

УДК 004.853

Научная статья

 <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2026-28-3-11-22>

 EXNDXR

Концептуальные основы создания системы имитационного проектирования физико-химических характеристик робототехнических изделий

К. Ч. Бжихатлов, И. А. Пшенокова✉

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

Аннотация. В статье рассматривается проблема разработки комплексной системы имитационного моделирования физико-химических свойств для проектирования робототехнических систем.

Цель исследования – разработка модульной многомодальной системы моделирования физико-химических свойств для интеллектуальной коллаборативной системы проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники с возможностью настройки требуемой точности и вычислительной сложности моделирования.

Методы исследования. В качестве основных методов исследования применяются мультиагентные системы и имитационное моделирование. Предложена концепция использования интеллектуальных программных агентов для моделирования физико-химических свойств, основанная на нейрокогнитивных архитектурах.

Результаты. В работе представлен комплексный подход к проектированию изделий робототехники, основанный на совместной работе человеко-машинного коллектива. Разработана архитектура системы, состоящая из трех основных групп модулей: моделирование свойств, поведения и визуализация. Особое внимание уделяется созданию подсистемы моделирования физико-химических процессов, реализованной в виде серверной архитектуры с возможностью обмена данными между различными модальностями. Для обмена информацией между отдельными подпрограммами вводятся «узлы обмена сообщениями», являющиеся отдельными открытыми каналами обмена сообщениями с возможностью подключения редактора мультиагентных архитектур, пользователя и системы управления базами данных.

Заключение. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента, позволяющего обеспечить комплексное моделирование физических, химических и информационных процессов при проектировании роботов. Применение модульной многомодальной системы моделирования физических взаимодействий, химических процессов и информационных потоков данных с возможностью обмена данными между модальностями позволит обеспечить достаточную полноту модели и гибкость в настройке САПР с целью подбора требуемой точности и вычислительной сложности процесса моделирования. Использование интеллектуальных систем прогнозирования физико-химических свойств объектов может обеспечить процесс разработки без необходимости самостоятельного описания всех возможных физических процессов, связанных с эксплуатацией разрабатываемого узла робота.

Ключевые слова: мультиагентные системы, искусственный интеллект, САПР, робототехника, моделирование физических процессов, цифровое проектирование

Поступила 14.04.2026, одобрена после рецензирования 13.05.2026, принята к публикации 11.06.2026

Для цитирования. Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А. Концептуальные основы создания системы имитационного проектирования физико-химических характеристик робототехнических изделий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 3. С. 11–22. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-11-22

© Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А., 2026



Контент доступен под лицензией [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Conceptual foundations for simulating the physical and chemical properties in robotic systems design

K.Ch. Bzhikhatlov, I.A. Pshenokova✉

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia

Abstract. This article addresses the problem of developing a comprehensive system for simulating physical and chemical properties in the design of robotic systems.

Aim. To develop a modular, multimodal physical and chemical property modeling system integrated into an intelligent collaborative platform for designing and prototyping robotic devices, featuring configurable simulation accuracy and computational complexity.

Methods. The research utilizes multi-agent systems and simulation modeling as its primary methodological framework. A concept of neurocognitive architecture-based intelligent software agents is proposed for modeling physical and chemical properties.

Results. The paper presents an integrated approach to robotic systems design based on human-machine teaming. A system architecture has been developed, which includes three main module groups for property modeling, behavior, and visualization. Particular attention is paid to developing the physical and chemical process modeling subsystem, implemented as a server-based architecture with cross-modality data sharing capabilities. To exchange information between individual subroutines, "messaging nodes" are introduced, representing separate open communication channels capable of connecting a multi-agent architecture editor, a user, and a database management system.

Conclusion. The practical significance of this work is the development of a versatile tool for the comprehensive simulation of physical, chemical, and information processes in robotic systems design. Utilizing a modular, multimodal system for physical, chemical, and informational workflows ensures comprehensive model fidelity and CAD flexibility, allowing users to balance accuracy against computational complexity. Intelligent prediction of physical and chemical properties simplifies robotic design by removing the requirement to manually define every physical process involved in the system's operation.

Keywords: multi-agent systems, artificial intelligence, CAD, robotics, modeling of physical processes, digital design

Submitted 14.04.2026,

approved after reviewing 13.05.2026,

accepted for publication 11.06.2026

For citation. Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A. Conceptual foundations for simulating the physical and chemical properties in robotic systems design. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 3. Pp. 11–22. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-3-11-22

ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования любых сложных технических изделий, в том числе узлов для робототехники, является сложной задачей, которая охватывает анализ требований, предварительное проектирование, детальное 3D-моделирование, симуляцию и тестирование, и требует использования комплекса специализированного программного обеспечения, в том числе и систем автоматизированного проектирования (САПР). В условиях перехода к принципам «Индустрии 5.0» [1], где робот рассматривается как интегрированный элемент гибкой производственной системы, традиционные подходы к автоматизированному проектированию сталкиваются с новыми вызовами. В условиях усложнения конструкций и

расширения сфер применения роботов критически важно на этапе проектирования прогнозировать поведение материалов и узлов в реальных эксплуатационных режимах. Существующие системы фокусируются на отдельных аспектах: геометрическом моделировании (CAD), инженерном анализе (CAE) или технологической подготовке производства (CAM), что увеличивает длительность цикла разработки. При этом высокий уровень сложности разработки приводит к необходимости работы в гетерогенных коллективах, состоящих из различных специалистов и системы искусственного интеллекта.

Существует несколько подходов к представлению геометрических моделей в системах проектирования (точечная, каркасная, граничная, конструктивная и воксельная модели), среди которых наибольшее распространение получила граничная модель (она же Boundary REPresentation) [2].

В работе [3] представлен интегрированный метод проектирования и моделирования мехатронных систем, способный осуществлять полную синхронизацию и верификацию моделей, генерацию геометрических решений и визуальное представление. Методология базируется на системной интеграции имитационного и геометрического моделирования с использованием стандарта SysML (Systems Modeling Language) как унифицированной платформы представления знаний. Разработанный фреймворк позволяет осуществлять извлечение системных данных через формализованные картографические правила (mapping rules), генерацию промежуточных моделей для сравнительного анализа проектных альтернатив и имитационного моделирования, что позволяет параллельно выполнять процесс проектирования по верификациям симуляции с частью проектирования архитектуры системы.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является обеспечение сквозной прослеживаемости проектных решений на всех этапах жизненного цикла разработки мехатронной системы из-за единой модель-ориентированной среды проектирования. Однако есть проблемы интеграции SysML-моделей с CAD/CAE-системами (AutoCAD, ANSYS, SolidWorks) из-за различия в форматах данных и семантике.

Вопрос об использовании имитационного моделирования при исследовании сложных биофизических систем с использованием нейронных сетей исследуется в работе [4]. Авторами проведен аналитический обзор нейросетевых подходов к имитационному моделированию экспериментальных данных при исследовании сложных биомолекулярных систем методами флуоресцентной спектроскопии. В [5] дается описание создания систем поддержки принятия решений при проектировании химико-технологических систем на этапе их аппаратного оформления. Каждая стадия аппаратного оформления осуществляется с использованием информационной модели, позволяющей преобразовать входной информационный поток в выходной.

В работе Массачусетского технологического института [6] представлена модель интуитивной физики ADEPT («Approximate Derenderer, Extended Physics, and Tracking»), где восприятие физической реальности разделено на несколько этапов: извлечение кадров, сбор информации, симуляция поведения системы в физическом 3D-движке, анализ поведения и сравнение с эталонным. Результаты тестирования показали, что ADEPT превосходит стандартные сетевые архитектуры в распознавании физически неправдоподобных сцен и часто выполняет это различие на том же уровне, что и человек.

Одним из перспективных направлений, стремительно развивающихся в последние годы, является генеративное проектирование [7]. Этот подход представляет собой автоматизированный процесс проектирования, основанный на алгоритмах оптимизации, которые стремятся удовлетворить множеству критериев и ограничений, поставленных пользователем, с целью

минимизации либо максимизации определенной целевой функции (такой как масса, себестоимость, максимальный сдвиг, коэффициент запаса прочности). Генеративное проектирование реализуется на предгенеративном, генеративном и послегенеративном этапах. Ключевым преимуществом генеративного проектирования является способность автоматически формировать и сравнивать множество конфигураций конструкции, выбирая оптимальный вариант с наименьшей массой, максимальной экономичностью производства и высокими показателями прочности. Однако внедрение генеративного проектирования сопряжено с необходимостью мощного вычислительного ресурса и специализированных пакетов программного обеспечения, таких как ANSYS и Autodesk Fusion 360. Эффективность такого подхода иллюстрируется рядом успешных практических экспериментов. Так, в работе [8] проведено сравнение традиционных рам квадрокоптеров с результатами генеративного проектирования, продемонстрировавшими улучшение показателей устойчивости и снижение общего веса. Аналогичные успехи зафиксированы в исследованиях роботизированных рук [9–12].

Кроме ANSYS, для имитационного моделирования физико-химических процессов в робототехнике используются программные пакеты: COMSOL Multiphysics, MATLAB/Simulink и Gazebo [13, 14]. Однако выбор инструмента зависит от решаемой задачи. COMSOL подходит для мультифизического моделирования, Simulink – для моделирования динамических систем и автоматического управления, а Gazebo – для симуляции роботов и их взаимодействия с окружением. Так, в работах [15, 16] COMSOL Multiphysics использовался для моделирования молниеносного импульса, приложенного к носу, крыльям и фюзеляжу беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Также в работах [17–19] для управления движением роботов, которое включает в себя аппаратные и программные системы различного назначения, используется MATLAB/Simulink – среда графического программирования, предназначенная для моделирования, симуляции и анализа динамических систем. В работах [20–23] для симуляции и тестирования алгоритмов управления и навигации автономных и коллективов роботов используется Gazebo – симулятор с поддержкой 3D-визуализации, реалистичной физики и интеграцией с операционной системой для роботов ROS (Robot Operating System).

Однако представленные выше системы проектирования имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение в сложных задачах. Основные недостатки существующих систем (CAD/CAE) при проектировании физико-химических свойств узлов роботов сводятся к отсутствию межпакетной и междисциплинарной интеграции. Для комплексного анализа часто приходится комбинировать несколько программных пакетов (CAD, CAE, PLM), что усложняет рабочий процесс, повышает риск ошибок и требует дополнительной настройки. Кроме того, большинство систем фокусируются на форме (CAD), а химический состав и микроструктура материала часто задаются как «усредненные» константы из библиотек. Сложно точно предсказать, как химическая деградация (коррозия, окисление, воздействие радиации) изменит механическую прочность узла в динамике.

При моделировании сложных трехмерных систем или мультифизических процессов расчеты требуют значительных вычислительных мощностей, что увеличивает время разработки и затраты на оборудование. Для снижения вычислительной нагрузки системы используют упрощенные физические модели (дискретизация пространства, аппроксимация свойств материалов), что может приводить к потере точности результатов, что затрудняет оценку надежности и границ применимости модели. Многие из проблем постепенно устраняются за счет развития алгоритмов, облачных вычислений и интеграции ИИ, но на текущий момент они остаются актуальными для большинства инженерных задач.

Целью исследования является разработка модульной многомодальной системы моделирования физико-химических свойств для интеллектуальной коллаборативной системы проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники с возможностью настройки требуемой точности и вычислительной сложности моделирования.

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Рассматриваемая в работе система моделирования физико-химических свойств является частью разрабатываемой интеллектуальной коллаборативной системы проектирования и прототипирования изделий и устройств робототехники и описанной в [24]. Подобная система предполагает комплексный подход к проектированию и прототипированию изделий робототехники с использованием совместной работы гетерогенного человеко-машинного коллектива. Подсистема моделирования должна обеспечивать комплексное моделирование различных процессов, необходимое для построения наиболее полного «цифрового двойника» разрабатываемого робота.

Подсистема состоит из набора модулей, которые можно разделить на три группы: моделирование свойств, поведения и визуализация. Под моделированием свойств понимается математическое или имитационное моделирование свойств объекта, связанных с определенной модальностью (например, теплопередача конструктивных элементов робота). Моделирование поведения зависит от внешних сигналов (команд оператора или интеллектуальной системы управления) и связанных с ними изменений состояния (например, была включена система охлаждения). Результат работы этих двух модулей передается на модуль визуализации и выгрузки данных. Общая структура подобной многомодальной системы моделирования приведена на рис. 1.

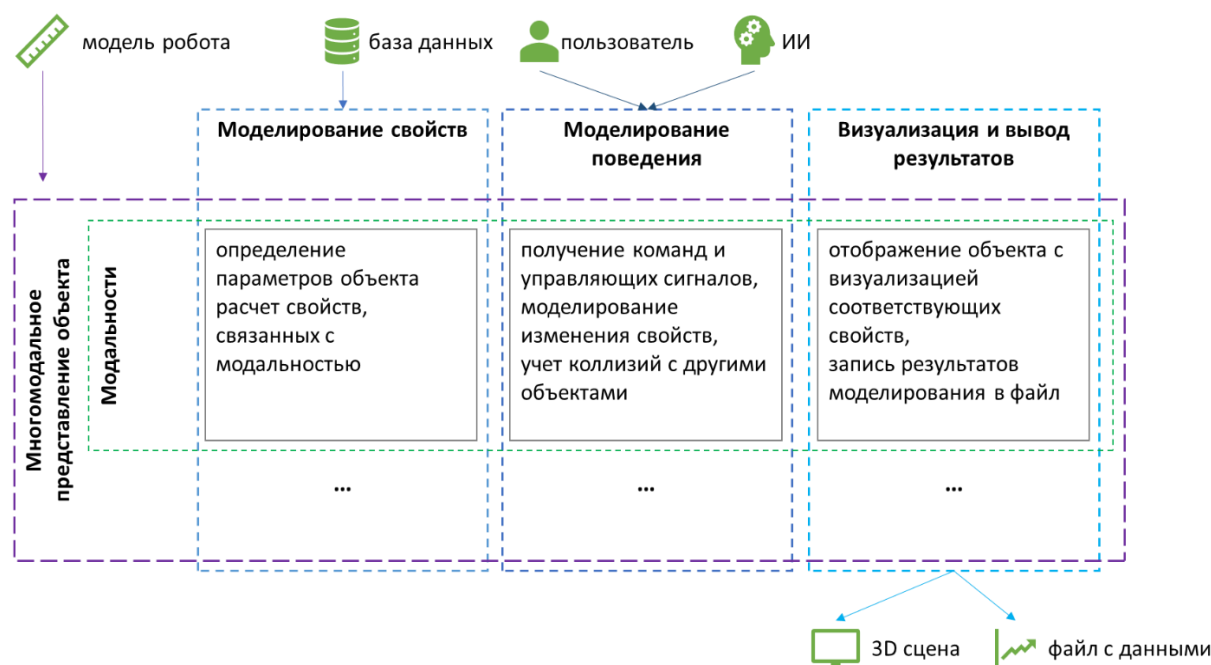


Рис. 1. Структура многомодальной системы моделирования физико-химических свойств моделируемых объектов

Fig. 1. Structure of the multimodal system for physical and chemical property modeling

При этом для каждой модальности должен быть реализован модуль моделирования свойств, через который загружаются необходимые данные о модели из общей базы данных и рассчитываются соответствующие характеристики модели. Модальности могут влиять друг на друга (за счет обмена данными). К модальностям можно отнести:

- моделирование кинематики;
- теплопередача;
- деформация конструкции;
- воздействие среды;
- износ и стирание;
- химическое взаимодействие узлов.

В программе подобная система реализована в виде отдельных подпрограмм, осуществляющих передачу данных друг другу. Например, моделирование механики и теплопередачи определенного узла представляет собой набор подпрограмм моделирования управляющего сигнала, построения объемной модели, моделей поверхности и запуска системы визуализации. Подобная структура при моделировании отдельного узла робота показана на рис. 2. Объемная модель отвечает за моделирование перемещения объекта, расчета деформации и учета процессов теплопереноса. Модели поверхности участвуют в расчете коллизий и учете трения (для внесения корректив в перемещение узла и для учета выделения тепла). Все полученные данные, а также информация о внешнем виде узла используются при визуализации объекта.



Рис. 2. Пример структуры модальностей при моделировании отдельного узла робота

Fig. 2. Example of the modality structure for modeling an individual robotic unit

Подсистема моделирования физико-химических процессов реализована в виде сервера, на котором развернут набор модулей, отвечающих за разные модальности (рис. 3). Для обмена информацией между отдельными подпрограммами вводятся «узлы обмена сообще-

ниями», представляющие собой отдельные открытые каналы обмена сообщениями с возможностью подключения различных подпрограмм (по аналогии с topic в операционной системе ROS2 [25]). При этом допустимые структуры сообщений определяются узлом. Эти узлы обеспечивают обмен сообщений, связанных с определенными модальностями (или группами модальностей) для обмена информацией между программой-редактором, внешними программными агентами и внутренними подпрограммами на сервере. В качестве подпрограмм могут выступать как обычные системы компьютерного моделирования различных физических процессов, так и системы прогнозирования поведения на основе искусственного интеллекта, основанного на различных формализмах (например, нейронные сети, логические модели, эволюционные алгоритмы и мультиагентные нейрокогнитивные архитектуры). Все эти данные также собираются в общую модель («цифрового двойника») и сохраняются в базе данных сервера.

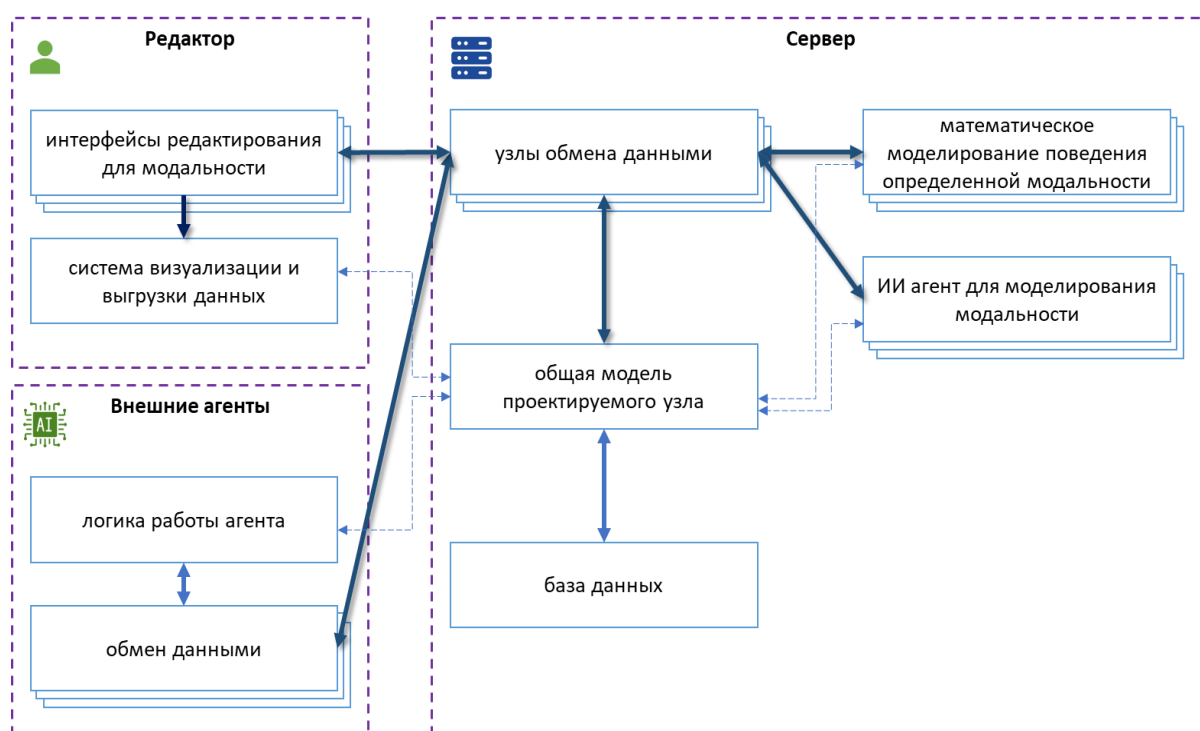


Рис. 3. Схема программной реализации подсистемы моделирования физико-химических процессов в интеллектуальной системе проектирования изделий и узлов робототехники

Fig. 3. Software architecture of the physicochemical process modeling subsystem within an intelligent robotic design environment

В свою очередь в программе редактирования для каждой из модальностей разработана своя часть интерфейса пользователя, которая позволяет вносить изменения в определенный аспект модели и обмениваться данными с сервером и системой визуализации. Похожим образом реализовано взаимодействие с внешними программными агентами (в том числе и агентами на основе ИИ). Стоит отметить, что клиент-серверная архитектура не ограничивает количество подключенных внешних пользователей (редакторов и агентов), а использование общих узлов обмена данными позволяет реализовать множество независимых подпрограмм моделирования поведения различных модальностей.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ И УСТРОЙСТВ

В программе проектирования, кроме отдельных подпрограмм, моделирующих отдельные аспекты разрабатываемого узла, предполагается использование интеллектуальных программных агентов моделирования физико-химических свойств на основе мультиагентных нейрокогнитивных архитектур [26]. Особенностью предложенного подхода является то, что структурная и функциональная организация программных агентов демонстрирует существенное сходство с принципами работы человеческого мозга.

Мультиагентная модель позволяет реализовать систему онтологизации внешней среды, которая будет автоматически заполняться информацией об объектах, их характеристиках и взаимодействии. Например, появление агента-объекта и агента-действия позволяет заключить между ними контракт (объект – что делает – действие), после чего эти два агента инициируют создание агента-события. При этом каждый агент имеет ряд возможных контрактов (валентностей), которые стремится заключить. В частности, это свойства объекта, признаки действия и события. Для события это чаще всего время и место фиксации, а также некоторая эмоциональная оценка, на базе которой строится дальнейший план реагирования. Свойства объектов и признаки действия могут заключать контракты с числительными, отвечающими за конкретное измерение признака (температуру объекта или скорость действия). Большая часть агентов создается после получения сигналов с соответствующих сенсоров. Общая структура мультиагентного представления объекта, действия и события приведена на рис. 4, а пример архитектуры для события «манипулятор переместился» показан на рис. 5.

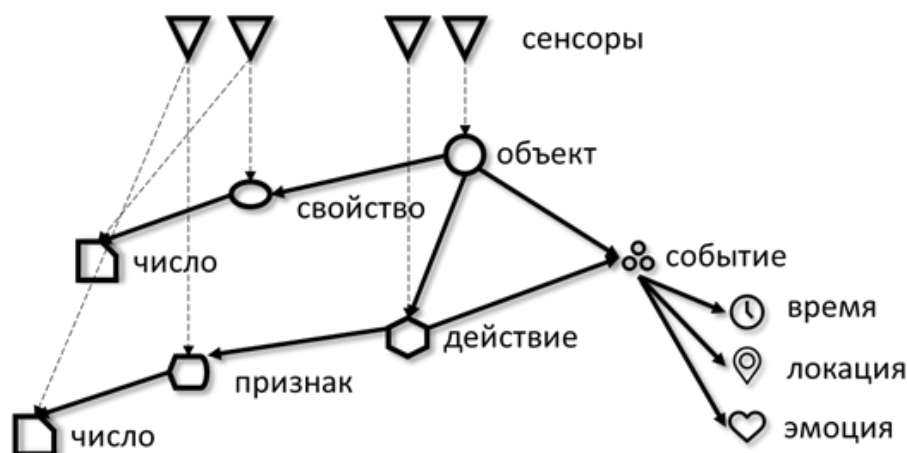


Рис. 4. Архитектура интеллектуального агента

Fig. 4. Intelligent agent architecture

В представленном примере сенсоры (например, камера) фиксируют наличие манипулятора и факт его перемещения. В результате создается агент-объект «манипулятор» и агент-действие «перемещается», которые заключают контракт на запрос «что делает?». Затем они вместе путем отправки сообщений создают агент-событие «манипулятор переместился», который уже в свою очередь заключает контракты с агентом-локацией (на запрос «где?») и агентом времени («когда?»). Параллельно с этим происходит процесс заполнения различных контрактов агента «манипулятор», связанных с его свойствами и присутствующими сенсорами. В частности, определяются цвет, масса, температура и текстура объекта. Подобным образом заполняются контракты между действием «перемещается» и его признаками, связанными с генерируемым звуком и скоростью действия.

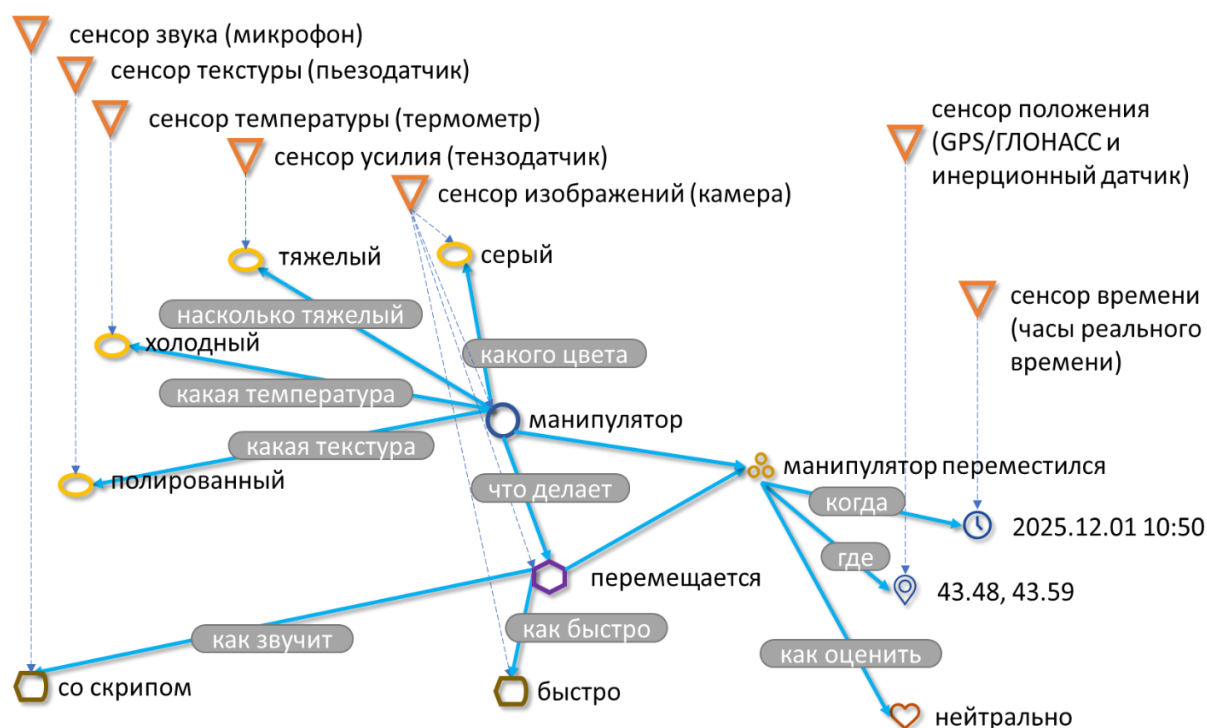


Рис. 5. Пример заполнения свойств и признаков для объекта «манипулятор» и действия «перемещается»

Fig. 5. Example of property and attribute definitions for the "manipulator" object and "moves" action

Заполнение такой онтологии является основой для дальнейшего построения мультиагентной модели внешнего мира. После фиксации множества событий в реальном мире мультиагентная модель может строить и группировать причинно-следственные связи между агентами-событиями («событие-почему-событие» и «событие-поэтому-событие»), что в дальнейшем позволит определять закономерности реального мира без необходимости явного описания математической модели процесса. То есть мультиагентная архитектура будет строить причинно-следственные связи на базе опыта, оценивая сначала конкретные ситуации («тяжелый манипулятор упал-поэтому-корпус из пластика деформировался») и затем переходя к обобщению («тяжелый узел упал с высоты более 100 см-поэтому-детали из пластика толщиной менее 10 мм погнулись»). Это позволит реализовать интеллектуальную систему моделирования различных физико-химических процессов, используя сбор данных интеллектуальными агентами, наблюдающими за процессом сборки и работы автономных роботов, и в будущем позволит снизить вычислительную нагрузку и обойтись без ручной разметки данных. На данном этапе ведется разработка базовых архитектур, моделирующих работу основных функциональных систем человеческого мозга.

Стоит отметить, что обучение подобной системы интеллектуального моделирования физико-химических процессов не требует разметки значительного объема данных в обучающей выборке, но при этом не исключает необходимости обеспечения сбора данных из широкого спектра источников. В частности, наиболее логичной будет реализация федеративной системы обучения с использованием сбора информации из всех доступных сенсоров (камеры роботов, сенсорные подсистемы промышленных предприятий).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка комплексной системы моделирования для коллаборативного интеллектуального САПР является необходимым элементом для развития инструментов проектирования современных изделий робототехники. В рамках исследования предложена концепция модульной многомодальной системы моделирования физических, химических и информационных процессов при проектировании роботов с возможностью обмена данными между модальностями. Такая архитектура призвана обеспечить достаточную полноту модели и гибкость настройки САПР, позволяя подбирать требуемую точность и вычислительную сложность процесса моделирования в зависимости от задачи.

На следующем этапе планируется экспериментальная апробация предложенной системы, в частности, тестирование точности моделирования на тестовых моделях робототехнических узлов и оценка вычислительной эффективности и масштабируемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Emiliani F., Bajrami A., Costa D.M. et. al. Design and prototyping of a collaborative station for machine parts assembly. *Machines*. 2024. Vol. 8. P. 572. DOI: 10.3390/machines12080572
2. Конопацкий Е. В., Ротков С. И., Лагунова М. В., Безсольников М. В. Подход к твёрдотельному моделированию геометрических объектов в точечном исчислении // *Онтология проектирования*. 2025. Т. 15. № 1(55). С. 24–33. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33
- Konopatsky E.V., Rotkov S.I., Lagunova M.V., Bezsolnov M.V. An approach to solid-state modeling of geometric objects in point calculus. *Ontology of Designing*. 2025. Vol. 15. No.1(55). Pp. 24–33. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-1-24-33. (In Russian)
3. Chu Ch., Zhang Ch., Yin Ch. Synchronous integration method of mechatronic system design, geometric design, and simulation based on SysML. *Computer-Aided Design*. 2024. Vol. 174. P. 103735. DOI: 10.1016/j.cad.2024.103735
4. Yatskou M.M., Apanasovich V.V. Simulation modelling and data mining approach for the study of applied fluorescence spectroscopy systems. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024. Vol. 1. Pp. 4–15.
5. Мокрозуб В. Г., Альсаиди А. А. М. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника // *Онтология проектирования*. 2024. Т. 14. № 4(54). С. 595–606. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606
- Mokrozub V.G., Alsaidi A.A.M. Decision support system for selecting the type of shell-and-tube heat exchanger. *Ontology of Designing*. 2024. Vol. 14. No. 4(54). Pp. 595–606. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. (In Russian)
6. Smith K., Mei L., Yao S. et. al. Modeling expectation violation in intuitive physics with coarse probabilistic object representations. *Advances in Neural Information Processing systems*. 2019. Vol. 32. Pp. 14931–14942.
7. Gowtham V.K., Sidharth B.S., Schilberg D., Doss A.S.A. Optimization of a robotic arm using generative design. In: Rajkumar K., Jayamani E., Ramkumar P. (eds) *Recent Advances in Materials Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-3895-5_28
8. Jerrin Bright R., Suryaprakash S.A., Giridharan A. Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1012(1):012019. DOI: 10.1088/1757-899X/1012/1/012019
9. Hsiao J.C., Shivam K., Chou C.L., Kam T.Y. Shape design optimization of a robot arm using a surrogate-based evolutionary approach. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No 7. P. 2223. DOI: 10.3390/app10072223

10. Kumaran M., Senthilkumar V. Generative design and topology optimization of analysis and repair work of industrial robot arm manufactured using additive manufacturing technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1012. No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1012/1/012036

11. Santosh, Lingala Purandhara Sai et al. Design and analysis of a robotic arm under different loading conditions using FEA simulation. *Materials Today: Proceedings* 50 (2022): 759–765. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.457

12. Li H., Li Y. Finite element analysis and structural optimization design of multifunctional robotic arm for garbage truck. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 11. P. 1543967. DOI: 10.3389/fmech.2025.1543967

13. Миронов Д. А., Ламм А. К., Расулов Р. К. Обзор программных продуктов разработки цифровых двойников // Вестник Национального института бизнеса. 2022. № 4(48). С. 12–27. EDN: QQNQEE

Mironov D.A., Lamm A.K., Rasulov R.K. Review of software products for developing digital twins. *Bulletin of the National Institute of Business*. 2022. No. 4(48). Pp. 12–27. EDN: QQNQEE. (In Russian)

14. Горбунова М. В. Сравнительный анализ инструментов виртуального прототипирования для задач робототехники // Лучшие студенческие статьи 2026: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. 2026. С. 21–25.

Gorbunova M.V. Comparative analysis of virtual prototyping tools for robotics tasks. *Best Student Papers 2026: Collection of Papers of the International Research Competition*. 2026. Pp. 21–25. (In Russian)

15. Al Salameh M.S.H., Musa B.A.M. COMSOL solutions to EMI hardening of UAVs against lightning strikes. *IEEE. International Microwave and Antenna Symposium (IMAS)*, Cairo, Egypt. 2023. Pp. 215–218.

16. Zhang Z., Zhou Y., Zhang Y., Qian B. Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*. 2024. Vol. 13(2). P. 393. DOI: 10.3390/electronics13020393

17. Bairwa B., Gautham R.N., Himabindu N., Kushal T.A. Real-time control of servomotor using arduino and matlab. *International Conference on Advances. In Renewable Energy & Electric Vehicles (AREEV). IEEE*, 2025. Pp. 65–70.

18. Hristov V., De Amorim A. A ROS and MATLAB/Simulink framework for modeling and control of a robotic manipulator. *33rd National Conference with International Participation (TELECOM). IEEE*, 2025. Pp. 1–4.

19. Chotikunnan R., Roongprasert K., Chotikunnan P., Imura P. Robotic arm design and control using MATLAB/Simulink. *International Journal of Membrane Science and Technology*. 2023. Vol. 10(3). Pp. 2448–2459. DOI: 10.15379/ijmst.v10i3.1974

20. García J., Molina J.M. Simulation in real conditions of navigation and obstacle avoidance with PX4/Gazebo platform. *Pers Ubiquit Comput*. 2022. Vol. 26(2). Pp. 1171–1191. DOI: 10.1007/s00779-019-01356-4

21. Dsouza J.M., Rafikh R.M., Nair V.G. Autonomous navigation system for multi-quadrotor coordination and human detection in search and rescue. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2023. Vol. 35. No. 4. Pp. 1084–1091. DOI: 10.20965/jrm.2023.p.1084

22. Wan Y., Tang J., Zhao Z., Chen X. Distributed vision-only cooperative flight of multiple quadrotors in unknown cramped environments. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2025. Vol. 10. No. 7. Pp. 3902–3916.

23. Макаров М. И., Коргин Н. А., Пыжъянов А. А. Симуляторы беспилотного наземного транспорта, применяемые для моделирования движения по пересеченной местности // Проблемы управления. 2025. Т. 1. С. 3–15. EDN: TDVRXK

Makarov M.I., Korgin N.A., Pyzhyanov A.A. Unmanned vehicles: a survey of modern simulators. *Problems of Management*. 2025. Vol. 1. Pp. 3–15. EDN: TDVRXK. (In Russian)

24. Бжихатлов К. Ч., Пшенокова И. А. Коллективное проектирование и прототипирование робототехнических систем на основе нейрокогнитивного подхода // *Онтология проектирования*. 2025. Т. 15. № 4(58). С. 497–508. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508

Bzhikhatlov K.Ch., Pshenokova I.A. Collaborative design and prototyping of robotic systems based on a neurocognitive approach. *Ontology of Designing*. 2025. Vol. 15. No. 4. Pp. 497–508. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-4-497-508. (In Russian)

25. Macenski S., Foote T., Gerkey B. et al. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*. 2022. Vol. 7. No. 66. DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074

26. Нагоев З. В. Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 211 с.

Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intelligence or thinking in living and artificial systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 211 p. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Бжихатлов Кантемир Чамалович, канд. физ.-мат. наук, директор Института информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-код: 9551-5494

Пшенокова Инна Ауюсовна, канд. физ.-мат. наук, зав. отд. «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-код: 3535-2963

Information about the authors

Kantemir Ch. Bzhikhatlov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

haosit13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0924-0193>, SPIN-code: 9551-5494

Inna A. Pshenokova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department Multi-Agent Systems, Institute of Computer Science and Problems of Regional Management – branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

37-a, I. Armand street, Nalchik, 360000, Russia;

pshenokova_inna@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3394-7682>, SPIN-code: 3535-2963