



Научная статья

УДК 53.087.92

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187453>

EDN: <https://www.elibrary.ru/FRTTEI>

**ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АРХИТЕКТУРЫ КОГНИТИВНОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ**

А.С. Сомов  

Сколковский институт науки и технологий,

г. Москва, Россия

 a.somov@skoltech.ru

Цитирование: Сомов А.С. Информационное, математическое и алгоритмическое обеспечение архитектуры когнитивного интернета вещей для информационно-измерительных и управляющих систем// Труды МАИ. 2026. № 146.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187453>

Аннотация. В статье анализируются практические аспекты создания прототипа архитектуры когнитивного интернета вещей для создания средств автоматизации интеллектуального мониторинга природной среды. Предложен ряд информационных технологий для реализации трех уровней архитектуры: сервисного уровня, уровня виртуальных составных объектов и уровня виртуальных объектов. Продемонстрирована математическая модель выполнения сервисного запроса путем поиска и подбора виртуальных составных объектов и соответствующих виртуальных объектов, которые создаются из объектов реального мира. Для предоставления последовательности действий выполнения сервисного запроса приведены алгоритм начальной загрузки архитектуры когнитивного интернета вещей и алгоритм запуска виртуальных составных объектов. Приведена оценка времени реализации сервисного запроса и времени создания виртуальных составных объектов на базе доступных виртуальных объектов. Разработанная архитектура когнитивного интернета

вещей была применена на беспилотном летательном аппарате для аэромониторинга борщевика Сосновского.

Ключевые слова: алгоритмы, аэромониторинг, БПЛА, дрон, интернет вещей, информационно-измерительные системы, интеллектуальные системы, искусственный интеллект, математическая модель, набор датчиков, программное обеспечение

INFORMATION, MATHEMATICAL, AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR THE ARCHITECTURE OF THE COGNITIVE INTERNET OF THINGS FOR INFORMATION, MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS

A.S. Somov 

Skolkovo Institute of Science and Technology,
Moscow, Russia

 a.somov@skoltech.ru

Citation: Somov A.S. Information, mathematical, and algorithmic support for the architecture of the cognitive internet of things for information, measurement, and control systems // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187453>

Abstract. The article performs the analysis of the practical aspects for creating a prototype of architecture for the cognitive internet of things to create automation tools for intelligent monitoring of the natural environment. A number of information technologies are proposed for the implementation of three levels of architecture: the service level, the level of virtual composite objects and the level of virtual objects. A mathematical model of fulfilling a service request is demonstrated by searching and selecting virtual composite objects and corresponding virtual objects, which are created from real-world objects. To provide a sequence of actions for executing a service request, an algorithm for bootstrapping the cognitive internet of things architecture and an algorithm for launching the virtual composite objects are shown. Timing analysis for addressing the service request and creating virtual composite objects given the number of available virtual objects is provided. The developed architecture of the cognitive internet of things was applied on an unmanned aerial vehicle for aeromonitoring of the Sosnovsky hogweed.

Keywords: algorithms, aerial monitoring, UAV, drone, Internet of Things (IoT), information and measurement systems, intelligent systems, artificial intelligence, mathematical model, sensor suite, software system

Введение

Концепция Интернета вещей (КИВ) впервые была предложена исследователем Кевином Эштоном в 1999 году [1]. В частности, ученый предлагал обогатить компьютеры большим количеством собираемых данных от RFID (англ. Radio Frequency Identification – радиочастотная идентификация) меток и «умных» датчиков [2], чтобы делать более точные выводы при анализе собранных данных [3], используя математические методы.

С тех пор в мире появились миллиарды «вещей» в виде датчиков, измерительных приборов, мобильных беспроводных устройств, подключенных к сети Интернет [4]. Предполагалось, что большое количество беспроводных сенсорных устройств помогут автоматизировать процессы мониторинга и исключить человека из решения рутинных задач [5]. В частности, Интернет вещей используется при разработке и эксплуатации аэрокосмических [6] и наземных радионавигационных систем [7], где летательные и космические аппараты рассматриваются как элементы среды Интернета вещей, а собираемые ими данные могут быть интегрированы и использованы для проведения прогнозного анализа и решения аналитических задач [8].

Развитие Интернета вещей привело к появлению ряда проблем:

(а) как подключить большое количество разнородных устройств к сети Интернет?

(б) можно ли переиспользовать «вещи» в приложениях, для которых они изначально не были предназначены?

(в) как использовать и получить доступ к вещам 24/7, чтобы использовать в вычислениях конкретные измеренные данные [2]?

(г) каким образом можно обеспечить когнитивные возможности системы для принятия решений и обеспечения самоорганизации Интернета вещей?

Потребность в универсальности для сферы Интернета вещей сформулирована большинством, если не всеми, учеными, работающими в этой области [9]. Это связано с необходимостью иметь единый стандартизированный язык или протоколы общения между многочисленными и разнообразными устройствами и системами, обеспечивающими совместимость, взаимопонимание и эффективное взаимодействие разных компонентов Интернета вещей. Такой универсальный язык облегчает интеграцию, развитие и масштабирование решений ИВ во всем мире.

Целью статьи является анализ практических рекомендаций для разработки прототипа функциональной архитектуры когнитивного Интернета вещей для автоматизации средств информационно-измерительных систем в области интеллектуального мониторинга природной среды. Задачами исследования являются: разработка математического, алгоритмического и информационного обеспечения разработки прототипа функциональной архитектуры когнитивного Интернета вещей.

Одними из первых значимых проектов по разработке эталонной архитектуры Интернета вещей являются «Интернет вещей — Архитектура» (англ. Internet of Things – Architecture, IoT-A) [10] и основанная на стандартах открытая архитектура для промышленных систем Интернета вещей (англ. Industrial Internet Reference Architecture, IIRA) [11]. IoT-A более универсальна и структурирована для широкого спектра IoT-приложений, тогда как IIRA специализируется на промышленном секторе с акцентом на интеграцию, масштабируемость и цифровизацию промышленных процессов. IIRA построена с учётом специфики промышленных систем и информационных потоков, тогда как IoT-A предлагает чёткую модульную структуру для разностороннего использования. Стоит отметить, что в обеих архитектурах отсутствует выраженный функционал для реализации интеллектуальных и когнитивных возможностей для разрабатываемых систем.

Аналогично решению IoT-A, ученые, предложившие архитектуру BUTLER [12] разрабатывают доменно-центричные «умные» решения в архитектуре

Интернета вещей, а также разрабатывают горизонтальное решение для обеспечения развития безопасных и «умных» приложений.

Проект IoT6 [13] нацелен на использование потенциала IPv6 и связанных стандартов, таких как 6LoWPAN и CoAP, чтобы преодолеть имеющиеся недостатки и фрагментацию Интернета вещей. Его основные задачи и цель — исследовать, проектировать и разрабатывать высокомасштабируемую ориентированную на услуги архитектуру на базе IPv6 для достижения совместимости, мобильности, интеграции с облачными вычислениями и распределения интеллекта между разнородными компонентами умных вещей, приложениями и сервисами.

Та же проблема лежит в основе проекта *iot.est* [14]. В понимании ученых, работающих над проектом, текущие реализации архитектур Интернета вещей ограничены конкретными областями применения и адаптированы лишь под ограниченные требования своих узких приложений. Подход команды проекта для преодоления технологических и отраслевых границ и возможности проектирования и интеграции новых типов услуг, а также создания новых бизнес-возможностей заключается в создании среды сервисов, которая собирает и использует данные и информацию с датчиков и исполнительных устройств, использующих различные технологии и форматы связи.

Приведенные выше проекты были предложены консорциумами ученых преимущественно из академических учебных заведений и представляют из себя теоретические исследования без пояснения технических аспектов реализации предложенных решений.

Архитектура Интернета вещей с поддержкой искусственного интеллекта (англ. Artificial Intelligence enabled IoT, AIoT) показана в работе [15]. Модель архитектуры состоит из трёх уровней: приложения, интерфейсы и инфраструктура [16]. Типовая архитектура данной модели на практике не является достаточно «интеллектуальной» и масштабируемой, так как она нацелена на решение сетевых задач и подключения разных объектов. Как правило, она позволяет соединить человека с умными устройствами и готовыми умными сервисами. Данная архитектура является теоретической и помогает лишь решать определенные задачи путем использования определенных методов

искусственного интеллекта, не добавляя когнитивности к развернутой системе в целом. Таким образом, это существенно ограничивает построение масштабных сервисов и создание действительно когнитивных приложений.

Альтернативная всеобъемлющая архитектура Metaverse of Things (MoT) (англ. Метавселенная вещей) была предложена в научной работе [17]. В концепции MoT новая структура для будущих приложений в метавселенной состояла из множества синхронизированных потоков данных от нескольких операторов. Более того, предложенная учеными модель была разработана на основе динамического детализированного распределения потоков данных и выбора услуг с использованием невзаимозаменяемых токенов, которыми можно торговать через блокчейн между пользователями и операторами в децентрализованной среде мобильной сети [18]. В итоге, был предложен всеобъемлющий подход Metaverse of Everything (MoE) (англ. Метавселенная всего) к цифровому двойнику в виртуальных мирах [19]. Концепция MoE известна как наиболее всеобъемлющее и автономное сообщество, в котором существует множество устройств с поддержкой искусственного интеллекта, которые реагируют на запросы человека в фоновом режиме и машинные запросы и создают виртуальные продукты. Стоит отметить, что данный подход сводит к минимуму доминирование человека в процедурах и функционировании систем. Проблема подключения и взаимодействия аппаратных средств в сети в данном подходе остается открытой.

На сегодняшний день, несмотря на достаточное количество предложенных архитектур Интернета вещей с точки зрения теории, осуществлено немного экспериментальных развертываний систем Интернета вещей для их изучения на практике в рамках определенных приложений. Очевидно, что данные эксперименты необходимы для получения обратной связи учеными в целях оптимизации разработанных решений [20]. Для этого необходимо, чтобы ученые разрабатывали практические рекомендации реализации предложенных функциональных архитектур Интернета вещей.

Функциональная архитектура когнитивного интернета вещей

Функциональная архитектура состоит из трех уровней: сервисного, уровня виртуальных составных объектов (ВСО) и уровня виртуальных объектов (ВО). В задачи сервисного уровня входит получить сервисный запрос от пользователя, выделить из него цель запроса и декомпозировать на последующие задачи поиска или составления необходимых ВСО, чтобы удовлетворить запрос пользователя. Уровень ВСО получает требования по ВСО и начинает поиск в реестре ВСО с целью найти максимально подходящие запросу ВСО. Если имеющихся ВСО недостаточно, то уровень ВСО создает запрос на уровень ВО для поиска необходимых объектов, чтобы создать ВСО. На уровне ВО хранятся все виртуальные модели имеющихся в распоряжении системы объектов реального мира, а также организован канал связи с ними.

Стоит отметить, что архитектура КИВ обладает рядом полезных свойств. Ситуационная осведомленность – при удовлетворении пользовательского запроса, архитектура понимает контекст и ситуацию, в которой происходит запрос. Это необходимо. Чтобы максимально точно реализовать запрос на базе ВСО и ВО. Виртуализация – объекты реального мира представлены программными моделями (ВО и ВСО) в функционально обогащенной среде. Это помогает решить проблему разнородности объектов реального мира и их масштабируемость. Когнитивность – знания извлекаются из наблюдения за внешней средой и контекстом запросов и событий. Это позволяет не только накапливать знания, но и принимать решения, которые основаны не только на прямых измерениях, но и учитывать контекст, ситуацию, при которой делается вывод и принимается решение. Функциональная архитектура КИВ подробно описана в статье [21]. В данной научной работе приводятся практические аспекты создания прототипа архитектуры КИВ из ее функциональной архитектуры.

Информационное и программное обеспечение архитектуры когнитивного Интернета вещей

Для разработки информационно-измерительных систем на основе предложенной архитектуры когнитивного Интернета вещей [21], а также их

поддержки и расширения их функциональных возможностей, предложен набор различных технологий. Пример реализации архитектуры когнитивного Интернета вещей показан на рисунке 1. Ниже приведено описание каждой технологии.

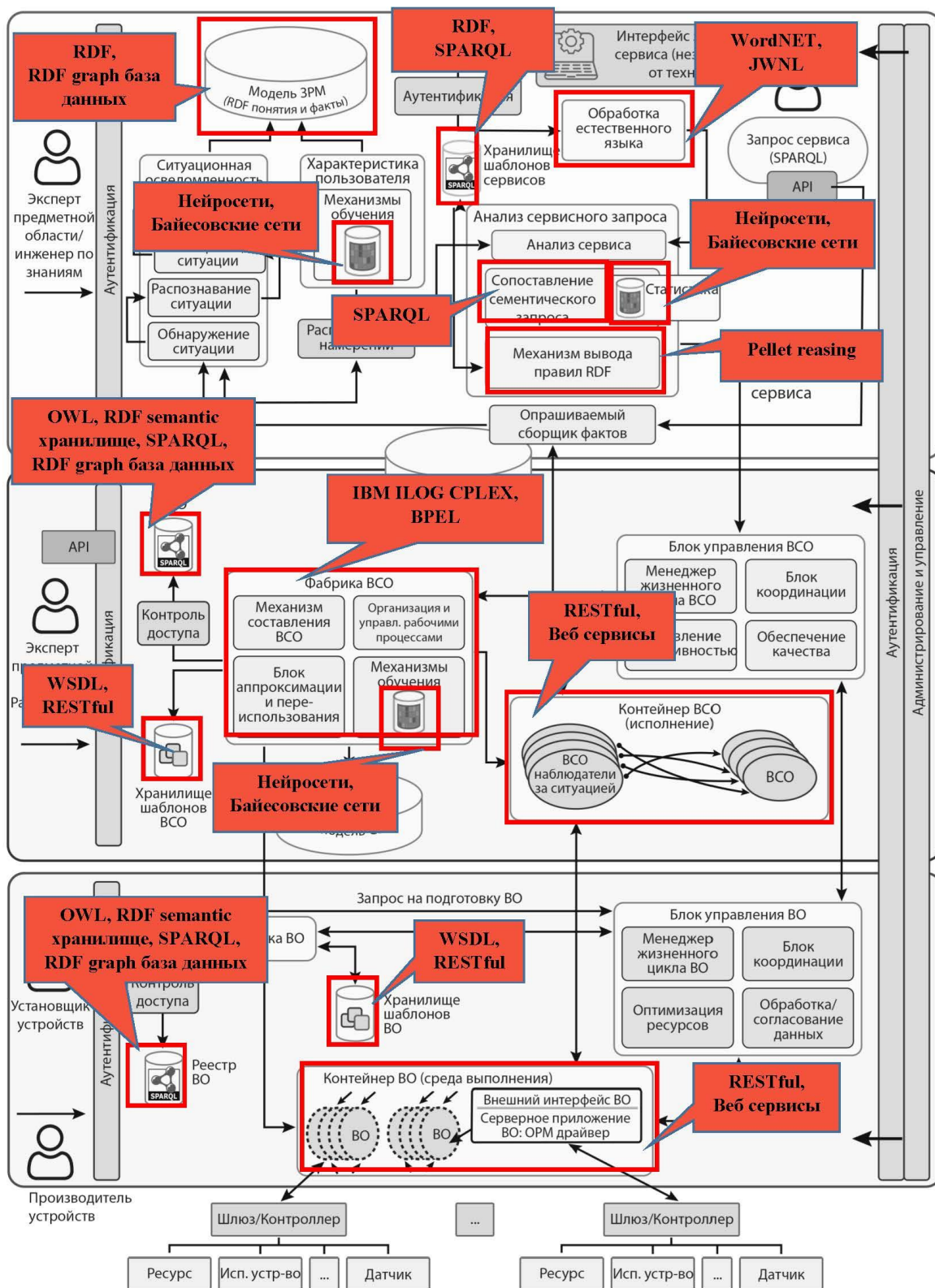


Рисунок 1 - Пример реализации функциональной архитектуры когнитивного Интернета Вещей

Язык веб-онтологий OWL¹ (англ. Web Ontology Language) предназначен для использования приложениями, которым необходимо обрабатывать информацию, а не просто представлять ее людям. OWL обеспечивает большую машинную интерпретируемость веб-контента, чем тот, который поддерживается XML, RDF и RDF-схемой (RDF-S), предоставляя дополнительную лексику наряду с формальной семантикой. RDF² (англ. Resource Description Framework) - это стандартная модель для обмена данными в сети Интернет. RDF обладает функциями, которые облегчают объединение данных, даже если базовые схемы различаются, и, в частности, поддерживает эволюцию схем с течением времени, не требуя изменения всех пользователей данных. Семантические репозитории [22] или графовые базы данных RDF - это системы, аналогичные системам управления базами данных (СУБД) - они позволяют хранить структурированные данные, запрашивать их и управлять ими. Основные различия с СУБД можно определить как:

(а) они используют онтологии в качестве семантических схем, что позволяет им автоматически анализировать данные;

(б) они работают с гибкими и универсальными физическими моделями данных, такими как RDF-графы, что позволяет им легко интерпретировать и оперативно внедрять на практике новые онтологии или схемы метаданных.

Одной из ключевых особенностей семантических хранилищ является то, что они обеспечивают более легкую интеграцию разнообразных данных и большую аналитическую мощь. Sesame³ - это Java-фреймворк с открытым исходным кодом для хранения, запросов и анализа данных с помощью RDF и RDF схем. Его можно использовать как базу данных для RDF и RDF схем или как Java-библиотеку для приложений, которым необходимо работать с RDF внутри системы. SPARQL⁴ (англ. SPARQL Protocol and RDF Query Language) может использоваться для запросов к различным источникам данных, независимо от того, хранятся ли данные изначально в формате RDF или просматриваются как RDF с помощью промежуточного программного обеспечения.

¹ OWL, <http://www.w3.org/TR/owl-features>

² RDF, <http://www.w3.org/RDF>

³ Sesame база данных, https://www.lanica.com/Products/sesame_brief.html

⁴ Язык запросов SPARQL, <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query>

SPARQL содержит возможности для запроса необходимых и необязательных графических шаблонов, а также их соединений. Кроме того, такие компоненты, как Jena⁵ ARQ и Sesame SPARQL parser, могут быть использованы для создания конечных точек SPARQL, которые предлагают полный сервис SPARQL для запроса и обновления данных RDF. Pellet [23] - это ПО для анализа данных и принятия решений OWL DL на основе Java с открытым исходным кодом. Оно может использоваться в сочетании с библиотеками API Sesame и Jena, а также предоставляет интерфейс DIG.

REST ⁶ (англ. REpresentational State Transfer) определяет набор архитектурных принципов, с помощью которых можно разрабатывать веб-сервисы (англ. Web Service, WS), ориентированные на ресурсы системы, включая то, как состояния ресурсов обрабатываются и передаются по протоколу HTTP широким кругом клиентов, написанных на разных языках. RESTful WS обеспечивает взаимодействие между различными объектами в сети, а также может быть легко описан с помощью языка WSDL⁷ (англ. Web Services Description Language), что позволяет автоматизировать процессы и обеспечить взаимодействие между веб-ресурсами. WSDL – это сокращение от языка описания веб-сервисов. WSDL используется для описания интерфейса веб-сервиса. WSDL написан на XML. Это делает документы WSDL независимыми от платформы.

Язык выполнения бизнес-процессов для веб-служб BPEL⁸ или BPEL4WS (англ. Business Process Execution Language) - это язык, используемый для определения и выполнения бизнес-процессов с использованием веб-служб. BPEL обеспечивает реализацию сервис-ориентированной архитектуры (англ. Service Oriented Architecture, SOA) ``сверху вниз'' посредством компоновки, оркестровки и координации веб-сервисов. Технология математического программирования IBM ILOG CPLEX⁹ Optimizer обеспечивает аналитическую поддержку принятия решений для повышения эффективности, снижения затрат и повышения рентабельности.

⁵ Движок запросов для Jena, <https://jena.apache.org/documentation/query/index.html>

⁶ REST, <https://restfulapi.net/>

⁷ WSDL, <https://developer.ibm.com/articles/ws-restful/>

⁸ A Hands-on Introduction to BPEL, <https://www.oracle.com/technical-resources/articles/matjaz-bpel.html>

⁹ IBM ILOG CPLEX Optimizer, <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optim>

IBM ILOG CPLEX Optimizer обеспечивает мощность, необходимую для решения очень сложных задач оптимизации в реальном мире, а также скорость, необходимую для современных интерактивных аналитических приложений поддержки принятия решений. WordNet - это лексическая справочная система, дизайн которой основан на современных психолингвистических теориях лексической памяти человека. Английские существительные, глаголы и прилагательные объединены в наборы синонимов, каждый из которых представляет одно из основных лексических понятий. Наборы синонимов связаны различными отношениями [24]. Для взаимодействия с WordNet механизм NLP использует JWNL (англ. Java WordNet Library)). JWNL - это API для доступа к реляционным словарям в стиле WordNet. Различные методы машинного обучения (англ. Machine Learning) расширяют когнитивные возможности систем. Одним из наиболее популярных методов являются байесовские сети, которые представляют собой графические модели для рассуждения в условиях неопределенности. Эти прямые связи часто являются причинно-следственными связями. Кроме того, байесовские сети моделирует количественную силу связей между переменными, позволяя автоматически обновлять вероятностные представления о них по мере поступления новой информации [25]. Другим методом являются нейронные сети [26]. Неотъемлемая сила нейронных сетей заключается в их способности распознавать взаимосвязь, лежащую в основе входных и выходных данных. С помощью заданного алгоритма обучения и серии итераций обучения сеть учится распознавать закономерности в наборах данных и присваивать веса каждой переменной (узлам).

Математическое обеспечение архитектуры когнитивного Интернета вещей

Математическое описание преобразования сервисного запроса в архитектуре КИВ от сервисного уровня до уровня виртуальных объектов (ВО) можно сформулировать следующим образом:

1. На сервисном уровне пользователь / приложение генерирует сервисный запрос S_r .

2. Этот запрос подвергается обработке функциональным блоком обработки естественного языка, если запрос представлен в естественной форме. Результатом является формальный запрос Q , описанный уравнением (1) и пригодный для дальнейшей обработки, например, в формате SPARQL:

$$Q = NLP(S_r) \quad (1)$$

3. Формальный запрос Q анализируется и сопоставляется с сервисными шаблонами S_i из хранилища шаблонов сервисов, как показано в уравнении (2):

$$S^* = Match(Q, S_i), \quad (2)$$

где S^* - выбранный шаблон сервиса.

4. На основе выбранного шаблона сервиса активируется сервисная логика L_s , которая разбивает запрос на набор функциональных задач и формирует запрос на выполнение сервиса S_E для нижних уровней:

$$S_E = L_s(S^*) \quad (3)$$

5. Запрос на выполнение сервиса S_E идет на уровень ВСО. Менеджер жизненного цикла ВСО производит поиск релевантных ВСО $\{V_{Cj}\}$, соответствующих запросу:

$$V_{C_{active}} \subseteq \{V_{Cj} | Fit(V_{Cj}, S_E) \geq \theta\}, \quad (4)$$

где Fit - функция соответствия, θ - порог.

6. Для каждого выбранного ВСО формируется запрос к уровню ВО для определения экземпляров ВО $\{V_{Sk}\}$, которые обеспечивают требуемые функции:

$$V_{S_{active}} \subseteq \{V_{Sk} | Supports(V_{Sk}, V_{C_{active}}) = True\} \quad (5)$$

7. Менеджер жизненного цикла ВО контролирует состояние экземпляров ВО и запускает их выполнение функцией $E(V_{S_{active}})$.

Таким образом происходит преобразование абстрактного сервисного запроса S_r в конкретные действия на ВСО и поиск ВО, обеспечивающих реализацию сервиса в системе, основанной на архитектуре КИВ.

Алгоритмическое обеспечение архитектуры когнитивного Интернета вещей

Диаграмма, описывающая алгоритм начальной загрузки архитектуры КИВ, показана на рисунке 2. Пользователь при помощи графического интерфейса должен авторизоваться в системе и разместить сервисный запрос. Блок анализа сервисного запроса декомпозирует его и отправит на последующие шаги, связанные с распознаванием намерений и подбором потенциально имеющегося сервисного шаблона. По окончании этих шагов система подберет шаблон с именами ВСО и отправит в блок формирования правил RDF, который на последующих этапах перенаправит полученный шаблон для формирования и запуска ВО.

На рисунке 3 показана диаграмма алгоритма запуска ВСО. Цель данной операции - подобрать необходимые ВО под созданные ВСО, запустить ВСО и контролировать работу ВСО для удовлетворения сервисным требованиям.

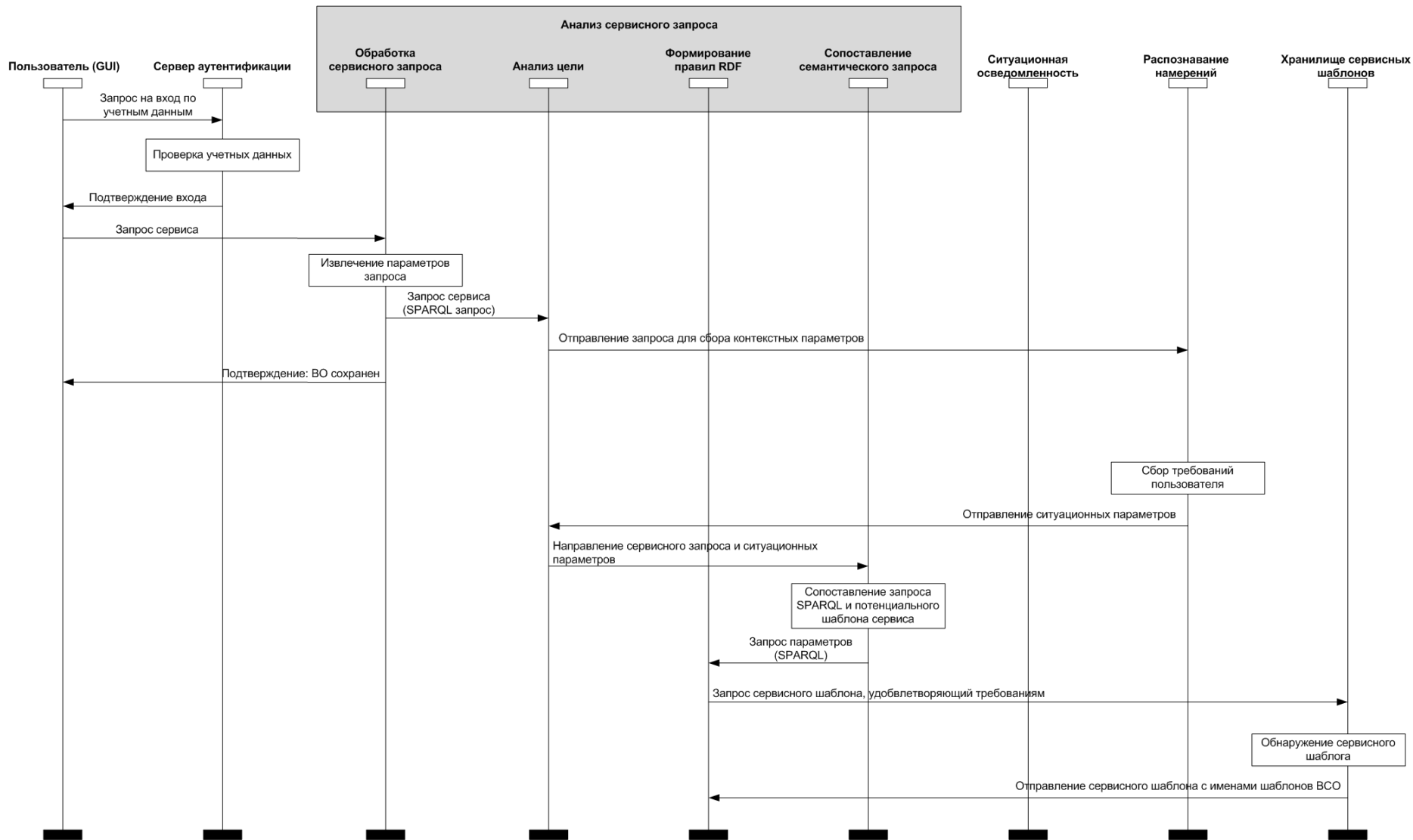


Рисунок 2 - Алгоритм начальной загрузки архитектуры когнитивного интернета вещей

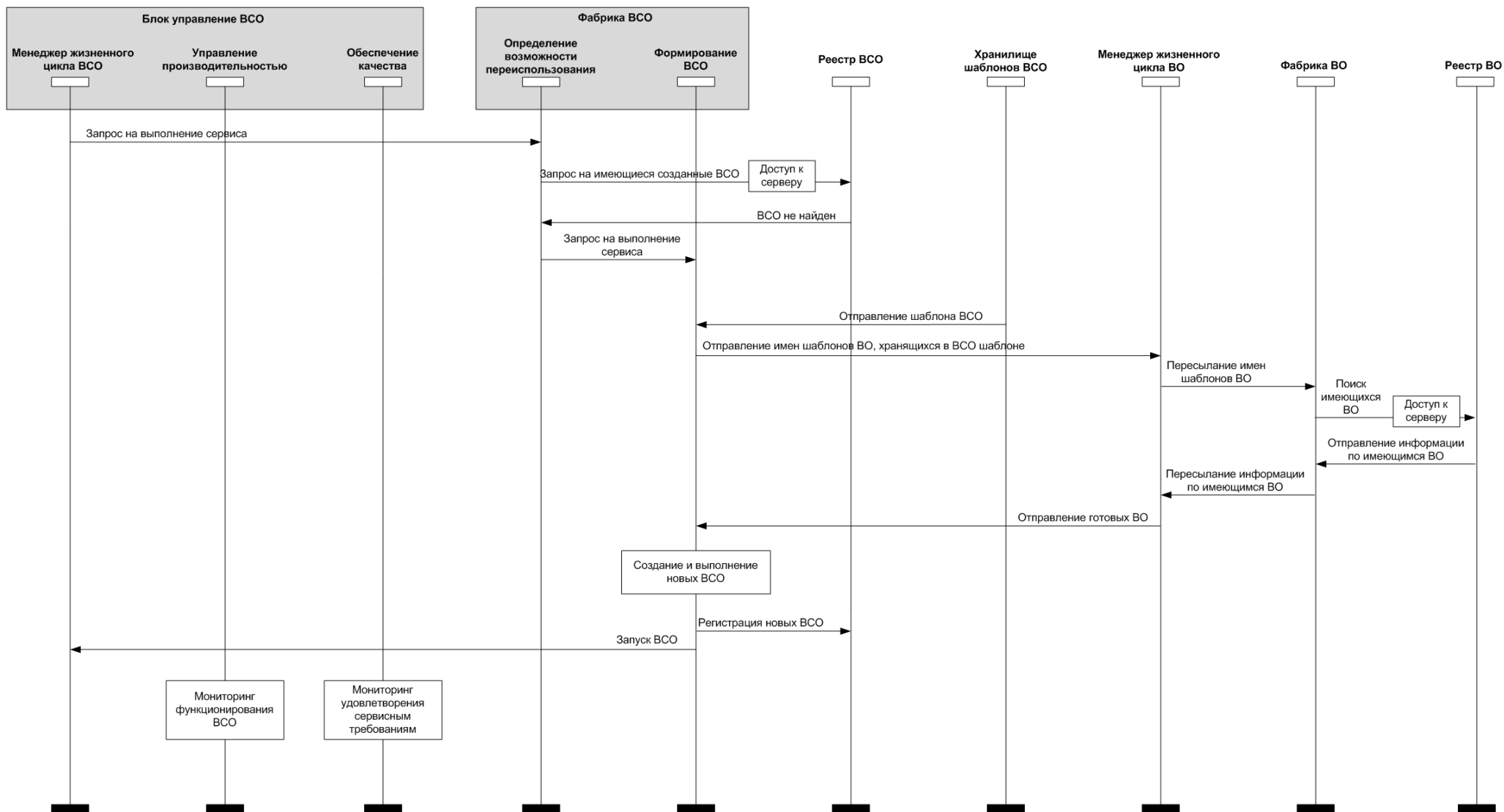


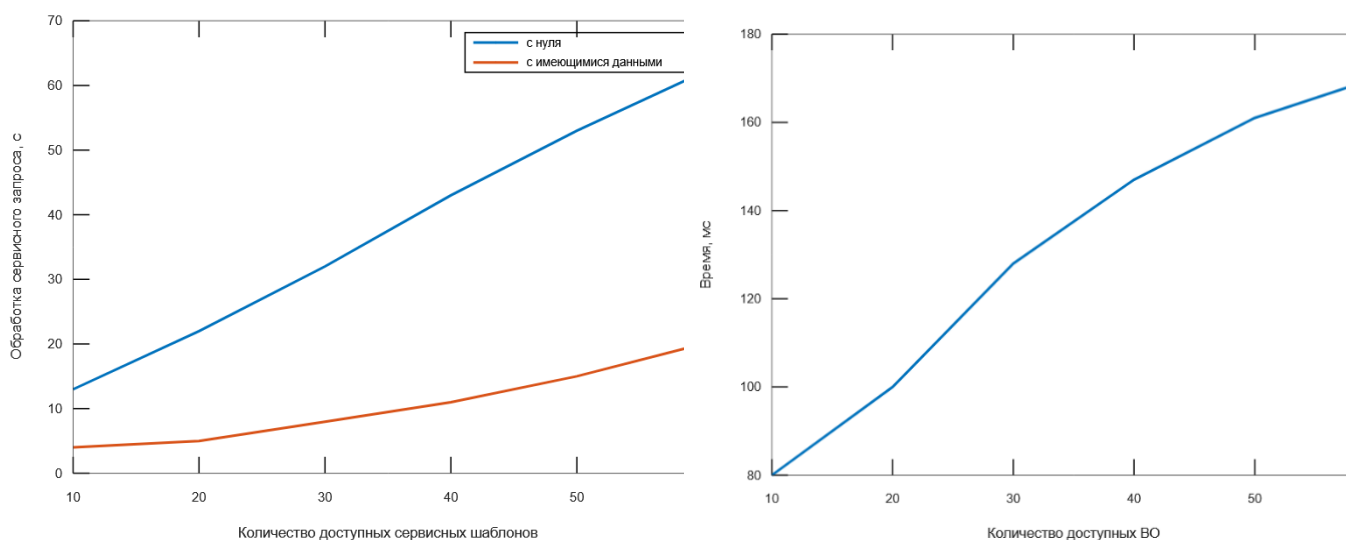
Рисунок 3 - Алгоритм запуска виртуальных составных объектов

Результаты

В качестве примера рассмотрим применение прототипа архитектуры КИВ к аэрокосмической и сельскохозяйственным областям, а именно к детектированию сорняка борщевика Сосновского при помощи Беспилотного Летательного Аппарата (БПЛА). БПЛА оснащен RGB и мультиспектральной камерами для повышения точности детектирования. Данные приборы являются ВО и реализованы в формате RDF файлов, хранящихся в базе данных Sesame. Однако, мультиспектральная камера является причиной удорожания сервиса и уменьшения радиуса полетного задания. Для замены мультиспектральной камеры, как аппаратного объекта на Программное Обеспечение (ПО), использовалась предобученная сверточная нейронная сеть и методы трансферного обучения. Это позволяет использовать ПО в качестве сервисной функции согласно архитектуре КИВ. Шаблоны сервисов хранятся в виде RDF файлов в базе данных Sesame и относятся к сервисному уровню архитектуры КИВ. ВСО составляются при помощи программного обеспечения ILOG CPLEX, представленного ранее. Интеллектуальная составляющая детектирования обеспечивается методами трансферного обучения, показанными в предыдущем исследовании [27].

Как видно из рис. 4(а), при наличии предварительной информации для обработки запроса пользователя механизмами сервисного уровня требуется менее половины времени. Как правило, цель автоматизированного анализа и согласования требований пользователей для динамического создания и настройки ВСО с целью предоставления сервиса посредством выбора наиболее подходящего сервисного шаблона достигается в реалистичные сроки, учитывая, что механизмы управления сервисным уровнем выполняются на начальном этапе проектирования. На этом этапе следует подчеркнуть, что две линии на диаграмме никогда не пересекутся, поскольку они имеют совершенно разную скорость увеличения пропорционально увеличению количества доступных сервисных шаблонов. На рисунке 4(б) показано время создания компонента ВСО по мере увеличения количества рассматриваемых доступных ВО. Эта продолжительность соответствует процессу оптимизации выбора

подходящего ВО для создания оптимального ВСО. В частности, из этого механизма могут быть использованы два алгоритма: алгоритм CPLEX для нахождения оптимального состава функций ВО или эвристический алгоритм ВСО из движка составления ВСО, который находит оптимальное решение для каждой запрашиваемой функции в отдельности и объединяет их, чтобы составить оптимальный ВСО. Время, необходимое для работы обоих алгоритмов, увеличивается по мере увеличения количества доступных ВО в данной области. Тем не менее, это время можно считать относительно коротким.



а) зависимость времени выполнения сервисного запроса от количества доступных сервисных шаблонов

б) время, необходимое на составление ВСО из доступных ВО

Рисунок 4 - Оценка времени выполнения сервисного запроса

На примере разработки методов обработки видео и использования комплекса решений архитектуры КИВ продемонстрирована возможность повышения эффективности аэромониторинга – детектирования борщевика Сосновского. Это происходит за счет снижения расходов на аппаратную часть БПЛА (мультиспектральной камеры), которая заменяется программным кодом в виде ВО без снижения точности детектирования [27], а также за счет снижения полезной нагрузки БПЛА. Это дает новые возможности, которые значительно расширяют функционал отрасли сельского хозяйства для борьбы с сорняками. Кроме этого, применение архитектуры КИВ позволяет существенно расширить функционал сервисов: иметь удаленный доступ ко всем блокам БПЛА 24/7,

которые являются ВО и ВСО, активировать необходимые блоки, оценивать загруженность каждого блока, оценивать типы детектируемых объектов для планирования стратегии борьбы с сорняками и их дальнейшей утилизации или переработки.

Примечание: данная статья, в силу ограниченности объема, является первой из цикла работ. В дальнейшем будут детально рассмотрены вопросы построения ВО из объектов реального мира на примере беспроводных сенсорных сетей для детектирования утечек взрывоопасного газа и выявление взрывоопасности окружающей среды при утечках газовых смесей.

Заключение

В статье проведен анализ практических рекомендаций для разработки прототипа архитектуры когнитивного Интернета вещей, позволяющей автоматизировать средства информационно-измерительных систем. В частности, приведено математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение для создания прототипа архитектуры. В исследовании также проведена оценка времени, необходимого на процедуру выполнения сервисного запроса и создания виртуального составного объекта из известных виртуальных объектов системы. На примере задачи детектирования сорняков в рамках аэромониторинга при помощи БПЛА показано, что использование комплекса решений архитектуры КИВ позволило повысить эффективность мониторинга за счет снижения расходов на аппаратную часть БПЛА, а также снизить полезную нагрузку БПЛА, что дает новые возможности, которые значительно расширяют функционал отрасли сельского хозяйства для борьбы с сорняками. Потенциальным ограничением может быть проблема составления ВСО из миллионов ВО. Однако изучение данной проблемы требует отдельного исследования – для представленного примера она неактуальна. Данное решение можно использовать и для других задач, например, для задач автоматизации средств интеллектуального мониторинга природной среды – детектирование утечек взрывоопасных газов [28], мониторинг средств энергетического комплекса [29], а также моделирование в аэрокосмической промышленности [6] и наземных радионавигационных системах [7].

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Toward autonomic internet of things: recent advances, evaluation criteria, and future research directions / Q.M. Ashraf, M. Tahir, M.H. Nabaebi, J. Isoaho // IEEE Internet of Things Journal. 2023. Vol. 10, no. 16. P. 14725–14748. DOI 10.1109/JIOT.2023.3285359.

2. Касатиков Н.Н., Брехов О.М., Николаева Е.О. Интеграция технологий искусственного интеллекта и интернета вещей для расширенного мониторинга и оптимизации энергетических объектов в умных городах // Труды МАИ : электрон. журн. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175929>. DOI 10.34759/trd-2023-131-23.

3. Воробьев А.А., Елесин И.А. Опыт разработки автоматизированной системы поддержки принятия решений на основе экспертных знаний // Приборы. 2024. № 10 (292). С. 9–16.

4. Суриков К.А. Архитектура системы интернета вещей // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 3/2. С. 152–155. DOI 10.24412/2500-1000-2022-3-2-152-155.

5. Дорожко И.В., Мусиенко А.С. Модель мониторинга технического состояния сложных устройств с применением искусственного интеллекта // Труды МАИ : электрон. журн. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>.

6. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ : электрон. журн. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175930>. DOI 10.34759/trd-2023-131-24.

7. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с

помощью математической среды моделирования Engage / М.Р. Цымбал, А.Е. Семичастнов, Д.А. Балакин, Н.Н. Удалов // Труды МАИ : электрон. журн. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180679>.

8. Дорожко И.В. Применение алгоритмов машинного обучения байесовских сетей для решения задач диагностирования сложных технических систем с использованием дискретных диагностических признаков // Труды МАИ : электрон. журн. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186315>.

9. Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems // River publishers series in communications / ed. by O. Vermesan, P. Friess. Aalborg, Denmark : River Publishers, 2013. P. 153–204.

10. IoT reference architecture / M. Bauer, M. Boussard, N. Bui et al. // Enabling things to talk: designing IoT solutions with the internet of things architectural reference model. Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 29–51.

11. Weyrich M., Ebert C. Reference architectures for the internet of things // IEEE Software. 2016. Vol. 33. P. 112–116.

12. Leveraging multi-domain links via the internet of things / A. Andrushevich, B. Copigneaux, R. Kistler et al. // Internet of things, smart spaces, and next generation networking / ed. by S. Balandin, S. Andreev, Y. Koucheryavy. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 13–24.

13. Ziegler S., Crettaz C. IoT6 project in a nutshell // The Future Internet / ed. by A. Galis, A. Gavras. Berlin ; Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 353–355.

14. Test-enabled architecture for IoT service creation and provisioning / Suparna De, Francois Carrez, Eike Reetz et al. ; ed. by A. Galis, A. Gavras // The Future Internet. Berlin ; Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 233–245.

15. Deep reinforcement learning for autonomous internet of things: model, applications and challenges / Lei Lei, Yue Tan, Kan Zheng et al. // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2020. Vol. 22, no. 3. P. 1722–1760.

16. Far Azadeh Saeed Banaeian, Rad Ali Ismail. Internet of artificial intelligence (IoAI): the emergence of an autonomous, generative, and fully human-disconnected

community // Discover Applied Sciences. 2024. Vol. 91, P. 1–16. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-05726-3>.

17. Blockchain-empowered service management for the decentralized metaverse of things / T. Maksymyuk, J. Gazda, G. Bugar, V. Gazda, M. Liyanage, M. Dohler. // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 99025–99037. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9885206>.

18. Web3-based decentralized autonomous organizations and operations: architectures, models, and mechanisms / Rui Qin, Wenwen Ding, Juanjuan Li, Sangtian Guan, Ge Wang, Yuhai Ren // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2023. Vol. 53, P. 2073–2082. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9993805>.

19. Toward metaverse of everything: opportunities, challenges, and future directions of the next generation of visual/virtual communications / Saeed Banaeian Far, Azadeh Imani Rad, Seyed Mojtaba Hosseini Bamakan, Maryam Rajabzadeh Asaar // Journal of Network and Computer Applications. 2023. Vol 217. Art. 103675. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804523000942>.

20. Оськин К.И., Екимов К.А. Разработка испытательного комплекса для контроллера систем автоматизации // Приборы. 2024. №7 (289). С. 30–36.

21. Сомов А.С. Моделирование архитектуры когнитивного интернета вещей для информационно-измерительных и автоматизированных систем // Труды МАИ : электрон. журн. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185107>.

22. OWLIM: A family of scalable semantic repositories / B. Bishop, A. Kiryakov, D. Ognyanoff, I. Peikov, Z. Tashev, R. Velkov // Semantic Web Journal. 2010. Vol. 2, no. 1. P. 33–42.

23. Pellet: A practical OWL-DL reasoner / E. Sirin, B. Parsia, B.C. Grau, A. Kalyanpur, Y. Katz // Journal of Web Semantics. 2007. Vol. 5, no. 2. P. 51–53.

24. Miller G.A., Beckwith R., Fellbaum C., Gross D., Miller K. Introduction to WordNet: An on-line lexical database : technical report / Princeton University, Cognitive Science Laboratory. 1993. 86 p.

25. Korb K.B., Nicholson A.E. Bayesian artificial intelligence. 2nd ed. CRC Press, 2010. 492 p. (Chapman & Hall/CRC Computer Science & Data Analysis).
26. Dreyfus G. Neural networks : methodology and applications. Springer, 2005. 386 p.
27. Drone-aided detection of weeds: transfer learning for embedded image processing / I. Koshelev, M. Savinov, A. Menshchikov, A. Somov // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2023. Vol. 16. P. 102–111.
28. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. A wireless sensor–actuator system for hazardous gases detection and control // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 210. P. 157–164. DOI 10.1016/j.sna.2014.02.025.
29. Касатиков Н.Н., Фадеева А.Д., Брехов О.М. Мультиагентная система для контроля объектов энергетического комплекса // Труды МАИ : электрон. журн. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174622>. DOI 34759/trd-2023-130-23.

References

1. Ashraf Q.M., Tahir M., Habaebi M.H., Isoaho J. Toward autonomic internet of things: recent advances, evaluation criteria, and future research directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, vol. 10, no. 16, pp. 14725–14748. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3285359>.
2. Kasatnikov N.N., Brekhov O.M., Nikolaeva E.O. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2023, no. 131. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175929>. DOI 10.34759/trd-2023-131-23.
3. Vorobev A.A., Elesin I.A. *Pribory*, 2024, no. 10 (292), pp. 9–16.
4. Surikov K.A. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2022, no. 3/2. pp. 152–155. DOI [10.24412/2500-1000-2022-3-2-152-155](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-3-2-152-155).
5. Dorozhko I.V., Musienko A.S. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2024, no. 137. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181885>.
6. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2023, no. 131. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175930>. DOI [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)

7. Tsymbal M.R., Semichastnov A.E., Balakin D.A., Udalov N.N. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2024, no. 136. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180679>.
8. Dorozhko I.V. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2025, no. 144. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186315>.
9. Internet of things: converging technologies for smart environments and integrated ecosystems. *River publishers series in communications*, ed. by O. Vermesan, P. Friess. Aalborg, Denmark, River Publishers, 2013. pp. 153–204.
10. Bauer M., Boussard M., Bui N., De Loof J., Magerkurth C., Meissner S., Nettsträter A., Stefa J., Thoma M., Walewski J.W. IoT reference architecture. *Enabling things to talk: designing IoT solutions with the internet of things architectural reference model*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. pp. 29–51.
11. Weyrich M., Ebert C. Reference architectures for the internet of things. *IEEE Software*. 2016, vol. 33, pp. 112–116.
12. Andrushevich A., Copigneaux B., Kistler R., A. Kurbatski, Le Gall F., Klapproth A. Leveraging multi-domain links via the internet of things. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking*, ed. by S. Balandin, S. Andreev, Y. Koucheryavy. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 13–24.
13. Ziegler S., Crettaz C. IoT6 Project in a nutshell // *The Future Internet*, ed. by A. Galis, A. Gavras. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 353–355.
14. De S., Carrez F., Reetz E., Tonjes R., Wang W. Test-enabled architecture for IoT service creation and provisioning. *The Future Internet*, ed. by A. Galis, A. Gavras. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg, 2013. pp. 233–245.
15. Lei Lei, Yue Tan, Kan Zheng, Shiwen Liu, Kuan Zhang, Xuemin (Sherman) Shen. Deep reinforcement learning for autonomous internet of things: model, applications and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2020, vol. 22, no. 3. pp. 1722–1760.
16. Far Azadeh Saeed Banaeian, Rad Ali Ismail. Internet of artificial intelligence (IoAI): the emergence of an autonomous, generative, and fully human-disconnected community. *Discover Applied Sciences*, 2024, vol. 91, pp. 1–16. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-05726-3>.

17. Maksymyuk T., Gazda J., Bugar G., Gazda V., Liyanage M., Dohler M. Blockchain-empowered service management for the decentralized metaverse of things. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 99025–99037. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9885206>.
18. Rui Qin, Wenwen Ding, Juanjuan Li, Sangtian Guan, Ge Wang, Yuhai Ren. Web3-based decentralized autonomous organizations and operations: architectures, models, and mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, vol. 53, pp. 2073–2082. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9993805>.
19. Saeed Banaeian Far, Azadeh Imani Rad, Seyed Mojtaba Hosseini Bamakan, Maryam Rajabzadeh Asaar. Toward metaverse of everything: opportunities, challenges, and future directions of the next generation of visual/virtual communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 2023, vol. 217. p. 103675. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804523000942>.
20. Oskin K.I., Ekimov K.A. *Pribory*, 2024, no. 7 (289), pp. 30–36.
21. Somov A.S. Modeling the architecture of the cognitive internet of things for information and measurement systems and automated systems, *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2025, no. 142. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185107>.
22. Bishop B., Kiryakov, A., Ognyanoff, D., Peikov, I., Tashev, Z., Velkov, R. OWLIM: A family of scalable semantic repositories. *Semantic Web Journal*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 33–42.
23. Sirin E., Parsia B., Grau B.C., Kalyanpur A., Katz Y. Pellet: A practical OWL-DL reasoned. *Journal of Web Semantics*, 2007, vol. 5, no. 2, pp. 51–53.
24. Miller G.A., Beckwith R., Fellbaum C., Gross D., Miller K. *Introduction to WordNet: an on-line lexical database : technical report*. Princeton University, Cognitive Science Laboratory, 1993.
25. Korb K.B., Nicholson A.E. *Bayesian artificial intelligence*. 2nd ed. Chapman & Hall/CRC Computer Science & Data Analysis, CRC Press, 2010. 492 p.
26. Dreyfus G. *Neural networks: methodology and applications*, Springer, 2005. 386 p.

27. Koshelev I., Savinov M., Menshchikov A., Somov A. Drone-aided detection of weeds: transfer learning for embedded image processing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, vol. 16, pp. 102–111.

28. Somov A., Baranov A., Spirjakin D. A wireless sensor–actuator system for hazardous gases detection and control. *Sensors and Actuators. A: Physical*, 2014, vol. 210, pp. 157–164. DOI 10.1016/j.sna.2014.02.025.

29. Kasatikov N.N., Fadeeva A.D., Brekhov O.M. Multi-agent system for monitoring objects of the energy complex. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2023, no. 130. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174622>. DOI [34759/trd-2023-130-23](https://doi.org/10.26907/2023-130-23).

Информация об авторах

Андрей Сергеевич Сомов, доцент, Сколковский Институт Науки и Технологий, г. Москва, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4615-3008>, ScopusID: 35227955700, e-mail: a.somov@skoltech.ru

Information about the authors

Andrey S. Somov, Associate Professor, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4615-3008>, ScopusID: 35227955700, e-mail: a.somov@skoltech.ru

Получено 7 ноября 2025 ● Принято к публикации 5 февраля 2026 ● Опубликовано 27 февраля 2026

Received 7 November 2025 ● Accepted 5 February 2026 ● Published 27 February 2026
