

АВТОНОМНЫЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНЫЙ УЗЕЛ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS WIRELESS SENSOR NODE FOR CONTROL OF THE GAS ENVIRONMENT ON INDUSTRIAL FACILITIES

A. Sukhanov

Summary. The article shows the results of wireless sensor node development for creation of the self-organized wireless sensor node for systems of industrial safety and environmental monitoring. It also describes the architecture of an autonomous wireless sensor node, which consists of digital data processing platform and power supply. Detailed information, technical characteristics and principle of operation of each hardware block of a wireless sensor node is described. The article present the algorithm of wireless sensor node operation which includes the following operation modes: sleep mode, suspended mode, measurement mode, data receive, data transfer.

Keywords: wireless sensor node, Zigbee, gas sensor, 3D SIP, pollution monitoring.

Суханов Александр Владимирович

НПК «Технологический центр» МИЭТ», г. Зеленоград
aksernar@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты разработки беспроводного сенсорного узла для построения самоорганизующихся беспроводных сенсорных сетей для систем промышленной безопасности и экологического мониторинга. Рассматривается архитектура автономного беспроводного сенсорного узла, который состоит из цифровой платформы обработки данных с газового сенсора и источника питания. Представлена детальная информация, технические характеристики и принцип работы каждого аппаратного блока беспроводного сенсорного узла. Описан алгоритм работы устройства, который включает в себя следующие режимы: спящий, ожидания, измерения, ожидания, приема данных, передачи данных.

Ключевые слова: беспроводной сенсорный узел, Zigbee, газовый сенсор, 3D SIP, система мониторинга.

Введение

Задача предупреждения и предотвращения опасных ситуаций, связанных с наличием горючих и токсичных газов в атмосфере, является актуальной и своевременной. В настоящее время на крупных производственных объектах химической промышленности используются проводные автоматизированные системы контроля токсичных и взрывоопасных газов. В технологических процессах, связанных с добычей, транспортировкой, переработкой, получением, хранением и применением горючих и токсичных газов, всегда имеется высокая вероятность образования взрывоопасных и токсичных смесей [1–2]. Данная задача требует тщательной проработки, применения современных методов и средств контроля концентраций опасных газов [3]. В настоящее время задача автоматизированного контроля газовой среды на объектах промышленности является очень актуальной.

Для её решения можно использовать систему мониторинга на основе беспроводной сенсорной сети (БСС). БСС в настоящее время являются актуальной передовой технологией в области самоорганизующихся систем контроля и управления различными процессами [4–5].

В рамках проекта был разработан беспроводной сенсорный узел (БСУ), который позволяет определять кон-

центрацию токсичных и горючих газов. Разработанный БСУ выполняет функции газоанализатора, но имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими портативными приборами.

Разработанный БСУ предназначен для построения самоорганизующихся и энергонезависимых БСС [6–7], которые могут использоваться на крупных промышленных предприятиях. Газоанализатор может функционировать в сетевой системе мониторинга контроля утечек горючих и токсичных газов, как конечное устройства или как сетевой маршрутизатор.

На рисунке 1 представлены изготовленные БСУ в пластиковых ABS корпусах со встроенными солнечными панелями, которые были изготовлены на 3D принтере.

Конструктивно-схемотехническое решение БСУ представляет собой две платы (рисунок 2), которые соединяются между собой при помощи штыревых разъемов. Верхняя плата — это интеллектуальный источник питания (ИИП), нижняя плата — это универсальная цифровая платформа (УЦП). Макет БСУ изготовлен по технологии поверхностного монтажа с контролем сборочно-монтажных операций современными оптическими или рентгеновскими методами.

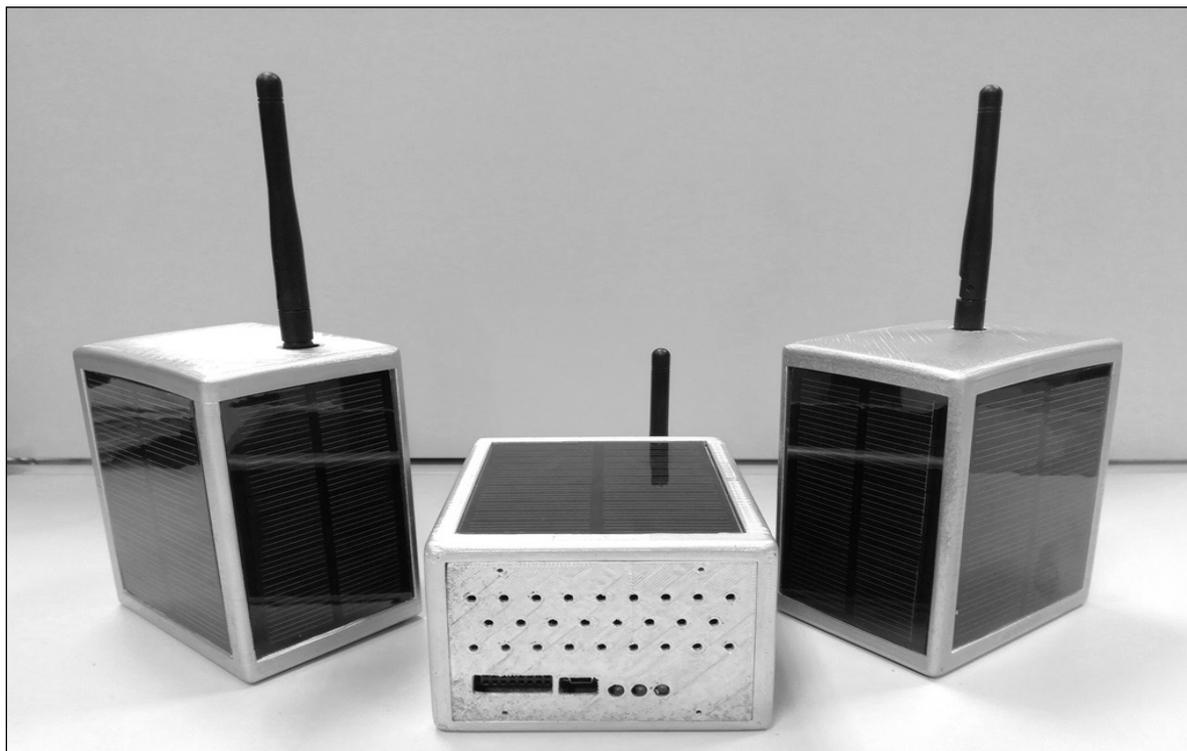


Рис. 1. Изготовленные беспроводные сенсорные узлы

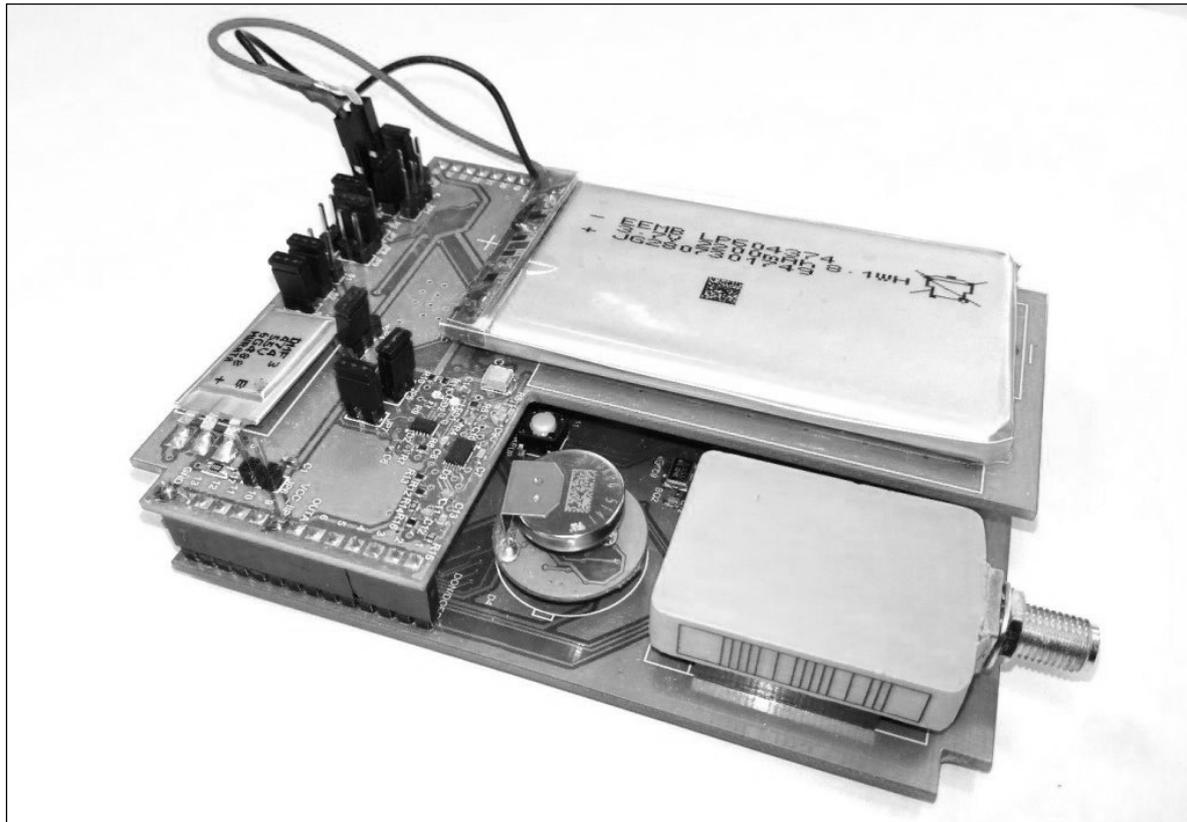


Рис. 2. Беспроводной сенсорный узел без корпуса

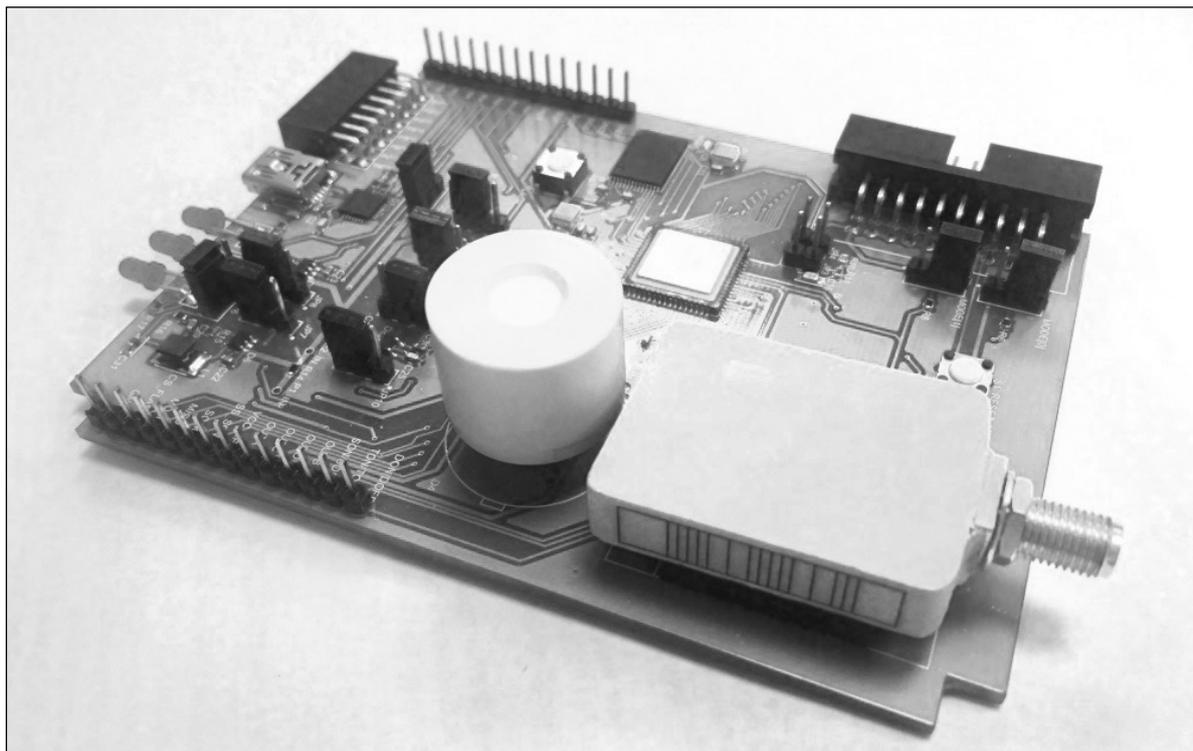


Рис. 3. Универсальная цифровая платформа с приемопередающей микросборкой стандарта IEEE802.15.4

Универсальная цифровая платформа

УЦП служит для построения самоорганизующихся и энергонезависимых БСС, реализующую интеграцию газовых сенсоров различного физического типа (электрохимический, термокаталитический, оптический, полупроводниковый). УЦП обеспечивает передачу измерительной и служебной информации по беспроводной сети на основе открытого стандарта IEEE802.15.4.

Состав макета УЦП включает в себя управляющий российский 32-разрядный микроконтроллер, микросборку приемопередатчика, интегрированный источник питания постоянного тока с программно-аппаратной поддержкой режима пониженного энергопотребления, цифровой газовый датчик (ЦГД), флеш-память 16 Мб, блок интерфейсов JTAG и USB для отладки.

Главным компонентом в УЦП является 32-разрядный микроконтроллер фирмы Миландр 1986ВЕ4 в металлокерамическом корпусе [8]. Управляющий микроконтроллер УЦП обладает встроенной Flash памятью программ и построен на базе низкопотребляемого процессорного RISC ядра ARM Cortex-M0. Управляющий микроконтроллер УЦП обеспечивает работу алгоритма обработки и преобразования первичных сигналов, кодирование и сохранение измерительной информации

в автономном режиме, и передачу данных в составе БСС на расстояние не менее 100 метров. Микроконтроллер УЦП работает с флэш-памятью по последовательного синхронному цифровому интерфейсу SPI. Флэш-память используется для архивации информации полученной от ЦГД, в случае если маршрутизатор или координатор БСС не доступен. Конструктивно-схемотехническая реализация УЦП позволяет перепрограммировать встроенный микроконтроллер посредством JTAG и разъема USB с использованием режима UART загрузчика.

В состав УЦП входит микросборка приемопередатчика стандарта IEEE802.15.4, изготовленная по перспективной технологии миниатюризации 3D-SiP (Three-dimensional System-In-A-Package). Внешний вид платы УЦП с приемопередающей микросборкой с SMA разъемом для подключения антенны и штыревыми выводами для посадки на печатную плату представлена на рисунке 3.

Используемая SiP технология [9–10] заключается в упаковке нескольких электронных подсистем (ячеек либо стекных плат) в одну функциональную высокоинтегрированную систему на уровне кристаллов. Такая система содержит 2 или более уровней. В роли таких уровней выступают технологические подложки, на которые монтируются различные корпусные компоненты, либо кристаллы. В технологии для соединения подсистем используется

шариковый припой BGA (Ball grid array — массив шариков), термокомпрессионная микросварка, присоединение перевернутого кристалла (Flip Chip), присоединение кристалла к выводам ленточного кристалла (TAB — Tape Automated Bonding), а также вертикальные межсоединительные колонки VIP (Vertical Interconnect Pillar).

В БСУ применяется 3D SiP микросборка с межсоединительными колонками изготовленная в НПК «Технологический центр». В состав используемой микросборки входят микросхема приемопередатчика ZigBee, миниатюрный 32-разрядный микроконтроллер, микросхема памяти, микросхема усилителя радиочастотного сигнала, SMA разъем. Разработанное программное обеспечение 3D SiP микросборки поддерживают работу по алгоритмам сетевого стека, который соответствует стандарту IEEE802.15.4. Основное преимущество технологии ZigBee заключается в том, что она при малом энергопотреблении поддерживает не только простые варианты топологии сети, но и самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся ячеистую топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений.

Цифровой газовый датчик

Для реализации интеграции аналоговых газовых сенсоров различного типа в одном автономном устройстве был разработан цифровой газовый датчик (ЦГД). В состав ЦГД входит управляющий миниатюрный микроконтроллер, который оцифровывает значение полученное с аналогового чувствительного элемента. Всего было разработано 4 разных ЦГД для контроля разных газов: CH₄, CO, O₂, NO₂. ЦГД имеет 10 выводов с сигналами аналогового и цифрового питания, а также последовательным периферийным интерфейсом SPI. На рисунке 3 ЦГД расположен рядом с 3D микросборкой. ЦГД позволяет обмениваться информацией используя цифровой интерфейс SPI для последовательного обмена данными между микросхемами. В качестве ведущего шины обычно выступает микроконтроллер УЦП. В рамках проекта разработан специальный протокол ЦГД, который стоит запроса управляющего микроконтроллера системы и ответа датчика. Разработанные команды в протоколе ЦГД позволяют узнать информацию о датчике, о концентрации газа, версии ПО, калибровочной концентрации, дате изготовления, даты калибровки и т.д. Концепция использования ЦГД позволяет создать легко обслуживаемый удаленный сенсорный узел, который в отличие от аналоговых датчиков, является калиброванным средством измерения и обеспечивает автоматическую температурную коррекцию и самодиагностику. Использование ЦГД позволяет автоматически проводить дополнительные операции по калибровке и переконфигурации системы, поскольку все необходимые данные содержатся в памяти датчика и могут быть прочитаны с помощью специальных команд протокола.

Интегрированный источник питания

В состав платы УЦП входит интегрированный источник питания. ИИП УЦП работает с 5В входного напряжения полученного от интеллектуального источника питания, принимает входные контрольные сигналы от управляющего микроконтроллера УЦП. Контрольные цифровые сигналы позволяют организовать программно-аппаратную поддержку пониженного энергопотребления. В состав интегрированного источника питания УЦП входят 4 понижающих малопотребляющих преобразователя напряжения для цифрового и аналогового питания. В интегрированном источнике питания используется только конденсаторы с ультранизким эквивалентным последовательным сопротивлением, что позволяет уменьшить токи утечки. Первый малощумящий понижающий преобразователь напряжения с выходным напряжением 3,3 В и ограничением по току 150 мА используется для подачи питания управляющего микроконтроллера УЦП и микросхемы флеш-памяти. Второй и третий малощумящий понижающий преобразователь напряжения используется для цифрового и аналогового питания ЦГД. Микроконтроллер УЦП используя свой цифровой порт задает контрольный логический уровень на втором преобразователе, который включает и отключает цифровое питание газового сенсора. Отдельное отключаемое цифровое питание цифрового газового сенсора позволяет уменьшить энергопотребление УЦП. Если использовать цифровое и аналоговое питание от одного малощумящего понижающего преобразователя, то может случиться ситуация, когда в момент разогрева термодаталитического газового сенсора будет падать общее напряжение питания и управляющий микроконтроллер сенсора отключиться (Reset). Четвертый преобразователь с настраиваемым выходным напряжением и ограничением по току 250 мА используется для питания 3D микросборки

Интеллектуальный источник питания

При разработке устройства был проведен анализ энергопотребления УЦП, который показал, что основная часть потраченной энергии тратится на прием, прослушивание и передачу данных, а не на обработку или сохранение данных полученных от ЦГД. Для продолжительной автономной работы БСУ потребовалось разработка специализированного источника питания с использованием альтернативного источника энергии, который позволял бы в продолжительный солнечный день самостоятельно зарядить литий-полимерную аккумуляторную батарею.

Разработанный ИИП состоит из микросхемы заряда аккумулятора от солнечного харвестера с функцией отслеживания точки максимальной мощности, цифровой

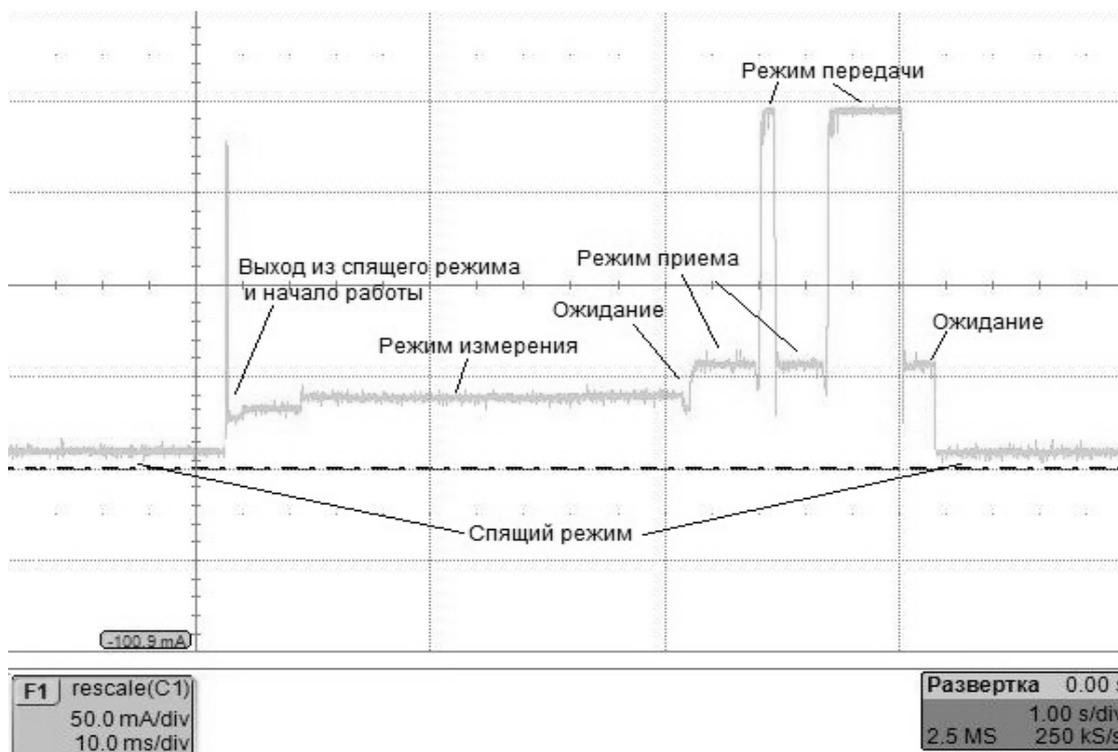


Рис. 4 График энергопотребления БСУ в различных режимах работы

малопотребляющей микросхемы индикации уровня заряда, высокоэффективного понижающе-повышающего преобразователя напряжения, литий-полимерного аккумулятора, ионистора и солнечных панелей. Все микросхемы в интеллектуальном источнике питания изготовлены фирмой Texas Instruments и имеют низкий ток потребления и спящие режимы работы [11–12]. Выходное напряжение солнечной батареи, которая подключается к источнику питания может быть в диапазоне 3,5–18 В, максимальный ток заряда аккумулятора — 800 мА. Источник питания позволяет заряжать литий-полимерный аккумулятор и от шины USB перед первоначальным автономным использованием БСУ. Использование литий-полимерного аккумулятора дает ряд преимуществ, среди которых высокая энергетическая плотность, низкий саморазряд, отсутствие «эффекта памяти». В случае проблем с литий-полимерным аккумулятором в схеме присутствует тонкопленочная конденсаторная ячейка емкостью 1 Ф, который в любой момент может увеличить ток отдаваемый потребителю. Используемый литий-полимерный аккумулятор может иметь емкость от 1500 до 32000 мАч (теоретически). Во время успешных лабораторных испытаний использовался литий-полимерный аккумулятор емкостью 2200 мАч (8,1 Вт*ч).

Цифровая малопотребляющая микросхема индикации уровня заряда использует специализированный алгоритм для замера емкости аккумуляторной батареи,

состояния заряда, времени непрерывной работы, время до отключения, напряжения аккумуляторной батареи и температуры.

Управляющий микроконтроллер УЦП использует последовательную синхронную шину данных I2C для получения информации от микросхемы индикации уровня заряда. Периодически информация о состоянии аккумулятора источник питания передается в БСС. Использование специализированных микросхем работы с аккумулятором позволяет оператору сбора данных БСС знать состояние каждого БСУ и во время заменить полностью разряженную испорченную батарею. Использование ИИП позволяет накапливать энергию в литий-полимерном аккумуляторе и отдавать ее потребителю — УЦП, высокоэффективный понижающе-повышающий преобразователь напряжения устанавливает на входе питания УЦП 5В при максимальном токе 1200 мА.

Энергопотребление беспроводного сенсорного узла

Основная проблема, с которой сталкиваются в настоящее время технические специалисты при обслуживании БСС — это постоянная замена аккумуляторов у автономных устройств. Эффективность использования энергии имеет первостепенное значение для работы разработанного БСУ в составе БСС. Энергопотребление

БСУ в основном зависит от следующих параметров: расстояние передачи данных и наличие препятствий между узлами, объем передаваемой информации, частота передачи данных, энергопотребление используемых компонентов в ЦГД, структура сети, скорость выхода узла из спящего режима и т.д.

Реализованный алгоритм работы БСУ включает в себя следующие режимы: спящий, ожидания, измерения, ожидания, приема данных, передачи данных. Энергопотребление устройства за один энергоцикл представлено на рисунке 4. При анализе энергопотребления можно выделить следующие состояния: короткий этап выхода устройства из спящего режима, режим измерения концентрации газа со всех ЦГД, выход из спящего режима приемопередатчика, серия приема и передачи информации в БСС, этап перехода устройства в спящий режим. Как видно из формы сигнала тока, энергия в основном затрачивается на прослушивание эфира, на отправку полученной информации, на спящий режим и выход из спящего режима.

На основе разработанного алгоритма, БСУ с электрохимическими сенсорами может успешно работать автономно только с аккумулятором не менее 5 лет, при частоте передачи данных в БСС — 30 секунд. Встроенный ИИП и солнечные батареи, которые конструктивно расположены в корпусе устройства, позволят значительно увеличить время автономной работы устройства.

Выводы

Разработанное устройство позволяет выявлять в атмосфере взрывоопасные и токсичные газы и может использоваться в системах предотвращения аварийных ситуаций на производстве совместно с исполнительными устройствами. Автономная работа в течение длительного промежутка времени, возможность передачи данных на большие расстояния по беспроводному каналу, скорость развертывания и настройки системы мониторинга, а также низкое энергопотребление обуславливают высокую конкурентоспособность разработанного устройства. Системы мониторинга на основе разработанного БСУ позволяют локализовать развитие опасных ситуаций на ранних стадиях, а также увеличивают период времени для принятия соответствующих защитных мер и действий по устранению аварийных ситуаций. Система мониторинга на основе БСУ позволяет снизить стоимость каналов связи для передачи данных, а также снизить стоимости функционирования системы вследствие удаленного управления. Полученный научный задел позволит перейти к непосредственному созданию широчайшего спектра устройств нового поколения для систем мониторинга и управления.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0225, уникальный идентификатор RFMEFI57716X0225).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. — М.: Мир, 1989, С. 672
2. Бесчастнов М. В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. — М.: Химия, 1991, С. 432
3. Гринчук А. П., Таратын И. А., Хатько В. В. Разработка газовых сенсоров для контроля горючих газов // Приборы и методы измерений. 2010. № 1 (1). С. 51–55
4. Wheeler. Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee. IEEE Communication Magazine, 45(4):70–77, 2007
5. Kay Romer, Mattern Friedemann, «The Design Space of Wireless Sensor Networks». IEEE Wireless Communications, 2004, pp. 54–61.
6. Perillo M. A., Heinzelman W. B. Wireless Sensor Network Protocols // Handbook of Algorithms for Wireless Networking and Mobile Computing. 2005. P. 813–842.
7. William Stallings, Wireless communications and networks, Prentice Hall, USA, 2002, pp. 110–113.
8. Миландр. «Спецификация Микроконтроллер на базе процессорного ядра ARM Cortex-M0», datasheet, 2015 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://milandr.ru/uploads/Products/product_276/spec_1986BE4.pdf (дата обращения: 11.03.2016).
9. De Munck, Koen, De Moor, Piet, Sabuncuoglu Tezcan, Deniz, Baert, Kris, Beyne, Eric, Mertens, Robert, & Van Hoof, Chris. (2005). 3D Interconnect technology for space applications.
10. 11-Manuba Bonkohara, «Technologies for 3D assembly and chip level stack» Proceedings of 2nd International Symposium on Microelectronics and Packaging, ISMP2003, IMAPS-Korea, Seoul, Korea, September 24–25, 2003,, pp. 85–90.
11. Texas Instruments, “BQ24210, Single Cell Li-Ion Solar Battery Charger” datasheet, 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24210.pdf> (дата обращения: 11.03.2016).
12. Texas Instruments, “BQ27510-G3 System-Side Impedance-Track Fuel Gauge With Direct Battery Connection” datasheet, 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq27510-g3.pdf> (дата обращения: 15.03.2016).

© Суханов Александр Владимирович (aksearnar@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»