

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 3. С. 232-242. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 3. P. 232-242. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 621.3

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-232-242

БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Тимур Тальгатович Юмалин¹, Ренат Баязитович Салихов¹,
Вали Хызырович Абдрахманов¹, Тимур Ренатович Салихов¹,
Константин Владимирович Важдаев^{1,2}, Татьяна Дмитриевна Мунтянова²

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Константин Владимирович Важдаев, vazhdaev.k@gmail.com

Аннотация. Достижения в технологии коммерческого производства компактных интегральных схем сделали возможной интеграцию беспроводных передатчиков, обработки сигналов и датчиков в одном корпусе интегральной схемы. Такие решения представляют собой недорогое средство связи с физическим миром, и могут иметь приложения в таких различных областях, как безопасность, управление производством, исследование и мониторинг окружающей среды. Мы обрисовываем в общих чертах проблемы проектирования системы для распределенной сенсорной сети, в которой каждый узел имеет ограниченный источник энергии и канал связи. Узлы должны установить синхронную сеть с несколькими переходами, определить местоположения и взаимодействовать для таких целей, как ретрансляция сигнала и передача данных на серверное устройство. Слияние недорогой беспроводной связи, вычислений и датчиков привело к созданию нового поколения интеллектуальных устройств. Использование десятков и тысяч таких устройств в самоорганизующихся сетях привело к созданию новой технологии, называемой беспроводными сенсорными сетями. В этой статье мы рассмотрим пример применения такой сети на основе беспроводного протокола передачи данных Bluetooth Low Energy (BLE), который дал серьезный толчок в развитии беспроводных сенсоров. В купе с органическими полимерами, которые используются в качестве сенсорного слоя, можно добиться высокой энергоэффективности, и селективной чувствительности в мониторинге. Также стоит отметить быстрое и дешевое производство электроники на основе органических полимеров. Благодаря полупроводниковым и гибким свойствам органических полупроводниковых материалов гибкая органическая электроника стала основой нашей технологии. Область органической электроники вступает в коммерческую фазу. Появление на рынке первых прототипов на основе органических транзисторов, изготовленных из растворов, призвано расширить существующее присутствие на рынке органических электронных устройств. Мы рассмотрим некоторые ключевые требования к производительности для рабочих устройств. Мы также рассмотрим некоторые из важных достижений в области проектирования полупроводников и технологий изготовления устройств и обсудим некоторые технические проблемы, которые необходимы при оптимизации продуктов следующего поколения.

Для цитирования

Юмалин Т.Т., Салихов Р.Б., Абдрахманов В.Х., Салихов Т.Р., Важдаев К.В., Мунтянова Т.В. Беспроводная система контроля качества окружающей среды // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 3. С. 232-242. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-3-232-242>.

Ключевые слова

беспроводные датчики;
беспроводные системы;
системы мониторинга; Bluetooth Low Energy; Bluetooth Mesh;
органическая электроника;
органические датчики

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания (код научной темы FZWU-2023-0002).

© Юмалин Т.Т., Салихов Р.Б., Абдрахманов В.Х., Салихов Т.Р., Важдаев К.В., Мунтянова Т.В., 2023

Original article

WIRELESS ENVIRONMENTAL QUALITY MONITORING SYSTEM

Timur T. Yumalin¹, Renat B. Salikhov¹, Vali Kh. Abdrakhmanov¹,
Timur R. Salikhov¹, Konstantin V. Vazhdaev^{1,2}, Tatyana D. Muntyanova²

¹Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

²Ufa state petroleum technological university, Ufa, Russia

Corresponding author

Konstantin V. Vazhdaev, vazhdaev.k@gmail.com

Abstract. Advances in commercial compact integrated circuit technology have made it possible to integrate wireless transceivers, signal processing, and sensors in a single integrated circuit package. Such solutions provide a low-cost means of communication with the physical world and can have applications in areas as diverse as security, production management, research and environmental monitoring. We outline the challenges of system design for a distributed sensor network in which each node has a limited power source and communication channel. The nodes must establish a synchronous network with multiple hops, determine locations, and communicate for purposes such as relaying a signal and transmitting data to a server device. The confluence of low-cost wireless, computing, and sensors has created a new generation of smart devices. The use of tens and thousands of such devices in self-organizing networks has led to the creation of a new technology called wireless sensor networks. In this article, we will consider an example of the use of such a network based on the Bluetooth Low Energy (BLE) wireless data transfer protocol, which gave a serious impetus to the development of wireless sensors. Together with organic polymers, which are used as a sensor layer, it is possible to achieve high energy efficiency and selective sensitivity in monitoring. It is also worth noting the fast and cheap production of electronics based on organic polymers. Due to the semiconductor and flexible properties of organic semiconductor materials, flexible organic electronics has become the core of our technology. The field of organic electronics is entering a commercial phase. The appearance on the market of the first prototypes based on organic transistors made from solutions is intended to expand the existing presence in the market of organic electronic devices. We'll look at some of the key performance requirements for working devices. We will also look at some of the important advances in semiconductor design and device manufacturing technologies and discuss some of the technical challenges that are needed to optimize next generation products.

Keywords

sensors; wireless systems; monitoring systems; Bluetooth Low Energy; Bluetooth Mesh; organic electronics; organic sensors

Acknowledgment

The study was carried out within the framework of the state task (scientific code topics FZU-2023-0002).

For citation

Yumalin T.T., Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.Kh., Salikhov T.R., Vazhdaev K.V., Muntyanova T.V. *Besprovodnaya sistema kontrolya kachestva okruzhayushchej sredy [Wireless environmental quality monitoring system] // Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 3. pp. 232-242. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-3-232-242>.

Введение

Постоянно растущие проблемы, связанные с качеством воздуха внутри и снаружи помещений, утечкой промышленного газа, свежестью продуктов питания и медицинской диагностики, требуют миниатюрных датчиков газа с превосходной чувствительностью, избирательностью, стабильностью, низким энергопотреблением, экономичностью и длительным сроком службы. Органические сенсоры, отличающиеся структурным разнообразием, скоростью производства и низкой це-

ной, открывают большие перспективы для изготовления различных устройств для различных приложений, включая мониторинг газов в окружающей среде.

Развитие технологий датчиков, таких как микроэлектромеханические системы (МЭМС), беспроводная связь, встроенные системы, распределенная обработка и приложения для беспроводных датчиков, в последнее время способствовали значительным изменениям в беспроводной сенсорной сети (wireless sensors network- WSN). Это помогает и

улучшает производительность труда как в сфере промышленности, так и в повседневной жизни. Сеть беспроводных датчиков широко используется во многих областях, особенно для наблюдения и мониторинга в сельском хозяйстве и мониторинге среды обитания. Мониторинг окружающей среды стал важной областью контроля и защиты, обеспечивая систему в реальном времени и связь управления с физическим миром. Интеллектуальная и интеллектуальная система беспроводной сенсорной сети может собирать и обрабатывать большой объем данных с самого начала мониторинга и управления качеством воздуха, условиями дорожного движения и погодными ситуациями.

За последние пару десятилетий беспроводная связь расширилась с невероятной скоростью, проникая в любую среду, во многом благодаря развитию Интернета вещей (IoT). Ключевой инфраструктурой IoT являются беспроводные сенсорные сети. WSN состоят из набора пространственно распределенных электронных устройств, обычно называемых узлами, развернутых в интересующей области, которые собирают и обмениваются информацией, полученной из своего окружения. Потенциальные области применения WSN в основном соответствуют парадигме IoT, начиная от домашней автоматизации и заканчивая промышленным и производственным контролем, транспортом, автомобильными сетями, сельским хозяйством и пр. Использование органических полимеров при производстве сенсоров значительно удешевляет и ускоряет внедрение систем мониторинга, а использование масштабируемых беспроводных систем передачи данных таких как Wi-Fi и Bluetooth позволяет быстро настроить прием-передачу между устройствами с низким энергопотреблением [1-2]. Чтобы внедрить хорошую систему мониторинга, необходимо соблюдать несколько требований. Очевидно, что WSN это альтернативный способ заменить традиционный метод, который использует силу человека для наблюдения за окружающей средой. Также доказано, что эти подходы могут улучшить производительность системы, обеспечить удобный и эффективный метод, а также могут выполнять функциональные требования.

Концепция WSN хорошо подходит для достижения быстрого и удобного мониторинга за окружающей средой. Имея в работе не-

сколько десятков портативных беспроводных датчиков небольшого размера, можно быстро покрыть территорию (улицу или помещение), необходимую для контроля, например, группой экологов. Собирать информацию можно через смартфон или любое устройство, поддерживающее технологии Wi-Fi или Bluetooth Low Energy (BLE), это значительно повышает доступность подобного решения. Датчики, ввиду их маленького размера и отсутствия проводов, можно расположить абсолютно на любой поверхности в большом количестве, а использование органических сенсоров не ограничивает нас мониторингом влажности, температуры и т.д., а позволяет наблюдать за конкретными химическими соединениями, требующими мониторинга. Так, например, можно моментально измерить уровень опасных летучих соединений в помещении. Использование преимуществ беспроводной связи в компактности и простоте использования, современных протоколов связи в энергоэффективности, а органических полимеров в широком спектре регистрируемых веществ и простой технологии производства устройств, позволит добиться простого, портативного и функционального решения для мониторинга. Не менее важным преимуществом является доступность всех вышеописанных технологий. Наработки в данном направлении уже имеются и требуют лишь модернизации программной части и постановки производственного цикла [3].

Полимерные органические сенсоры

Органические полевые транзисторы (OFET) или органические тонкопленочные транзисторы используют органические полупроводники, включая ковалентные органические каркасы и металлоорганические каркасы в качестве материалов для активных каналов, что обеспечивает высокую скорость изготовления электронных изделий на гибких пластиковых подложках в мягких условиях при сверхнизкой стоимости [4–9]. OFET имеют широкий спектр применений, таких как гибкие дисплеи, интеллектуальные этикетки, интеллектуальная упаковка, различные типы датчиков, носимая электроника, имплантируемая электроника и т. д. В частности, датчики на основе OFET имеют сверхнизкую стоимость и могут быть интегрированы с другими электроникой в качестве встроенных датчиков, что делает их идеальными для быстрорасту-

щей технологии Интернета вещей (IoT), носимой электроники и медицинских приложений.

Существенные задачи стоят в создании сенсорных покрытий, в данной работе мы рассматриваем тонкопленочные сенсорные устройства на основе органических полимеров. Это обусловлено множеством преимуществ, о которых более подробно будет сказано далее в соответствующей главе. В целом, датчики на основе органических полимеров имеют давнюю историю исследований, уже существуют датчики углекислого и газа, аммиака, метана и прочих опасных соединений, здесь необходимо выделить наиболее оптимальные и стабильные полимеры, о них также будет подробнее сказано далее. Главной задачей в создании беспроводной системы датчиков является коммерчески выгодный производственный процесс, благо использование органических полимеров позволяет создать простой производственный цикл ввиду их простого синтеза, также использование готового протокола Bluetooth Low Energy снимает внушительную часть разработки системы приема-передачи данных.

В нашей работе, в роли сенсоров предлагается использовать многослойные тонкопленочные структуры на основе органических соединений. Органические сенсоры бывают трех типов: емкостные, резистивные и транзисторные, отличающиеся низким энергопотреблением [10–11]. Такие сенсоры могут контролировать температуру и влажность воздуха, а также мониторить наличие вредных веществ в атмосфере таких как пары аммиака, угарного газа, окислы азота, водорода и метана [12–13].

Активным сенсорным слоем являются тонкие пленки растворимых форм полианилинов, полииндолов, фуллеренов, РСВМ, а также полимерных композитов с углеродными нанотрубками и оксидами графена (рисунок 1). Пленки электродов из алюминия или меди получают термическим осаждением в вакууме, а полимерные слои формируются методом центрифугирования из раствора.

Проводящие полимеры представляют собой важный класс органических материалов с повышенным сопротивлением внешним воздействиям. Среди них полимеры ПАНИ вы-

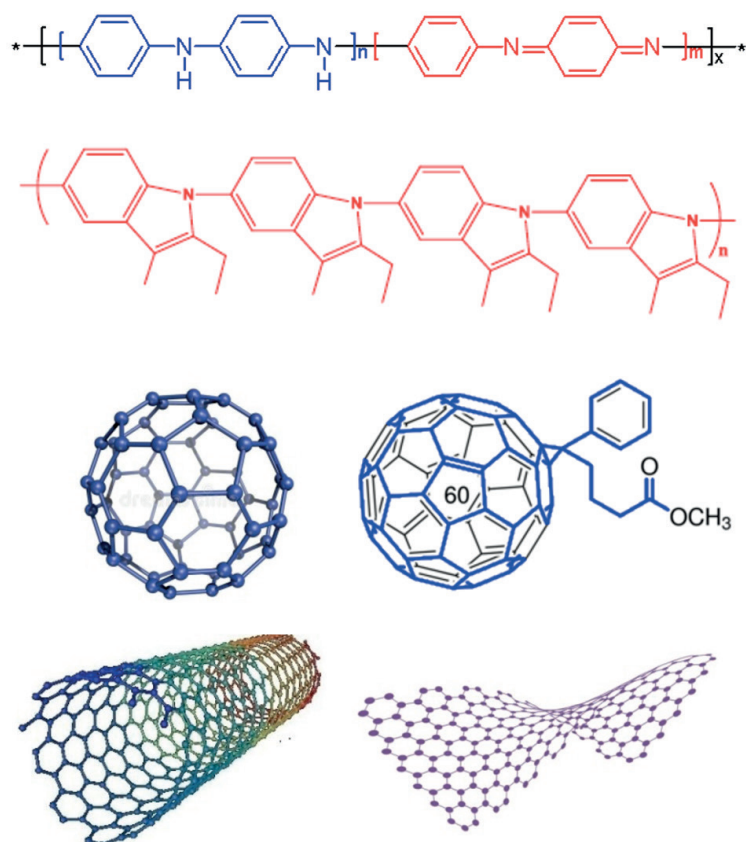


Рисунок 1. Органические соединения: полианилин (ПАНИ), полииндол, фуллерен, РСВМ, углеродная нанотрубка, оксид графена

Figure 1. Organic compounds: polyaniline (PANI), polyindole, fullerene, RSVM, carbon nanotube, graphene oxide

звали широкий интерес из-за универсальности их использования в сочетании с простотой синтеза, высоким выходом и хорошей устойчивостью к окружающей среде, а также с хорошим откликом на детектируемые молекулы. Кроме того, из ПАНИ можно формировать различные структуры с различной морфологией, а возможность получения нановолокон в дополнение к тонким пленкам открывает возможность быстрого развития сверхчувствительных химических сенсоров с улучшенной технологичностью и функциональностью. Производные ПАНИ, фуллерена и прочих полимеров позволяют создавать различного типа сенсоры, как по структуре, так и по типу действия (рисунок 2).

Многофункциональность нанокompозитов ПАНИ широко использовалась в различных приложениях с впечатляющими результатами. Синергетический эффект между составляющими сделал эти материалы особенно привлекательными в качестве чувствительных элементов для газов и биологических агентов. Нанокompозиты ПАНИ не только позволяют обнаруживать при комнатной температуре большое количество горючих или токсичных газов и загрязняющих веществ с высокой селективностью и чувствительностью, они также позволяют иммобилизовать биорецепторы, такие как ферменты, антиген-антитела и нуклеиновые кислоты, на их поверхности для обнаружения множества биологических агентов путем сочетания биохимических и электрохимических реакций. Предпринимаются усилия по пониманию механизма работы нанокompозитов ПАНИ, что расширит их потенциальные области применения.

Спрос на небольшие недорогие датчики, которые могут быть изготовлены из гибкого пластика, привел к быстрому развитию синтетической методологии в области электроники

на основе органических материалов. Это связано с тем, что органические материалы можно обрабатывать при низких температурах, даже близких к комнатной температуре, что дает возможность очень дешевого производства. Гибкость и малый вес, которыми обладают органические материалы, позволяют использовать множество простых и недорогих методов нанесения покрытий, включая литье из раствора, струйную печать, штамповку, нанесение покрытия погружением, а также напылением и вращением, изготовление рулонов.

Программное обеспечение

Обмен данными в такой системе имеет немаловажную роль. Беспроводная и портативная специфика ставит определенные задачи, которые требуется решить для эффективной работы системы. Передача данных должна происходить на оптимальной дистанции и при разумном энергопотреблении. Передача сигнала на большие дистанции (свыше 50 метров) требует высоких энергозатрат, что не стыкуется с идеей портативности. Однако, сегодня существуют решения, которые могут обеспечить беспроводную передачу данных при низком уровне энергопотребления, корнем всего этого является «интернет вещей».

С программной частью комплекса все довольно тривиально, существует множество модулей BLE от разных производителей в разных ценовых категориях, каждый из которых имеет свои библиотеки для работы с данным протоколом. Так, например, модули от Nordic Semiconductor имеют высокое качество и подробную документацию, однако цена данного решения значительно превосходит большинство аналогов, к тому же, ввиду мировой экономической ситуации, найти подобные решения в свободном доступе не всегда возможно,

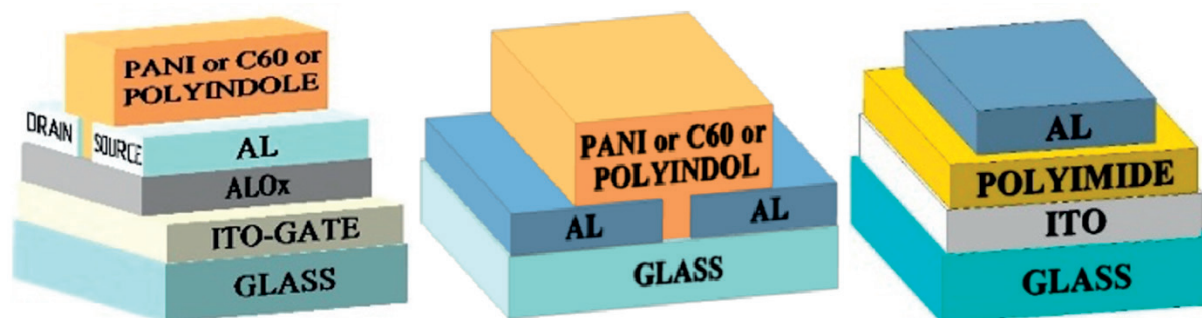


Рисунок 2. Типы органических сенсоров: транзисторный, резистивный и емкостной

Figure 2. Types of organic sensors: transistor, resistive and capacitive

особенно если речь идет о массовом производстве. Более дешевыми аналогами являются китайские модели типа ESP32 от компании Espressif Systems, они также имеют подробную документацию и свободно доступны для покупки, однако данные модули могут иметь не самые стабильные технические характеристики. Так или иначе, выбрать контроллер связи можно в широком ценовом диапазоне и не представляет какого-либо препятствия для дальнейшей разработки.

Для приема и передачи данных предлагается использовать технологии Wi-Fi или Bluetooth. Обе данные технологии уже широко используются для создания устройств интернета вещей [14–15].

Небольшие, компактные и встроенные датчики широко используются в повседневной жизни для широкого круга приложений (например, носимые устройства, домашняя техника, системы электронного здравоохранения и т.д.). BLE сочетает в себе хорошую производительность, низкое энергопотребление и широкое распространение. Основные моменты можно резюмировать следующим образом: пропускная способность теоретически может достигать предела ~230 кбит/с, но реальные приложения, проанализированные в этом обзоре, показывают пропускную способность, ограниченную ~100 кбит/с; максимально достижимая дальность строго зависит от мощности радиостанции и достигает нескольких десятков метров; максимальное количество узлов в сети зависит от параметров подключения, архитектуры сети и конкретных характеристик устройства, но обычно не превышает 10; энергопотребление и задержка во многом моделируются и анализируются и строго зависят от огромного количества параметров. Большинство этих характеристик основано на аналитических моделях, но для понимания реальных пределов необходимы строгие экспериментальные оценки.

Главной инновационной характеристикой BLE по сравнению с Classic Bluetooth и другими беспроводными технологиями является низкое энергопотребление. В BLE, как в режиме вещания, так и в режиме подключения РЧ-модуль включается для отправки или получения данных, а затем выключается в целях экономии энергопотребления.

Чтобы оценить энергопотребление BLE, необходимо оценить средний ток, потребляемый в течение активной фазы в каждом ре-

жиме связи. На самом деле, когда модуль находится в фазе сна, потребление тока составляет примерно 1 мкА (при 3 В опорного напряжения) [16].

В режиме соединения исследовать энергопотребление сложнее, потому что оно сильно варьируется в зависимости от нескольких параметров, таких как полезная нагрузка пакета, интервал связи, количество ведомых устройств на ведущее устройство, тип связи (односторонняя или круговая) и так далее.

Особый интерес стоит уделить технологии Bluetooth Mesh, которая позволяет не только передавать данные с одного устройства на другое, но и предоставляет строить ячеистые сети «один ко многим» или «многие ко многим», это увеличивает дальность связи и дает возможность сети к самовосстановлению (если один элемент выйдет из строя, остальные смогут передавать сообщения между собой). Bluetooth Mesh работает как механизм лавинной рассылки без установления соединения, когда каждое устройство транслирует как свои данные, так и данные, принадлежащие другим устройствам. Хотя BLE работает как в режиме рекламы, так и в режиме подключения, устройства BLE Mesh используют только первый тип, используя три частотных канала, как определено базовой спецификацией Bluetooth. Условная схема сети Bluetooth Mesh показана на рисунке 3.

Основными преимуществами технологии BLE можно назвать малое энергопотребление благодаря высоко оптимизированному протоколу и открытый доступ к официальной спецификации. Безопасность передачи данных обеспечивает 128-битная криптография AES-CCM для шифрования передаваемых пакетов, которую производит сам контроллер Bluetooth Low Energy [17].

Габариты датчика не будут превышать десятка сантиметров. Масса датчика также будет иметь минимальное значение, значительную часть от общей массы будет составлять элемент питания. Печатная плата, выполненная по технологии двухстороннего монтажа, будет иметь компактные размеры не более 5–10 см в зависимости от компонентной базы и трассировки.

Таким образом, такой датчик можно будет без труда разместить на любой поверхности. Для питания можно использовать аккумуляторные батареи, например, разновидности AA или AAA. Известно, что устройства на техно-

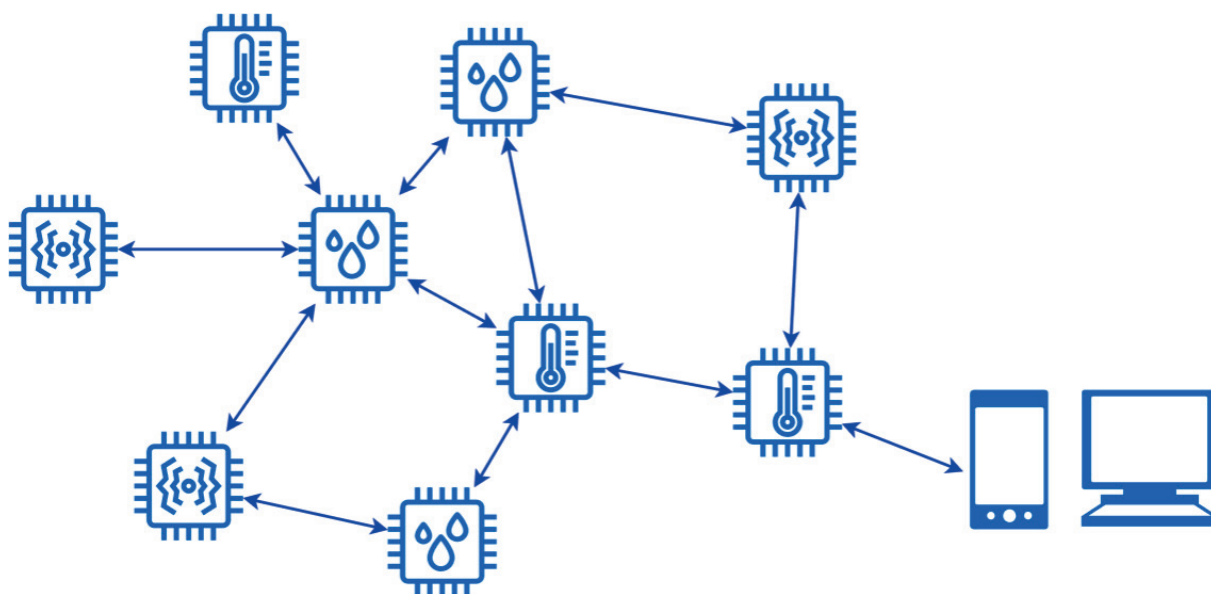


Рисунок 3. Схема сети BluetoothMesh, множество датчиков (узлов) путем ретрансляции данных передают информацию к серверному устройству

Figure 3. BluetoothMesh network diagram, multiple sensors (nodes) by data relay transmit information to server device

логии BluetoothMesh, при использовании аккумулятора емкостью 235 мАч, потенциально могут работать до 21 месяца [18-19].

Сценарии применения

В нефтегазовом секторе беспроводные датчики могут играть важную роль в мониторинге и обеспечении безопасности. Согласно отчетам Международного энергетического агентства, нефтегазовая промышленность является одной из наиболее рискованных отраслей, подверженных авариям и утечкам, которые могут привести к серьезным экологическим и экономическим последствиям. В связи с этим, надежная система мониторинга имеет важное значение для своевременного обнаружения и предотвращения возможных проблем.

Использование беспроводных датчиков позволяет собирать разнообразные данные, необходимые для мониторинга нефтегазовой инфраструктуры. Например, данные о температуре, давлении, вибрации и газовых концентрациях могут помочь определить аномалии, предупредить о возможных утечках или аварийных ситуациях. Кроме того, беспроводные датчики позволяют установить сеть мониторинга на большой площади, что особенно важно для нефтегазовых объектов, которые могут располагаться на обширных территориях.

Одной из основных преимуществ беспроводных датчиков является их гибкость и мо-

бильность. Датчики могут быть размещены в труднодоступных или опасных зонах, не требуя проводной инфраструктуры. Это позволяет легко изменять конфигурацию и добавлять новые датчики по мере необходимости.

Использование беспроводных датчиков в нефтегазовом мониторинге также способствует оптимизации работы и повышению эффективности. Системы могут быть интегрированы с автоматизированными системами управления и диспетчерскими центрами, что обеспечивает быструю передачу данных и реагирование на изменения в реальном времени.

Существует несколько подходов к обнаружению чрезвычайных ситуаций, при которых данные от датчиков передаются на базовую станцию или в командный центр с использованием сетей беспроводных датчиков, но этот конкретный вариант использования не является основным направлением данной работы. Вместо этого основное внимание уделяется оценке использования технологии Bluetooth Mesh для создания энергоэффективной маршрутизации к узлу мобильного приемника (которые могут применяться в сценарии обнаружения утечек или в других ситуациях, в которых мобильному узлу может потребоваться сбор данных из сенсорной сети). Концептуальная схема системы приведена на рисунке 4.

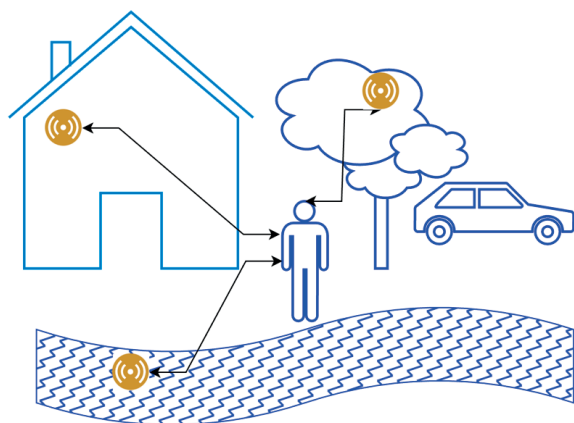


Рисунок 4. Пример схемы распределения датчиков мониторинга окружающей среды. Человек выступает в качестве контролирующего, например, эколога

Figure 4. An example of an environmental monitoring sensor distribution scheme. A person acts as a supervisor, for example, an ecologist

Помимо приложений для обнаружения пожаров, различные отрасли могут извлечь выгоду из сбора данных с использованием мобильных приемников в беспроводных ячеистых сетях. В сельском хозяйстве датчики могут быть развернуты для наблюдения за огромными участками земли. Телефоны рабочих или даже дроны могут использоваться для сбора данных с этих датчиков. Этого можно достичь с помощью мобильного WMN, где датчики могут динамически обмениваться данными и пересылать данные серверам по мере их подключения к ним. Точно так же датчики, развернутые на заводе, могут обмениваться данными для отправки в Интернет (например, на сервер, который управляет заводом). Они также могут отправлять данные другим узлам с намерением узлов принять быстрое решение, при этом информация даже не должна попадать в сеть.

Выводы

Прогресс в разработке сенсоров на основе органических полимеров за последние два десятилетия в значительной степени стимулировался достижениями в разработке и синтезе органических компонентов, подходами к приготовлению пленок, а также исследованиями их физико-химических свойств. Исследования показывают, что органические полимеры являются многообещающими кандидатами для материалов датчиков газа, которые открывают большие перспективы для мониторинга качества воздуха внутри и снаружи помещений,

утечки промышленного газа и др. Уникальные характеристики и различные архитектурные преобразования органических материалов значительно улучшают характеристики обнаружения различных газов с точки зрения чувствительности, селективности, дрейфа, энергопотребления и т. д. на различных механизмах преобразования, включая химико-резистивные, емкостные, а также полевые транзисторы. Используя преимущества органической электроники и современных протоколов передачи данных, уже можно создать коммерчески интересные системы мониторинга окружающей среды. Энергоэффективная и всем известная технология BLE позволят развернуть сеть с датчиками без использования специального оборудования или персонала, устройством для обмена данными с датчиками может быть любой смартфон или ноутбук, так как все современные гаджеты уже поддерживают технологию BLE. Как показано в этой работе, проектирование и реализация сети для обмена данными между датчиками с использованием технологии Bluetooth Low Energy является очень удобным и интересным решением. Многие инструменты и функции, используемые в качестве стандартной передачи данных, уже встроены в спецификации как на аппаратном, так и на программном уровне. Так, например, вам не нужно вручную выполнять проверку целостности данных с помощью контрольных сумм (CRC), так как это уже реализовано в самом протоколе. Также очень удобен инструмент от получателя, с помощью которого можно гарантировать получение данных на противоположной стороне, что также освобождает разработчиков от реализации подобного функционала. Автоматическое получение последних актуальных данных практически полностью исключает запросы на чтение от клиентских устройств. Весь этап разработки системы обмена данными значительно сокращается.

Сеть Bluetooth полностью совместима и масштабируема. Эта технология может служить основой для сетей корпоративного уровня, инструментов управления и автоматизации для умных домов и офисов, а также решений для отслеживания активности.

Таким образом, использование энергоэффективного беспроводного протокола BLE позволяет быстро создавать автономные измерительные системы с использованием любых

датчиков. Отсутствие кабелей повышает надежность и масштабируемость системы, что значительно упрощает процесс настройки и дальнейшей эксплуатации. Bluetooth Low Energy предназначен для обеспечения очень низкого энергопотребления устройств. Такие производители микросхем, как Cambridge Silicon Radio, Dialog Semiconductor, Nordic Semiconductor, STMicroelectronics, Cypress

Semiconductor, Silicon Labs и Texas Instruments, уже производят маломощные чипсеты, оптимизированные для Bluetooth.

Беспроводные технологии используются в промышленности уже более трех десятилетий, но их внедрение идет медленно, поскольку новые технологии должны работать с существующей инфраструктурой или проводными сетями.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Салихов Р.Б., Юмалин Т.Т., Салихов Т.Р. Органические электронные сенсоры для автоматизированной системы экологического мониторинга // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сб. тр. XIX международ. науч.-практ. конф. М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА, 2022. С. 162-167. EDN: JIIBEI.
2. Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.K., Yumalin T.T. Experience of Using Bluetooth Low Energy to Develop a Sensor Data Exchange System Based on the NRF52832 Microcontroller // Materials of IEEE International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, Russia. 2021. P. 229-233. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559492.
3. Salikhov T.R., Abdrakhmanov V.K., Yumalin T.T. Application of Organic Sensors in Wireless Environmental Monitoring Systems // Materials of IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). Ufa, Russia. 2021. P. 500-503. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657269.
4. Mittal P., Yadav S., Negi S. Advancements for Organic thin Film Transistors: Structures, Materials, Performance Parameters, Influencing Factors, Models, Fabrication, Reliability and Applications // Materials Science in Semiconductor Processing. 2021. Vol. 133. Article No. 105975. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105975.
5. Liu Y., Li B., Ma C.Q., Huang F., Feng G., Chen H., Bo Z. Recent Progress in Organic Solar Cells (Part I Material Science) // Science China Chemistry. 2022. Vol. 65. P. 224-268. DOI: 10.1007/s11426-021-1180-6.
6. Park H.L., Lee T.W. Organic and Perovskite Memristors for Neuromorphic Computing // Organic Electronics. 2021. Vol. 98. Article No. 106301. DOI: 10.1016/j.orgel.2021.106301.
7. Ansari A.A., Malhotra B.D. Current Progress in Organic-Inorganic Hetero-Nano-Interfaces Based Electrochemical Biosensors for Healthcare Monitoring // Coordination Chemistry Reviews. 2022. Vol. 452. Article No. 214282. DOI: 10.1016/j.ccr.2021.214282.
8. Wang W., Zhao W., Xu H., Liu S., Huang W., Zhao Q. Fabrication of Ultra-Thin 2D Covalent Organic Framework Nanosheets and their Application in Functional Electronic Devices // Coordination Chemistry Reviews. 2021. Vol. 429. Article No. 213616. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213616.
9. Freund R., Zaremba O., Arnauts G., Ameloot R., Skorupskii G., Dincă M., Wuttke S. The Current Status of MOF and COF Applications // Angewandte Chemie International Edition. 2021. Vol. 60, Issue 45. P. 23975-24001. DOI: 10.1002/anie.202106259.
10. Salikhov R.B., Lachinov A.N., Rakhmiev R.G., Gadiev R.M., Yusupov A.R., Salazkin, S.N. Chemical Sensors Based on Nano-Polymer Films // Measurement Techniques. 2009. Vol. 52, Issue 4. P. 427. DOI: 10.1007/s11018-009-9277-4.
11. Andrianova A.N., Salikhov R.B., Latypova L.R., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Mustafin A.G. The Structural Factors Affecting the Sensory Properties of Polyaniline Derivatives // Sustainable Energy and Fuels. 2022. Vol. 6, Issue 14. P. 3435-3445. DOI: 10.1039/D2SE00405D.
12. Okur S. Identification Of Mint Scents Using a QCM Based e-Nose // Chemosensors. 2021. Vol. 9, Issue 2. P. 31. DOI: 10.3390/chemosensors9020031.
13. Salikhov R.B. Functionalized Polyanilines: Influence of the Surface Morphology on the Electrophysical and Sensory Properties of thin Films Based on them // Letters on Materials. 2021. Vol. 11, Issue 2. P. 140-145. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-2-140-145.
14. Sharma R.R. Design of Distribution Transformer Health Management System Using IoT Sensors // Journal of Soft Computing Paradigm. 2021. Vol. 3, Issue 3. P. 192-204. DOI: 10.36548/jscp.2021.3.005.
15. Kopetz H., Steiner W. Internet of Things // Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 325-341. DOI: 10.1007/978-3-031-11992-7_13.
16. Liu C., Zhang Y., Zhou H. A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2093. Article No. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
17. Lacava A. Securing Bluetooth Low Energy Networking: An Overview of Security Procedures and Threats // Computer Networks. 2022. Vol. 211. Article No. 108953. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108953.
18. Darroudi S.M., Caldera-Sánchez R., Gomez C. Bluetooth Mesh Energy Consumption: A Model // Sensors. 2019. Vol. 19, Issue 5. Article No. 1238. DOI: 10.3390/s19051238.
19. Katila R., Gia T.N., Westerlund T. Analysis of Mobility Support Approaches for Edge-Based IoT Systems Using High Data Rate Bluetooth Low Energy 5 // Computer Networks. 2022. Vol. 209. Article No. 108925. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108925.
20. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды // ТАСС. URL: <https://tass.ru/info/6712527> (дата обращения: 10.04.2023).

REFERENCES

1. Salikhov R.B., Yumalin T.T., Salikhov T.R. Organicheskie elektronnye sensory dlya avtomatizirovannoi sistemy ekologicheskogo monitoringa [Organic Electronic Sensors for Automated Environmental Monitoring System]. *Sbornik trudov XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii»* [Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference «Innovative, Information and Communication Technologies»]. Moscow, Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA Publ., 2022, pp. 162-167. EDN: JIIBEI. [in Russian].
2. Salikhov R.B., Abdrakhmanov V.K., Yumalin T.T. Experience of Using Bluetooth Low Energy to Develop a Sensor Data Exchange System Based on the NRF52832 Microcontroller. *Materials of IEEE International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, Russia, 2021, pp. 229-233. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559492.
3. Salikhov T.R., Abdrakhmanov V.K., Yumalin T.T. Application of Organic Sensors in Wireless Environmental Monitoring Systems. *Materials of IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa, Russia, 2021, pp. 500-503. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657269.
4. Mittal P., Yadav S., Negi S. Advancements for Organic thin Film Transistors: Structures, Materials, Performance Parameters, Influencing Factors, Models, Fabrication, Reliability and Applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, Vol. 133, Article No. 105975. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105975.
5. Liu Y., Li B., Ma C.Q., Huang F., Feng G., Chen H., Bo Z. Recent Progress in Organic Solar Cells (Part I Material Science). *Science China Chemistry*, 2022, Vol. 65, pp. 224-268. DOI: 10.1007/s11426-021-1180-6.
6. Park H.L., Lee T.W. Organic and Perovskite Memristors for Neuromorphic Computing. *Organic Electronics*, 2021, Vol. 98, Article No. 106301. DOI: 10.1016/j.orgel.2021.106301.
7. Ansari A.A., Malhotra B.D. Current Progress in Organic-Inorganic Hetero-Nano-Interfaces Based Electrochemical Biosensors for Healthcare Monitoring. *Coordination Chemistry Reviews*, 2022, Vol. 452, Article No. 214282. DOI: 10.1016/j.ccr.2021.214282.
8. Wang W., Zhao W., Xu H., Liu S., Huang W., Zhao Q. Fabrication of Ultra-Thin 2D Covalent Organic Framework Nanosheets and their Application in Functional Electronic Devices. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, Vol. 429, Article No. 213616. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213616.
9. Freund R., Zaremba O., Arnauts G., Ameloot R., Skorupskii G., Dincă M., Wuttke S. The Current Status of MOF and COF Applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, Vol. 60, Issue 45, pp. 23975-24001. DOI: 10.1002/anie.202106259.
10. Salikhov R.B., Lachinov A.N., Rakhmiev R.G., Gadiev R.M., Yusupov A.R., Salazkin, S.N. Chemical Sensors Based on Nano-Polymer Films. *Measurement Techniques*, 2009, Vol. 52, Issue 4, pp. 427. DOI: 10.1007/s11018-009-9277-4.
11. Andriianova A.N., Salikhov R.B., Latypova L.R., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Mustafin A.G. The Structural Factors Affecting the Sensory Properties of Polyaniline Derivatives. *Sustainable Energy and Fuels*, 2022, Vol. 6, Issue 14, pp. 3435-3445. DOI: 10.1039/D2SE00405D.
12. Okur S. Identification Of Mint Scents Using a QCM Based e-Nose. *Chemosensors*, 2021, Vol. 9, Issue 2, pp. 31. DOI: 10.3390/chemosensors9020031.
13. Salikhov R.B. Functionalized Polyanilines: Influence of the Surface Morphology on the Electrophysical and Sensory Properties of thin Films Based on them. *Letters on Materials*, 2021, Vol. 11, Issue 2, pp. 140-145. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-2-140-145.
14. Sharma R.R. Design of Distribution Transformer Health Management System Using IoT Sensors. *Journal of Soft Computing Paradigm*, 2021, Vol. 3, Issue 3, pp. 192-204. DOI: 10.36548/jscp.2021.3.005.
15. Kopetz H., Steiner W. Internet of Things. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Cham, Springer International Publishing, 2022. pp. 325-341. DOI: 10.1007/978-3-031-11992-7_13.
16. Liu C., Zhang Y., Zhou H. A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2093, Article No. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
17. Lacava A. Securing Bluetooth Low Energy Networking: An Overview of Security Procedures and Threats. *Computer Networks*, 2022, Vol. 211, Article No. 108953. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108953.
18. Darroudi S.M., Caldera-Sánchez R., Gomez C. Bluetooth Mesh Energy Consumption: A Model. *Sensors*, 2019, Vol. 19, Issue 5, Article No. 1238. DOI: 10.3390/s19051238.
19. Katila R., Gia T.N., Westerlund T. Analysis of Mobility Support Approaches for Edge-Based IoT Systems Using High Data Rate Bluetooth Low Energy 5. *Computer Networks*, 2022, Vol. 209, Article No. 108925. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.108925.
20. Lesnye pozhary v Rossii. Statistika i antirekordy [Forest Fires in Russia. Statistics and Anti-Records]. TASS. Available at: <https://tass.ru/info/6712527> (accessed 10.04.2023). [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тимур Тальгатович Юмалин, аспирант кафедры «Физическая электроника»; младший научный сотрудник лаборатории «Дизайн новых материалов», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Timur T. Yumalin, post-graduate student, Physical electronics department; junior researcher, scientific laboratory of «Design of new materials», Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

Ренат Баязитович Салихов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Renat B. Salikhov, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of Infocommunication technologies and nanoelectronics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

Вали Хызырович Абдрахманов, кандидат технических наук доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Vali Kh. Abdrakhmanov, candidate of technical sciences, associate professor, Infocommunication technologies and nanoelectronics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

Тимур Ренатович Салихов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Timur R. Salikhov, candidate of physical and mathematical sciences associate professor, Infocommunication technologies and nanoelectronics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

Константин Владимирович Ваздаев, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Инфокоммуникационные технологии и нанoeлектроника», Уфимский университет науки и технологий; доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Konstantin V. Vazhdaev, candidate of technical sciences, associate professor, Infocommunication technologies and nanoelectronics department, Ufa university of science and technology; associate professor, Water supply and sanitation department, Ufa state petroleum technological university, Ufa, Russia

vazhdaev.k@gmail.com

Татьяна Дмитриевна Мунтянова, студент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Tatyana D. Muntyanova, student, Ufa state petroleum technological university, Ufa, Russia

Статья поступила в редакцию 15.03.2023; одобрена после рецензирования 02.04.2023; принята к публикации 30.05.2023.

The article was submitted 15.03.2023; approved after reviewing 02.04.2023; accepted for publication 30.05.2023.