

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ (IIOT) НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (CO₂)

USING THE INTERNET OF THINGS (IIOT) IN INDUSTRIAL PRODUCTION TO MONITOR CARBON DIOXIDE (CO₂) EMISSIONS

K. Khananov

Summary. This research paper examines the application of the Industrial Internet of Things (IIoT) to monitor, measure, and visualize CO₂ emission reductions in real time in industrial and environmental applications. Key challenges of using the Internet of Things are identified, including interoperability, data security, and system scalability. The paper describes the challenges that enterprises face when using IIoT: issues of interoperability of heterogeneous hardware and software, ensuring reliable security of confidential and critical data transmitted over networks, and the complexity of scaling systems to cover large enterprises or distributed facilities. The paper highlights the need for an integrated approach to IIoT implementation to effectively manage the carbon footprint.

Keywords: industrial Internet of things (IIoT), CO₂ monitoring, real-time data processing, carbon footprint monitoring, air quality, security, and privacy in IIoT, emissions management, predictive maintenance, edge computing, machine learning, blockchain technology, smart buildings, smart cities, environmental sustainability.

Хананов Кирилл Русланович

Аспирант, Российская академия народного хозяйства
и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
mr.hananov@gmail.com

Аннотация. В научной статье рассматривается применение промышленных Интернет вещей (IIoT) для мониторинга, измерения и визуализации в режиме реального времени сокращения выбросов CO₂ в промышленных и экологических областях. Выявлены ключевые проблемы использования Интернет вещей, которые включают в себя совместимость, безопасность данных и масштабируемость системы. Описаны проблемы, с которыми сталкиваются предприятия при использовании IIoT: вопросы совместимости разнородного оборудования и программного обеспечения, обеспечение надежной безопасности конфиденциальных и критически важных данных, передаваемых по сетям, а также сложности масштабирования систем для охвата крупных предприятий или распределенных объектов. Статья подчеркивает необходимость комплексного подхода к реализации IIoT для эффективного управления углеродным следом.

Ключевые слова: промышленный Интернет вещей (IIoT), мониторинг CO₂, обработка данных в реальном времени, мониторинг углеродного следа, качество воздуха, безопасность и конфиденциальность в IIoT, управление выбросами, прогностическое обслуживание, периферийные вычисления, машинное обучение, технология блокчейн, умные здания, умные города, экологическая устойчивость.

Введение

Промышленный Интернет вещей (IIoT) представляет собой технологическую платформу, обеспечивающую интеграцию интернета вещей (IoT) в производственные процессы. Современные системы IIoT предоставляют возможность сбора и анализа данных о качестве атмосферного воздуха и динамике выбросов диоксида углерода (CO₂), что способствует оптимизации экологической устойчивости, операционной эффективности и надежности промышленных объектов [1, 2]. Ключевым элементом архитектуры таких систем выступают сенсорные устройства, реализующие принципы Industry 4.0 и Industry 5.0 посредством межмашинного взаимодействия в режиме реального времени [2].

Современные исследования демонстрируют, что комбинация периферийных и облачных вычислений, методов машинного обучения (ML), искусственного ин-

теллекта (ИИ), а также систем безопасного управления данными позволяет создавать интеллектуальные платформы для непрерывного мониторинга эмиссии CO₂ и внедрения устойчивых производственных практик [2, 3]. Применение беспроводных технологий, включая LoRaWAN, обеспечивает масштабируемый мониторинг газовых выбросов в распределенных промышленных системах [4, 5].

Важным аспектом является интеграция IIoT с инструментами визуализации данных, что повышает доступность экологической информации для принятия управленческих решений в секторах производства, логистики и энергетики [6–9]. Актуальность мониторинга CO₂ обусловлена не только требованиями регуляторных органов (например, директивами ЕС, предусматривающими финансовые санкции за несоблюдение нормативов [10]), но и необходимостью минимизации рисков для здоровья персонала, связанных с недостаточной вентиляцией помещений.

Когнитивные системы на базе IIoT позволяют трансформировать первичные данные о выбросах в структурированные цифровые метрики, что упрощает идентификацию источников загрязнения, прогнозирование экологических рисков и разработку стратегий снижения углеродного следа промышленных предприятий [4, 9, 11, 12].

Методология

Для анализа преимуществ и проблем внедрения систем IIoT методология включает обзор литературы, технический анализ и практические примеры использования. Литература основана на материалах баз данных, таких как IEEE Xplore, ScienceDirect и Google Scholar, для сбора разнообразной информации, включая теоретические статьи, примеры использования и практические приложения. Определенные критерии использовались для отбора и оценки собранной литературы на основе ее соответствия целям исследования.

Анализ литературы

Литература была разделена на категории по общим темам и разделам, и для уменьшения смещения данных использовалась триангуляция из нескольких источников. Чтобы глубже понять преимущества и ограничения систем IIoT и датчиков CO₂, был проведен технический анализ для сравнения производительности систем IIoT и практических реализаций. Сюда входила надежность скоростей обработки данных, аспекты безопасности и точность системы при обнаружении выбросов CO₂.

Теоретические основы

Современные системы Промышленного Интернета вещей (IIoT) интегрируют сенсорные устройства, методы анализа данных и беспроводные коммуникационные протоколы для оптимизации промышленных процессов и управления производственными активами [1, 2]. Режим реального времени в мониторинге выбросов CO₂ играет критическую роль в обеспечении энергоэффективности, производственной надежности и экологической устойчивости промышленных объектов [13, 14]. Архитектура дата-центров IIoT формирует концептуальную основу Индустрии 4.0/5.0, обеспечивая синергию между киберфизическими системами (CPS) и распределенными вычислительными ресурсами [15].

Структура типовой IIoT-платформы включает:

- Сенсорные узлы для сбора параметров эмиссии;
- Микроконтроллерные системы предварительной обработки данных;
- Гибридные вычислительные среды (edge-fog-cloud computing) для анализа, хранения и принятия решений в режиме реального времени [15].

Такая конвергенция технологий обеспечивает сквозную автоматизацию мониторинга углеродного следа в кросс-отраслевом контексте.

Современные методы детектирования CO₂ эволюционируют благодаря внедрению сенсоров нового поколения, таких как недисперсионные инфракрасные (NDIR) датчики, характеризующихся высокой точностью измерений и устойчивостью к внешним помехам [5]. Актуальным трендом является разработка компактных измерительных систем на базе микроконтроллерных платформ, интегрированных с мультисенсорными массивами [11].

Архитектура систем Промышленного Интернета вещей (IIoT), ориентированных на мониторинг, количественную оценку и визуализацию выбросов углерода (CO₂), представляет собой многоуровневую структуру, интегрирующую аппаратные и программные модули [1]. Ключевые компоненты включают:

- Сенсорные узлы: датчики CO₂ для непрерывного сбора данных по выбросам;
- Коммуникационные интерфейсы: протоколы передачи данных (LoRaWAN, ZigBee);
- Вычислительные платформы: алгоритмы предобработки (фильтрация шумов) и анализа (машинное обучение, регрессионные модели);
- Системы визуализации: дашборды для оперативного отображения метрик эмиссии.

Данная конфигурация обеспечивает сквозную интеграцию от сбора сырых данных до генерации аналитических инсайтов, критических для оптимизации экологического менеджмента.

Основными источниками данных выступают сенсорные устройства, являющиеся базовыми элементами IIoT-систем и обеспечивающими детектирование и количественную оценку параметров окружающей среды, включая концентрацию CO₂. Выбор сенсорных технологий определяется компромиссом между точностью, временем отклика, энергопотреблением и стоимостью. Интеграция сенсоров в IIoT-архитектуры позволяет реализовать:

- Дистанционный мониторинг через облачные платформы;
- Автоматизацию корректирующих действий на основе предиктивной аналитики [13].

Критическим аспектом интеграции сенсоров CO₂ в системы IIoT является выбор стратегии обработки данных, определяющий производительность и масштабируемость системы. В современных архитектурах применяются два подхода:

- Периферийные вычисления — локальная обработка данных вблизи источника генерации (сенсорные узлы, шлюзы), обеспечивают мини-

мальную задержку за счет локальной обработки данных без передачи в централизованные облака;

- Облачные вычисления — делегирование обработки на удаленные серверы с распределенными ресурсами. Оптимальное решение для задач, требующих масштабируемых вычислительных ресурсов и обработки больших данных (Big Data) в распределенных IIoT-средах.

Оба метода решают задачи анализа данных, но отличаются по ключевым метрикам: задержкам, энергоэффективности, стоимости эксплуатации. Ниже представлены основные преимущества и ограничения обоих методов (Табл.1).

Таблица 1.

Преимущества и ограничения периферийных и облачных вычислений

Наименование	Периферийные вычисления	Облачные вычисления
Преимущества	Снижение сетевой нагрузки, Повышение отказоустойчивости, Соблюдение нормативов GDPR	расширенная аналитика (кластерный анализ) централизованное управление, гибридные архитектуры для балансировки нагрузки
Ограничения	Ограниченная вычислительная мощность; Дефицит памяти	Задержки передачи данных, Риски кибербезопасности

Обеспечение передачи данных между компонентами систем Промышленного Интернета вещей (IIoT) и вычислительными платформами (периферийные/облачные серверы) представляет собой критически важный функциональный модуль, определяющий производительность и надежность экологического мониторинга. Для реализации данного процесса применяются беспроводные коммуникационные протоколы, выбор которых осуществляется на основе следующих параметров [4]:

- Пропускная способность;
- Радиус действия;
- Энергоэффективность.

Соблюдение регламентов по уровню CO₂ (например, директивы ЕС по промышленной эмиссии) и требований безопасности труда (стандарт ISO 45001) требует реализации аналитических алгоритмов с задержкой менее 200 мс. В условиях промышленных объектов с повышенными требованиями к кибербезопасности рекомендованы следующие основные меры: сквозное шифрование и аутентификация данных [4, 12].

Исследования показали, что модели ИИ поддерживают системы IIoT с производительностью и точностью

данных, что делает такие подходы более эффективными, чем предыдущие системы. Кроме того, ИИ может также предоставлять такие функции, как экспертные предложения на основе данных системы IIoT, и способствовать улучшенному анализу при работе с обширными наборами данных [8,10]. Алгоритмы МО также могут быть интегрированы для выявления потенциальных аномалий в потоках данных до того, как они станут критическими. Соответственно, алгоритмы МО могут использоваться для поддержки анализа исторических данных и прогнозистических моделей, которые могут прогнозировать концентрации CO₂ на основе факторов окружающей среды. Кроме того, методы МО могут помочь поддерживать автоматизированные ответы для обработки изменений выбросов CO₂, такие как запуск вентиляции путем отправки оповещений в реальном времени менеджерам объекта или поддержка с калибровками путем динамического прогнозирования и исправления дрейфов датчика CO₂ [8].

Визуализация данных в системах промышленного Интернета вещей

Инструменты визуализации данных являются важным компонентом архитектуры систем IIoT, обеспечивающим трансформацию «сырых» данных, полученных от сенсорных сетей мониторинга CO₂, в когнитивно-оптимизированные форматы. С помощью современных инструментов визуализации данные системы IIoT можно визуализировать в легко понятных форматах, таких как диаграммы, графики и тепловые карты. Различные инструменты визуализации, такие как Tableau, Power BI и другие специализированные панели управления данными, были разработаны для предоставления удобных интерфейсов для выходных данных системы IIoT.

Использование веб-панелей управления, работающих на смартфонах, планшетах или настольных компьютерах, является еще одним современным способом визуализации и демонстрации данных из систем IIoT [10,11]. Эти интерфейсы, работающие на основе веб-технологий, таких как HTML, CSS и JavaScript, позволяют пользователям и заинтересованным сторонам отслеживать выбросы CO₂ в реальном времени и управлять данными системы IIoT непосредственно в промышленных условиях.

Проблемы безопасности и конфиденциальности в системах IIoT

Интеграция систем IIoT в промышленные среды может представлять сложные проблемы безопасности, требующие внимания [15]. Проблемы безопасности включают уязвимости встроенного ПО устройств, небезопасные протоколы связи и управление несколькими взаимосвязанными устройствами. Кроме того, разнообразие систем IIoT и отсутствие стандартизированных

стандартов безопасности еще больше усложняют аспекты безопасности ландшафта систем IIoT. Физические системы в сочетании с цифровыми элементами управления особенно подвержены кибератакам, нарушают работу и потенциально могут нанести значительный ущерб. Однако решение этих проблем безопасности может обеспечить повышенную целостность данных и предотвратить несанкционированный доступ к данным, особенно при работе с конфиденциальной промышленной информацией [11].

Несмотря на стоящие проблемы, меры безопасности в последние годы достигли успехов. Эти достижения включают внедрение различных протоколов и методов безопасности для устранения рисков безопасности, связанных с системами IIoT, протоколами аутентификации и шифрованием [10]. Интеграция блокчейна в системы IIoT может создавать защищенные от несанкционированного доступа транзакции данных и поддерживать целостность данных. Более того, периферийные вычисления могут поддерживать протоколы безопасности, обрабатывая данные системы IIoT локально и тем самым сокращая объем данных, передаваемых по уязвимым сетям. Другие рекомендации включают развертывание систем обнаружения вторжений, регулярное обновление прошивки и принятие фреймворков безопасности, которые устраняют как аппаратные, так и программные уязвимости. Также разрабатываются платформы промежуточного программного обеспечения для облегчения интеграции и решения проблем взаимодействия между устройствами системы IIoT [10] и наоборот, внедрение систем предиктивного обслуживания, используемых глубокими алгоритмами машинного обучения для эффективного анализа данных из систем IIoT, также может обеспечить эффективность поддержки и функции безопасности системы.

При этом вопросы безопасности и конфиденциальности в системах IIoT имеют решающее значение для промышленных операций. Исследования показали, что системам IIoT нужны защищенные сети для защиты целостности данных, конфиденциальности и доступности [15]. Процедуры безопасности охватывают фреймворки обнаружения вторжений, протоколы аутентификации на основе криптографии и обнаружение вторжений на основе аномалий для ограниченных сетей IIoT.

Варианты использования

Как уже упоминалось, промышленный Интернет вещей (IIoT) представляет собой прогресс в повышении эффективности и производительности в различных промышленных областях [12]. Например, заводы используют системы IIoT для контроля состояния оборудования и оптимизации производства, сокращая время простоя и повышая эффективность [14].

Кроме того, используя системы IIoT и подключенные датчики для мониторинга производственных процессов, компании могут улучшить процедуры качества продукции и эффективно поддерживать меры безопасности сотрудников.

Мониторинг окружающей среды Системы IIoT могут контролировать окружающую среду, предоставляя данные в реальном времени о таких факторах, как состояние почвы, воздуха или воды. Например, в исследовании использовалась система IIoT для отслеживания условий выращивания грибов путем интеграции датчиков для мониторинга выбросов CO₂, влажности и температуры для обеспечения оптимальных условий роста и повышения производительности. В других исследованиях системы IIoT использовались для измерения влажности и уровня питательных веществ для упрощения методов ведения сельского хозяйства и эффективного поддержания экологических ресурсов [12, 13].

Заключение

В статье проанализированы возможности промышленного интернета вещей (IIoT) для мониторинга, анализа и визуализации уровней выбросов CO₂ в промышленности и окружающей среде. Реализация IIoT-систем обеспечивает непрерывный контроль качества воздуха и выбросов углекислого газа в режиме реального времени за счёт интеграции датчиков, алгоритмов обработки данных и инструментов визуализации [2, 4]. Применение передовых технологий, включая высокоточные сенсоры CO₂, методы слияния данных, искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО), позволяет повысить точность измерений и оптимизировать управление эмиссиями в промышленных процессах [1].

Потенциал IIoT не ограничивается производственными объектами: такие системы могут быть адаптированы для сельского хозяйства, умных городов и управления зданиями, где контроль CO₂ критически важен для экологической устойчивости и социального благополучия [4, 8, 12].

Перспективные направления развития IIoT-платформ для мониторинга CO₂ включают:

1. Повышение энергоэффективности и масштабируемости решений, включая внедрение периферийных вычислений и блокчейн-технологий для обеспечения безопасности данных [9].
2. Интеграцию ИИ-сервисов и МО-алгоритмов для прогнозирования, обнаружения аномалий и предиктивного обслуживания систем [2].
3. Разработку стандартизированных протоколов связи и межплатформенных процессов, обеспечивающих совместимость устройств от разных производителей. Это позволит создать гибкие экосистемы для кросс-отраслевого управления выбросами [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Le T., Oktian Y., Kim H.: XGBoost для несбалансированных многоклассовых систем обнаружения вторжений промышленного Интернета вещей. *Sustainability* 14(14), 8707 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14148707>
2. Mofidul R.B., Rahman M.H., Jang Y.M.: Система сбора данных об энергии в реальном времени, обнаружения аномалий и мониторинга: реализация защищенной, надежной и интегрированной глобальной инфраструктуры IIoT с периферийной и облачной ИИ. *Sensors* 22(22), 8980–8980 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22228980>
3. Каур М., Хан М., Гупта С., Альсаиди А.: Внедрение блокчейна с сетями 5G для промышленного Интернета вещей: последние достижения, проблемы и потенциальные решения. *IEEE Access* 10, 981–997 (2022). <https://doi.org/10.1109/access.2021.3138754>
4. Матеев В., Маринова И.: Распределенная система Интернета вещей для мониторинга CO₂ с помощью LoRaWAN (2021). <https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513682>
5. Дипан С., Бурадкар М., Акхила П., Кумар К.С., Шарма М.К. и Чакраварти М.К.: Прогностическое обслуживание с использованием ИИ для промышленных систем Интернета вещей. В: Труды 2024 г. (2024). <https://doi.org/10.1109/ACCAI61061.2024.10601983>
6. Бансод Н.В., Хор У.В.: Система мониторинга качества воздуха на основе Интернета вещей, стр. 1106–1114 (2021). <https://doi.org/10.48175/IJARSC-1536>
7. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M.: Промышленный интернет вещей: вызовы, возможности и направления. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 14(11), 4724–4734 (2018). <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2852491>
8. Wójcicki K., Biegańska M., Paliwoda B., Górna J.: Интернет вещей в промышленности: профилирование исследований, применение, вызовы и возможности — обзор. *Energies* 15(5), 1806 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15051806>
9. Saragea Ş, Toma M., Micu D., Fratila G., Badea G.: Стратегия программного обеспечения для управления двигателем внутреннего сгорания и электродвигателем на гибридном электромобиле, оснащённом ремённым стартер-генератором и автоматизированной механической коробкой передач. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1235(1), 012035 (2022). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1235/1/012035>
10. Salhaoui M., Guerrero-González A., Arioua M., Ortiz F., Oualkadi A., Torregrosa C.: Интеллектуальная промышленная система мониторинга и управления IoT на основе БПЛА и облачных вычислений, применённая к бетонному заводу. *Датчики* 19(15), 3316 (2019). <https://doi.org/10.3390/s19153316>
11. Ullo S., Sinha G.: Достижения в области интеллектуальных систем мониторинга окружающей среды с использованием IoT и датчиков. *Датчики* 20(11), 3113 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20113113>
12. Маулана Г.Г., Амина С., Берллиянто А.Н.: Внедрение системы мониторинга производства с использованием IIoT на основе мобильного приложения. *Журнал RESTI* 7(5) (2023). <https://doi.org/10.29207/resti.v7i5.5221>
13. Аль-Рубайе С., Кадхум Э., Ни К., Анпалаган А.: Промышленный Интернет вещей, движимый Платформа SDN для обеспечения устойчивости интеллектуальных сетей. *IEEE Internet Things J.* 6(1), 267–277 (2019). <https://doi.org/10.1109/jiot.2017.2734903>
14. Джамил Ф., Джаваид У., Хан В., Аман М., Перваиз Х., Янтти Р.: Обучение с подкреплением в сетях IIoT на базе блокчейна: обзор последних достижений и открытых проблем. *Устойчивость* 12(12), 5161 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12125161>
15. Саркар А., Гош Д., Гангули К., Гош С., Саха С.: Исследование Интернета вещей для мониторинга и анализа CO₂ в реальном времени. *arXiv.org*, т. abs/2308.03780 (2023). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2308.03780>

© Хананов Кирилл Русланович (mr.hananov@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»