

Научная статья
УДК 004.056
DOI: [10.34759/trd-2023-130-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-23)

МУЛЬТАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Николай Николаевич Касатиков^{1✉}, Анна Дмитриевна Фадеева²,

Олег Михайлович Брехов³

^{1,2,3}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Nick925@yandex.ru[✉]

Аннотация. В этом тексте описаны различные способы использования устройств и технологий Интернета вещей для защиты критически важных активов. В нем выделены четыре основных применения IoT для защиты: наблюдение, контроль доступа, отслеживание активов и мониторинг окружающей среды. Авторы приводят конкретные примеры устройств IoT, используемых для каждого приложения, таких как камеры и датчики для наблюдения, биометрические системы и системы доступа без ключа для контроля доступа, GPS-трекеры и RFID-метки для отслеживания активов и датчики для мониторинга окружающей среды. В тексте показано как технологии Интернета вещей могут помочь предотвратить кражи, потери, ущерб от стихийных бедствий и обеспечить безопасность на критически важных объектах, в том числе на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Ключевые слова: Интернет-вещей, мультиагентная система, энергетика, умный город, искусственный интеллект

Для цитирования: Касатиков Н.Н., Фадеева А.Д., Брехов О.М. Мультиагентная система для контроля объектов энергетического комплекса // Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-23)

Original article

MULTI-AGENT SYSTEM FOR MONITORING OBJECTS OF THE ENERGY COMPLEX

Nikolay N. Kasatikov¹, **Anna D. Fadeeva²**, **Oleg M. Brekhov³**

^{1,2,3}Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Nick925@yandex.ru

Abstract: The purpose of the presented article consists in developing a multi-agent system capable of effective management and control of various objects of a power complex. The system will employ artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) techniques to analyze data from sensors and other sources to detect and prevent potential problems, optimize energy consumption and improve overall efficiency. The multi-agent system will enable communication and cooperation between the various agents involved in the management of the energy complex, such as operators, engineers and maintenance personnel, as well. The final goal of the article consists in creation of the system, capable of reducing the dead time, enhancing productivity and increasing safety in the energy complex. The work is of a review character, about multi agent system of a “smart city”

and its application at the energetics and space-rocket industry in the first place. The results of this work are proposed steps on the multi-agent system general development for its implementation at the power and space-rocket enterprises. The article describes how the “smart city” multi-agent system may be applied at the space-rocket enterprises and power objects in various ways. These systems may be helpful while controlling complex and interrelated processes, associated with space missions, from the spacecraft start and to its operation. Multi-agent systems may enable connection and coordination between different agent, such as ground-based control and satellite systems. They may as well be helpful in energy consumption optimizing and reduce the number of waste due to the energy consumption and storing control. Besides, these systems may help with the maintenance service, revealing potential problems prior they become critical, as well as increasing the space mission overall security and effectiveness. The multi-agent system application at the power objects and space-rocket enterprises may present several advantages such as efficiency, reliability and cost effectiveness enhancing. One inference that can be drawn consists in the fact that the multi-agent system would help optimizing energy production and consumption by coordination and control of the separate agents’ behavior. Each agent in the system may have its certain functions such as energy consumption monitoring, equipment operation control or decision making on the energy storage and distribution.

One more inference consists in the fact that the multi-agent system is able to increase the energetics objects reliability by ensuring redundancy and fault tolerance. In case of one of the agents’ failure, other agents will be able to keep on running and compensate the failure, reducing the risk of dead time and increasing the overall reliability of the system. Besides, the multi-agent system may increase economic efficiency by the energy losses

reduction based on the real time data. The system may help as well to control the energy demand reducing peak loads and demand for the extra power for energy production, which will result in savings on costs for both energy suppliers and consumers.

As a whole, the multi-agent system employing on the space-rocket objects and power objects would lead to significant increase in energy efficiency, reliability and economic efficiency, which makes it an up-and-coming approach to control and optimization of power systems.

Keywords: Internet of things, multi-agent system, energy, smart city, artificial intelligence

For citation: Kasatkov N.N., Fadeeva A.D., Brekhov O.M. Multi-agent system for monitoring objects of the energy complex. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-23)

Введение

Защита критически важных объектов с помощью Интернета вещей (IoT) может быть обеспечена за счет использования устройств и технологий IoT для мониторинга и защиты этих объектов. Вот несколько примеров:

Наблюдение: устройства IoT, такие как камеры и датчики, можно использовать для наблюдения за периметром критически важных объектов, обнаружения вторжений и подачи сигнала тревоги в случае любой подозрительной активности.

Контроль доступа: технологии Интернета вещей, такие как биометрия, интеллектуальные замки и системы доступа без ключа, могут использоваться для

контроля доступа к критически важным объектам, гарантируя, что внутрь будет допущен только авторизованный персонал.

Отслеживание активов: Устройства IoT, такие как GPS-трекеры и RFID-метки, можно использовать для отслеживания и мониторинга [1] местоположения критически важных активов, таких как оборудование и расходные материалы, помогая предотвратить кражу и потерю.

Мониторинг окружающей среды: датчики IoT можно использовать для мониторинга условий окружающей среды на критически важных объектах [2], таких как температура, влажность и качество воздуха, чтобы предотвратить ущерб от стихийных бедствий или других экологических опасностей.

Техническое обслуживание. Устройства IoT можно использовать для мониторинга состояния специального оборудования, прогнозирования необходимости обслуживания и планирования профилактического обслуживания [3] для минимизации времени простоя.

Техническая спецификация

Существует несколько технических спецификаций, которые важны для обеспечения безопасности критически важных объектов с использованием технологии IoT. Некоторые из них включают:

Сетевое подключение. Устройства IoT[4], используемые для защиты критически важных объектов, должны быть подключены к защищенной сети, которая может поддерживать передачу данных в режиме реального времени и удаленный доступ. Этого можно добиться за счет использования проводных или беспроводных сетей, таких как Wi-Fi, Zigbee или LTE;

Безопасность данных. Данные, генерируемые устройствами IoT на критически важных объектах, являются конфиденциальными и должны быть защищены от несанкционированного доступа или изменения. Это может быть достигнуто с помощью шифрования, безопасной аутентификации и брандмауэров [5];

Управление питанием. Устройства IoT, используемые на специальных объектах, должны получать питание круглосуточно и без выходных, а также должны иметь возможность работать в режимах с низким энергопотреблением для экономии [6] энергии и продления срока службы батареи;

Устойчивость к воздействию окружающей среды. Устройства IoT, используемые на критически важных объектах, должны выдерживать суровые условия окружающей среды, такие как экстремальные температуры, влажность и вибрация, чтобы обеспечить их работоспособность в случае необходимости [7];

Совместимость: Устройства IoT, используемые на критически важных объектах, должны иметь возможность взаимодействовать друг с другом и с другими системами, такими как системы контроля доступа или системы наблюдения, чтобы обеспечить комплексное решение;

Масштабируемость. Системы IoT, используемые на критически важных объектах, должны быть масштабируемыми для удовлетворения растущих потребностей объекта, включая добавление новых устройств или интеграцию новых систем [8];

Принимая во внимание эти технические характеристики, критически важные объекты могут гарантировать, что системы IoT, используемые для обеспечения

безопасности, являются надежными, эффективными и безопасными, обеспечивая высокий уровень защиты объектов и их активов.

Таким образом, использование технологий Интернета вещей может обеспечить высокий уровень безопасности критически важных объектов, позволяя обнаруживать и реагировать на угрозы и потенциальные нарушения безопасности в режиме реального времени.

Сочетание нейронных сетей и IoT (Интернета вещей) может быть использовано для обеспечения безопасности объектов гидроэнергетики и ракетно-космической отрасли несколькими способами [9]:

Анализ изображений и видео. Нейронные сети можно обучить выполнять анализ изображений и видео, который можно использовать для обнаружения аномалий, таких как вторжения, сбои в работе оборудования или опасные факторы окружающей среды. Эта информация может быть передана сотрудникам службы безопасности в режиме реального времени с помощью устройств IoT [10];

Прогностическое обслуживание. Используя датчики Интернета вещей для сбора данных о производительности и состоянии оборудования на гидроэнергетических объектах, нейронные сети можно обучить прогнозировать потенциальные отказы и рекомендовать действия по техническому обслуживанию. Это может помочь предотвратить незапланированные простои и повысить общую надежность объекта;

Контроль доступа: Нейронные сети могут использоваться для биометрического распознавания, такого как распознавание лиц или отпечатков пальцев, для повышения безопасности систем контроля доступа на

гидроэнергетических объектах и ракетно-космических предприятиях. Это может помочь предотвратить несанкционированный доступ к важным областям и снизить риск кражи или повреждения [11,12];

Мониторинг окружающей среды: датчики IoT можно использовать для мониторинга условий окружающей среды, таких как уровень воды, погодные условия и качество воздуха, и предоставлять данные в реальном времени для анализа нейронным сетям. Эта информация может использоваться для обнаружения потенциальных опасностей, таких как наводнения или оползни, и принятия соответствующих ответных мер;

Мультиагентная система (MAS) умного города [13] - это децентрализованная распределенная система, в которой несколько агентов или независимых компонентов используются для выполнения определенных задач. В контексте жизненно важных объектов в небольших населенных пунктах этот тип системы может использоваться для улучшения операций и принятия решений путем сбора и анализа данных из различных источников. Например, система может использовать датчики для сбора информации о состоянии объектов, такой как уровень занятости, потребление энергии и потребности в техническом обслуживании. Затем агенты в системе могут использовать эти данные для принятия обоснованных решений о том, как оптимизировать использование ресурсов, повысить безопасность и защиту, а также реагировать на чрезвычайные ситуации.

Помимо улучшения операций, мультиагентная система умного города также может помочь в принятии решений, моделируя сценарии и анализируя возможные результаты. Например, система может моделировать различные сценарии

управления энергопотреблением на жизненно важном объекте и определять, какая стратегия будет наиболее эффективной и действенной.

Мультиагентная система умного города является ценным инструментом для улучшения управления жизненно важными объектами в небольших населенных пунктах, помогая обеспечить их бесперебойную и эффективную работу и надежную защиту сообщества.

Мультиагентная система действительно может помочь ускорить и оптимизировать работу по контролю за безопасностью на объектах электроэнергетики и атомных станциях. Вот как:

Параллельная обработка: мультиагентная система может распределять задачи мониторинга между несколькими агентами, обеспечивая параллельную обработку и более быстрое выполнение проверок безопасности. **Улучшенное принятие решений:** децентрализованный характер мультиагентной системы позволяет принимать более быстрые и обоснованные решения, поскольку агенты могут общаться и сотрудничать в режиме реального времени. **Улучшенная ситуационная осведомленность:** MAS может интегрировать данные из нескольких источников, таких как датчики и камеры, чтобы обеспечить всестороннее представление о состоянии безопасности объекта. **Повышенная надежность:** при совместной работе нескольких агентов MAS может обеспечить повышенную надежность при мониторинге безопасности, поскольку сбой одного агента не влияет на всю систему. **Профилактическое обслуживание:** MAS также может использовать методы искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования потенциальных проблем безопасности и упреждающего их устранения, снижая

вероятность инцидентов. Использование мультиагентной системы контроля безопасности объектов электроэнергетики, атомных станций, прочих объектов специального назначения позволяет значительно повысить эффективность и результативность контроля безопасности, снизить риск возникновения инцидентов и обеспечить безопасную эксплуатацию этих объектов критической инфраструктуры.

Обучение модели умного города

Исходя из описанного выше, мы получаем выводы - обучение модели умного города может быть сложным и многоэтапным процессом, вот общий план необходимых шагов:

- сбор данных: необходимо собрать большое количество данных, связанных с городом, таких как данные о дорожном движении, данные о потреблении энергии, данные о погоде и данные из социальных сетей;

- предварительная обработка данных. Необходимо провести очистку и подготовить данные для использования в модели, включая удаление пропущенных значений, выбросов и шума;

- извлечение признаков: необходимо выбрать из данных соответствующие признаки, такие как модели трафика, модели энергопотребления и погодные условия [14];

- выбор модели. Следует провести выборку наиболее подходящих для задачи алгоритмов машинного обучения или глубокого обучения. [15];

- обучение модели: обучение выбранной модели с использованием подготовленных данных и признаков с использованием таких методов, как обучение с учителем, обучение без учителя или обучение с подкреплением;

- оценка модели. Проведение оценки производительности модели с помощью соответствующих показателей, таких как точность, достоверность, полнота и оценка [16];

- точная настройка модели. Уточнение параметров и гиперпараметров модели для повышения ее производительности с использованием таких методов, как перекрестная проверка и поиск по сетке;

Развертывание модели. Внедрение обученной модели в облачной инфраструктуре или на оперативном устройстве для использования в режиме реального времени в городе;

Мониторинг модели. Контроль и мониторинг производительности модели в реальных условиях и обновление ее по мере необходимости, чтобы она оставалась точной и актуальной.

Такой концепт действий, необходимых для обучения модели умного города. Конкретные шаги и детали могут различаться в зависимости от сложности модели, размера и типа используемых данных. Искусственный интеллект и IoT-технологии неразрывно связаны и для успешного обучения модели умного города необходимо выполнять процессы по синтезированию решений машинного обучения, глубокого обучения и больших данных (BigData).

Профилактическое обслуживание в сфере ИИ

Профилактическое обслуживание является важным применением искусственного интеллекта и машинного обучения в области мониторинга безопасности на объектах энергетики и ракетно-космической техники. Анализируя

данные из различных источников, таких как датчики и исторические записи об обслуживании, система профилактического обслуживания может выявлять закономерности и предсказывать потенциальные проблемы безопасности до того, как они возникнут. Это позволяет проводить упреждающее техническое обслуживание и ремонт, снижая вероятность инцидентов и обеспечивая безопасную эксплуатацию объектов [17,18].

В мультиагентной системе агенты могут работать вместе, чтобы собирать и анализировать данные, делать прогнозы и генерировать рекомендации по обслуживанию. Это может повысить эффективность и точность профилактического обслуживания, поскольку несколько агентов могут внести свой опыт и знания в процесс принятия решений. Интеграция методов искусственного интеллекта и машинного обучения в мультиагентные системы может значительно повысить способность прогнозировать и предотвращать проблемы с безопасностью, что приводит к улучшению показателей безопасности и снижению рисков на объектах критической инфраструктуры. В мультиагентной системе для сбора и анализа данных с устройств IoT несколько агентов работают вместе для выполнения различных задач, таких как сбор, обработка и хранение данных. Эти агенты могут быть выполнены в виде программных или аппаратных компонентов и могут взаимодействовать друг с другом через коммуникационную сеть [19].

Данные, собираемые с устройств IoT, обычно представляют собой показания датчиков, и агенты несут ответственность за обработку этих данных и извлечение значимой информации. Затем обработанные данные сохраняются в центральном репозитории, таком как база данных или облако, для дальнейшего анализа.

Важным аспектом такой системы является обеспечение безопасности и конфиденциальности собираемых и обрабатываемых данных. Этого можно достичь путем реализации таких мер безопасности, как шифрование, аутентификация и контроль доступа.

Таким образом, мультиагентная система для сбора и анализа данных с устройств Интернета вещей может обеспечить масштабируемый и эффективный способ управления огромным объемом данных, генерируемых этими устройствами, и их осмысления.

АГЕНТ	ФУНКЦИИ
Агент мониторинга потребления энергии	Сбор данных о потреблении энергии в разных зонах предприятия
Агент контроля работы оборудования	Контроль и диагностика работы оборудования
Агент управления распределением энергии	Принятие решений о распределении энергии между различными потребителями на предприятии
Агент управления хранением энергии	Управление системами хранения энергии на предприятии
Агент принятия решений по энергосбережению	Анализ данных о потреблении энергии и разработка стратегии по энергосбережению

Агент управления связью	Обеспечение связи между всеми агентами и обмен данными между ними
-------------------------	---

Табл. 1. Схема мультиагентного пути

На данной схеме (Табл. 1) агенты представлены прямоугольниками, функции, то чем они занимаются, а среда представляет собой внешний контекст, в котором действуют агенты. Компонент координации и управления отвечает за обеспечение эффективной совместной работы агентов, а репозиторий является центральным хранилищем для хранения данных и доступа к ним.

Для более понятных технических решений мы предлагаем математическую модель MAS в устройствах IoT для интеллектуальной энергетики:

1 Энергоэффективность (EE): отношение общей энергии, потребляемой системой, к энергии, необходимой для выполнения желаемой функции. Формула для EE: $EE = (\text{Общая энергия, потребляемая системой}) / (\text{Энергия, необходимая для выполнения функции})$

2 Стабильность системы (SS): Способность системы сохранять свою функциональность при наличии возмущений. Формула для SS: $SS = 1 - (\text{Общее количество отказов системы} / \text{Общее время безотказной работы системы})$

3 Балансировка нагрузки (LB): степень, в которой система равномерно распределяет нагрузку между устройствами. Формула для LB: $LB = (1 / N) * \sum(|L_i - L_{avg}| / L_{avg})$, где N — общее количество устройств, L_i — нагрузка устройства i , а L_{avg} — средняя нагрузка всех устройств.

Используя эти метрики и формулы, показанные выше, можно оценить и оптимизировать производительность MAS в устройствах IoT для интеллектуальной энергетики для максимальной энергоэффективности, стабильности системы и балансировки нагрузки.

Развитие IoT-технологии на объектах энергетики

Для разработки мультиагентной системы мониторинга энергетических объектов и объектов ракетно-космической отрасли можно выполнить следующие шаги:

1) Сбор требований: сюда входит определение требований к системе, включая цели, ограничения и желаемые функции. Это может включать консультации с заинтересованными сторонами и экспертами в энергетической отрасли [20].

2) Архитектурный проект. Разработка общей архитектуры системы, включая компоненты, протоколы связи и требования к хранению данных.

3) Дизайн агента: проектирование отдельных агентов, включая их обязанности, процессы принятия решений и механизмы связи.

4) Моделирование среды: создание среды моделирования для тестирования системы, включая реалистичные модели энергетических объектов и окружающей среды.

5)Реализация: внедрение и встраивание агентов, коммуникационной сети и компоненты хранения данных. Сюда входит и тестирование системы, потому что она должна соответствовать требованиям и работать должным образом.

6)Развертывание: настройка системы на реальном энергетическом объекте, проводя интегрирование ее с существующими системами мониторинга и управления, и обеспечив ее безопасность и надежность.

7)Обслуживание и улучшение: необходимо вести постоянный контроль и производить улучшение системы, регулярно обновляя ее новыми данными и алгоритмами и устраняя любые возникающие проблемы.

В этом процессе важно учитывать безопасность и конфиденциальность системы, а также масштабируемость и производительность системы по мере увеличения.

Это ключевые компоненты в разработке мультиагентной системы для использования на энергетических объектах. Конкретные детали будут зависеть от конкретных требований и целей вашего проекта и количества энергетических объектов и устройств IoT.

Выводы

В заключение можно сказать, что сочетание нейронных сетей и Интернета вещей обеспечивает мощный инструмент для повышения безопасности гидроэнергетических объектов, предприятий, занимающихся созданием ракетно-космической техники за счет анализа и прогнозирования данных в режиме

реального времени, биометрического распознавания и мониторинга окружающей среды. Главные преимущества мультиагентной системы заключаются в том, что мультиагентные системы позволяют распределять сложные проблемы между несколькими агентами, что позволяет находить более быстрые и эффективные решения, позволяют адаптироваться к изменяющимся условиям и реагировать на непредвиденные события, обеспечивая большую гибкость и отказоустойчивость. Мультиагентные системы могут распределять задачи и принимать решений между несколькими агентами, мультиагентные системы могут повысить надежность и уменьшить влияние сбоев или ошибок на отдельных агентах. Их можно легко масштабировать и удалять в зависимости от необходимости. У них улучшенная координация, они плавно сотрудничают с агентами и могут собирать и анализировать данные из нескольких источников, что приводит к улучшению процесса принятия решений и повышению точности. И естественно повышенная автоматизация: мультиагентные системы могут автоматизировать повторяющиеся задачи и снизить потребность в человеческом вмешательстве, что приведет к повышению эффективности и снижению затрат.

Список источников

1. Baldi P. Autoencoders, Unsupervised Learning, and Deep Architectures // JMLR Proceedings of Machine Learning Research, 2012, vol. 27, pp. 37–49.
2. Wang Y., Yao H., Zhao S. Auto-encoder based dimensionality reduction // Neurocomputing, 2016, vol. 184, pp. 232–242. DOI:[10.1016/j.neucom.2015.08.104](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.104)
3. Murphree J. Machine learning anomaly detection in large systems // IEEE

Autotestcon, 2016. DOI:[10.1109/AUTEST.2016.7589589](https://doi.org/10.1109/AUTEST.2016.7589589)

4. Araya Daniel Berhane, Katarina Grolinger, Hany F. El Yamany, Miriam A. M. Capretz. An ensemble learning framework for anomaly detection in building energy consumption // Energy Buildings, 2017. DOI:[10.1016/j.enbuild.2017.02.058](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.058)
5. Bouabdallaoui Y., Lafhaj Z., Yim P., Ducoulombier, L., Bennadji B. Natural Language Processing Model for Managing Maintenance Requests in Buildings // Buildings, 2020, vol. 10 (9), pp. 160. DOI:[10.3390/buildings10090160](https://doi.org/10.3390/buildings10090160)
6. Su Y., Zhao Y., Niu C., Liu R., Sun W., Pei D. Robust Anomaly Detection for Multivariate Time Series through Stochastic Recurrent Neural Network // In Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining, Anchorage, AK, USA, 4–8 August 2019, vol. 1485, pp. 2828–2837. DOI:[10.1145/3292500.3330672](https://doi.org/10.1145/3292500.3330672)
7. Fan C., Xiao F., Yan C. A framework for knowledge discovery in massive building automation data and its application in building diagnostics // Automation Construction, 2015, vol. 50, pp. 81-90. DOI:[10.1016/j.autcon.2014.12.006](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.006)
8. Moreno M.V., Dufour L., Skarmeta A.F., Jara A.J., Genoud D., Ladevie B. et al. Big data: The key to energy efficiency in smart buildings // Soft Computing, 2015, vol. 20, pp. 1749–1762. DOI:[10.1007/s00500-015-1679-4](https://doi.org/10.1007/s00500-015-1679-4)
9. Minoli D., Sohraby K., Occhiogrosso B. IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings - Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems // IEEE Internet Things Journal, 2017, vol. 4, pp. 269–283. DOI:[10.1109/JIOT.2017.2647881](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2647881)
10. Akkaya K., Guvenc I., Aygun R., Pala N., Kadri A. IoT-based occupancy

monitoring techniques for energy-efficient smart buildings // In Proceedings of the 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), New Orleans, LA, USA, 9–12 March 2015, pp. 58–63.

DOI:[10.1109/WCNCW.2015.7122529](https://doi.org/10.1109/WCNCW.2015.7122529)

11. Bourdeau M., Zhai, X., Nefzaoui E., Guo X., Chatellier P. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques // Sustain Cities and Society, 2019, vol. 48. DOI: [10.1016/j.scs.2019.101533](https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101533)

12. Gunay B., Shen W. Newsham G. Data analytics to improve building performance: A critical review // Automion in Construction, 2019, vol. 97, pp. 96-109.

DOI:[10.1016/j.autcon.2018.10.020](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.020)

13. Marmo R., Nicoletta M., Polverino F., Tibaut A., Marmo R. A Methodology for a Performance Information Model to Support Facility Management // Sustainability, 2019, vol. 11, pp. 7007. DOI:[10.3390/su11247007](https://doi.org/10.3390/su11247007)

14. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // ICT Express, 2019, vol. 5, pp. 1-7. DOI: [10.1016/j.ict.2017.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005)

15. Zheng A., Casari A. Feature Engineering for Machine Learning, O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA, 2018, 218 p.

16. Miller C., Arjunan P., Kathirgamanathan A., Fu C., Roth J. et al. The ASHRAE Great Energy Predictor III competition: Overview and results // Science and Technology for Built Environment, 2020, vol. 26 (1), pp. 1427-1447.

DOI:[10.1080/23744731.2020.1795514](https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1795514)

17. Sagheer A., Kotb M. Unsupervised Pre-training of a Deep LSTM-based Stacked

Autoencoder for Multivariate Time Series Forecasting Problems // *Scientific Reports*, 2019, no. 9, pp. 19038. DOI: [10.1038/s41598-019-55320-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-55320-6)

18. Семенов М.Е., Соловьев А.М., Попов М.А. Стабилизация неустойчивых объектов: связанные осцилляторы // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80231>

19. Сударенко Д.А., Лютов А.В. Разработка базы данных структурно-параметрического описания технологии LTCC с применением ADO.NET // Труды МАИ. 2020. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161428>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-14

20. Брехов О.М., Тин М.А. Обработка запросов к базе данных посредством ассоциативной вычислительной системы // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63151>

References

1. Baldi P. Autoencoders, Unsupervised Learning, and Deep Architectures, *JMLR Proceedings of Machine Learning Research*, 2012, vol. 27, pp. 37–49.

2. Wang Y., Yao H., Zhao S. Auto-encoder based dimensionality reduction, *Neurocomputing*, 2016, vol. 184, pp. 232–242. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.08.104

3. Murphree J. Machine learning anomaly detection in large systems, *IEEE Autotestcon*, 2016. DOI: 10.1109/AUTEST.2016.7589589

4. Araya Daniel Berhane, Katarina Grolinger, Hany F. El Yamany, Miriam A. M. Capretz. An ensemble learning framework for anomaly detection in building energy consumption, *Energy Buildings*, 2017. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.058

5. Bouabdallaoui Y., Lafhaj Z., Yim P., Ducoulombier, L., Bennadji B. Natural Language Processing Model for Managing Maintenance Requests in Buildings, *Buildings*, 2020, vol. 10 (9), pp. 160. DOI: 10.3390/buildings10090160
6. Su Y., Zhao Y., Niu C., Liu R., Sun W., Pei D. Robust Anomaly Detection for Multivariate Time Series through Stochastic Recurrent Neural Network, *In Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, Anchorage, AK, USA, 4–8 August 2019, vol. 1485, pp. 2828–2837. DOI: 10.1145/3292500.3330672
7. Fan C., Xiao F., Yan C. A framework for knowledge discovery in massive building automation data and its application in building diagnostics, *Automation Construction*, 2015, vol. 50, pp. 81-90. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.12.006
8. Moreno M.V., Dufour L., Skarmeta A.F., Jara A.J., Genoud D., Ladevie B. et al. Big data: The key to energy efficiency in smart buildings, *Soft Computing*, 2015, vol. 20, pp. 1749–1762. DOI: 10.1007/s00500-015-1679-4
9. Minoli D., Sohraby K., Occhiogrosso B. IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings - Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems, *IEEE Internet Things Journal*, 2017, vol. 4, pp. 269–283. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2647881
10. Akkaya K., Guvenc I., Aygun R., Pala N., Kadri A. IoT-based occupancy monitoring techniques for energy-efficient smart buildings, *In Proceedings of the 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, New Orleans, LA, USA, 9–12 March 2015, pp. 58–63. DOI: 10.1109/WCNCW.2015.7122529

11. Bourdeau M., Zhai, X., Nefzaoui E., Guo X., Chatellier P. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques, *Sustain Cities and Society*, 2019, vol. 48. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101533
12. Gunay B., Shen W. Newsham G. Data analytics to improve building performance: A critical review, *Automation in Construction*, 2019, vol. 97, pp. 96-109. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.020
13. Marmo R., Nicoletta M., Polverino F., Tibaut A., Marmo R. A Methodology for a Performance Information Model to Support Facility Management, *Sustainability*, 2019, vol. 11, pp. 7007. DOI: 10.3390/su11247007
14. Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express*, 2019, vol. 5, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.icte.2017.12.005
15. Zheng A., Casari A. *Feature Engineering for Machine Learning*, O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA, 2018, 218 p.
16. Miller C., Arjunan P., Kathirgamanathan A., Fu C., Roth J. et al. The ASHRAE Great Energy Predictor III competition: Overview and results, *Science and Technology for Built Environment*, 2020, vol. 26 (1), pp. 1427-1447. DOI: 10.1080/23744731.2020.1795514
17. Sagheer A., Kotb M. Unsupervised Pre-training of a Deep LSTM-based Stacked Autoencoder for Multivariate Time Series Forecasting Problems, *Scientific Reports*, 2019, no. 9, pp. 19038. DOI: 10.1038/s41598-019-55320-6
18. Semenov M.E., Solov'ev A.M., Popov M.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80231>

19. Sudarenko D.A., Lyutov A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161428>. DOI: 10.34759/trd-2021-120-14
20. Brekhov O.M., Tin M.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63151>

Статья поступила в редакцию 12.02.2023

Одобрена после рецензирования 23.03.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 12.02.2023; approved after reviewing on 23.03.2023; accepted for publication on 27.06.2023