

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного
зондирования неразрушающего контроля
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 004.896

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-4-36-52>

EDN FJRJYK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Диагностика неисправностей в интеллектуальных системах управления автономными роботами на основе онтологического подхода

Ю.А. Быковцев[@], В.М. Лохин,
С.В. Манько, М.П. Романов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: bykovcev@mirea.ru

• Поступила: 23.12.2025 • Доработана: 23.01.2026 • Принята к опубликованию: 24.05.2026

Резюме

Цели. Целью работы является создание средств и методов диагностики автономных роботов для оперативного выявления неисправностей на основе анализа причинно-следственных связей между наблюдаемыми проявлениями и источниками возникновения отказов.

Методы. В ходе выполнения работы использовались методы аналитического обзора современной научно-технической литературы по тематике проводимых исследований; методы построения онтологий при разработке модели диагностики автономных роботов; методы булевой алгебры при формировании запросов к онтологической модели диагностики; модификации методов условной и безусловной диагностики в приложении к поиску причинно-следственных связей между отказами и неисправностями на основе использования онтологической модели; методы машинного эксперимента при оценке продолжительности обработки запросов к онтологической модели диагностики.

Результаты. Предложена онтологическая модель и методы условной и безусловной диагностики, позволяющие обеспечить установление причинно-следственных связей между наблюдаемыми отказами и вызывающими их неисправностями.

Выводы. Показано, что на основе онтологического подхода с учетом наличия развитой инструментальной поддержки, включая языки описания онтологий, средства их моделирования, а также технологии логического вывода и рассуждений на онтологиях, создается новая парадигма разработки перспективного класса автономных робототехнических комплексов, обладающих повышенной степенью отказоустойчивости и, соответственно, адаптивностью. Поскольку создание автономного робота предполагает наличие бортовой интеллектуальной системы управления, построенной по иерархическому принципу и содержащей исполнительный, тактический и стратегический уровни, повышение адаптивности может быть обеспечено за счет эффективного использования «богатых» баз алгоритмов интеллектуальной системы управления на всех уровнях иерархии управления, которые подключаются в зависимости от результатов работы онтологической модели.

Ключевые слова: автономные роботы, интеллектуальные системы, самодиагностика, отказоустойчивость, онтология

Для цитирования: Быковцев Ю.А., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Диагностика неисправностей в интеллектуальных системах управления автономными роботами на основе онтологического подхода. *Russian Technological Journal*. 2026;14(4):36–52. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-4-36-52>, <https://elibrary.ru/FJRJYK>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Fault diagnostics in intelligent control systems of autonomous robots: An ontological approach

Yuri A. Bykovtsev[@], Valery M. Lokhin, Sergey V. Manko, Mikhail P. Romanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: bykovtsev@mirea.ru

• Submitted: 23.12.2025 • Revised: 23.01.2026 • Accepted: 24.05.2026

Abstract

Objectives. The work set out to develop diagnostic tools and methods for autonomous robots for the rapid detection of faults based on the analysis of cause-and-effect relationships between observed manifestations and the sources of failures.

Methods. The paper presents an analytical review of the current scientific and technical literature on the topic of the research, which includes ontology construction methods for developing a diagnostic model for autonomous robots, Boolean algebra methods for generating queries to the ontological diagnostic model, modifications to conditional and unconditional diagnostic methods for finding cause-and-effect relationships between failures and malfunctions based on the use of an ontological model, and machine experimentation methods for estimating the processing time of queries to the ontological diagnostic model.

Results. The presented ontological model and methods for conditional and unconditional diagnostics is used to establish cause-and-effect relationships between observed failures and the malfunctions that cause them.

Conclusions. Based on an ontological approach and taking into account the availability of advanced tool support, including ontology description languages, ontology modeling tools, and ontology-based inference and reasoning technologies, a new paradigm is identified for the development of a promising class of autonomous robotic systems with increased fault tolerance and, consequently, adaptability. The development of an autonomous robot presupposes the presence of an onboard intelligent control system built on a hierarchical principle that comprises executive, tactical, and strategic levels. The results of the ontological model provide an effective basis for activating and utilizing the intelligent control system's rich algorithm databases at all levels of the control hierarchy to support increased adaptability.

Keywords: autonomous robots, intelligent systems, self-diagnostics, fault tolerance, ontology

For citation: Bykovtsev Yu.A., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. Fault diagnostics in intelligent control systems of autonomous robots: An ontological approach. *Russian Technological Journal*. 2026;14(4):36–52. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-4-36-52>, <https://elibrary.ru/FJRJYK>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Создание перспективных образцов робототехники является одним из важнейших приоритетов технологического развития России в XXI веке. Интенсивные работы по созданию дистанционно-управляемых, полуавтоматических и автономных роботов ведутся многими коллективами академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, специализированных конструкторских бюро и ведущих вузов страны. Разработанные образцы роботов различных типов и назначения начинают находить активное применение в широком спектре прикладных областей. Однако объективная оценка опыта эксплуатации современных робототехнических комплексов (РТК) свидетельствует о необходимости существенного повышения уровня автономности, адаптивности, надежности и отказоустойчивости их функционирования в условиях экстремальных сред при наличии факторов неопределенности и возмущающих воздействий случайного характера.

Один из наиболее важных и актуальных аспектов этой проблемы, связанной с обеспечением отказоустойчивости перспективных образцов автономных роботов, сопряжен с развитием средств и методов бортовой самодиагностики для оперативного

обнаружения возникающих неисправностей с последующим принятием решений о полном или частичном восстановлении утраченной работоспособности.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ РОБОТАМИ

Автономность функционирования РТК обеспечивается совокупностью различных факторов, главный из которых связан с наличием бортовой системы управления, обладающей необходимым набором возможностей для планирования поведения, целесообразных действий и перемещений на основе анализа собираемой сенсорной информации об изменении собственного состояния и условий внешней среды (рис. 1). В то же время эффективность полномасштабной реализации функциональных возможностей системы во многом определяется ее адаптивными свойствами по подстройке своих параметров или трансформации структуры для поддержания требуемого качества управления при изменении окружающей среды, воздействии возмущений и многообразии факторов неопределенности.

До последнего момента основное внимание разработчиков средств робототехники специального,



Рис. 1. Обобщенная структура интеллектуальной системы управления автономного робота.

Цифрами 1, 2, 3 обозначены данные, которые от стратегического, тактического и исполнительного уровней передаются в подсистему диагностики. Цифрами 4, 5, 6 обозначены сигналы от подсистемы диагностики к уровням системы управления

промышленного и бытового назначения было сосредоточено главным образом на различных аспектах повышения степени автономности и адаптивности создаваемых образцов на основе комплексного применения технологий обработки знаний [1, 2].

Активные усилия, предпринимаемые на этом поприще, позволили добиться значительных успехов по целому ряду проблемных вопросов интеллектуального управления роботами, действующими в условиях неопределенности в автономном режиме. К числу такого рода достижений следует отнести развитие методов нейросетевого распознавания, интеллектуального планирования, локальной навигации и картографирования, глубинного анализа данных и самообучения.

Важно отметить, что одна из ключевых особенностей современного подхода к построению интеллектуальных систем управления автономными роботами связана с выделением подсистем информационно-измерительного, поведенческого, траекторного и исполнительного уровней, решение специфических задач каждого из которых обеспечивается с помощью механизмов обработки знаний для избирательного подключения необходимых алгоритмов в зависимости от характера текущих ситуаций [3, 4]. При этом вариативность используемых алгоритмов, содержащихся в соответствующих библиотеках, возможность их взаимного переключения и/или ситуативной подстройки параметров определяют широкий диапазон адаптивных возможностей системы управления на всех уровнях ее иерархии.

Вместе с тем совершенно очевидно, что надежность, а, в конечном итоге, и эффективность функционирования автономных роботов определяется не только совокупностью их интеллектуальных и адаптивных возможностей, но и устойчивостью к отказам, неизбежно вызываемым экстремальными условиями эксплуатации и агрессивными воздействиями среды.

Специфика проблемы обеспечения повышенного уровня отказоустойчивости и живучести перспективных образцов автономных РТК обусловлена необходимостью решения совокупности взаимосвязанных задач оперативного обнаружения отказов и их локализации, диагностики неисправностей и оценки тяжести ожидаемых последствий с принятием активных мер по их преодолению или компенсации.

При этом основные сложности этапа комплексной диагностики автономного робота сопряжены с двумя главными факторами:

- многообразием возможных причин, вызывающих отказ в работе той или иной функциональной подсистемы;
- многообразием проявлений одной и той же неисправности, приводящей к одновременному

возникновению отказов в работе нескольких подсистем.

В свою очередь успешность проведения этапа диагностики будет во многом предопределять результативность попыток частичного или полного восстановления работоспособности робота, осуществляемых за счет реконфигурации программно-аппаратных средств интеллектуальной бортовой системы управления с изменением режимов, порядка и/или целей функционирования.

Настоящая статья посвящена обсуждению вопросов, связанных с разработкой средств самодиагностики автономных роботов на основе онтологической модели причинно-следственных связей между наблюдаемыми отказами и вызывающими их неисправностями.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Результаты исследований, активно проводимых в области диагностики автономных роботов в США¹, странах Западной Европы и целом ряде других стран еще с конца XX в. в рамках более общего направления по созданию отказоустойчивых систем управления [5], начинают находить свое практическое воплощение в первых опытных разработках. Показательной иллюстрацией может служить автономный необитаемый подводный аппарат RAUVER (Лаборатория океанических систем, Университет Хериота – Уатта, Эдинбург, Великобритания), оснащаемый средствами самодиагностики, по итогам оперативного завершения которой бортовые планировщики осуществляют корректировку исходной целевой миссии в случае такой необходимости [6].

Опыт проведения поисково-спасательных и других специальных операций с использованием современной робототехники (как с автономным или полуавтоматическим, так и с дистанционным управлением) убедительно свидетельствует, что эффективность ее практического применения существенно ограничивается недостаточно высоким уровнем отказоустойчивости [7, 8]. При этом возникающие сбои, неисправности и отказы отдельных функциональных подсистем робота в общем случае имеют различную природу и вызываются случайными возмущениями внешнего и внутреннего характера, деградацией узлов, элементов и материалов, а также другими факторами. Анализ имеющейся статистики позволяет классифицировать реально наблюдаемые отказы как обусловленные неполадками в исполнительных механизмах, сенсорных подсистемах,

¹ Соединенные Штаты Америки.



Рис. 2. Классификация неисправностей в робототехнических системах

Таблица 1. Оценки вероятностей основных отказов для мобильных роботов специального назначения

Производитель	Исполнительные механизмы	Система управления	Система питания	Система связи	Сенсорная подсистема
Inuktun (Канада)	0.45	0.32	0.00	0.02	0.12
Irobot (США)	0.22	0.30	0.15	0.22	0.11

системах управления, питания и связи, так и рядом других обстоятельств, включая промахи оператора и разнородные внешние воздействия (рис. 2).

Реальные показатели среднего времени наработки на отказ имеют широкий разброс и варьируются в диапазоне от единиц до нескольких десятков часов (в зависимости от типа робота, специфики поставленных перед ним задач и условий их выполнения) [7–10]. В качестве примера в табл. 1 приведены статистические данные американского Центра поисково-спасательной робототехники (Center for Robot-Assisted Search and Rescue, США) по оценке вероятностей основных отказов для двух типов роботов специального назначения за трехлетний период эксплуатации².

Общепринятая трактовка понятия отказоустойчивых систем управления предполагает, что надежность их функционирования должна обеспечиваться за счет развитого набора функциональных возможностей для решения следующих основных задач диагностики возникающих неисправностей и их устранения или компенсации [10–12]:

- обнаружение отказа (как установление факта ненормального поведения системы);
- локализация неисправности (с точностью до определения места и типа произошедшего отказа);
- идентификация неисправности (как установление причин отказа на основе анализа его наблюдаемых проявлений);
- оценка серьезности найденных неисправностей и принятие решений о полном или частичном восстановлении работоспособности.

В контексте развития средств и методов автоматической диагностики неисправностей и восстановления работоспособности автономных роботов необходимо различать следующие критически важные типы отказов:

- полные и частичные, первые из которых вызывают потерю работоспособности объекта, а вторые обуславливают ее ограничение;
- устраняемые (вплоть до обретения объектом его исходной работоспособности) и компенсируемые (позволяющие восстановить утраченные функции в ограниченных объемах).

В свою очередь серьезность неисправностей, идентифицируемых в процессе диагностики, оценивается по шкале с четырьмя категориями:

² Carlson J. Analysis of How Mobile Robots Fail in the Field (2004). USF Tampa Graduate Theses and Dissertations. <https://digitalcommons.usf.edu/etd/980>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

- низкая, при которой робот, адаптируя некоторые параметры своего функционирования, может продолжать выполнение заданной целевой миссии на том же уровне автономности;
- средняя, при которой робот может продолжать выполнение сокращенного варианта заданной целевой миссии, оставаясь на том же уровне автономности функционирования;
- значительная, при которой робот не может продолжать выполнение заданной целевой миссии, оставаясь на том же уровне автономности функционирования;
- фатальная, при которой робот не может продолжать выполнение заданной целевой миссии.

Как показывает обзор литературы [10–21] конструктивной основой для развития методов обнаружения отказов и диагностики неисправностей служат три принципиально различных подхода, связанные соответственно с использованием аналитических моделей [11, 19], анализом данных [13, 17] и обработкой знаний [6, 16, 18]. Соответствующая классификация методов диагностики приведена на рис. 3.

Методы диагностики на моделях предполагают установление неисправности по отклонению фактически наблюдаемого и ожидаемого поведения системы. Главный недостаток подхода обусловлен сложностью создания адекватных математических моделей объектов диагностики [15]. Тем не менее, методы диагностики на моделях широко применяются для обнаружения неисправностей, возникающих в процессе функционирования РТК [11, 14, 18, 19, 22–27]. В рамках этого класса наибольшее распространение в силу своей эффективности получили методы с эталонной моделью и наблюдателем, реализуемые с помощью различных модификаций фильтра Калмана.

Принципиально иной подход (который активно применяется для диагностики роботов, равно как и других типов сложных динамических объектов в реальном масштабе времени, не требуя априорного создания математических моделей поведения

системы) основан на анализе потоков данных и оперативном обнаружении аномальных ситуаций в изменении контролируемых сигналов [20, 21]. При этом отклонение текущих данных от статистически ожидаемых рассматривается в качестве показателя возникновения неисправности. Для извлечения необходимых признаков, обеспечивающих возможность выявления неисправностей при обработке потока поступающих данных, применяются различные методы анализа сигналов во временной, частотной или частотно-временной областях, а также основанные на машинном обучении [20, 28].

Так, например, анализ сигналов во временной области позволяет получить целый ряд статистически важных характеристик, включая среднее и среднеквадратичное значение, площадь под кривой, наклон и коэффициент формы, дисперсию, энтропию и т.д.

В свою очередь, анализ сигналов в частотной области, выполняемый с помощью преобразований Фурье, также использует соответствующие статистические характеристики [29, 30], главными из которых являются центр частоты, среднеквадратичная частота и частота корневой дисперсии и ряд прочих [31].

Частотно-временной анализ, реализуемый с привлечением вейвлет-преобразования или кратковременного преобразования Фурье, дает подробное представление о характеристиках сигнала как во временной, так и в частотной областях [32, 33].

Совокупность признаков, сопоставление с которыми текущих данных позволяет обеспечить обнаружение отказов или диагностику неисправностей, может формироваться в режиме машинного обучения, проводимого с использованием аппарата нейронных или байесовских сетей, кластерного и регрессионного анализа или ряда других альтернативных механизмов на примерах априорно размеченной выборки или оперативных наблюдений из «скользящего окна» [20, 34].



Рис. 3. Классификация методов обнаружения отказов и диагностики неисправностей

Таблица 2. Основные характеристики современных подходов к диагностике неисправностей

Подходы	Преимущества	Проблемы практического применения
На основе моделей	• выполнение в реальном времени; • возможность обнаружения неизвестных неисправностей	• моделирование сложных систем; • моделирование контекста
На основе анализа данных	• не требует наличия модели; • возможность обнаружения неизвестных неисправностей	• выполнение в реальном времени
На основе знаний	• выполнение в реальном времени; • низкая вычислительная нагрузка	• обнаружение неизвестных неисправностей

Главный недостаток методов диагностики на основе анализа данных связан с проблемами обработки больших объемов информации в реальном масштабе времени.

Интеллектуальная диагностика на основе знаний предполагает, что поиск неисправностей может осуществляться или на уровне экспертных представлений, аккумулирующих опыт высококвалифицированных специалистов, или с использованием казуальных моделей, описывающих объект диагностики, его структуру³ и особенности выполняемых прикладных задач, а также проявления возможных отказов и их вероятные причины [6, 16, 18, 35–44].

Главный недостаток методов интеллектуальной диагностики связан с возможностью обнаружения и идентификации ограниченного набора неисправностей из числа типов, априорно заложенных в базу знаний.

Для построения моделей интеллектуальной диагностики применяются различные формы представления знаний, включая предикаты первого порядка, продукционные правила, семантические сети, фреймообразные структуры, онтологии и т.д. [16, 35, 36, 41, 45–48]. Выбранная форма представления знаний предопределяет совокупность средств и методов, необходимых для их логической обработки при проведении интеллектуальной диагностики. Следует особо отметить, что существующие подходы к диагностике неисправностей взаимно дополняют друг друга по своим возможностям [16, 20], представленным в табл. 2.

Так, например, методы диагностики на основе моделей позволяют обеспечить выявление

неисправностей исполнительных механизмов, приводов, датчиков внутреннего осязания и других компонентов системы, поведение которых может быть описано на уровне аналитических представлений.

В свою очередь методы диагностики на основе данных находят широкое применение при обработке показаний датчиков внешнего осязания для обнаружения и локализации отказов, вызываемых как внутренними неисправностями системы, так и воздействиями окружающей среды.

Эффективным подходом для диагностики неисправностей датчиков внешнего осязания в составе мультисенсорных систем может служить привлечение различных методов слияния данных, в т.ч. на основе использования фильтра Калмана или Демпстера – Шейфера.

Наиболее важное достоинство подхода к поиску неисправностей на основе знаний заключается в возможности его использования для объединения диагностических подходов на основе анализа данных и на основе моделей в рамках гибридной системы мониторинга, позволяющей установить причинно-следственные связи между наблюдаемым проявлением отказа и конкретной неполадкой или аварийной ситуацией.

Диагностика и восстановление неисправностей, связанных с различными типами программно-аппаратных сбоев в составе бортового комплекса вычислительных средств, осуществляется на основе устоявшихся и отработанных методик соответствующего плана.

Обобщение результатов проведенного обзора приводит к ряду принципиально важных выводов:

- комплексное применение современных методов технической диагностики позволяет обеспечить оперативное обнаружение отказов, возникающих в процессе функционирования автономного робота;
- надежное выявление типа неисправностей, которые в своем подавляющем большинстве оказывают негативное влияние на работоспособность сразу нескольких функциональных подсистем робота, предполагает необходимость привлечения специализированных моделей диагностики

³ ГОСТ Р 27.302-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. *Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей* (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 1249-ст). М.: Стандартинформ, 2011, 22 с. [GOST R 27.302-2009. National Standard of the Russian Federation. *Reliability in Engineering: Fault Tree Analysis* (approved and put into effect by Order No. 1249-st of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 15, 2009). Moscow: Standartinform; 2011, 22 p. (In Russ.).]

для установления причинно-следственных связей между наблюдаемыми проявлениями отказов и их первопричинами;

- использование онтологического подхода позволяет обеспечить создание модели самодиагностики автономного робота, отражающей всю совокупность причинно-следственных связей его возможных отказов и конкретных неисправностей с учетом особенностей иерархического построения интеллектуальных бортовых систем управления.

В зависимости от серьезности найденных неисправностей восстановление работоспособности системы может обеспечиваться несколькими различными способами, связанными с подстройкой параметров алгоритмов управления, реконфигурацией аппаратно-программных средств, оперативной трансформацией планов выполнения поставленных задач или коррекцией целей функционирования [10].

Развитие средств и методов самодиагностики и восстановления работоспособности интеллектуальных бортовых систем управления обуславливает реальные перспективы создания нового поколения робототехнических систем, обладающих высокой степенью отказоустойчивости, автономности и надежности функционирования [20, 23].

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ АВТОНОМНОГО РОБОТА

Наиболее современный и многообещающий подход к созданию отказоустойчивых систем управления автономными роботами со встроенными средствами бортовой самодиагностики связан с использованием онтологических форм представления знаний [45, 46, 48]. При этом под онтологией понимается формальное описание концептуальной модели предметной области в ее некотором контексте [49, 50].

Важно отметить, что главное преимущество онтологического представления знаний заключается в возможности их использования в решении различных функциональных и прикладных задач как на уровне отдельно взятого робота, так и на уровне робототехнической группировки.

Формально онтология определяется следующим кортежем:

$$O = \langle X, R, F \rangle,$$

где X – конечное множество понятий (концептов) предметной области; R – конечное множество отношений между понятиями; F – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и/или отношениях.

В свою очередь онтологическая модель, позволяющая описывать взаимосвязь онтологий разных уровней, также задается в виде кортежа:

$$Z = \langle O, P, M \rangle,$$

где O – онтология верхнего уровня (метаонтология), которая содержит общие понятия и отношения, не зависящие от предметной области; P – множество предметных онтологий и онтологий задач предметной области (с учетом предпочтений пользователя); M – модель машины вывода данной онтологической системы (например, для изменения критериев релевантности поиска или критериев формирования репозитория).

Применение онтологий обеспечивает реализацию широкого набора функциональных возможностей, главными из которых являются:

- формализованное представление знаний, включая организацию общей и предметной терминологии, описание предметных областей для совместного использования различными интеллектуальными агентами, индексирование, фильтрацию и классификацию формализованных знаний;
- приобретение и структурирование знаний;
- семантическая интеграция информационных ресурсов (формирование единого сетевого пространства знаний);
- обеспечение возможности поиска нужной информации (индексирование, фильтрация и классификация формализованных знаний).

Важно отметить, что формирование и обработка онтологических моделей представления знаний поддерживаются развитым инструментарием, включая языки описания онтологий (SHOE⁴, XOL⁵, OIL⁶, RDFS⁷, DAML⁸+OIL и OWL⁹) [51], средства модели-

⁴ Simple HTML ontology extensions – язык описания онтологий, основанный на языке разметки данных HTML (hypertext markup language – язык гипертекстовой разметки). [Simple HTML ontology extensions is the ontology description language based on the HTML data markup language (hypertext markup language).]

⁵ XML-based ontology exchange language – язык описания онтологий, предназначен для обмена описаниями онтологий (XML – eXtensible Markup Language – расширяемый язык разметки). [XML-based ontology exchange language is the ontology description language designed for exchanging ontology descriptions (XML – eXtensible Markup Language).]

⁶ Ontology interchange language – язык описания онтологий. [Ontology interchange language.]

⁷ RDF Schema – язык описания онтологий, семантическое расширение языка RDF (resource description framework, среда описания ресурса). [RDF Schema is the ontology description language, a semantic extension of the RDF language (resource description framework).]

⁸ Digital asset modeling language – язык смарт-контрактов с открытым исходным кодом. [Digital asset modeling language is the open-source smart contract language.]

⁹ Web ontology language – язык описания онтологий для семантической паутины. [Web ontology language is the language for describing ontologies for the semantic web.]

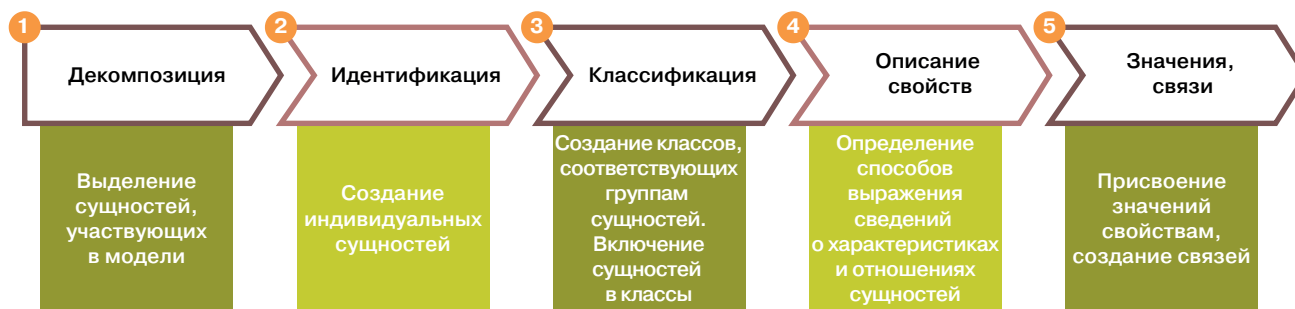


Рис. 4. Этапы разработки онтологии диагностической модели

рования онтологий (*Apollo*¹⁰, *WebOnto*¹¹, *WebODE*¹², *OntoEdit*¹³ и *Protégé*¹⁴) [52], а также технологические процедуры логического вывода и рассуждений на онтологиях (*Racer*¹⁵, *Pellet*¹⁶, *FaCT++*¹⁷, *FOWL*¹⁸, *KAON2*¹⁹, *Hoolet*²⁰, *Jess*²¹) [50, 53–58].

Эффективность использования онтологических моделей представления знаний в задачах поиска и идентификации неисправностей подтверждается примерами реальных образцов систем технической диагностики сложного электромеханического оборудования, станков с числовым программным управлением, автопогрузчиков, автономных роботов и других типов динамических объектов [36, 48, 50, 59, 60].

Более того, онтологические модели становятся конструктивной основой для становления новой парадигмы разработки перспективного поколения автономных РТК [45, 46, 61–63]. Ярким подтверждением этой тенденции может служить тот факт, что рабочая группа по стандартизации в области робототехники и автоматизации (IEEE Robotics

and Automation Society Ontologies for Robotics and Automation Working Group, IEEE ORA WG) в начале 2015 г. опубликовала первый в истории специальный стандарт IEEE 1872-2015²², который определяет набор онтологий, связанных с робототехникой и автоматизацией (Robotics and Automation, R&A) [64]. С позиции современных тенденций эта концепция соответствует идее интеграции интеллектуальных систем управления и диагностики автономных роботов.

Разработка любой онтологии, включая онтологическую модель диагностики автономного робота, носит итеративный характер и предполагает выполнение следующих основных этапов [50], последовательность которых показана на рис. 4:

- выделение сущностей, участвующих в модели (декомпозиция);
- создание индивидуальных сущностей (идентификация);
- создание классов, соответствующих группам сущностей, и включение сущностей в классы (классификация);
- определение способов выражения сведений о характеристиках и отношениях сущностей (описание свойств);
- присвоение значений свойствам, создание связей (значения, связи).

Такой подход позволяет разработчику сконцентрироваться на выделении основных понятий и объектов, закладываемых в модель, а уже потом определить общие свойства или признаки, по которым данные объекты могут быть объединены в классы для организации причинно-следственных, логических, количественных и других отношений между отдельными классами. При этом множество базовых понятий будет напрямую зависеть не только от предметной области или конкретного исследуемого объекта, но и задачи, которая решается онтологической моделью.

¹⁰ <https://www.apollographql.com/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹¹ <http://kmi.open.ac.uk/projects/webonto/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹² <https://oeg.fi.upm.es/index.php/en/old-technologies/60-webode/index.html>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹³ <https://www.softpedia.com/get/Science-CAD/OntoStudio.shtml>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹⁴ <https://protege.stanford.edu/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹⁵ <https://www.chai.uni-hamburg.de/~moeller/racer/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹⁶ <http://pellet.owldl.com/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹⁷ <http://owl.cs.manchester.ac.uk/tools/fact/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹⁸ <https://fowl.sourceforge.net/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

¹⁹ <https://km.aifb.kit.edu/projects/owltools/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

²⁰ <http://owl.man.ac.uk/hoolet/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

²¹ <https://www.ida.liu.se/~hener77/JessTab/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

²² <https://standards.ieee.org/ieee/1872/5354/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed April 30, 2026.

В качестве примера может быть приведена разработка онтологической модели диагностики подвижной платформы автономного РТК, включающей следующие основные компоненты:

- исполнительные приводы, объединяющие в своем составе двигатель, датчики обратной связи (ОС) и индивидуальный контроллер системы управления (СУ) приводом;
- система управления исполнительным уровнем платформы, содержащим комплект приводов, систему технического зрения (СТЗ) и глобальную

навигационную спутниковую систему (ГНСС), а также центральный вычислитель, формирующий задающие воздействия (на СУ приводов);

- система питания с контроллером;
- блок связи с тактическим уровнем системы управления РТК.

В этом случае в качестве основных сущностей создаваемой онтологической модели, которая представлена на рис. 5, должны рассматриваться не составные компоненты подвижной платформы, а их возможные отказы и неисправности.

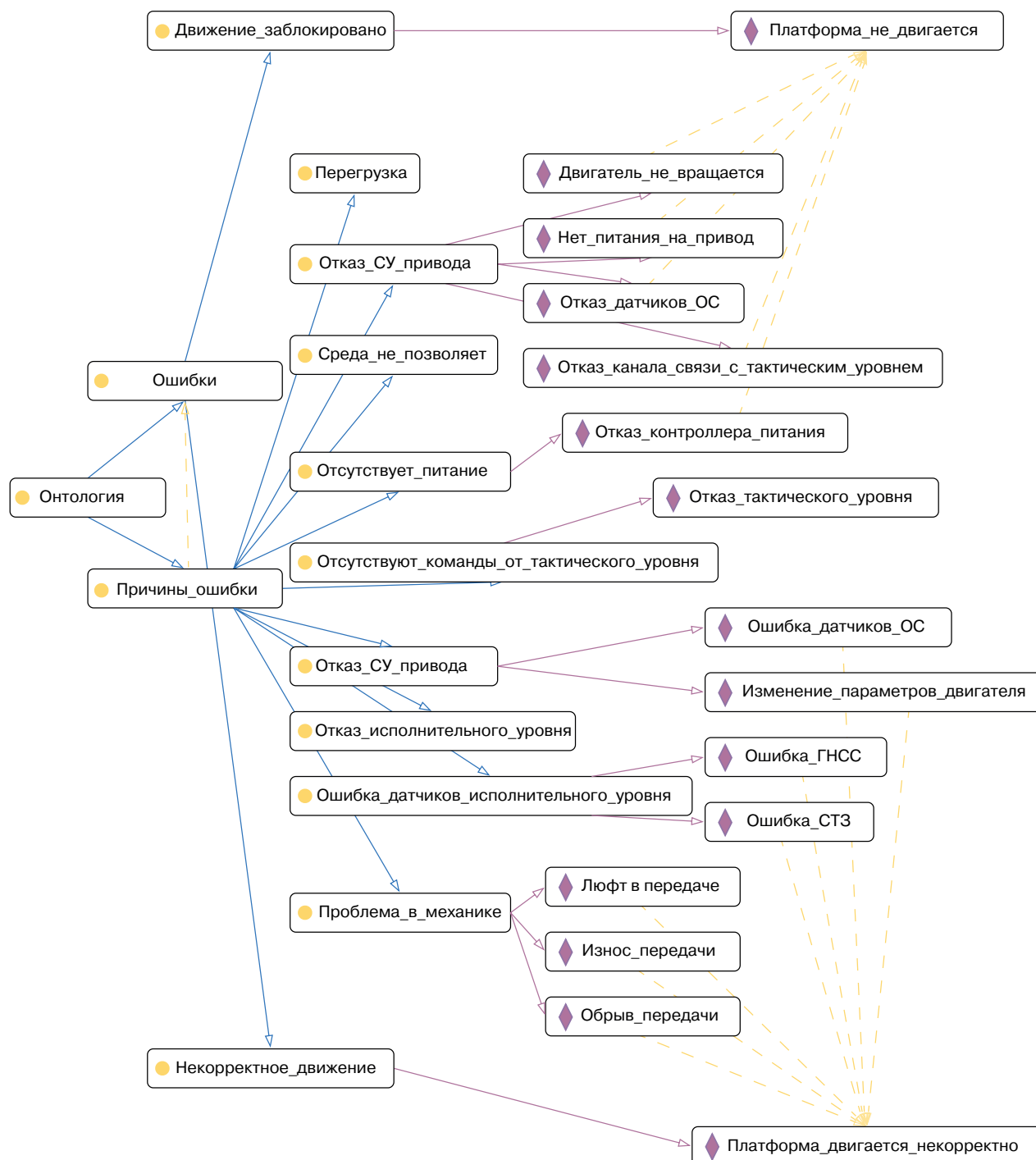


Рис. 5. Онтологическая модель диагностики мобильной платформы автономного РТК

Так, для системы управления приводом к подобному типу отказов, объединяемых в отдельный класс «Отказ СУ привода», можно отнести ситуации полной остановки двигателя, отсутствие питания на привод или отказы датчиков ОС.

Аналогичные рассуждения, проводимые по отношению к каждому конкретному компоненту или подсистеме подвижной платформы, позволяют определить следующий набор классов:

- отказ исполнительного уровня;
- ошибка датчиков исполнительного уровня;
- отказ СУ привода;
- ошибка СУ привода;
- отсутствие питания;
- отсутствие команды от тактического уровня;
- проблема в механике;
- отказ, обусловленный взаимодействием со средой;
- перегрузка.

Для выделенных классов возможных неисправностей в конкретных подсистемах платформы, потенциально приводящих к ошибкам в ее движении, дополнительно вводится один более общий класс «Причины ошибки». Вместе с тем, сами ошибки, представленные подклассами «Движение заблокировано» и «Некорректное движение», объединяются в класс «Ошибки». Взаимосвязи неисправностей с их проявлением на уровне наблюдаемых отказов задаются с помощью свойств-указателей «влечет» и «вызвано», которые будут определять соответствующие отношения между классами «Ошибки» и «Причины ошибки».

При этом в качестве свойств-значений, характеризующих возможные состояния установленных сущностей (истинное (true) или ложное (false)) в составе онтологической модели, рассматриваются два параметра – «Состояние ошибки» и «Подозрение на ошибку», первое из которых определено как на множестве объектов в классе «Ошибки», так и в классе «Причины ошибки», а второе – только на объектах последнего класса.

Очевидно, что разработанная онтологическая модель, приведенная на рис. 5, допускает возможность своего наращивания при необходимости учета более широкого спектра неисправностей и отказов, проявляемых не только на уровне подвижной платформы, но и РТК в целом.

АЛГОРИТМЫ БЕЗУСЛОВНОГО И УСЛОВНОГО ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Диагностика неисправностей и анализ их возможных последствий на основе наблюдаемых отказов с использованием онтологической модели предполагает необходимость организации запросов.

В соответствии с алгоритмом безусловной диагностики при изменении свойства-значения или

свойства-указателя отдельного объекта онтологии механизм логического вывода обрабатывает каждый запрос из своей базы знаний независимо от результатов обработки предыдущих запросов.

Общий вид запросов, формируемых на языке SWRL²³ (как наиболее богатом и часто применяемом) представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{Класс_1}(x) \wedge \text{свойство-значение_1}(x, \text{значение_1}) \wedge \\ &\quad \wedge \text{свойство-указатель}(x, y) \wedge \text{Класс_2}(y) \rightarrow \\ &\quad \rightarrow \text{свойство-значение_2}(y, \text{значение_2}), \end{aligned}$$

где x и y – объекты классов 1 и 2 соответственно; свойство-значение_1 и свойство-значение_2 – значение (числовое, строковое, логическое и т.д.) некоторого параметра, относящегося к объектам класса 1 и 2 соответственно; свойство-указатель – отношение, связывающее объекты классов 1 и 2.

Подобная структура запроса позволяет на основе информации о состоянии объектов одного класса сделать заключение об изменении состояния объекта другого класса.

Так, в частности, «восходящий» тип запроса, позволяющего проследить проявление отказа на уровне платформы от возникновения ошибки в конкретном компоненте, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} &\text{Отказ_СУ_привода}(?c) \wedge \\ &\quad \wedge \text{Состояние_ошибки}(?c, \text{true}) \wedge \text{влечет}(?c, ?y) \rightarrow \\ &\quad \rightarrow \text{Состояние_ошибки}(?y, \text{true}). \end{aligned}$$

Обработка сформированного запроса обеспечивается процедурой логического вывода с последовательным выполнением серии соответствующих шагов, включая:

- отбор тех компонент (c) из класса «Отказ СУ привода», для которых значение свойства-значения «Состояние ошибки» является истинным (true);
- отыскание всех объектов (y), которые связаны с отобранными свойством-указателем «влечет» и установить истинным (true) свойство-значение «Состояние ошибки» для объектов y .

Таким образом, если для одного или нескольких объектов, входящих в класс «Отказ СУ привода» (например, «Двигатель не вращается»), свойство-значение «Состояние ошибки» принимает значение «истина» (true), то по итогам обработки запроса механизмом логического вывода свойству-значению «Состояние ошибки» для объекта «Платформа не двигается» также присваивается значение «истина» (true) (рис. 6).

В свою очередь «нисходящий» тип запроса, позволяющий обеспечить диагностику неисправности

²³ Semantic web rule language – язык описания правил для общедоступной глобальной семантической сети Semantic web. [Semantic web rule language is the rule description language for the publicly accessible global Semantic web.]

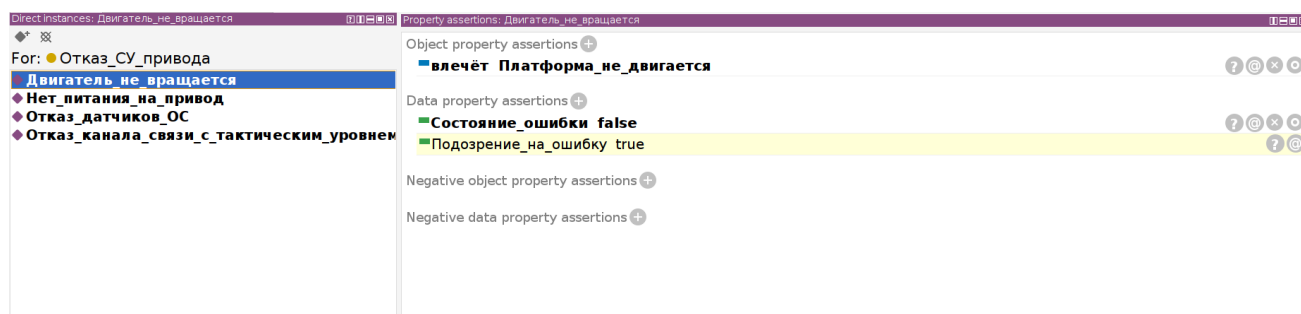


Рис. 6. Результаты модельного эксперимента по обработке «восходящего» запроса о возможных последствиях неисправности

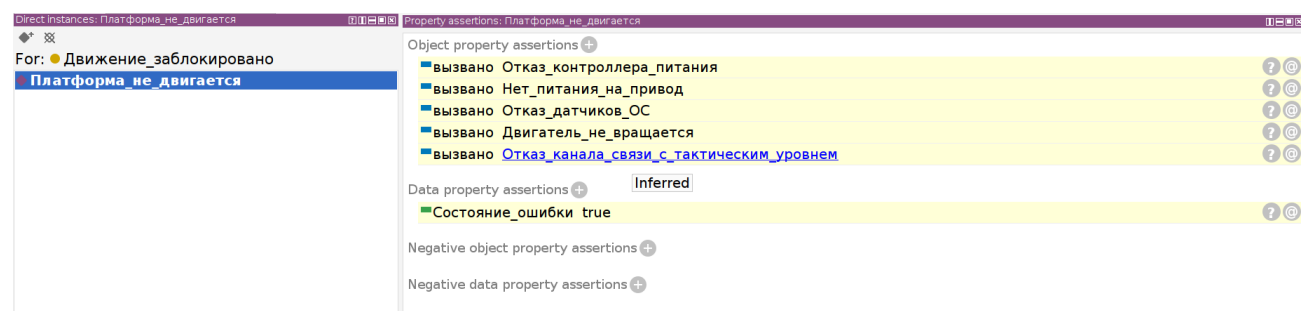


Рис. 7. Результаты модельного эксперимента по обработке «нисходящего» запроса о возможных причинах наблюдаемого отказа

по ее проявлению на уровне отказа платформы, формируется аналогичным образом:

$$\begin{aligned} & \text{Движение_заблокировано}(?c) \wedge \\ & \wedge \text{Состояние_ошибки}(?c, \text{true}) \wedge \text{вызвано}(?c, ?y) \rightarrow \\ & \rightarrow \text{Подозрение_на_ошибку}(?y, \text{true}). \end{aligned}$$

Результаты модельного эксперимента по обработке «нисходящего» запроса о возможных причинах наблюдаемого отказа представлены на рис. 7.

Отсутствие условий на обработку запросов, с одной стороны, существенно упрощает анализ результатов работы онтологической модели диагностики, однако, по мере увеличения размерности как самой онтологии, так и базы запросов, может привести к критическому превышению времени отклика диагностической системы при возникновении неисправности. В связи с этим крайне перспективной представляется организация условного поиска неисправностей, обеспечивающего выбор обрабатываемых запросов из базы знаний на текущем шаге на основе результатов выполнения предыдущего шага в целях сокращения общей продолжительности процесса диагностики.

Отличительная особенность предлагаемого алгоритма связана с обработкой только тех запросов из числа содержащихся в базе знаний, которые могут привести к изменению состояния онтологической модели. При этом под состоянием модели будем понимать совокупность свойств-значений сущностных

объектов онтологии, а отбор запросов осуществлять на основе анализа их антецедентной части.

Пусть $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n})$ – вектор состояния онтологической модели на текущем шаге (под состоянием будем понимать свойства-значения объектов); $\mathbf{X}_{i-1} = (x_{i-1,1}, x_{i-1,2}, \dots, x_{i-1,n})$ – вектор состояния на предыдущем шаге; $\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$ – новое состояние, связанное с возникновением неисправности; $\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_{i-1})$ – вектор изменения состояния.

Тогда формальное описание алгоритма условного поиска неисправностей будет иметь следующий вид:

1. Принять $\mathbf{X}_i = \tilde{\mathbf{X}}$;
2. Вычислить $\hat{\mathbf{X}}$;
3. Если $\hat{\mathbf{X}} \neq 0$, то для каждого ненулевого компонента вектора найти в базе знаний запрос, содержащий данный компонент в антецедентной части. В противном случае алгоритм завершается;
4. Принять $\mathbf{X}_{i-1} = \mathbf{X}_i$;
5. Сформировать новый вектор $\mathbf{X}_i$ на основе результатов обработки выбранных запросов с помощью механизма логического вывода;
6. Перейти к шагу 2.

Очевидно, что потенциальная применимость разрабатываемых алгоритмов диагностики во многом определяется их вычислительной сложностью и средним показателем временных затрат, связанных в первую очередь с обработкой запросов к онтологической модели и зависящих не только от ее структуры и размерности, но и от особенностей механизма логического вывода.

Следует отметить, что одним из наиболее эффективных инструментальных средств формирования смысловых рассуждений является механизм логического вывода *Pellet*, который в отличие от множества известных аналогов (*Hermit*²⁴, *RacerPro*²⁵, *FaCT++* и т.д.) поддерживает работу с онтологиями не только на уровне классов и свойств-указателей, но и на уровне отдельных объектов, что имеет принципиальное важное значение для решения задач диагностики с использованием алгоритмов безусловно и условного поиска.

Оценки вычислительной сложности механизма логического вывода *Pellet*, приводимые в ряде работ [65, 66], соответствуют квадратичной зависимости ($O(n^2 + m^2)$) от количества классов n и отношений m и линейной зависимости $O(k)$ от количества запросов k . Исходя из этих данных, можно утверждать, что расширение модели диагностики (если это необходимо) должно вестись с позиции увеличения количества запросов, а не детализации состава самой онтологии, ориентируемой на поиск причинно-следственных связей между наблюдаемыми отказами и вызывающими их неисправностями. При этом контроль корректности функционирования отдельных компонентов, узлов и подсистем робота должен осуществляться с помощью средств и методов локальной диагностики на основе моделей и анализа данных. Серия экспериментов, проведенных на персональном компьютере с четырехъядерным центральным процессором i5-7200U с тактовой частотой 2.50 ГГц, показала, что максимальное время обработки запроса к представленной онтологической модели диагностики составляет 61 мс, что является вполне приемлемым показателем в контексте задач отказоустойчивого управления автономными роботами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение устойчивости к отказам, которое является одним из важнейших требований к перспективным образцам автономных роботов, предполагает необходимость разработки средств оперативного обнаружения отказов и реконфигурации бортовой системы управления для компенсации их последствий. При всем многообразии современных методов технической диагностики комплексная

проверка работоспособности робота остается весьма непростой задачей, сложность которой связана с выявлением истинных причин, влекущих наблюдаемые нарушения в поведении его функциональных подсистем.

В статье предложены онтологическая модель и алгоритмы самодиагностики автономного робота для выявления конкретных неисправностей на основе анализа причинно-следственных взаимосвязей между совокупностью реальных проявлений и источниками возникновения возможных отказов.

Технология онтологического моделирования (в отличие от известных подходов, основанных на применении аналитических моделей и анализе данных) может стать конструктивной базой для построения комплексной системы самодиагностики, отражающей всю совокупность причинно-следственных связей возможных отказов и конкретных неисправностей автономного робота с учетом особенностей иерархического построения интеллектуальной бортовой системы управления и специфики задач каждого из ее уровней.

Экспериментальные исследования по оценке времени обработки запросов к онтологической модели диагностики показали в частности, что время обработки десяти запросов составляет порядка 60 мс, что является вполне приемлемым с учетом инерционных параметров мобильных роботов.

Применение онтологической модели открывает также дальнейшие перспективы для решения задач повышения живучести и работоспособности автономных роботов в экстремальных условиях за счет реконфигурации программно-аппаратных средств интеллектуальной системы управления по результатам проводимой самодиагностики.

Вклад авторов

Ю.А. Быковцев – разработка примера онтологической модели и симуляция.

В.М. Лохин – общее руководство и рецензирование.

С.В. Манько – поиск и анализ литературы.

М.П. Романов – постановка задачи.

Authors' contributions

Yu.A. Bykovtsev – development of an example ontology model and simulation.

V.M. Lokhin – general guidance and review.

S.V. Manko – literature review and analysis.

M.P. Romanov – problem statement.

²⁴ <http://www.hermit-reasoner.com/>. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed 30.04.2026.

²⁵ https://franz.com/agraph/racer/racer_features.lhtml. Дата обращения 30.04.2026. / Accessed 30.04.2026.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Jang D.S., Cho D.H., Lee W.C., Ryu S.K., Jeong B., Hong M., Jung M., Kim M., Lee M., Lee S., Choi H.L. Unlocking Robotic Autonomy: A Survey on the Applications of Foundation Models. *International Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS)*. 2024;22(8):2341–2384. <https://doi.org/10.1007/s12555-024-0438-7>
2. Zghair N.A., Al-Araji A.S. A One Decade Survey of Autonomous Mobile Robot Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2021;11(6):4891–4906. <http://doi.org/10.11591/ijece.v11i6.pp4891-4906>
3. Интеллектуальные системы автоматического управления; под ред. Макарова И.М., Лохина В.М. М.: Физматлит; 2001, 576 с. ISBN 5-9221-0162-5
[Makarov I.M., Lokhin V.M. (Eds.). *Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya (Intelligent Automatic Control Systems)*. Moscow: Fizmatlit; 2001, 576 p. (In Russ.). ISBN 5-9221-0162-5]
4. Quan N.D., Ha H.H., Son L.D., An T.V., Hung N.T., Linh C.V. Control system architecture of an intelligent humanoid robot. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2022;60(6):1162–1178.
5. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control System. *Ann. Rev. Contr.* 2008;32(2): 229–252. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.03.008>
6. Hamilton K., Lane D., Taylor N., Brown K. Fault diagnosis on autonomous robotic vehicles with RECOVERY: an integrated heterogeneous-knowledge approach. In: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2001. V. 4. P. 3232–3237. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933116>
7. Carlson J., Murphy R.R. How UGVs physically fail in the field. *IEEE Trans. Robotics*. 2005;21(3):423–437. <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.838027>
8. Carlson J., Murphy R. Reliability analysis of mobile robots. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2003. V. 1. P. 274–281. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241608>
9. Khalastchi E., Kaminka G.A., Kalech M., Lin R. Online anomaly detection in unmanned vehicles. In: *10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. 2011. V. 1–3. P. 105–112.
10. Crestani D., Godary-Dejean K., Lapierre L. Enhancing Fault Tolerance of Autonomous Mobile Robots. *Robot. Auton. Syst.* 2015;68:140–155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.015>
11. Hasan A., Tahavori M., Midtiby H. Model-Based Fault Diagnosis Algorithms for Robotic Systems. *IEEE Access*. 2023;11:2250–2258. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3233672>
12. Abdilatif Alobaidy M., Alobaidy A., Abdul-Jabbar J., Saeed S. Faults Diagnosis in Robot Systems: A Review. *Al-Rafidain Engineering Journal (AREJ)*. 2020;25:164–175.
13. Golombek R., Wrede S., Hanheide M., Heckmann M. Online data-driven fault detection for robotic systems. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2011. P. 3011–3016. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6095034>
14. Isermann R. Model-based fault-detection and diagnosis—Status and applications. *Ann. Rev. Contr.* 2005;29(1):71–85. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.12.002>
15. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2009;41(3):Article 15.
16. Xu S. A Survey of Knowledge-Based Intelligent Fault Diagnosis Techniques. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1187:032006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/3/032006>
17. Khalastchi E., Kalech M., Rokach L. Sensor fault detection and diagnosis for autonomous systems. In: *Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. 2013. P. 15–22. <https://doi.org/10.65109/RKJM1183>
18. Xu F., Liu X., Chen W., Zhou C., Cao B. Ontology-Based Method for Fault Diagnosis of Loaders. *Sensors*. 2018;18(3):729. <https://doi.org/10.3390/s18030729>
19. Alikhani A., Sharifi G. Application of a Model-Based Fault Detection Approach on a Spacecraft. *International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application (IJRRS)*. 2020;3(2):19–26.
20. Khalastchi E., Kalech M. On Fault Detection and Diagnosis in Robotic Systems. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2018;51(1):1–24. <https://doi.org/10.1145/3146389>
21. Quamar M., Nasir A. Review on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Scheme for Robotic Manipulators: Recent Advances in AI, Machine Learning, and Digital Twin. *arXiv preprint. arXiv:2402.02980*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.02980>
22. Brandstötter M., Hofbaur M., Steinbauer-Wagner G., Wotawa F. Model-based fault diagnosis and reconfiguration of robot drives. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2007. P. 1203–1209. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399092>
23. Pettersson O. Execution monitoring in robotics: A survey. *Robot. Auton. Syst.* 2005;53(2):73–88. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2005.09.004>
24. Aguiar A.P. Multiple-model adaptive estimators: Open problems and future directions. In: *Proceedings of ECC'07 – European Control Conference*. IEEE. 2007. P. 5544–5545. <https://doi.org/10.23919/ECC.2007.7069028>
25. Lao L., Ellis M., Christofides P.D. Proactive fault-tolerant model predictive control. *AIChE J.* 2013;59(8):2810–2820. <https://doi.org/10.1002/aic.14074>
26. Yao J., Wang D., Cai D., Xu Y., Zhao Y. Fault-tolerant strategy and experimental study on compliance assembly of a redundant parallel six-component force sensor. *Sens. Actuators A: Phys.* 2018;272:114–124. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.12.036>
27. Du Pu, Venkidasalapathy J.A., Venkateswaran S., Wilhite B., Kravaris C. Model-Based Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control for Safety-Critical Chemical Reactors: A Case Study of an Exothermic Continuous Stirred-Tank Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2023;62(34):13554–13571. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01205>

28. Mogal S., Lalwani D. A brief review on fault diagnosis of rotating machineries. *Appl. Mech. Mater.* 2014;541-542:635–640. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.541-542.635>
29. Li S., Xin Y., Li X., Wang J., Xu K. A review on the signal processing methods of rotating machinery fault diagnosis. In: *Proceedings IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. IEEE. 2019. P. 1559–1565. <https://doi.org/10.1109/ITAIC.2019.8785572>
30. Niu G., Dong X., Chen Y. Motor Fault Diagnostics Based on Current Signatures: A Review. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2023;72:Article 3520919.
31. Niu G. Data Acquisition and Preprocessing. In: *Data-Driven Technology for Engineering Systems Health Management: Design Approach, Feature Construction, Fault Diagnosis, Prognosis, Fusion and Decisions*. Singapore: Springer; 2017. P. 49–99. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2032-2_4
32. Islam A., Amin R., Sharan M.H., Ushno J.A., Islam K.M.T., Hossen D., Hossain M.S., Alam M.S. Designing an autonomous framework to detect and classify the fabric defects using wavelet transform and neural network. *AIP Conf. Proc.* 2023;2788:050003. <https://doi.org/10.1063/5.0148618>
33. Bai Y., Cheng W., Wen W., Liu Y. Application of time-frequency analysis in rotating machinery fault diagnosis. *Shock and Vibration*. 2023;2023:Article 9878228. <https://doi.org/10.1155/2023/9878228>
34. Surucu O., Gadsden S., Yawney J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. *Expert Syst. Applicat.* 2023;221:19738. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119738>
35. Manzoor S., Rocha Y.G., Joo S.H., Bae S.H., Kim E.J., Joo K.J., Kuc T.Y. Ontology-Based Knowledge Representation in Robotic Systems: A Survey Oriented toward Applications. *Appl. Sci.* 2021;11(10):4324. <https://doi.org/10.3390/APP11104324>
36. Diab M., Pomarlan M., Borgo S., et al. FailRecOnt – An ontology-based framework for failure interpretation and recovery in planning and execution. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Ontologies for Autonomous Robotics*. 2021. P. 1–14. URL: <https://hdl.handle.net/2117/357471>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.
37. Yan B., Zhang T., Xie C. Fuzzy expert system for fault diagnosis of robotic assembly. In: *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation*. IEEE. 2002. P. 445–449. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2002.1022148>
38. De la Sen M., Minambres J.J., Garrido A.J., Almansa A., Soto J.S., Basic theoretical results for expert systems: application to the supervision of adaptation transients in planar robots. *Artif. Intell.* 2004;152(2):173–211. [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(03\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(03)00136-X)
39. Lamine K.B., Kabanza F. History checking of temporal fuzzy logic formulas for monitoring behavior-based mobile robots. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. IEEE. 2000. P. 312–319. <https://doi.org/10.1109/TAI.2000.889888>
40. Lamine K.B., Kabanza F. Using temporal fuzzy logic for monitoring behavior based mobile robots. In: *Proceedings of the IASTED Conference in Robotics and Applications*. 2000. P. 116–121.
41. Gao D., Wu Ch., Zhang B., Ma X. Signed Directed Graph and Qualitative Trend Analysis Based Fault. *Chinese J. Chem. Eng.* 2010;18(2):265–276. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(08\)60352-3](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(08)60352-3)
42. Берман А.Ф., Павлов Н.Ю., Николайчук О.А. Метод синтеза и анализа деревьев отказов на основе понятий механизма и кинетики событий. *Проблемы анализа риска*. 2018;15(3):62–77. <https://www.elibrary.ru/xwpijif>
[Berman A.F., Pavlov N.Yu., Nikolaichuk O.A. Method for synthesis and analysis of “failure trees” based on the concepts of mechanism and events kinetics. *Problemy analiza riska = Issues of Risk Analysis*. 2018;15(3):62–77 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/xwpijif>]
43. Byun S., Papaalias M., Márquez F.P.G., Lee D. Fault-Tree-Analysis-Based Health Monitoring for Autonomous Underwater Vehicle. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022;10(12):1855. <https://doi.org/10.3390/jmse10121855>
44. Bai B., Xie C., Liu X., Li W., Zhong W. Application of integrated factor evaluation–analytic hierarchy process–T-S fuzzy fault tree analysis in reliability allocation of industrial robot systems. *Appl. Soft Comp.* 2022;115:108248. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108248>
45. Manzoor S., Rocha Y.G., Joo S.H., Bae S.H., Kim E.J., Joo K.J., Kuc T.Y. Ontology-Based Knowledge Representation in Robotic Systems: A Survey Oriented toward Applications. *Appl. Sci.* 2021;11(10):4324. <https://doi.org/10.3390/app11104324>
46. Olivares-Alarcos A., Bessler D., Khamis A., et al. A review and comparison of ontology-based approaches to robot autonomy. *The Knowledge Engineering Review*. 2019;34:e29. <https://doi.org/10.1017/S0269888919000237>
47. Грибова В.В., Шалфеева Е.А. Онтология диагностики процессов. *Онтология проектирования*. 2019;4(34):449–461. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2019-9-4-449-461>
[Gribova V.V., Shalfeeva E.A. The Ontology of processes diagnosis. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*. 2019;4(34):449–461 (in Russ.). <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2019-9-4-449-461>]
48. Тимошенко А.А., Зуев А.В., Мурсалимов Э.Ш., Грибова В.В., Инзарцев А.В. Описание и диагностирование неисправностей в автономных необитаемых подводных аппаратах на основе онтологий. *Онтология проектирования*. 2022;3(45):310–324. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2022-12-3-310-324>
[Timoshenko A.A., Zuev A.V., Mursalimov E.S., Gribova V.V., Inzartsev A.V. Description and diagnosis of malfunctions in autonomous uninhabited underwater vehicles based on ontologies. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*. 2022;3(45):310–324 (in Russ.). <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2022-12-3-310-324>]
49. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993;5(2):199–220. <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
50. Xu Y., Zhang S., Li Y., Liu J. Ontology-based Fault Diagnosis and Maintenance Process Generation of Electromechanical System. *Int. J. Performability Eng.* 2019;15(2):454–463. <https://doi.org/10.23940/ijpe.19.02.p10.454463>

51. Taye M. Understanding Semantic Web and Ontologies: Theory and Applications. *J. Computing*. 2010;2(6):182–192.
52. Su X.M., Ilebrikke L. A Comparative Study of Ontology Languages and Tools. In: Pidduck A.B., Ozsu M.T., Mylopoulos J., Woo C.C. (Eds.). *Advanced Information Systems Engineering (CAISE)*. 2002. P. 761–765. https://doi.org/10.1007/3-540-47961-9_62
53. Haarslev V., Moller R. Racer: A Core Inference Engine for the Semantic Web. In: *Proceedings of the 2nd International Semantic Web Conference (ISWC2003)*. 2003. P. 292–297.
54. Sirin E., Parsia B., Grau B.C., et al. Pellet: A Practical OWL-DL Reasoner. *J. Web Semantics*. 2007;5(2):51–53. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2007.03.004>
55. Tsarkov D., Horrocks I. FaCT++ Description Logic Reasoner: System Description. In: *Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Automated Reasoning*. 2006. P. 292–297. https://doi.org/10.1007/11814771_26
56. Tsarkov D., Riazanov A., Bechhofer S., Horrocks I. Using Vampire to Reason with OWL. In: *Proceedings of the 3rd International Semantic Web Conference (ISWC2004)*. 2004. P. 471–485. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30475-3_33
57. Abburi S. A Survey on Ontology Reasoners and Comparison. *Int. J. Computer Applications*. 2012;57(17):33–39. URL: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume57/number17/9208-3748/>. Дата обращения 19.07.2025. / Accessed July 19, 2025.
58. Rubin D.L., Noy N.F., Musen M.A., Protégé: A Tool for Managing and using Terminology in Radiology Applications. *J. Digit. Imaging*. 2007;20(1):34–46. <https://doi.org/10.1007/s10278-007-9065-0>
59. Shen B., Zhao S.Y., Wang J.H. Ontology-Based Fault Diagnosis Knowledge Representation of CNC Machine Tool. *Appl. Mech. Mater.* 2013;427–429:1372–1375. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.427-429.1372>
60. Wang D., Tang W.H., Wu Q.H. Ontology-based fault diagnosis for power transformers. In: *IEEE PES General Meeting*. IEEE. 2010. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589575>
61. Dogmus Z., Erdem E., Patoglu V. RehabRobo-Onto: Design, development and maintenance of a rehabilitation robotics ontology on the cloud. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2015;33:100–109. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.010>
62. Соколов С.М. Онтологический подход в создании робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2022;1(225):42–58. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-42-59> [Sokolov S.M. An ontological approach to the creation of robotic complexes with an increased degree of autonomy. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2022;1(225):42–58 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-1-42-59>]
63. Лебедев С.В., Пантелеев М.Г. Онтологическое проектирование подсистемы оценки обстановки интеллектуальных агентов. *Онтология проектирования*. 2016;3(21):297–316. [Lebedev S.L., Panteleyev M.G. Ontology-driven design approach to development of situation awareness subsystem of intelligent agents. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*. 2016;3(21):297–316 (in Russ.).]
64. Bayat B., Bermejo-Alonso J., Carbonera J., et al. Requirements for building an ontology for autonomous robots. *Industrial Robot*. 2016;43(5):469–480. <https://doi.org/10.1108/IR-02-2016-0059>
65. Sirin E., Parsia B., Grau B., Kalyanpur A., Katz Y. Pellet: a practical OWL-DL reasoner. *J. Web Semantics*. 2007;5(2):51–53. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2007.03.004>
66. Alaya N., Ben Yahia S., Lamolle M. Towards Unveiling the Ontology Key Features Altering Reasoner Performances. *arXiv preprint*. arXiv:1509.087172015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.08717>

Об авторах

Быковцев Юрий Алексеевич, к.т.н., доцент, кафедра проблем управления, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bykovcev@mirea.ru. Scopus Author ID 57302607300, ResearcherID KRQ-5339-2024, SPIN-код РИНЦ 9961-4437, <https://orcid.org/0009-0003-6671-5674>

Лохин Валерий Михайлович, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат государственной премии РФ в области науки и техники. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Член научного Совета Российской академии наук по робототехнике и мехатронике. Заслуженный деятель науки РФ. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

Манько Сергей Викторович, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования. Член научного Совета Российской академии наук по робототехнике и мехатронике. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, SPIN-код РИНЦ 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

Романов Михаил Петрович, д.т.н., профессор, научный руководитель Института искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: m_romanov@mirea.ru. Scopus Author ID 14046079000, SPIN-код РИНЦ 5823-8795, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>

About the Authors

Yuri A. Bykovtsev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bykovtsev@mirea.ru. Scopus Author ID 57302607300, ResearcherID KRQ-5339-2024, RSCI SPIN-code 9961-4437, <https://orcid.org/0009-0003-6671-5674>

Valery M. Lokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the State Prize of the Russian Federation in the field of science and technology. Russian Federation State Prize Laureate in the field of education. Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on robotics and mechatronics. Honored Worker of Science of the Russian Federation. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

Sergey V. Manko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the State Prize of the Russian Federation in the field of science and technology. Russian Federation State Prize Laureate in the field of education. Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on robotics and mechatronics. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, RSCI SPIN-code 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

Mikhail P. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Supervisor of the Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454 Russia). E-mail: m_romanov@mirea.ru. Scopus Author ID 14046079000, RSCI SPIN-code 5823-8795, <https://orcid.org/0000-0003-3353-9945>