УДК 004.82

ОНТОЛОГИИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ С ОДНОВИТКОВЫМИ ВИХРЕТОКОВЫМИ ДАТЧИКАМИ

© 2026 С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 30.09.2026

Предложен подход к формализации научных и инженерных знаний в области проектирования систем контроля и диагностирования технического состояния объектов авиационной и ракетно-космической техники на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков, обеспечивающих получения объективной измерительной информации о параметрах контролируемых изделий в экстремальных условиях эксплуатации. Для представления знаний о рассматриваемой предметной области предложено воспользоваться методами онтологического инжиниринга, которые позволяют существенно упростить процессы совместного накопления и использования знаний. В работе рассмотрены особенности функционирования вихретоковых преобразователей и их разновидностей с одновитковым чувствительным элементом, определен и проанализирован возможный круг задач технического диагностирования, для которых эффективным будет применение рассматриваемых технических средств контроля. Разработаны и описаны онтологии, которые обеспечивают концептуализацию рассматриваемой предметной области в понятиях словаря для выделенных классов объектов, их качественных характеристик и отличительных особенностей. Результаты исследования не только позволили получить первые формальные описания накопленных знаний в области контроля и диагностирования технического состояния объектов авиационной и ракетно-космической техники на основе применения систем с одновитковыми вихретоковыми датчиками, но также должны способствовать упрощению поиска специалистами необходимых конфигураций оборудования с целью его использования в конкретных практических приложениях.

Ключевые слова: объекты авиационной и ракетно-космической техники, силовые установки, контроль технического состояния, диагностирование, вихретоковые преобразователи, одновитковые вихретоковые датчики, концептуальное моделирование, онтология предметной области, онтология задач.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-8-25
EDN: NQBZTS

Работа выполнена сотрудниками лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН FMRW-2026-0004.

1. ВВЕДЕНИЕ

Транспортное машиностроение и, прежде всего, та его часть, которая включает отрасли производства, ответственные за создание современных образцов изделий авиационной и ракетно-космической техники (АиРКТ), представляет собой стратегически значимый сектор экономики, определяющий уровень обороноспособности государства и обеспечивающий территориальную связность национального пространства. В рамках аэрокосмического производства реализуется комплексный цикл технологических операций, включающий проектирование, изготовление, сборку и испытания обширной номенклатуры изделий и их комплектующих. Не секрет, что к продукции данной отрасли предъявляются высокие требования в части эксплуатационной надёжности и безопасности применения, что обусловливает необходимость проведения систематического контроля технического состояния критических элементов изделий на всех этапах их жизненного цикла.

Известно, что условия эксплуатации объектов АиРКТ, их систем и агрегатов зачастую характеризуются как тяжелые и даже экстремальные. Это, в совокупности с существующими конструктив-

Боровик Сергей Юрьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации. E-mail:borovik@iccs.ru
Секисов Юрий Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации. E-mail: sekisov@iccs.ru

ными ограничениями, определяющими допустимое число и возможные места установки измерительного оборудования на объекте контроля с учетом необходимости сохранения соответствующего набора функциональных характеристик, надежности и безопасности изделий аэрокосмической техники, накладывает жесткие требования к используемым средствам мониторинга технического состояния и, прежде всего, к сенсорам, которые должны также обладать высокой надёжностью, быть устойчивыми к вибрациям, перепадам температур, агрессивным средам, а также иметь минимальные массогабаритные характеристики.

В современных изделиях аэрокосмического назначения, для мониторинга состояния элементов конструкций и параметров среды функционирования, применяют разные типы сенсоров, основанные на различных физических принципах. Выбор конкретного датчика определяется характером контролируемого параметра, условиями эксплуатации и требованиями к точности и надёжности. Применительно к задачам оценки целостности электропроводных элементов объектов АиРКТ, измерения их перемещений, взаимного положения и геометрических размеров, вибраций, биений и т.п. широкое применение нашли вихретоковые преобразователи (ВТП) [1, 2], которые обеспечивают получение измерительной информации бесконтактным способом, в том числе, в условиях повышенных температур, а также нечувствительны к неэлектропроводным неферромагнитным материалам и средам в зоне контроля (грязь, пыль, масло и т.д.).

Отдельной и самостоятельной разновидностью высокотемпературных ВТП авиационного и ракетно-космического применения являются т.н. одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД), первые разработки которых относятся к концу 80-х, началу 90-х годов прошлого столетия [3, 4]. Отличительной особенностью датчиков является то, что используемая в большинстве традиционных конструкций ВТП [1, 2] в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) многовитковая катушка индуктивности (пара катушек для ВТП трансформаторного типа), заменена в ОВТД на одиночный контур тока (виток) [5-8] или его фрагмент в виде линейного отрезка проводника [3-5, 7-10]. Такое конструктивное решение не требует применения в ЧЭ высокотемпературной межвитковой изоляции и при использовании для его изготовления материалов с высокой температурой плавления, обеспечивает необходимую механическую и термическую стойкость датчика при воздействиях экстремальных температур, свойственных рабочим условиям функционирования изделий АиРКТ. В частности, на основе ОВТД были разработаны компьютеризированные системы мониторинга технического состояния полноразмерных авиационных и ракетных силовых установок, а также их узлов и агрегатов, которые показали свою эффективность в процессе стендовых испытаний машин [6, 7, 10-15].

Таким образом, можно констатировать, что к настоящему моменту накоплен богатый научный и инженерный опыт в области создания систем контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ на основе ОВТД. В тоже время, внедрение таких систем в практику испытаний изделий аэрокосмического назначения происходит очень медленно, а примеры их использования в штатной эксплуатации объектов АиРКТ и вовсе пока неизвестны. Причиной является не только и не столько тот факт, что системы на основе ОВТД применяются преимущественно в ходе экспериментальных исследований новых образцов техники для подтверждения или опровержения эффективности тех или иных конструкторских решений, а потому являются уникальными и не предполагают тиражирования, сколько то, что уникальные знания специалистов в области проектирования и применения подобного рода систем являются достоянием разработчиков, зачастую выражены в научных публикациях в области информационно-измерительной техники и не ориентированы на конструкторов и эксплуатантов АиРКТ. Последнее обстоятельство существенно ограничивает использование систем, т.к. практически исключает возможность привлечения в процесс их разработки (хотя бы на уровне постановки задач) и последующего сопровождения при эксплуатации высококвалифицированных экспертов в области АиРКТ как равноправных участников.

Одним из возможных решений проблемы является создание систем, обеспечивающих представление гетерогенных знаний о рассматриваемых классах объектов контроля и средств диагностирования с последующим совместным доступом и многократным использованием формализованных знаний соответствующими специалистами. Среди существующих моделей представления знаний, упрощающих реализацию упомянутых выше процессов накопления и использования, выделяют формальные онтологии, которые позволяют создавать базы знаний, понятные специалистам, и формировать объяснение процесса работы в привычных профессиональных терминах [16, 17, 18].

Вопросам построения онтологий контроля и диагностирования технического состояния изделий АиРКТ на основе применения систем с ОВТД, которые обеспечивают «явную спецификацию концептуализации» фрагментов реального мира [19] в понятиях словаря для выделенных классов объектов, их качественных характеристик и отличительных особенностей, посвящена настоящая статья. Результаты проведенного исследования будут способствовать не только формализации научных и инженерных знаний в выделенной предметной области (ПрО)с целью сделать эти знания более понятными, систематизированными и удобными для дальнейшего использования специ-

алистами, но также должны позволить выделить круг задач технического диагностирования, для которых эффективным будет применение рассматриваемых технических средств контроля, а также упростить поиск необходимых конфигураций оборудования с целью его использования в конкретных практических приложениях.

Структура статьи содержит разделы, посвященные рассмотрению особенностей функционирования ВТП и их разновидностей с одновитковыми ЧЭ, анализ которых позволил определить круг задач технической диагностики, доступных для решения с помощью указанных аппаратных средств; описанию общего подхода к построению онтологий ПрО, предоставляющих соответствующие формализмы для представления знаний в виде структурированных моделей, где явно заданы иерархии классов понятий, их экземпляры, свойства, отношения и логические ограничения, а также результатов применения онтологического подхода для формализации накопленных знаний в области контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ на основе применения систем с ОВТД.

2. ВИХРЕТОКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В основе функционирования любого ВТП лежит вихретоковый принцип измерения, который предполагает определение свойств ферромагнитных и/или неферромагнитных электропроводных объектов на основе анализа результатов его (объекта) электромагнитного взаимодействия с ЧЭ сенсора. Преобразователи данного типа не чувствительны к неэлектропроводным материалам и средам (например, грязь, пыль, масло и т.д.), что делает их применение особенно привлекательным в условиях промышленной эксплуатации, в том числе, в составе объектов АиРКТ.

Традиционно в задачах контроля изделий аэрокосмического применения используют ВТП с ЧЭ в виде одной или нескольких катушек индуктивности, включаемых в измерительные цепи с гармоническим питанием. Форма ЧЭ (кольцевой, подковообразный, дисковый и т.п. [1]) зависит от назначения ВТП, при этом катушка может либо охватывать объект контроля (например, трубопровод системы смазки силовой установки), либо располагаться над его поверхностью (например, измерение зазоров между элементами конструкций изделий АиРКТ, вибраций и т.п.).

Необходимость в электрической изоляции витков катушек ЧЭ, а также наличие в некоторых конструкциях датчиков магнитопроводов, экранов и другие дополнительных элементов, обеспечивающих преобразования искомых характеристик объекта контроля в изменение параметров магнитной цепи преобразователя, ограничивает температурный диапазон применения ВТП, который для большинства сенсоров обычно лимитирован величиной порядка 180…200°С [20-22]. Это условие может быть критичным в задачах контроля технического состояния агрегатов и узлов АиРКТ, например, авиационных и ракетных силовых установок.

Известны решения, позволяющие расширить границы рабочих температур применения катушечных ВТП до 1000°С и выше, например, за счет принудительного водяного охлаждения преобразователей [23] или выполнения рабочих катушек ВТП из платины с их размещением на керамическом каркасе [24-26]. Однако такие технологии являются дорогими и далеко не всегда применимыми на практике (в частности, обеспечить водяное охлаждение датчиков на объектах АиРКТ зачастую является проблематичным). Альтернативой служат ОВТД, которые образуют отдельную и самостоятельную ветвь среди существующих ВТП.

В работах [3-15] с разной степенью детализации рассматриваются базовые варианты конструкций ОВТД, принципы преобразования информативных сигналов датчиков, а также способы получения с их помощью измерительной информации о контролируемых параметрах состояния сложных технических объектов, включая изделия АиРКТ. Учитывая, что ОВТД лежат в основе анализируемых в работе подходов к решению задач технической диагностики, дальнейшее изложение материала будет не полным без краткого описания особенностей функционирования ОВТД и систем на их основе.

Как отмечается в [8], все одновитковые ВТП могут быть разделены на две большие группы:

1. ОВТД, в которых в качестве ЧЭ используется одиночный контур с током целиком;

2. ОВТД с ЧЭ в виде фрагмента витка с током (например, линейного отрезка проводника), который вносится в зону контроля с помощью тоководов, обычно выполняемых по «безындуктивной» технологии в виде коаксиальных цилиндров или близкорасположенных металлических полос.

Именно простейшая конструкция ОВТД, ЧЭ которого не требует высокотемпературной изоляции, а механическая и термическая прочность деталей датчика определяется лишь свойствами используемого для их изготовления материалов (например, при исполнении ЧЭ и тоководов ОВТД из авиационных жаропрочных сплавов ЕІ868, ХН60ВТ [27], сенсор сохраняет свою конструктивную прочность и работоспособность при температурах свыше 1000°С), обеспечивает функционирование одновиткового ВТП в экстремальных условиях эксплуатации.

В отличие от высокочастотного гармонического питания, традиционного для «классических» ВТП [1, 2, 28], в ОВТД используется импульсный режим возбуждения датчика. В [29] отмечается, что технологии импульсного вихретокового контроля (PECT) известны, однако их применение преимущественно ограничено задачами дефектоскопии, причем в основном ферромагнитных материалов (более широкий частотный спектр уменьшает влияние эффекта отрыва ВТП от поверхности контроля и обеспечивает лучшее проникновение вглубь металла). В ОВТД же, которые применяются для контроля как ферромагнитных, так и неферромагнитных материалов, импульсный режим питания датчика обеспечивает приемлемое отношение сигнал/шум и подавление неинформативных параметров, в частности активного сопротивления, изменяющегося в широких пределах от влияния температуры в зоне измерения [30]. Кроме того, при импульсном питании сигнал на выходе измерительной цепи с ОВТД также имеет импульсный характер, что значительно упрощает дальнейшую коммутацию и аналого-цифровое преобразование.

Переходя непосредственно к задачам технического диагностирования с помощью систем на основе ОВТД необходимо отметить, что ВТП данного типа обладают еще одной особенностью, связанной с узкой «диаграммой направленности» ЧЭ (по крайней мере в варианте ЧЭ в виде фрагмента витка с током) в контексте распределения чувствительности датчика в пространстве относительно объекта контроля. В частности, например, при контроле элементов изделий АиРКТ с дискретной поверхностью (лопатки или лопасти силовых установок, зубчатые венцы шестерён редуктора и т.п.), сигнал на выходе измерительной цепи с ОВТД зависит не только от электрофизических свойств материала и расстояния до объекта контроля, но и от ориентации одновиткового ЧЭ относительно его поверхности. Другими словами, в сигнале ОВТД интегрально содержится информация о всех многокоординатных составляющих перемещения контролируемого объекта. Указанное свойство нельзя однозначно отнести к положительным или отрицательным характеристикам ОВТД, так как в зависимости от решаемой задачи это, с одной стороны, расширяет возможности систем на основе ОВТД в части повышения информативности измерений, а, с другой стороны, приводит к появлению дополнительных погрешностей, затрудняющих корректное определение контролируемых параметров.

3. ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ

Среди существующих моделей представления и описания структурированных знаний одно из ведущих мест занимают формальные онтологии и, в частности, онтологии ПрО. Общепринятым и наиболее известным определением «онтологии» является определение, предложенное в 1995 г. Т. Грубером, который определил онтологию «эксплицитной [явной] спецификацией концептуализации» [19]. Здесь под «концептуализацией» понимается «абстрактная модель явлений (процессов) в мире, составленная посредством определения существенных для описания данных явлений понятий» [16].

В контексте настоящей статьи наиболее удачным представляется менее формальное определение, данное Гавриловой Т.А. и Хорошевским В.Ф. в работе [31], где под онтологиями авторы предлагают понимать«базы знаний специального типа, которые могут «читаться», пониматься и отчуждаться от разработчика и/или физически разделяться их пользователями». В том же источнике [31] приведено и одно из формальных описаний онтологии, как упорядоченной тройки (кортежа) вида:

$$\mathbf{O} = < \mathbf{X}, \mathfrak{R}, \mathbf{\Phi} > , \qquad (1)$$

где **X** – конечное множество концептов (понятий) предметной области (**X**≠∅); $\mathfrak{R}$ –конечное множество отношений между концептами; **Φ** – конечное множество функций интерпретации (аксиоматизаций), заданных на концептах и/или отношениях.

В выражении (1) понятия **X** представляют собой «концептуализацию» класса всех представителей однородных (формально – имеющих *одинаковый* набор атрибутов) сущностей, или предметов, которые объединены на основании наличия общих свойств. Между понятиями могут быть заданы отношения $\mathfrak{R}$, которые служат как для связи классов, так и для их описания. Самыми распространенными типами отношений являются таксономическое отношение, относящее сущность к той или иной категории (отношения типа «класс-подкласс», «IsA», «АКО» («AKindOf») и т.д.) и партономическое отношение «часть-целое» («HasA», «APartOf»), связывающее элементы в системе [32]. Однако таксономией и партономией спектр используемых отношений не ограничивается. В частности, часто также используются родовые («предок» - «потомок»), функциональные («производит», «влияет» и т.п.), количественные («больше», «меньше», «равно» и т.п.), пространственные («далеко от», «близко от», «за», «под», «над» и т.п.), темпоральные («раньше», «позже», «в течение» и т.п.), атрибутивные («иметь свойство», «иметь значение»), логические («И», «ИЛИ», «НЕ»), казуальные («если-то») и другие типы отношений. В свою очередь, аксиомы **Φ** позволяют выразить информацию, которая не может быть отражена в онтологии только посредством построения иерархии понятий и установки различных отношений между понятиями и предоставляют возможность осуществлять дополнительные выводы в рамках онтологии. Кроме того, аксиомы могут представлять собой ограничения, накладываемые на отношения $\mathfrak{R}$.

Возвращаясь к выражению (1), следует отметить, что при $\mathfrak{R}=\varnothing$, $\mathbf{F}=\varnothing$ онтология вырождается в простой «словарь» терминов ПрО без какого-либо их толкования. В свою очередь, если $\mathfrak{R}=\varnothing$, $\mathbf{\Phi}\neq\varnothing$, то онтология **O** будет представлять собой тезаурус (совокупность терминов, описывающих рассматриваемую ПрО с указанием семантических связей между ними), а при $\mathbf{R}\neq\varnothing$, $\mathbf{\Phi}=\varnothing$ – таксономию (иерархическую структуру классификаций определенного набора объектов ПрО) [33].

Отдельно следует отметить, что при необходимости, классическое описание онтологии (1) может быть расширено и представлено кортежами большей арности (количества компонентов), включающими, например, экземпляры сущностей и/или темпоральные отношения. Последнее, в частности, актуально для построения онтологий прогнозирования технического состояния и ресурса элементов сложных объектов и систем с учетом динамики изменений, свойственных процессу эксплуатации изделий [34].

Для обобщения частных случаев онтологических моделей представления знаний, в [31] вводится понятие формальной модели онтологической системы, под которой понимается триплет вида:

$$\mathbf{\Sigma^{O}} =< \mathbf{O}^{meta}, \{\mathbf{O}^{d\&t}\}, \Xi^{inf} >, \tag{2}$$

где $\mathbf{O}^{meta}$ – онтология верхнего уровня (метаонтология), которая не зависит от ПрО; $\{\mathbf{O}^{d\&t}\}$ – множество онтологий ПрО и онтологий задач; Ξ^{inf} – модель машины вывода, ассоциированной с рассматриваемой онтологической системой.

В рамках настоящей статьи, далее рассматриваются только элементы множества $\{\mathbf{O}^{d\&t}\}$. Тем не менее, даже в таком упрощенном виде, предлагаемая система онтологических моделей уже позволяет учесть особенности представления знаний как специалистов в области проектирования изделий аэрокосмического назначения, так и экспертов в области разработки соответствующих средств технического контроля и диагностирования состояния объектов АиРКТ, и сделать эти знания более понятными, систематизированными и удобными для дальнейшего использования в конкретных практических приложениях.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОНТОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ АиРКТ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ С ОВТД

4.1. Особенности проектирования онтологий рассматриваемой ПрО

Известно, что разработка единой онтологии любой ПрО зачастую сопряжена с большой трудоемкостью [35]. Поэтому, обычно создают отдельные онтологии «подобластей» ПрО, которые имеют различную глубину наполнения.

Существующие подходы к проектированию онтологических моделей [16, 36], в основном, ориентированы на использование уже готовых решений, например путем интеграции или адаптации существующих онтологий, их слияния и расширения, наполнения новыми сущностями или обогащения новыми отношениями и аксиомами. В то же время, специфика рассматриваемой ПрО, особенно в части средств контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ на основе ОВТД, уникальна, а потому воспользоваться существующими библиотеками решений крайне затруднительно или невозможно в виду отсутствия таковых. Это потребовало разработки своей «сети онтологий» ПрО практически «с нуля».

В качестве платформы для проектирования онтологий был выбран редактор Protégé, который в настоящее время является, пожалуй, одним из наиболее широко используемых инструментов, находящихся в свободном доступе. Protégé рассчитан на создание прикладных онтологий с нуля, позволяет быстро и относительно просто сконструировать небольшую предметную онтологию и имеет расширяемую архитектуру, которая дает возможность легко встраивать его в прикладные программы [37]. Представление онтологии в Protégé аналогично иерархической структуре каталога, что наряду с достаточно удобным графическим интерфейсом позволяет использовать редактор неопытными пользователями. Кроме того, Protégé поддерживает один из наиболее распространенных языков описания онтологий OWL, а также позволяет экспортировать разработанные онтологии в другие популярные форматы, включая RDF, RDFS, XML Schema.

С точки зрения способов формализации опыта и знаний, которые обеспечивают наполнение онтологий, в [38] рассматривается три основных подхода. Первый и наиболее часто используемый, связан с прямой формализацией знаний либо непосредственно самими экспертами с использованием соответствующих редакторов (например, Protégé), либо с привлечением для этих целей инженеров по знаниям [39]. Второй путь предполагает конкретизацию, композицию или декомпозицию существующих «библиотек» апробированных формальных онтологий различного уровня и направления. И, наконец, третий путь нацелен на использование методов автоматического (или полуав-

томатического) построения онтологий на основе доступных данных, которые рассматриваются как результат измерений (в самом широком смысле) свойств объектов исследуемой ПрО [38].

Безусловно, среди приведенных выше, третий путь построения формальных онтологий представляет наибольший интерес. Однако в контексте рассматриваемой задачи он требует привлечения соответствующих специалистов в области инженерии знаний и применения оригинальных программных средств, что на данном этапе исследований не представляется возможным. В этой связи, для формирования и наполнения рассматриваемых в работе онтологий был выбран первый способ, предполагающий формализацию научных и инженерных знаний в области проектирования систем контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ на основе применения ОВТД непосредственно самими разработчиками систем с привлечением текстологических методов извлечения знаний из соответствующих ГОСТов, инструкций, статей, монографий и других текстовых носителей профессиональных знаний.

4.2. Онтология объектов АиРКТ

Первые попытки классифицировать объекты АиРКТ, доступные для технического контроля ВТП и, в частности, ОВТД, были предприняты в работе [40]. Данная классификация, наравне с информацией из официальных источников Роскосмоса [41], Росавиации [42], Международной организации гражданской авиации ИКАО [43], Воздушного кодекса РФ [44] и монографий [45-47] использовалась для построения онтологии объектов АиРКТ, иерархия классов и общая графовая схема которой представлена на рис 1.

Нижеприведен фрагмент онтологии объектов АиРКТ на языке OWL2/XML с описанием базовых классов:

```
<OntologyontologyIRI=»http://…»>
<Prefix name=»owl» IRI=»http://www.w3.org/2002/07/owl#»/>
<Declaration>
<ClassIRI=”#АиРКТ_Ракетно-космическая_техника”/>
</Declaration>
<Declaration>
<ClassIRI=»#АиРКТ_Авиационная_техника»/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=”#РКТ_Средства_выведения_и_двигательные_установки”/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=”#РКТ_Космические_аппараты_и_их_элементы”/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=”#РКТ_Наземные_технические_средства_космических_
комплексов_(специальных_наземных_космических_комплексов)»/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=”#РКТ_Комплектующие_изделия_и_элементы_для_применения_
в_составе_космических_средств»/>
</Declaration>
…
<Declaration>
<Class IRI=»#АТ_Воздушное_судно»/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=»#АТ_Авиационный_двигатель»/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=»#АТ_Воздушный_винт»/>
</Declaration>
<Declaration>
<Class IRI=»#АТ_Комплектующие_изделия»/>
</Declaration>
…
```

```
<SubClassOf>
<Class IRI=”#РКТ_Средства_выведения_и_двигательные_установки”/>
<ClassIRI=”#АиРКТ_Ракетно-космическая_техника”/>

</SubClassOf>
<SubClassOf>
<Class IRI=”#РКТ_Космические_аппараты_и_их_элементы”/>
<ClassIRI=”#АиРКТ_Ракетно-космическая_техника”/>

</SubClassOf>
<SubClassOf>
<Class IRI=”#РКТ_Наземные_технические_средства_космических_
комплексов_(специальных_наземных_космических_комплексов)»/>
<ClassIRI=”#АиРКТ_Ракетно-космическая_техника”/>

</SubClassOf>
<SubClassOf>
<Class IRI=”#РКТ_Комплектующие_изделия_и_элементы_для_применения_
в_составе_космических_средств»/>
<ClassIRI=”#АиРКТ_Ракетно-космическая_техника”/>
</SubClassOf>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#АТ_Воздушное_судно»/>
<Class IRI=”#АиРКТ_Авиационная_техника”/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#АТ_Авиационный_двигатель»/>
<Class IRI=»#АиРКТ_Авиационная_техника»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#АТ_Воздушный_винт»/>
<Class IRI=”#АиРКТ_Авиационная_техника”/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#АТ_Комплектующие_изделия»/>
<Class IRI=»#АиРКТ_Авиационная_техника»/>
</SubClassOf>
…
</Ontology>
```

В соответствии с представленным описанием, основными концептами рассматриваемой ПрО являются «АиРКТ_Ракетно-космическая_техника» и «АиРКТ_Авиационная_техника», которые, соответственно, образуют корневые классы, на основе которых строится вся дальнейшая иерархия подклассов. В частности, класс «АиРКТ_Ракетно-космическая_техника» содержит подклассы «РКТ_Средства_выведения_и_двигательные_ установки», «РКТ_Космические_аппараты_и_их_элементы», «РКТ_Наземные_технические_ средства_космических_комплексов_(специальных_наземных_космических_комплексов)», «РКТ_Комплектующие_изделия_и_элементы_для_применения_в_составе_космических_средств», а класс «АиРКТ_Авиационная_техника» содержит подклассы «АТ_Воздушное_судно», «АТ_Авиационный_двигатель», «АТ_Воздушный_винт», «АТ_Комплектующие_изделия», которые также детализируются на последующих уровнях иерархии. При этом следует отметить, что на верхних уровнях иерархии классы являются непересекающимися (DisjointClasses), однако, по мере их детализации, границы зачастую размываются и появляются пересечения отдельных подклассов, что, в свою очередь, приводит к множественному наследованию свойств.

В соответствии с приведенным выше описанием, для обоих корневых классов «АиРКТ_Ракетно-космическая_техника» и «АиРКТ_Авиационная_техника»выделяются подклассы объектов, относящихся к силовым установкам изделий АиРКТ (подклассы «РКТ_Средства_выведения_и_двигательные_установки» и «АТ_Авиационный_двигатель», соответственно). В контексте настоящий статьи, а также учитывая, что большинство известных приложений систем на основе ОВТД [11-14] так или иначе ориентированы на задачи контроля состояний элементов конструкций именно этого вида

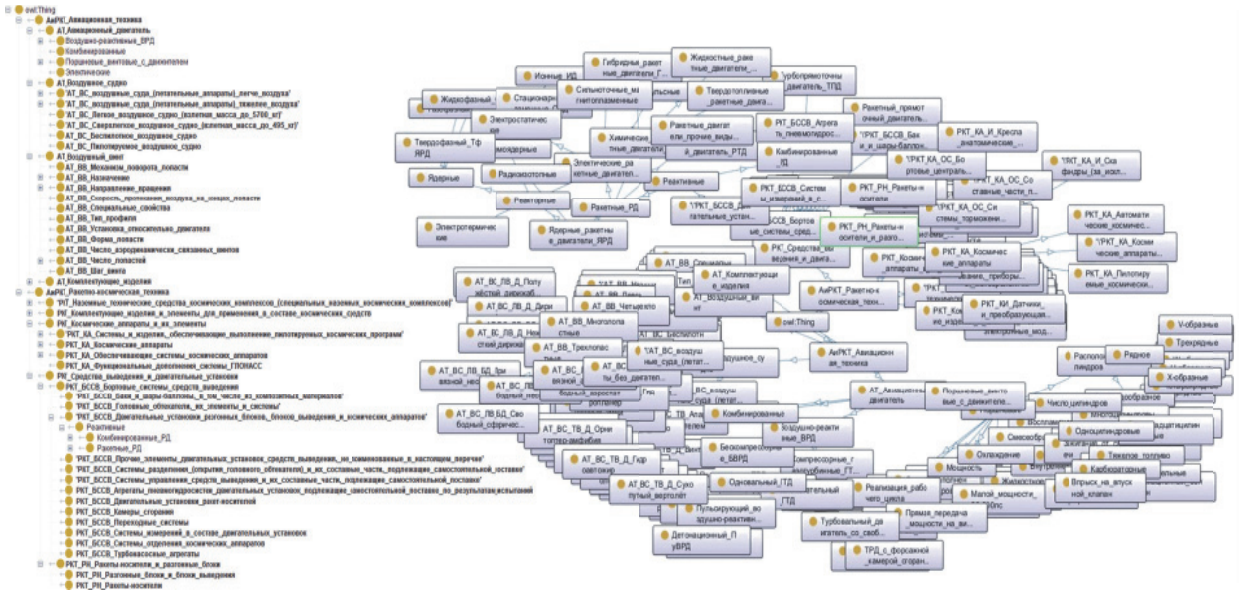

Рис. 1. Иерархия классов и общая графовая схема онтологии АиРКТ в нотации Protégé

объектов, в рассматриваемой ПрО «Объекты АиРКТ» была выделена подобласть «Силовые установки объектов АиРКТ», для которой построена отдельная онтология (иерархия классов и графовая схема онтологии приведены на рис. 2).

Для рассматриваемой подобласти ПрО, в классе «Силовые_установки_АиРКТ «можно выделить подклассы «Поршневые_винтовые_с_движителем», «Реактивные», «Комбинированные»и «Электрические» силовые установки [46, 47]. Два последних подкласса описывают изделия, которые скорее относятся к экзотическим направлениям развития авиационного и ракетного двигателестроения, в то время как поршневые и реактивные двигатели составляют основу большинства современных летательных и космических аппаратов.

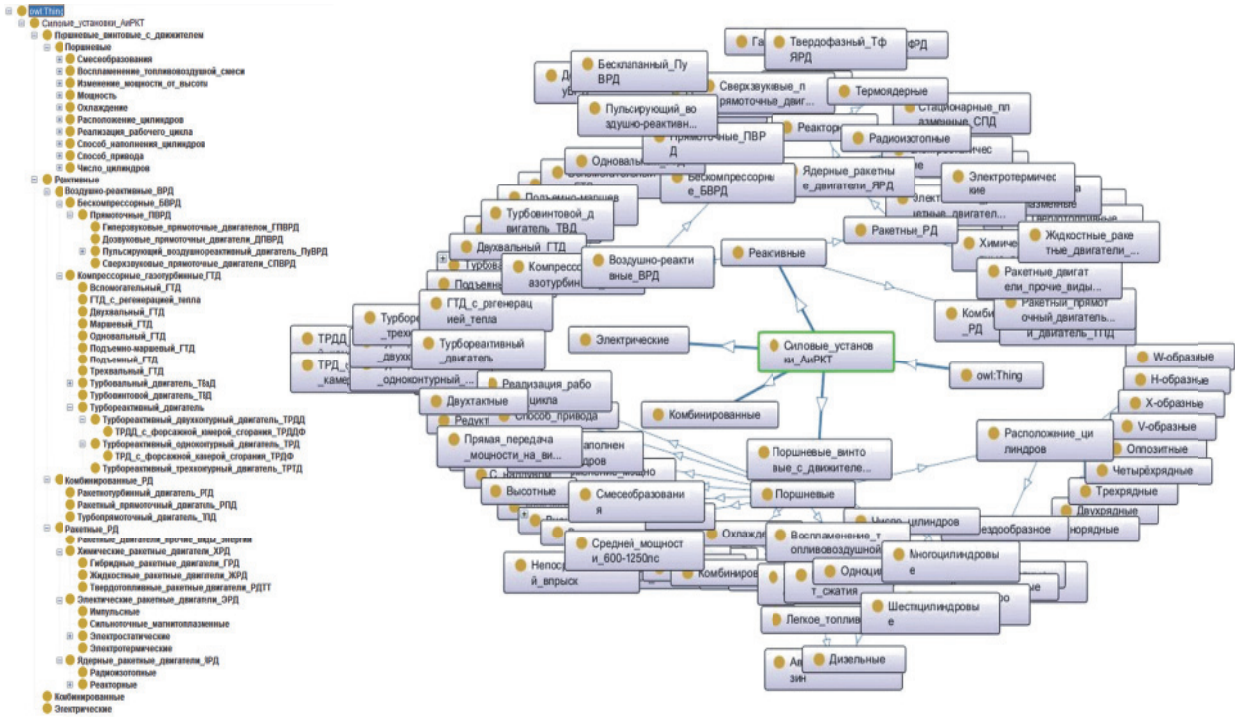

Рис. 2. Иерархия классов и графовая схема онтологии силовых установок объектов АиРКТв нотации Protégé

С точки зрения дальнейшего анализа и определения возможного круга задач технического контроля и диагностирования объектов АиРКТ с помощью аппаратных средств на основе ОВТД, представляется необходимым выделить следующие подклассы силовых установок, для которых, по крайней мере, существуют известные решения (для описания использовался язык OWL2/XML):

```
<OntologyontologyIRI=”http://…”>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Поршневые»/>
<Class IRI=»#Поршневые_винтовые_с_движителем»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#Способ_привода»/>
<Class IRI=»#Поршневые»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Редукторный»/>
<ClassIRI=”#Способ_привода»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Способ_наполнения_цилиндров»/>
<ClassIRI=»#Поршневые»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#С_наддувом»/>
<ClassIRI=”#Способ_наполнения_цилиндров»/>
</SubClassOf>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Воздушно_реактивные_ВРД»/>
<Class IRI=»#Реактивные»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Компрессорные_газотурбинные_ГТД»/>
<ClassIRI=”#Воздушно_реактивные_ВРД»/>
</SubClassOf>
…

<SubClassOf>
<ClassIRI=»#Ракетные_РД»/>
<Class IRI=»#Реактивные»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Химические_ракетные_двигатели_ХРД»/>
<Class IRI=»#Ракетные_РД»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#Жидкостные_ракетные_двигатели_ЖРД»/>
<ClassIRI=”#Химические_ракетные_двигатели_ХРД»/>
</SubClassOf>
…
</Ontology>
```

4.3. Онтология вихретоковых средств контроля

Учитывая достаточно широкое применение ВТП в аэрокосмических приложениях, в онтологии отражены как «классические» подходы к организации вихретокового контроля на основе типовых многовитковых ВТП, так и особенности применения для этих целей оригинальных ОВТД и их кластерных композиций. При этом в случае с ОВТД, такая попытка формализовать знания о проектирования систем на основе данного типа ВТП предпринимается впервые.

Иерархия классов и графовая схема онтологии средств контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ на основе применения ВТП представлена на рис. 3. Для построения онтологии в части традиционных технических средств контроля и методов преобразования их сигналов использовались известные источники [1, 2, 20, 21, 24, 25, 26, 28, 29, 48]. В свою очередь, для описания концептов, относящихся к области применения ОВТД, анализировались публикации [4-9, 11-14].

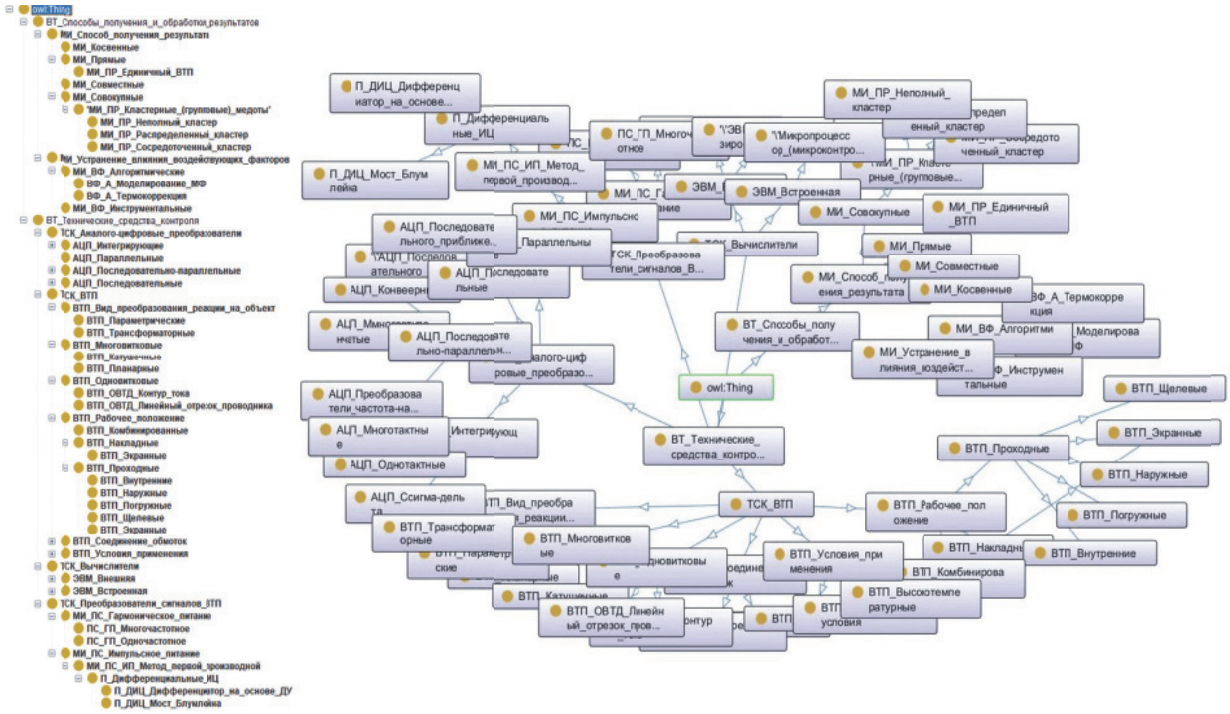

Рис. 3. Иерархия классов и графовая схема онтологии вихретоковых средств контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТв нотации Protégé

Онтология вихретоковых средств контроля и диагностирования содержит два корневых класса «ВТ_Технические_средства_контроля» и «ВТ_Способы_получения_и_обработки_ результатов», каждый из которых далее специализируется своими подклассами. По аналогии с описаниями классов онтологий АиРКТ и силовых установок объектов АиРКТ, приведенных в разделе 4.2, ниже, на языке OWL2/XML, представлены описания подклассов онтологии рис. 3, которые можно охарактеризовать как наиболее значимые в контексте рассматриваемых в статье задач:

```
<OntologyontologyIRI=”http://…”>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ТСК_ВТП»/>
<Class IRI=»#ВТ_Технические_средства_контроля»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ТСК_Преобразователи_сигналов_ВТП»/>
<Class IRI=»#ВТ_Технические_средства_контроля»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ТСК_Аналого-цифровые_преобразователи»/>
<Class IRI=»#ВТ_Технические_средства_контроля»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ТСК_Вычислители»/>
<Class IRI=”#ВТ_Технические_средства_контроля»/>
</SubClassOf>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ВТП_Многовитковые»/>
<Class IRI=»#ТСК_ВТП»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ВТП_Одновитковые»/>
<Class IRI=»#ТСК_ВТП»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
```

```
<ClassIRI=»#ВТП_Рабочее_положение»/>
<Class IRI=»#ТСК_ВТП»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ВТП_ОВТД_Контур_тока»/>
<Class IRI=»#ТСК_Одновитковые»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ВТП_ОВТД_Линейный_отрезок_проводника»/>
<ClassIRI=»#ТСК_Одновитковые»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ВТП_Проходные»/>
<ClassIRI=”#ВТП_Рабочее_положение»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ВТП_Накладные»/>
<ClassIRI=”#ВТП_Рабочее_положение»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ВТП_Комбинированные»/>
<ClassIRI=”#ВТП_Рабочее_положение»/>
</SubClassOf>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#МИ_ПС_Гармоническое_питание»/>
<Class IRI=»#ТСК_Преобразователи_сигналов_ВТП»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#МИ_ПС_Импульсное_питание»/>
<Class IRI=»#ТСК_Преобразователи_сигналов_ВТП»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ПС_ГП_Одночастотное»/>
<Class IRI=”#МИ_ПС_Гармоническое_питание»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ПС_ГП_Многочастотное»/>
<Class IRI=»#МИ_ПС_Гармоническое_питание»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#МИ_ПС_ИП_Метод_первой_производной»/>
<Class IRI=»#МИ_ПС_Импульсное_питание»/>
</SubClassOf>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#МИ_Способ_получения_результата”/>
<Class IRI=”#ВТ_Способы_получения_и_обработки_результатов»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#МИ_Устранение_влияния_воздействующих_факторов»/>
<Class IRI=»#ВТ_Способы_получения_и_обработки_результатов»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#МИ_Прямые»/>
<Class IRI=”#МИ_Способ_получения_результата»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#МИ_Совокупные»/>
<Class IRI=”#МИ_Способ_получения_результата»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
```

```
<ClassIRI=”#МИ_ПР_Кластерные_(групповые)_медоты»/>
<Class IRI=»#МИ_Совокупные»/>
</SubClassOf>
…
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#МИ_ВФ_Алгоритмические»/>
<Class IRI=”#МИ_Устранение_влияния_воздействующих_факторов»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#МИ_ВФ_Инструментальные»/>
<Class IRI=»#МИ_Устранение_влияния_воздействующих_факторов»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=»#ВФ_А_Термокоррекция»/>
<Class IRI=”#МИ_ВФ_Алгоритмические»/>
</SubClassOf>
<SubClassOf>
<ClassIRI=”#ВФ_А_Моделирование_МФ»/>
<Class IRI=»#МИ_ВФ_Алгоритмические»/>
</SubClassOf>
…
</Ontology>
```

Отдельно следует отметить, что для рассматриваемой онтологии вихретоковых средств контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ, уже на верхних уровнях описания наблюдается пересечение отдельных подклассов, т.к. зачастую один и тот же объект может быть классифицирован по различным признакам. Типовыми представителями таких пересекающихся подклассов являются подклассы «ВТП_Многовитковые», «ВТП_Одновитковые» и «ВТП_Рабочее_положение», т.к. они могут содержать общие экземпляры (например, как многовитковые, так и одновитковые ВТП могут быть накладными, проходными или комбинированными). При этом отсутствие дизъюнктивности, с одной стороны, обеспечивает гибкость категоризации и отражает реальную неоднозначность «ролей», ассоциированных с одним и тем же объектом, а, с другой стороны, всегда оставляет риски неоднозначности и резкого роста возможных комбинаций классов, свойств или экземпляров, что, в свою очередь, может привести к «громоздкости» онтологии и существенно замедлить логический вывод в практических задачах.

4.4. Онтология задач контроля и диагностирования технического состояния изделий АиРКТ, доступных для решения с помощью ОВТД

С точки зрения моделей представления знаний, обычно онтологии задач и онтологии ПрО проектируют раздельно, т.к. несмотря на то, что оба вида онтологий служат для описания реальности, они решают принципиально разные задачи и, соответственно, по-разному организуют понятийный аппарат [16, 49]. В частности, если онтологии ПрО описывают понятия и отношения, характерные для конкретных ПрО, независимо от того, какая именно задача сейчас решается, то онтологии задач включают понятия и отношения, описывающие деятельность (контроль и диагностику) [49]. При этом на практике эти два типа онтологий не противопоставляются, а дополняют друг друга. В частности, онтология задач опирается на онтологию ПрО, использует её понятийную структуру, но добавляет описания того, как именно эти понятия задействуются в решении той или иной задачи. В итоге формируется прикладная онтология (рис. 4), обеспечивающая формализацию и структурированное представление знаний, пригодное для дальнейшего использования специалистами при решении конкретных практических задач в выбранной ПрО.

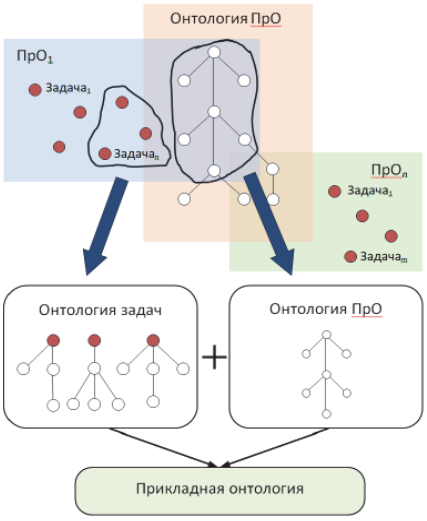

Рис. 4. Взаимосвязь онтологий ПрО, онтологий задач и прикладных онтологий [16]

Для формирования онтологии задач контроля и диагностирования технического состояния изделий АиРКТна основе ОВТД использовались результаты анализа открытых публикаций о типовых причинах аварийных ситуаций, возникающих на объектах АиРКТ [50], а также научные статьи и монографии [5-7,10-15], содержащие информацию о реальных практических применениях систем на основе ОВТД в практике экспериментальных исследований изделий аэрокосмического назначения.

Иерархия классов и графовая схема спроектированной онтологии задач представлена на рис.5.

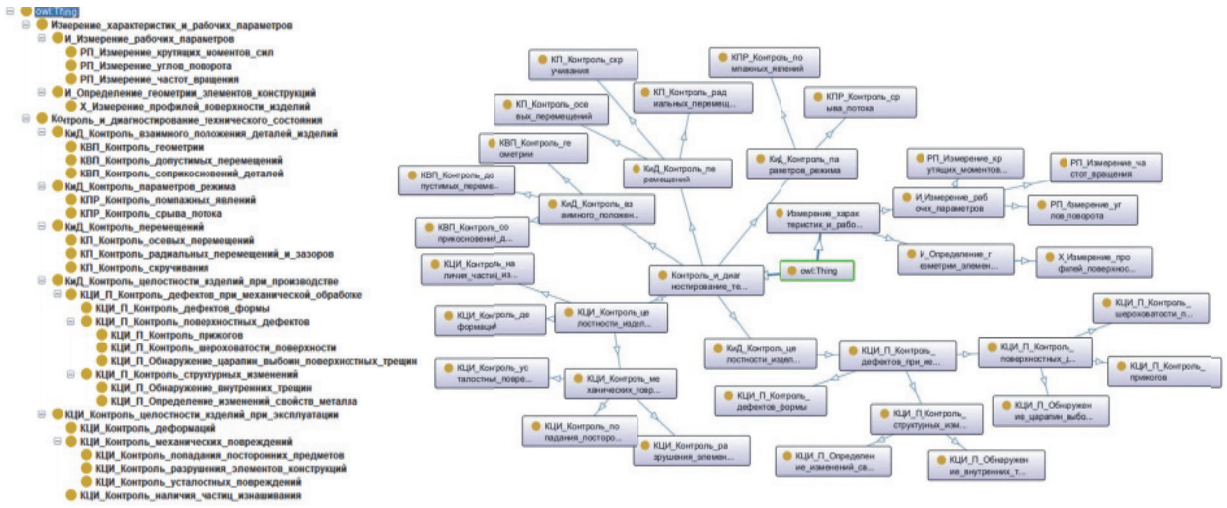

Рис. 5. Иерархия классов и графовая схема онтологии задач контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ на основе ОВТД в нотации Protégé

На верхнем уровне задачи, решаемые с помощью средств на основе ОВТД, разделены на два корневых класса «Измерение_характеристик_и_рабочих_параметров» и «Контроль_и_ диагностирование_технического_состояния», которые в полной мере характеризуют сферы применения ВТП рассматриваемого типа, однако, в общем случае, не ограничиваются только ими и допускают использование для данных целей других видов первичных преобразователей (оптических, радарных, емкостных и т.п.).

В части измерений характеристик и рабочих параметров объектов АиРКТ в настоящее время по крайней мере известны публикации [5, 8, 51], в которых ОВТД и системы на их основе применялись в экспериментальных исследованиях для измерения характеристик рабочих параметров силовых установок в составе изделий АиРКТ (подкласс «И_ Измерение_рабочих_параметров») и, в частности, для определения крутящих моментов сил, действующих на вал ГТД, угловых перемещений дроссельных заслонок поршневых двигателей, а также мгновенных скоростей и ускорений лопаточных колес компрессоров ГТД (подклассы «РП_Измерение_крутящих_моментов_сил», «РП_Измерение_углов_ поворота», «РП_Измерение_частот_вращения», соответственно). При этом в [52] также рассматривается вариант применения ОВТД в составе мультисенсорной системы для измерения дефектов формы (подкласс «И_Определение_геометрии_элементов_ конструкций/Х_Измерение_ профилей_поверхности_изделий»).

В то же время, судя по основной массе публикаций, системы на основе ОВТД наиболее востребованы в задачах контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ по крайней мере, в той части, которая касается контроля состояний элементов конструкций силовых установок в составе изделий аэрокосмического назначения [5-7,10-15]. Сейчас известно большое число работ [11-14], посвященных применению систем на основе ОВТД для контроля многомерных перемещений элементов силовых установок (подкласс «КиД_Контроль_перемещений) и, в частности, контроля радиальных зазоров в компрессорах и турбинах ГТД (подкласс «КП_Контроль_радиальных_перемещений_ и_зазоров), осевых перемещений валов в агрегатах ЖРД (подкласс «КП_Контроль_осевых_перемещений) и т.п.

Еще одной актуальной задачей является контроль целостности изделий АиРКТ при их производстве и эксплуатации (подклассы «КЦИ_Контроль_целостности_изделий_при_ производстве»и»КЦИ_ Контроль_целостности_изделий_при_эксплуатации», соответственно). В частности, в работах [6, 10] рассматривается применение систем на основе ОВТД для контроля технического состояния трибосопряжений авиационных и ракетных двигателей, к которым относятся радиальные и радиально-упорные подшипники, а также редукторы, применяемые в различных узлах и агрегатах машин.

В качестве диагностического параметра, доступного для контроля с помощью ОВТД, здесь использовалось наличие металлических частиц изнашивания в системах смазки подшипниковых узлов (подкласс «КЦИ_Контроль_наличия_частиц_изнашивания») и контроль осевых перемещений вала в радиально-упорном подшипнике (подкласс «КП_Контроль_осевых_перемещений).

Также среди известных задач контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ, которые могут быть решены на основе применения ОВТД, следует отметить задачи, связанные с обнаружением опасных состояний изделий из-за появления недопустимых деформаций элементов их конструкций (подкласс «КЦИ_Контроль_деформаций»), возникновения срывных и помпажных явлений в газовоздушном тракте силовых установок авиационного назначения (подклассы «КЦИ_Контроль_параметров_режима», «КПР_Контроль_помпажных_явлений», «КПР_Контроль_срыва_потока»), недопустимого соприкосновения смежных деталей (подкласс «КВП_Контроль_соприкосновения_деталей») и т.д.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей статьи был апробирован один из возможных подходов к построению формальных систем знаний в области проектирования и применения систем контроля и диагностирования технического состояния объектов АиРКТ, в основе которых лежит использование ВТП и, в частности, их одновитковых разновидностей, которые по ряду параметров являются наилучшими в своем классе. Безусловно, представленные в статье онтологии охватывают только базовые понятия и не могут претендовать на полноту описания ПрО. Тем не менее, даже на таком уровне разработки, предложенные модели описания научных и инженерных знаний в области измерительной техники и АиРКТ уже, по мнению авторов, должны способствовать существенному упрощению поиска соответствующими специалистами необходимых решений в части определения возможных конфигураций измерительного и контрольного оборудования для конкретных практических приложений. Дальнейшее направление исследований предполагает расширения спроектированных онтологий за счет дополнения их новыми сущностями (классами и подклассами), экземплярами, а также наборами аксиом, формализующих дополнительные ограничения и правила ПрО, что, в итоге, должно привести к созданию полноценной системы поддержки принятия решений в рассматриваемой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez,* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, Sensors, Vol. 11, Issue 3, 2011, pp. 2525-2565. https://doi.org/10.3390/s110302525.
2. *E. Doebelin*, Measurement Systems: Applications and Design – 4th ed., McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
3. Патент SU 1394912 A1. Высокотемпературный проводниковый вихретоковый преобразователь / Скобелев О.П., Секисов Ю.Н., Хритин А.А.; патентообладатель – Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева. – Дата публикации: 27.08.1995.
4. *Райков, Б.К.* Вихретоковые датчики зазоров с чувствительными элементами в виде отрезка проводника / Б.К. Райков, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев, А.А. Хритин // Приборы и системы управления. – 1996. – № 8. – С. 27-30.
5. *Боровик, С.Ю.* Одновитковые вихретоковые преобразователи для измерения механических параметров / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Вестник СГАУ. – 2013. – № 4(42). – С.94-102
6. *Belopukhov V., Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Podlipnov P., Sazhenkov A., Sekisov Y.* Monitoring Metal Wear Particles of Friction Pairs in the Oil Systems of Gas Turbine Power Plants. Energies 2022, 15, 4896. https://doi.org/10.3390/en15134896
7. *Borovik S., Sekisov Y.,* Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines, Sensors, Vol. 20, Issue 7, 2020, p. 2107. https://doi.org/10.3390/s20072107.
8. *Borovik S., Sekisov Y.* Single-Coil Eddy Current Sensors. In Sensors, Measurements and Networks, Book Series: Advances in Sensors, Vol. 8 / ed. S. Y. Yurish. Barcelona: IFSA Publishing, S. L., 2022. 19-48 p.
9. *Кутейникова М.М.* Конструктивные разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков / М.М. Кутейникова, Б.К. Райков, О.П. Скобелев// Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XIV межд. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2012. – С. 595-601.
10. *Belosludtsev V., Borovik S., Danilchenko V., Sekisov Y.* Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors. Sensors, Volume 21. Issue 10, 2021, p. 3463. https://doi.org/10.3390/s21103463
11. *Секисов, Ю.Н.* Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев, Л.Б. Беленький [и др.]; под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. – 188с.
12. *Беленький, Л.Б.* Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К. Райков [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Машиностроение, 2011. – 298с.
13. *Белопухов, В.Н.* Кластерные методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 224 с.

14. *Белопухов, В.Н.* Методы и средства измерения и обработки информации о радиальных зазорах в проточной части ГТД с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипнов [и др.]; под общ. ред. Скобелева О.П. – Самара: Изд. «Новая техника», 2021. – 142 с.
15. *Белопухов, В.Н.* Контроль технического состояния узлов и агрегатов силовых установок большой мощности на основе одновитковых вихретоковых датчиков / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов, Ю.Н. Секисов, А.В. Блинов, Е.А. Голдобин // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 8. – С. 49-54. – DOI 10.25728/avtprom.2024.08.10.
16. *Смирнов, А.В.* Онтологии в системах искусственного интеллекта: способы построения и организации (часть 1) / А.В. Смирнов, М.П. Пашкин, Н.Г. Шилов, Т.В. Левашова // Новости искусственного интеллекта. – 2002. – № 1. – С. 3-13.
17. *Грибова, В.В.* Онтология диагностики процессов / Грибова В.В., Шалфеева Е.А.// Онтология проектирования. – 2019. – Т. 9. – № 4(34). – С. 449-461. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-449-461
18. *Borovik S., Ivleva A., Smirnov S.* On the Way to the Ontology of Test and Diagnostics Systems for Blading Power Plants //Proceedings of 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020), Ufa, Russia, 6-9 October 2020. https://doi.org/10.2991/aisr.k.201029.062.
19. *Gruber T.R.,* Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. International Journal Human-Computer Studies, 43(5-6):907-928, 1995.
20. Eddy Current displacement, distance and position sensors (https://www.micro-epsilon.co.uk/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/).
21. Eddy Current Probes (https://www.eddycurrentprobe.com/).
22. KAMAN Precision Products/Measuring. Sensor Family Data Sheet: Advanced family of high-precision position sensors using Eddy Current Technology (https://www.kamansensors.com/pdf_files/ Kaman_sensor_family_data_sheet_web.pdf).
23. Puftechnik: NDT Accessories | Prodcut Catalog (https://www.pruftechnik.com/fileadmin/Products-Services/Products/NDT/NDT-Accessories/Encoders-Paint-markers-Warning-units-Test-defect/Downloads/PRUEFTECHNIK_NDT_Accessories_Catalog_EN-DE.pdf).
24. *Zhao Z., Liu Z., Lyu Y., Gao Y.,* Experimental Investigation of High Temperature-Resistant Inductive Sensor for Blade Tip Clearance Measurement, Sensors, Vol. 19, Issue 1: 61, 2019. https://doi.org/10.3390/s19010061.
25. *Przysowa R., Rokicki E.*, Inductive Sensors for Blade Tip-Timing in Gas Turbines, Journal of Konbin, Vol. 36, Issue 4, 2015, pp. 147-164. https://doi.org/10.1515/jok-2015-0064.
26. *Sridhar V., Chana K., Pekris M.,* High temperature eddy current sensor system for turbine blade tip clearance measurements, in Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics (ETC12), Stockholm, Sweden, 3-7 April 2017. https://doi.org/10.29008/ETC2017-217.
27. *Драгунов, Ю.Г.* Марочник сталей и сплавов. 7-е изд., стереотипное / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: Инновационное машиностроение, 2021. – 1216 с.
28. *Герасимов, В.Г.* Методы и приборы электромагнитного контроля / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников. – М.: Спектр, 2010. – 256 с.
29. *Huang Q., Wang R., Hu J., Jiao H., Zhang C., Hou Z., Duan C., Long X., Lv, L.* Development of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing: A Review. Sensors 2026, 26, 2289. https://doi.org/10.3390/s26082289
30. *Borovik, S., Kuteynikova, M., Sekisov, Y.* Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors. Sensors 2023, 23, 351. https://doi.org/10.3390/s23010351.
31. *Гаврилова, Т.А.* Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
32. *Gavrilova T. A., Leshcheva I. A., Rumyantseva M. N.* Knowledge elicitation methods taxonomy: Russian view // Lecture Notes in Computer Science. –2011. –Vol. 6881 LNAI.–No Part 1. – P. 337-346. – DOI 10.1007/978-3-642-23851-2_35.
33. *Дударь, З.В.* Формальная модель семантического поиска в электронной библиотеке / Дударь З.В., Белоконь В.А., Хильский В.Г. // ВЕЖПТ. – 2011. – № 2(52).
34. *Борисов, В.В.* Многомерное прогнозирование состояния неоднородных электромеханических систем для управления рисками нарушения их работоспособности на основе нечетких темпоральных онтологических и когнитивных моделей / В.В. Борисов, С.П. Курилин, А.П. Жарков, А.М. Соколов // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 4. – С. 83-102. – DOI 10.24412/2410-9916-2022-4-83-102.
35. *Тузовский, А.Ф.* Разработка систем управления знаниями на основе единой онтологической базы знаний / А.Ф. Тузовский // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, – № 2. – С. 182-185.
36. *Petasis G. et al.* Ontology population and enrichment: State of the art // Knowledge-driven multimedia information extraction and ontology evolution. – Springer-Verlag, 2011. – pp. 134-166.
37. *Муромцев, Д.И.* Онтологический инжиниринг знаний в системе Protégé / Д.И. Муромцев. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. – 62 с.
38. *Смирнов, С.В.* Онтологическое моделирование в ситуационном управлении / С.В. Смирнов // Онтология проектирования. – 2012. – №2 (4). – С. 16-24.
39. *Константинова, Н.С.* Онтологии как системы хранения знаний / Н.С. Константинова, О.А. Митрофанова. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2009. – 54 с.
40. *Боровик, С.Ю.* Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса объектов авиационно-космической техники на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков / С.Ю. Боровик, Ю.Н. Секисов // Труды Международного симпозиума надежность и качество, Пенза, 25-31 мая 2026 г. – 2026. – Т. 2. – С.59-66.

41. Перечень изделий РКТ. – URL: https://www.roscosmos.ru/34744/ (дата обращения 14. 07. 2026).
42. Методические рекомендации по организации и проведению в федеральном агентстве воздушного транспорта подтверждения соответствия юридических лиц, осуществляющих разработку воздушных судов и другой авиационной техники установленным требованиям. – 2017 г. – 19 с. – URL: https://favt.gov.ru/public/materials/c/a/b/2/c/cab2c5fa6cd94883a385e7ef5f33fc5a.pdf (дата обращения 14. 07. 2026).
43. Приложение 7 к Конвенции о международной гражданской авиации (Чикаго, 7 декабря 1944 года) / Международная организация гражданской авиации // Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 7 к Конвенции о международной гражданской авиации (ИКАО, 6-е изд., июль 2012 г.) / Международная организация гражданской авиации. – Женева, 2012. – С. 22. – ISBN 978-92-9249-056-0.
44. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 28.11.2025) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026).
45. *Жуков, К.А.* Воздушные винты: Учеб. пособие / К.А. Жуков, Б.А. Углов. – Самара: Самар. аэрокосм. ун-т, 1993. – 56 с.
46. *Москаленко, Л.В.* Основы теории и конструкции авиационных двигателей: учебное пособие / Москаленко Л.В., Стреляев Д.В., Чичков Б.А., Тимонин А.Л.. – М.: МГТУ ГА, 2015. – 64 с.
47. *Моисеев, В.С.* Силовые установки перспективных беспилотных вертолетов / В.С. Моисеев. – Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2020. – 284 с.
48. *Одинец, А.И.* Цифровые устройства: АЦП и ЦАП: Учеб. пособие / А.И. Одинец, А.П. Науменко. – Омск: ИздвоИРСИД, 2006. – 48 с.
49. *Guarino N.* Formal Ontology in Information Systems // Proceedings of FOIS'98, Trento, Italy, 6-8 June 1998. Amsterdam, IOS Press, pp. 3-15.
50. *Белопухов, В.Н.* О возможности применения систем на основе одновитковых вихретоковых датчиков для выявления аварийных ситуаций двигательных установок космического, авиационного, морского и наземного применения / В.Н. Белопухов, И.Г. Коршиков, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов. // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию МГТУ ГА. – М.: ИД Академии Жуковского, 2026. – С. 100-102.
51. *Белопухов, В.Н.* Система измерения ускорений лопаточного колеса компрессора и турбины с использованием одновиткового вихретокового датчика и микроконтроллера / В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции. – Самара: Из-во СамНЦ РАН, 2012. – С.607-611.
52. *Епифанцев, К.В.* Исследование возможности применения одновиткового вихретокового датчика для измерения дефектов формы / К.В. Епифанцев, Г.А. Петров, В.Н. Белопухов, О.А. Заякин // Инновационное приборостроение. – 2024. – Т. 3, № 1. – С. 63-76.

THE ONTOLOGY OF MONITORING AND DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT AND ROCKET-SPACE EQUIPMENT BASED ON THE USE OF SYSTEMS WITH SINGLE-COIL EDDY CURRENT SENSORS

© 2026 S.Y. Borovik, Y.N. Sekisov

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute for the Control of Complex Systems RAS, Samara, Russia

An approach to formalizing scientific and engineering knowledge in the field of designing systems for monitoring and diagnosing the technical condition of aviation and rocket and space objects is proposed. The approach is based on the use of single-turn eddy-current sensors, which provide objective measurement information about the parameters of controlled items under extreme operating conditions. Methods of ontological engineering have been proposed to represent knowledge in this subject area. These methods significantly simplify the processes of joint accumulation and use of knowledge. The paper examines the features of the operation of eddy current transducers with a single coil sensitive element and analyzes and identifies a possible range of tasks for technical diagnostics that can be effectively solved using this hardware. The developed and described ontologies provide a conceptualization of the subject area in terms of a dictionary of concepts for identified classes of objects, their qualitative characteristics, and distinctive features. These research results not only enable the first formal descriptions of accumulated knowledge in monitoring and diagnosing the technical condition of aircraft and rocket-spacecraft equipment using systems with single-coil eddy-current sensors, but should also help simplify the process for specialists in finding the necessary equipment configurations for specific practical applications.

Keywords: Objects of aviation and rocket-space technology, power plants, technical condition monitoring, diagnostics, eddy-current transducers, single-coil eddy-current sensors, conceptual modeling, domain ontology, task ontology.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-8-25
EDN: NQBZTS

REFERENCES

1. *J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez,* Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, Sensors, Vol. 11, Issue 3, 2011, pp. 2525-2565. https://doi.org/10.3390/s110302525.
2. *E. Doebelin,* Measurement Systems: Applications and Design – 4th ed., McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
3. Patent SU 1394912 A1. Vysokotemperaturnyj provodnikovyj vihretokovyj preobrazovatel' / Skobelev O.P., Sekisov Yu.N., Hritin A.A.; patentoobladatel' – Kujbyshevskij aviacionnyj institut im. akad. S. P. Koroleva. – Data publikacii: 27.08.1995.
4. *Rajkov, B.K.* Vihretokovye datchiki zazorov s chuvstvitel'nymi elementami v vide otrezka provodnika / B.K. Rajkov, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev, A.A. Hritin // Pribory i sistemy upravleniya. – 1996. – № 8. – S.27-30.
5. *Borovik, S.Yu.* Odnovitkovye vihretokovye preobrazovateli dlya izmereniya mekhanicheskih parametrov / S.Yu. Borovik, Yu.N. Sekisov // Vestnik SGAU. – 2013. – № 4(42). – S.94-102
6. *Belopukhov V., Blinov A., Borovik S., Luchsheva M., Muhutdinov F., Podlipnov P., Sazhenkov A., Sekisov Y.* Monitoring Metal Wear Particles of Friction Pairs in the Oil Systems of Gas Turbine Power Plants. Energies 2022, 15, 4896. https://doi.org/10.3390/en15134896
7. *Borovik S., Sekisov Y.,* Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines, Sensors, Vol. 20, Issue 7, 2020, p. 2107. https://doi.org/10.3390/s20072107.
8. *Borovik S., Sekisov Y.* Single-Coil Eddy Current Sensors. In Sensors, Measurements and Networks, Book Series: Advances in Sensors, Vol. 8 / ed. S. Y. Yurish. Barcelona: IFSA Publishing, S. L., 2022. 19-48 p.
9. *Kutejnikova, M.M.* Konstruktivnye raznovidnosti vysokotemperaturnyh odnovitkovyh vihretokovyh datchikov / M.M. Kutejnikova, B.K. Rajkov, O.P. Skobelev // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Trudy XIV mezhd. konf. – Samara: SamNC RAN, 2012. – S. 595-601.
10. *Belosludtsev V., Borovik S., Danilchenko V., Sekisov Y.* Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors. Sensors, Volume 21. Issue 10, 2021, p. 3463. https://doi.org/10.3390/s21103463
11. *Sekisov, Yu.N.* Metody i sredstva izmereniya mnogomernyh peremeshchenij elementov konstrukcij silovyh ustanovok / Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev, L.B. Belen'kij [i dr.]; pod red. Sekisova Yu.N., Skobeleva O.P. – Samara: Izd-vo SamNC RAN, 2001. – 188s.
12. *Belen'kij, L.B.* Klasternye metody i sredstva izmereniya deformacij statora i koordinat smeshchenij torcov lopatok i lopastej v gazoturbinnyh dvigatelyah / L.B. Belen'kij, S.Yu. Borovik, B.K. Rajkov [i dr.]; pod obshch. red. Skobeleva O.P. – M.: Mashinostroenie, 2011. – 298s.
13. *Belopuhov, V.N.* Klasternye metody i sredstva izmereniya radial'nyh zazorov v protochnoj chasti turbiny / V.N. Belopuhov, S.Yu. Borovik, M.M. Kutejnikova [i dr.]; pod obshch. red. Skobeleva O.P. – M.: Innovacionnoe mashinostroenie, 2018. -224 s.
14. *Belopuhov, V.N.* Metody i sredstva izmereniya i obrabotki informacii o radial'nyh zazorah v protochnoj chasti GTD s samokompensaciej temperaturnyh vozdejstvij na datchik / V.N. Belopuhov, S.Yu. Borovik, P.E. Podlipnov [i dr.]; pod obshch. red. Skobeleva O.P. – Samara: Izd. «Novaya tekhnika», 2021. – 142 s.
15. *Belopuhov, V.N.* Kontrol› tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov i agregatov silovyh ustanovok bol›shoj moshchnosti na osnove odnovitkovyh vihretokovyh datchikov / V.N. Belopuhov, S.Yu. Borovik, M.M. Kutejnikova, P.E. Podlipnov, Yu.N. Sekisov, A.V. Blinov, E.A. Goldobin // Avtomatizaciya v promyshlennosti. – 2024. – № 8. – S. 49-54. – DOI 10.25728/avtprom.2024.08.10.
16. *Smirnov, A.V.* Ontologii v sistemah iskusstvennogo intellekta: sposoby postroeniya i organizacii (chast› 1) / A.V. Smirnov, M.P. Pashkin, N.G. Shilov, T.V. Levashova // Novosti iskusstvennogo intellekta. – 2002. – № 1. – S. 3-13.
17. *Gribova, V.V.* Ontologiya diagnostiki processov / Gribova V.V., Shalfeeva E.A.// Ontologiya proektirovaniya. – 2019. – T. 9. – № 4(34). – S. 449-461. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-449-461
18. *Borovik S., Ivleva A., Smirnov S.* On the Way to the Ontology of Test and Diagnostics Systems for Blading Power Plants //Proceedings of 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020), Ufa, Russia, 6-9 October 2020. https://doi.org/10.2991/aisr.k.201029.062.
19. *Gruber T.R.,* Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. International Journal Human-Computer Studies, 43(5-6):907-928, 1995.
20. Eddy Current displacement, distance and position sensors (https://www.micro-epsilon.co.uk/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/).
21. Eddy Current Probes (https://www.eddycurrentprobe.com/).
22. KAMAN Precision Products/Measuring. Sensor Family Data Sheet: Advanced family of high-precision position sensors using Eddy Current Technology (https://www.kamansensors.com/pdf_files/ Kaman_sensor_family_data_sheet_web.pdf).
23. Puftechnik: NDT Accessories | Prodcut Catalog (https://www.pruftechnik.com/fileadmin/Products-Services/Products/NDT/NDT-Accessories/Encoders-Paint-markers-Warning-units-Test-defect/Downloads/PRUEFTECHNIK_NDT_Accessories_Catalog_EN-DE.pdf).
24. *Zhao Z., Liu Z., Lyu Y., Gao Y.,* Experimental Investigation of High Temperature-Resistant Inductive Sensor for Blade Tip Clearance Measurement, Sensors, Vol. 19, Issue 1: 61, 2019. https://doi.org/10.3390/s19010061.
25. *Przysowa R., Rokicki E.,* Inductive Sensors for Blade Tip-Timing in Gas Turbines, Journal of Konbin, Vol. 36, Issue 4, 2015, pp. 147-164. https://doi.org/10.1515/jok-2015-0064.
26. *Sridhar V., Chana K., Pekris M.*, High temperature eddy current sensor system for turbine blade tip clearance measurements, in Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics (ETC12), Stockholm, Sweden, 3-7 April 2017. https://doi.org/10.29008/ETC2017-217.

27. *Dragunov, Yu.G.* Marochnik stalej i splavov. 7-e izd., stereotipnoe / Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko, Yu.V. Kashirskij i dr. Pod obshchej red. Yu.G. Dragunova i A.S. Zubchenko. – M.: Innovacionnoe mashinostroenie, 2021. – 1216 s.
28. *Gerasimov, V.G.* Metody i pribory elektromagnitnogo kontrolya / V.G. Gerasimov, V.V. Klyuev, V.E. Shaternikov. – M.: Spektr, 2010. – 256 s.
29. *Huang Q., Wang R., Hu J., Jiao H., Zhang C., Hou Z., Duan C., Long X., Lv, L.* Development of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing: A Review. Sensors 2026, 26, 2289. https://doi.org/10.3390/s26082289
30. *Borovik, S.*, *Kuteynikova, M., Sekisov, Y.* Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors. Sensors 2023, 23, 351. https://doi.org/10.3390/s23010351.
31. *Gavrilova, T.A.* Bazy znanij intellektual›nyh sistem / T.A. Gavrilova, V.F. Horoshevskij. – SPb.: Piter, 2001. – 384 s.
32. *Gavrilova, T. A.* Knowledge elicitation methods taxonomy: Russian view / T. A. Gavrilova, I. A. Leshcheva, M. N. Rumyantseva // Lecture Notes in Computer Science. –2011. –Vol. 6881 LNAI.–No Part 1. – P. 337-346. – DOI 10.1007/978-3-642-23851-2_35.
33. *Dudar', Z.V.* , Formal›naya model› semanticheskogo poiska v elektronnoj biblioteke / Z.V.Dudar', V.A. Belokon', V.G. Hil'skij// VEZhPT. – 2011. – № 2(52).
34. *Borisov, V.V.* Mnogomernoe prognozirovanie sostoyaniya neodnorodnyh elektromekhanicheskih sistem dlya upravleniya riskami narusheniya ih rabotosposobnosti na osnove nechetkih temporal›nyh ontologicheskih i kognitivnyh modelej / V.V. Borisov, S.P. Kurilin, A.P. Zharkov, A.M. Sokolov // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. – 2022. – № 4. – S. 83-102. – DOI 10.24412/2410-9916-2022-4-83-102.
35. *Tuzovskij, A.F.* Razrabotka sistem upravleniya znaniyami na osnove edinoj ontologicheskoj bazy znanij / A.F. Tuzovskij // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2007. – T. 310, – № 2. – S. 182-185.
36. *Petasis G. et al.* Ontology population and enrichment: State of the art // Knowledge-driven multimedia information extraction and ontology evolution. – Springer-Verlag, 2011. – pp. 134-166.
37. *Muromcev, D.I.* Ontologicheskij inzhiniring znanij v sisteme Protégé / D.I. Muromcev. – SPb: SPb GU ITMO, 2007. – 62 s.
38. *Smirnov, S.V.* Ontologicheskoe modelirovanie v situacionnom upravlenii / S.V. Smirnov // Ontologiya proektirovaniya. – 2012. – №2 (4). – S. 16-24.
39. *Konstantinova, N.S.* Ontologii kak sistemy hraneniya znanij / N.S. Konstantinova, O.A. Mitrofanova. – SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet, 2009. – 54 s.
40. *Borovik, S.Yu.* Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya i ocenka ostatochnogo resursa ob"ektov aviacionno-kosmicheskoj tekhniki na osnove primeneniya odnovitkovyh vihretokovyh datchikov / S.Yu. Borovik, Yu.N. Sekisov // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma nadezhnost' i kachestvo, Penza, 25-31 maya 2026 g. – 2026. – T. 2. – S.59-66.
41. Perechen' izdelij RKT. – URL: https://www.roscosmos.ru/34744/ (data obrashcheniya 14. 07. 2026).
42. Metodicheskie rekomendacii po organizacii i provedeniyu v federal'nom agentstve vozdushnogo transporta podtverzhdeniya sootvetstviya yuridicheskih lic, osushchestvlyayushchih razrabotku vozdushnyh sudov i drugoj aviacionnoj tekhniki ustanovlennym trebovaniyam. – 2017 g. – 19 s. – URL: https://favt.gov.ru/public/materials/c/a/b/2/c/cab2c5fa6cd94883a385e7ef5f33fc5a.pdf (data obrashcheniya 14. 07. 2026).
43. Prilozhenie 7 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii (Chikago, 7 dekabrya 1944 goda) / Mezhdunarodnaya organizaciya grazhdanskoj aviacii // Mezhdunarodnye standarty i rekomenduemaya praktika. Prilozhenie 7 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii (IKAO, 6-e izd., iyul' 2012 g.) / Mezhdunarodnaya organizaciya grazhdanskoj aviacii. – Zheneva, 2012. – S. 22. – ISBN 978-92-9249-056-0.
44. Vozdushnyj kodeks Rossijskoj Federacii ot 19.03.1997 № 60-FZ (red. ot 28.11.2025) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2026).
45. *Zhukov, K.A.* Vozdushnye vinty: Ucheb. posobie / K.A. Zhukov, B.A. Uglov. – Samara: Samar. aerokosm. un-t, 1993. – 56 s.
46. *Moskalenko, L.V.* Osnovy teorii i konstrukcii aviacionnyh dvigatelej: uchebnoe posobie / Moskalenko L.V., Strelyaev D.V., Chichkov B.A., Timonin A.L.. – M.: MGTU GA, 2015. – 64 s.
47. *Moiseev, V.S.* Silovye ustanovki perspektivnyh bespilotnyh vertoletov / V.S. Moiseev. – Kazan': Redakcionno-izdatel'skij centr «Shkola», 2020. – 284 s.
48. *Odinec, A.I.* Cifrovye ustrojstva: ACP i CAP: Ucheb. posobie / A.I. Odinec, A.P. Naumenko. – Omsk: Izd-voIRSID, 2006. – 48 s.
49. *Guarino N.* Formal Ontology in Information Systems // Proceedings of FOIS'98, Trento, Italy, 6-8 June 1998. Amsterdam, IOS Press, pp. 3-15.
50. *Belopuhov, V.N.* O vozmozhnosti primeneniya sistem na osnove odnovitkovyh vihretokovyh datchikov dlya vyyavleniya avarijnyh situacij dvigatel'nyh ustanovok kosmicheskogo, aviacionnogo, morskogo i nazemnogo primeneniya / V.N. Belopuhov, I.G. Korshikov, M.M. Kutejnikova, P.E. Podlipnov. // Grazhdanskaya aviaciya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, posvyashchennoj 55-letiyu MGTU GA. – M.: ID Akademii Zhukovskogo, 2026. – S. 100-102.
51. *Belopuhov, V.N.* Sistema izmereniya uskorenij lopatochnogo kolesa kompressora i turbiny s ispol'zovaniem odnovitkovogo vihretokovogo datchika i mikrokontrollera / V.N. Belopuhov, S.Yu. Borovik // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah: Trudy XIV Mezhdunarodnoj konferencii. – Samara: Iz-vo SamNC RAN, 2012. – S.607-611.
52. *Epifancev, K.V.* Issledovanie vozmozhnosti primeneniya odnovitkovogo vihretokovogo datchika dlya izmereniya defektov formy / K.V. Epifancev, G.A. Petrov, V.N. Belopuhov, O.A. Zayakin // Innovacionnoe priborostroenie. – 2024. – T. 3, № 1. – S. 63-76.

Sergey Borovik, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory for Collecting and Processing Multidimensional Information. E-mail: borovik@iccs.ru

Yuriy Sekisov, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Chief Researcher at the Laboratory for Collecting and Processing Multidimensional Information. E-mail: sekisov@iccs.ru