекшего срока службы, не ремонтировать
Клапан_№36	Ремонт	Выполнить ремонт немедленно
Клапан_№31	Ремонт	Выполнить ремонт в плановом порядке, с полной диагностикой
Клапан_№55	Норма	Не требует обслуживания
Клапан_№32	Наблюдение	Провести техническое обслуживание в плановом порядке

ОМ формализует последовательность переходов от наблюдаемых признаков к действиям по ПТО с учётом контекста эксплуатации и возможной неполноты информации. На выборке из 58 записей осмотров клапанов получены следующие результаты и выводы:

- извлечение признаков из текстов осмотров выполнено автоматически с точностью более 90%;
- интерпретация ТС в случае множественных и конфликтующих признаков проводилась корректно;

- рекомендации, сформированные моделью, в 87% случаев совпали с экспертными заключениями;
- для объектов с недостаточной информацией ТС «не определено» с предложением повторной диагностики.

На рисунке 4 представлено распределение состояний клапанов в виде круговой диаграммы. Распределение свидетельствует о преобладании состояния «вмешательство», что требует приоритизации профилактических мероприятий. Вместе с тем, почти треть объектов находится в норме, и лишь менее 2 % остались без определения (что говорит о хорошей полноте данных). Автоматически формируемый отчёт в машиночитаемом формате (*Excel*) пригоден для передачи в подсистему планирования ремонтов, а визуализация (в виде круговых диаграмм) повышает удобство анализа.

Предложенная ОМ показала возможность её применения на практике, позволяя ППР в интерпретации осмотров, устойчивость к неполным данным и возможность интеграции в информационную систему поддержки технического обслуживания.



Рисунок 4 – Результат распределения клапанов по состояниям

Заключение

Предложена ОМ экспертных знаний в системе ПТО, которая основана на многоуровневой структуре, включающей результаты осмотров, признаки ТС, параметры контекста эксплуатации, интерпретированные состояния и соответствующие рекомендации по обслуживанию. Модель устойчива при наличии частичных или неоднозначных данных и способна формировать рекомендации, учитывающие технические, контекстные и организационные параметры. ОМ построена с использованием инструментов открытого программного обеспечения, что позволяет применить её в условиях промышленной эксплуатации.

Предложенная ОМ представляет собой основу для интеллектуальной ППР в системе ПТО, обеспечивая формализацию и развитие экспертных знаний предприятия.

Список источников

- [1] Антонов А.В. Оптимизация периодов технического обслуживания объектов стареющего типа. *Физико-техническая информатика (СРТ2023): Материалы Междунар. конф.*, Пушкино, 16–19 мая 2023 г. Н. Новгород: АНО в области информационных технологий "Научно-исследовательский центр физико-технической информатики", 2023. С.300-306. DOI: 10.54837/9785604289174_СРТ2023-p300.
- [2] Гладких Т.Д. Подход к оценке технического состояния нефтепромышленного электросетевого оборудования. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2016. №3. С.34-38. EDN: WCLYAP.
- [3] Федоров Д.В., Михайлов Ю.И. Подходы к оценке технического состояния оборудования. Развивая энергетическую повестку будущего: Сб. докладов Междунар. науч.-пр. конф. для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК, Санкт-Петербург, 10–11 декабря 2021 г. Санкт-Петербург: "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2021. С.392-394. EDN: NGOCWF.
- [4] Трутаев С.Ю., Кузнецов К.А. О необходимости совершенствования подходов к оценке технического состояния оборудования опасных производственных объектов, работающего при непроектных нагрузках. *Территория Нефтегаз*. 2019. №7-8. С.56-64.

- [5] **Мясникова О.В.** Методологические основы формирования дорожной карты прикладных решений цифровой трансформации производственно-логистических систем. *Организатор производства*. 2024. Т.32, №1. С.107–120. DOI: 10.36622/1810-4894.2024.54.75.009.
- [6] **Шилов Н.Г.** Разработка мультиаспектной онтологии для поддержки принятия решений в производственных системах. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2024. №2. С.52–64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [7] **Torres Da Silva V., Dos Santos J. S., Thiago R.** OWL ontology evolution: understanding and unifying the complex changes. *The Knowledge Engineering Review*. 2022. Vol.37. P.e10. DOI: 10.1017/s0269888922000066.
- [8] **Борзест Н.М.** Системный и онтологический анализы: схожесть и различие понятий. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.9–28. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [9] **Abdelghany A.S., Darwish N.R., Hefni H.A.** An agile methodology for ontology development. *Int. J. of Intelligent Engineering and Systems*. 2019. Vol.12, No.2. P.170–181. DOI 10.22266/ijies2019.0430.17.
- [10] **Poveda-Villalón M., Fernández-Izquierdo A., Fernández-López M., García-Castro R.** LOT: An industrial oriented ontology engineering framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. Vol.111. P.104755. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104755.
- [11] **Sattar A., Salwana E., Nazir M.** [et al.] Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review. *Int. J. of Advanced Computer Science and Applications*. 2020. Vol.11, No.5. DOI: 10.14569/ijacsa.2020.0110515.
- [12] **Cao Q., Samet A., Zanni-Merk C., De Beuvron F. D. B., Reich C.** An ontology-based approach for failure classification in predictive maintenance using fuzzy C-means and SWRL rules. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol.159. P.630–639. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.218.
- [13] **Polenghi A., Roda I., Macchi M., Pozzetti A.** Multi-attribute Ontology-based Criticality Analysis of manufacturing assets for maintenance strategies planning. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol.54, No.1. P.55–60. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.192.
- [14] **Matsokis A., Karray H.M., Chebel-Morello B., Kiritsis D.** An ontology-based model for providing semantic maintenance. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol.43. No.3. P.12–17. DOI: 10.3182/20100701-2-PT-4012.00004.
- [15] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Фаворская Е.А., Осипова Е.А.** Подход к оценке технического состояния электрооборудования с использованием взвешенных нечётких правил. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14. №1. С.134–144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [16] **Колоденкова А.Е., Верещагина С.С.** Разработка системы иерархических продукционных правил для диагностирования электротехнического оборудования. *Онтология проектирования*. 2020. №1 (35). DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-63-72.
- [17] **Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф.** Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15. №3. С.449–458. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.
- [18] **Ren G., Ding R., Li H.** Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance. *Advances in Engineering Software*. Vol.130. P.24–40. DOI 10.1016/j.advengsoft.2019.02.001.
- [19] **Zappa S., Franciosi Ch., Polenghi A., Voisin A.** Ontology-based Digital Twin for maintenance decisions in manufacturing systems: an application at laboratory scale. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol.58, No.8. P.13–18. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.043.
- [20] **Ковалев С.М., Колоденкова А.Е.** Построение базы знаний интеллектуальной системы контроля и предупреждения рискованных ситуаций для этапа проектирования сложных технических систем. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №4(26). С.398–409. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-398-409.
- [21] ГОСТ Р 27.606–2013. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. Утв. и введ. в действие приказом Росстандарта от 19.09.2013 № 1077-ст.
- [22] ГОСТ Р ИСО 17359–2015. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. Утв. и введ. в действие приказом Росстандарта от 20.10.2015 № 1581-ст.
- [23] **Mora M., Wang F., Gómez J. M., Phillips-Wren G.** Development methodologies for ontology-based knowledge management systems: A review. *Expert Systems*. 2022. Vol.39, No.2. DOI: 10.1111/exsy.12851.
- [24] **Abdallah A.A., Fan I.S.** Towards building ontology-based applications for integrating heterogeneous aircraft maintenance records. *Proc. of 2022 IEEE 20th Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*. 2022. P.293–299. DOI: 10.1109/INDIN51773.2022.9976080.
- [25] **Насонов М.А., Манищев С.А.** Моделирование распределения загрузки ремонтных бригад при планировании технического обслуживания и ремонтов оборудования на промышленном предприятии. *Моделирование систем и процессов*. 2025. Т.18, №1. С.51–59. DOI 10.12737/2219-0767-2025-51-59.

Сведения об авторах



Насонов Михаил Алексеевич, 1972 г.р. Окончил Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (2003), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ (2022). Руководитель проектов автоматизации производства в Группе компаний «Синтез ОКА», участвовал в проектах автоматизации управления производством крупных промышленных предприятий. В списке научных трудов более 20 работ. SPIN-код: 5676-2795; ORCID: 0000-0002-0200-8271. ma.nasonov@sintez-oka.ru. ✉.



Манцеров Сергей Александрович, 1980 г.р. Окончил НГТУ в 2002 г., д.т.н. (2024), заведующий кафедрой «Автоматизация машиностроения», директор Образовательно-научного института промышленных технологий машиностроения НГТУ. В списке научных трудов более 140 работ. Author ID: 627667; Scopus ID: 57204970096; ORCID 0000-0001-8458-8259. mca_9@nntu.ru.

Поступила в редакцию 16.06.2025, после рецензирования 16.10.2025. Принята к публикации 8.12.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39

Ontological model of preventive maintenance of industrial enterprise equipment

© 2026, М.А. Насонов¹✉, С.А. Манцеров²

¹ *Sintez OKA group of companies, Dzerzhinsk, Russia*

² *Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract

This paper addresses the problem of formalizing expert knowledge in the field of preventive maintenance of industrial equipment, which arises when interpreting the results of visual inspections taking into account the operating conditions. The focus of the study is the development of an ontological model that provides a logically grounded transition from unstructured descriptions of technical condition indicators to specific equipment maintenance actions. A multi-level ontological model is proposed, including the following levels: inspection, indicators, operating context, technical condition, and action. The results are intended for use in decision support systems for equipment maintenance. The novelty of the study lies in combining contextual parameters (such as equipment age, criticality level, aggressiveness of the operating environment, and others) with a logical inference mechanism, as well as in applying a method for structuring recommendations as a composition of a basic action and context-dependent refinements. The model was built in a Python environment and tested on a specific dataset, where equipment states were automatically determined, adaptive recommendations were generated, and reports were produced. The model showed robustness to incomplete information. The applied ontological approach to technical diagnostics contributed to the achievement of practically significant results for the digitalization of preventive maintenance processes of industrial enterprise equipment.

Keywords: *ontology, preventive maintenance, equipment inspection, technical condition, operational context, logical inference, expert knowledge.*

For citation: *Nasonov MA, Mantserov SA. Ontological model of preventive maintenance of industrial enterprise equipment [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 25-39. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-25-39.*

Authors' contributions: *Nasonov M.A.* - problem formulation, concept development, model formalization, and software implementation. *Mantserov S.A.* – expert review of the materials and validation of results.

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

List of figures and tables

- Figure 1 – Knowledge sources for use in the ontological model
Figure 2 – Conceptual diagram of the preventive maintenance ontology
Figure 3 – Logical inference diagram
Figure 4 – Result of valve distribution by states
Table 1 – Model classes
Table 2 – Project modules
Table 3 – Model class attributes
Table 4 – Inspection results information (fragment)
Table 5 – Equipment operating context information (fragment)
Table 6 – Inspection results and extracted indicators (example)
Table 7 – Interpreted states based on indicators and context (example)
Table 8 – Final recommendations for maintenance (example)

References

- [1] **Antonov AV.** Optimization of maintenance periods for aging-type facilities [In Russian]. In: *Proceedings of the International Conference “Physical and Technical Informatics (CPT2023)”*, Pushchino, May 16–19, 2023. Nizhny Novgorod: Scientific Research Center of Physical and Technical Informatics, 2023. P.300–306. DOI: 10.54837/9785604289174_CPT2023-p300.
- [2] **Gladkikh TD.** An approach to assessing the technical condition of oilfield electrical network equipment [In Russian]. *Elektro: Electrical Engineering, Electric Power Engineering, Electrotechnical Industry*, 2016, no.3, P.34–38.
- [3] **Fedorov DV, Mikhailov YuI.** Approaches to assessing the technical condition of equipment [In Russian]. In: *Developing the Energy Agenda of the Future: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference for Young Engineers of the Fuel and Energy Complex*, St. Petersburg, December 10–11, 2021. St. Petersburg: LETI University, 2021, pp. 392–394.
- [4] **Trutaev SYu, Kuznetsov KA.** On the need to improve approaches to assessing the technical condition of equipment at hazardous production facilities operating under non-design loads [In Russian]. *Territory of Oil and Gas*, 2019; (7–8): 56–64.
- [5] **Myasnikova OV.** Methodological foundations for developing a roadmap of applied solutions for the digital transformation of production and logistics systems [In Russian]. *Organizer of Production*, 2024; 32(1): 107–120. DOI: 10.36622/1810-4894.2024.54.75.009.
- [6] **Shilov NG.** Development of a multi-aspect ontology for decision support in manufacturing systems [In Russian]. *Information Technologies and Computing Systems*, 2024; 2: 52–64. DOI: 10.14357/20718632240205.
- [7] **Torres da Silva V, Dos Santos JS, Thiago R.** OWL ontology evolution: understanding and unifying complex changes. *The Knowledge Engineering Review*, 2022; 37: e10. DOI: 10.1017/S0269888922000066.
- [8] **Borgest NM.** System and ontological analyses: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2024; 14(1): 9–28. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [9] **Abdelghany AS, Darwish NR, Hefni HA.** An agile methodology for ontology development. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2019; 12(2): 170–181. DOI: 10.22266/IJIES2019.0430.17.
- [10] **Poveda-Villalón M, Fernández-Izquierdo A, Fernández-López M, García-Castro R.** LOT: an industrial-oriented ontology engineering framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022; 111: 104755. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104755.
- [11] **Sattar A, Salwana E, Nazir M. et al.** Comparative analysis of methodologies for domain ontology development: a systematic review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2020; 11(5). DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110515.
- [12] **Cao Q, Samet A, Zanni-Merk C, De Beuvron FDB, Reich C.** An ontology-based approach for failure classification in predictive maintenance using fuzzy C-means and SWRL rules. *Procedia Computer Science*, 2019; 159: 630–639. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.218.
- [13] **Polenghi A, Roda I, Macchi M, Pozzetti A.** Multi-attribute ontology-based criticality analysis of manufacturing assets for maintenance strategies planning. *IFAC-PapersOnLine*, 2021; 54(1): 55–60. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.192.
- [14] **Matsokis A, Karray HM, Chebel-Morello B, Kiritsis D.** An ontology-based model for providing semantic maintenance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010; 43(3): 12–17. DOI: 10.3182/20100701-2-PT-4012.00004.

- [15] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS, Favorskaya EA, Osipova E.A.** An approach to assessing the technical condition of electrical equipment using weighted fuzzy rules [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2024; 14(1): 134–144. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-1-134-144.
- [16] **Kolodenkova AE, Vereshchagina SS.** Development of a system of hierarchical production rules for electrical equipment diagnosing [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2020; 10(1): 63–72. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-63-72.
- [17] **Doronin SV, Filippova YuF.** Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2025; 15(3): 449–458. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.
- [18] **Ren G, Ding R, Li H.** Building an ontological knowledge base for bridge maintenance. *Advances in Engineering Software*, 2020; 130: 24–40. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2019.02.001.
- [19] **Zappa S, Franciosi C, Polenghi A, Voisin A.** Ontology-based digital twin for maintenance decisions in manufacturing systems: an application at laboratory scale. *IFAC-PapersOnLine*, 2024; 58(8): 13–18. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.043.
- [20] **Kovalev SM, Kolodenkova AE.** Knowledge base design for the intelligent system for control and prevention of risk situations at the design stage of complex technical systems [In Russian]. *Ontology of Designing*, 2017; 7(4): 398–409. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-398-409.
- [21] **GOST R 27.606–2013.** Reliability in technology. Reliability-centered maintenance [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2013.
- [22] **GOST R ISO 17359–2015.** Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines [In Russian]. Moscow: Standartinform, 2015.
- [23] **Mora M, Wang F, Gómez JM, Phillips-Wren G.** Development methodologies for ontology-based knowledge management systems: a review. *Expert Systems*, 2022; 39(2). DOI: 10.1111/exsy.12851.
- [24] **Abdallah AA, Fan IS.** Towards building ontology-based applications for integrating heterogeneous aircraft maintenance records. In: *Proceedings of the 2022 IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2022, pp. 293–299. DOI: 10.1109/INDIN51773.2022.9976080.
- [25] **Nasonov MA, Manzerov SA.** Modeling the workload distribution of repair teams in planning maintenance and repairs at an industrial enterprise [In Russian]. *Modeling of Systems and Processes*, 2025; 18(1): 51–59. DOI: 10.12737/2219-0767-2025-51-59.

About the authors

Mikhail Alekseevich Nasonov (b. 1972) graduated from the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (2003) and the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (2022). Project Manager for production automation at the "Sintez OKA" Group, participated in automation projects for production management at large industrial enterprises. Author of more than 20 scientific publications. SPIN-code: 5676-2795, ORCID: 0000-0002-0200-8271. ma.nasonov@sintez-oka.ru. ✉.

Sergey Alexandrovich Mantserov (b. 1980) graduated from Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU) in 2002. Doctor of Technical Sciences (2024). Head of the Department of Automation in Mechanical Engineering and Director of the Educational and Scientific Institute of Industrial Technologies in Mechanical Engineering at NSTU. Author of more than 140 scientific publications. Author ID: 627667; Scopus ID: 57204970096; ORCID 0000-0001-8458-8259. mca_9@nntu.ru.

Received June 16, 2025. Revised October 16, 2025. Accepted December 8, 2025.