

Разработка конструкции гибридных сенсорных мультисборок с элементами радиочастотной идентификации

А.И. Власов, П.В. Григорьев, В.А. Шахнов

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
shakhnov@iu4.bmstu.ru

Аннотация — Статья посвящена рассмотрению особенностей конструкции гибридных сенсорных мультисборок с элементами радиочастотной идентификации. Представлен обзор топологий беспроводных сенсорных сетей, на основании которого предложено использование топологии с несколькими главными узлами. В статье дается описание подхода к разработке топологии сенсорной сети с радиочастотной идентификацией, а также описана элементная база сенсорной сети. На основании сравнения беспроводных модулей связи и считывателей разработана структура блока управления сенсорной системы. Представлен вариант компоновки блока схемы усиления и обработки сигнала, состоящей из ячеек преобразователя напряжения, преобразователя интерфейсов и преобразователя сигналов с чувствительных элементов (ЧЭ), собранные на базе микропроцессора Миландр 1986VE93У. Авторами предложено использование гибридной схемы компоновки, что позволит минимизировать габаритные характеристики датчика. Описана концепция схемы контрольно-измерительного сенсора на основе RFID-метки, как базового элемента разработки линейки сенсоров для контрольно-измерительных защитных систем, что может служить основой для различных модификаций сенсоров, адаптированных к широкому спектру параметров измеряемых сред. В заключении дана оценка областей применения гибридных сенсорных мультисборок с элементами радиочастотной идентификации.

Ключевые слова — сенсорные мультисборки, беспроводные каналы связи, обработка сигналов, беспроводные сенсорные сети.

I. ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные сенсорные сети (БСС, Wireless Sensor Networks), состоящие из беспроводных сенсоров и управляющих устройств и способные к самоорганизации с помощью интеллектуальных алгоритмов, демонстрируют масштабные перспективы использования для контроля состояния окружающей среды, функционирования производственных и транспортных систем, состояния здоровья человека, учета различных ресурсов и др. [1]. Также они имеют интерфейсы для внешних подключений, что может расширить и без того богатые функциональные

возможности этих устройств. В основном они используются как системы мониторинга и контроля. Большим преимуществом БСС является возможность их использования как внутри помещений, так и за его пределами - в окружающей среде [2].

В зависимости от среды передачи сигналов датчики могут быть проводными и беспроводными. Применение проводных систем не всегда эффективно из-за высокой стоимости монтажных и пусконаладочных работ, а также технического обслуживания. Кроме того, в некоторых ситуациях установка проводных датчиков вообще невозможна по технологическим или организационным причинам [3]. Достоинствами беспроводных датчиков являются минимальные ограничения по их размещению, возможность внедрения и модификации сети таких датчиков на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования, надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [4]. Кроме того, в некоторых ситуациях установка проводных датчиков вообще невозможна по технологическим или организационным причинам. Достоинствами беспроводных датчиков являются минимальные ограничения по их размещению, возможность внедрения и модификации сети таких датчиков на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования, надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [5].

На сегодняшний день вопрос сбора и обработки информации с сенсорных элементов мультисборок является одним из основополагающих направлений исследований ведущих зарубежных научных институтов. Опубликован ряд работ зарубежных авторов, посвященных вопросу применения беспроводных каналов связи в различных датчиках при мониторинге объектов. Тем не менее, универсального решения, применимого в любых условиях и обладающего высокой точностью, на настоящий момент не получено, поэтому данная область актуальна для проведения дальнейших научных исследований [6-8].

Достоинства и недостатки топологий БС

Критерий сравнения	Сетевая топология с одним главным узлом	Сетевая топология с несколькими главными узлами
1	2	3
Надежность	Выход из строя главного узла выведет из строя всю сеть	Выход из строя одного из главных устройств не выведет сеть из строя, т.к. его функции может выполнять другое устройство
Стоимость	Сложное, мощное вычислительное устройство в одном узле – высокая стоимость	Имеется возможность распределить часть функций по более простым устройствам, что снижает стоимость
Энергопотребление	Установка мощных приемо-передающих устройств на базовой станции. Высокий расход энергии	Устройства работают только в момент передачи или приема данных, что уменьшает энергопотребление до 90%
Масштабируемость	Усложнена из-за лимита приёма-передачи информации по расстоянию главным узлом	Поддержка тысяч индивидуальных устройств.

II. МЕТОДИКА ВЫБОРА ТОПОЛОГИИ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

При разработке структуры сенсорных сетей важную роль играет архитектура и топология построения сети.

Топологии построения сети можно разделить на 2 группы:

- с одним главным узлом (single-hop);
- с несколькими главными узлами (multi-hop).

Достоинства и недостатки каждой топологии приведены в табл. 1. На рис. 1 представлена графическая интерпретация топологий сенсорных сетей.

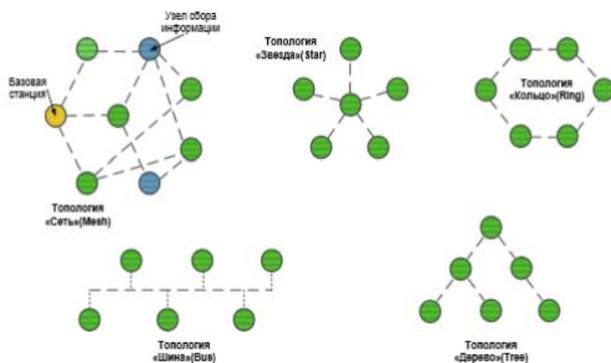


Рис. 1. Графическая интерпретация топологий сенсорных сетей

Одни из последних достижений в этой области продемонстрировал проект «SmartDust» (умная пыль), который нацелен на создание сверхминиатюрных устройств – узлов сенсорной сети [9].

III. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ

Для реализации топологии сенсорной сети с несколькими главными узлами, было выделено несколько категорий узлов:

- центральный узел;
- узел-координатор;
- узел-сенсор.

Центральный узел соединен с узлом-координатором проводной связью для обеспечения надежности передачи данных. Узел-координатор разворачивает главную подсеть и инициализируется для приема данных. Узлы-сенсоры, попавшие в зону устойчивого приема главной сети или подчиненной подсети, подключаются к узлу-координатору.

Центральный узел занимается сбором, обработкой и передачей данных, собранных с помощью сенсорной сети. Этот элемент сети является самым важным, так как в нем хранится вся информация, собранная в ходе работы.

Узел-координатор выступает в роли маршрутизатора. Его основная цель – сбор данных от узлов-сенсоров и передача в центральный узел. Общая схема приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема сенсорной сети

Узел-сенсор выступает в роли датчика, он собирает параметры об объекте исследования и передает на узел-координатор. Для увеличения энергоэффективности датчик (его коммуникационный модуль) должен находиться в режиме сна до тех пор, пока к нему не обратятся.

IV. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Вопросы проектирования блока управления сенсорных систем для различных условий эксплуатации подробно описаны в литературе [10]. Для создания более гибкой системы применена модульная структура блока управления. На рис. 3 приведена обобщенная структурная схема узла-сенсора [11].



Рис. 3. Структурная схема узла-сенсора

В качестве беспроводного протокола передачи данных предложено применить протокол ZigBee, поскольку при малом энергопотреблении дальность передачи данных достигает 200 метров в помещениях и 500 на открытой местности, а скорость передачи 250 кбит/с. Малое энергопотребление достигается за счет использования двух режимов работы. В одном режиме устройство работает при передаче данных, в другом – устройство может быть активно всегда или находиться в спящем состоянии [12].

Каждый узел сети может выполнять две функции: он либо собирает данные с датчиков или исполняет роль коммутатора узлов. Данная схема позволяет гибко настраивать сенсорную систему под конкретные нужды в производстве.

Конечная структурная схема сенсорной сети с радиочастотной идентификацией показана на рис.4.

Для обеспечения автономности работы датчика и RFID-антенны необходимо использовать микросхему, которая сможет питаться пассивно от RFID-антенны. Это позволит не заботиться о питании к датчику и повысит энергоэффективность всей системы.

Для связи между центральным узлом и узлом-координатором (1) будем использовать технологию Ethernet, это позволит увеличить пропускную способность канала, по сравнению с беспроводной технологией Wi-Fi, в 10 раз. Узел-координатор связан с узлом-сенсором (2) посредством технологии ZigBee.

Проблемным местом такой связи является ограниченное расстояние опроса узлов-сенсоров, для этого узлы-сенсоры могут принимать информацию от других узлов-сенсоров и передавать к следующему. Связь (3) между узлом-сенсором и считывателем происходит по протоколу UART. Для обеспечения связи между считывателем и RFID-антенной используется радиоканал на частоте 868 МГц [13].



Рис. 4. Структурная схема сенсорной сети с радиочастотной идентификацией

После ответа RFID-метки выполняется временное соединение ее с базовой станцией для дальнейшего обмена данными. Как только соединение произошло, ожидается передача пакета данных, содержащего идентификационный номер RFID-метки и информацию об уровне мощности принятого сигнала (RSSI – Received Signal Strength Indicator). Если соединения метки и базовой станции не произошло, базовая станция через некоторое время выдает вторую команду соединения. После того как был принят пакет данных от одной RFID-метки, базовая станция переходит в режим приема ответа следующей RFID-метки.

Связь (5) между датчиком и RFID-антенной происходит при попадании RFID-антенны в поле излучения считывателя. RFID-антенна заряжает внутренний конденсатор, датчик производит замеры и отправляет цифровой сигнал на RFID-антенну. Далее излучаемый сигнал получает считыватель.

V. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТА РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Основная функция узлов БСС – опрос датчиков и передача измерений центрам БСС. Исходя из анализа областей применения, можно выделить используемые БСС типы датчиков:

- пассивные, всенаправленные датчики;
- пассивные, узконаправленные датчики;
- активные датчики.

Пассивные, всенаправленные датчики. Эти датчики производят измерения физической величины в одной точке, не воздействуя на окружающую среду, поэтому и называются пассивными. Кроме того, многие

датчики этого типа не нуждаются в питании, потребляя энергию окружающей среды, питание нужно только для усиления их сигналов. Среди таких датчиков: термометры, датчики света, вибрации, микрофоны, тензодатчики, детекторы дыма, датчики химических соединений и т.д.

Пассивные, узконаправленные датчики. Эти датчики тоже не воздействуют на окружающую среду, но обладают направлением измерения. Примером таких датчиков является камера [14]. Она может производить измерения в одном направлении и быть повернута при необходимости.

Активные датчики. Производят воздействия на окружающую среду для измерения. Среди них: сонары, радары и прочие.

Все перечисленные датчики доступны в различных реализациях. В зависимости от приложения необходимо разрешить противоречие между: точностью, потребляемой мощностью, стоимостью, размером, доступностью. Чаще прочих используются пассивные всенаправленные датчики.

Датчики предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами, в приборах измерения уровня, расхода, силы и обеспечивают непрерывное преобразование значения измеряемого параметра в унифицированный токовый сигнал дистанционной передачи [15].

В данной работе основное внимание уделяется миниатюризации, обеспечению термокомпенсации и надежности разрабатываемых датчиков. От оптимизации расположения элементов зависит не только уменьшение занимаемого объема, последующая трассировка проводников и адаптация линий связи, но также и надежность всего электронного модуля, что объясняется наличием взаимного влияния (например, теплового) соседних элементов друг на друга. А в случае нежелательного теплового влияния на чувствительный элемент датчика давления, появляется дополнительная температурная погрешность измерений [16]. Поэтому актуально решение задачи по определению такого взаимного расположения электронных элементов, которое было бы оптимально по принятым критериям. Основными метрическими критериями являются минимальная суммарная длина межсоединений, минимальная площадь (объем) области размещенных элементов, а также их производные. К топологическим критериям относят такие критерии, которые учитывают взаимное расположение элементов и соединений на коммутационном поле, например: близость расположения друг к другу тепловыделяющих элементов, минимум числа пересечений соединений и др.

На рис. 5 представлен вариант компоновки блока схемы усиления и обработки сигнала, состоящей из ячеек преобразователя напряжения, преобразователя интерфейсов и преобразователя сигналов ЧЭ, собранные на базе микропроцессора Миландр 1986ВЕ93У.

собранные на базе микропроцессора Миландр 1986ВЕ93У.

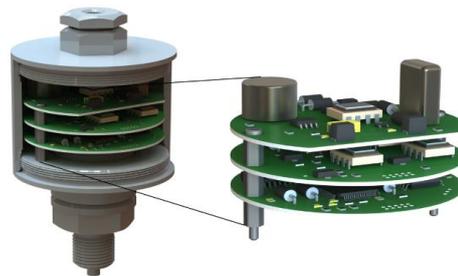


Рис. 5. Вариант компоновки блока схемы усиления и обработки сигнала, состоящей из ячеек преобразователя напряжения, преобразователя интерфейсов и преобразователя сигналов ЧЭ, собранные на базе микропроцессора Миландр 1986ВЕ93У

Представленный вариант компоновки позволяет разместить все узлы схемы в миниатюрном корпусе, а разнесённая конструкция обеспечивает удобство обслуживания. Данная схема обладает достаточно широким функционалом, но её недостатком является большая масса и габариты (диаметр корпуса – 60 мм, масса датчика примерно 750 г).

Задачи конструкторско-технологического синтеза микромеханических сенсоров, как правило, являются NP-трудными.

Используя технологии производства микросборок, можно минимизировать габаритные характеристики датчика. Также предложен вариант построения датчика, вычислительной схемы и элементов усиления на базе бескорпусного микроконтроллера по гибридной схеме компоновки.

Гибридная схема датчика давления содержит базовые элементы для осуществления полной функции преобразования: мембрану чувствительного элемента со стеклянной подложкой; полную мостовую тензорезистивную схему; электронную схему на интегральных операционных усилителях; микроконтроллер для получения стандартного выходного сигнала, температурной компенсации, балансировки и т.д.

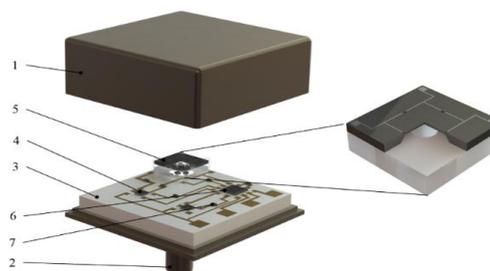


Рис. 6. Конструкция микросборки датчика давления

На рис. 6 представлена конструкция микросборки датчика давления. Конструкция состоит из крышки (1), трубки для подачи давления (2) и микроплаты в виде керамической подложки (3). На подложке (3) также

расположены один или два операционных усилителя (4), выполненных на отдельных полупроводниковых пластинах, и мембранный ЧЭ (5), изготовленный в виде отдельного элемента микроконтроллер (6) и необходимые для работы схемы пассивные элементы (7).

Концепция схемы контрольно-измерительного сенсора на основе RFID-метки как базового элемента разработки линейки сенсоров для контрольно-измерительных защитных систем может служить основой для различных модификаций сенсоров, адаптированных к различным параметрам измеряемых сред, различным способам измерения определённого параметра, использованию в различных средах окружающей среды. Например, давление в трубопроводе можно измерять, во-первых, подсоединившись к содержимому трубопровода, а во-вторых, используя высокую чувствительность монокристаллического кремния посредством измерения звукового давления, которое оказывает жидкость или газ на стенки трубопровода, прикрепив сенсор на поверхность трубопровода. Данная гибридная конструкция интегрируется в конструкцию на рис. 8.

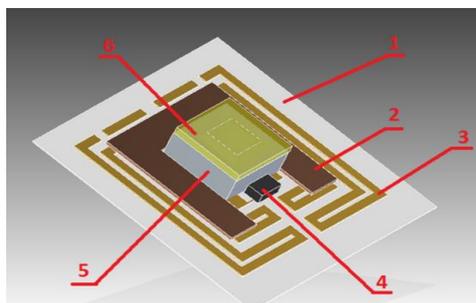


Рис. 8. Эскиз схемы контрольно-измерительного сенсора на RFID-метке (1 – RFID-метка, 2 – плата обработки и передачи сигнала, 3 – антенна RFID-метки, 4 – RFID-чип, 5 – стеклянная подложка чувствительного элемента, 6 – кристалл монокристаллического кремния с элементами измерения параметра и интегральной схемой обработки выходного сигнала)

Учитывая, что за базу конструкторской разработки модификаций сенсоров принимается чувствительный элемент, разработанный на монокристаллическом кремнии, имеющий различный измерительный инструмент, но единую интегральную схему обработки выходного сигнала, можно унифицировать схему обработки и оцифровки данных и их передачу. Что, в свою очередь, позволит унифицировать детали и сборочные узлы.

Унификация деталей и сборочных узлов упрощает технологический процесс их изготовления и контроля и технологический процесс сборки, тарировки и контроля сенсоров. Позволяет автоматизировать отдельные процессы и обеспечивает максимальное использование мощностей высокоэффективного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен анализ существующих топологий сенсорных сетей и дано описание основных узлов сети. Предложена топология сенсорной сети с несколькими главными узлами, а также структуры блока управления.

Проведен анализ способов синтеза гибридных сенсорных мультисборок с элементами радиочастотной идентификации.

Описана концепция и представлен эскиз схемы контрольно-измерительного сенсора на основе RFID-метки как базового элемента.

На основании полученных в ходе исследований данных разработана общая концепция сенсорной сети на базе RFID-технологии, получено представление об основных узлах и элементах, входящих в ее состав. Предметом дальнейшего исследования остается взаимная увязка функциональных узлов и элементов сети, реализация коммутационных структур между ними.

Отдельные результаты получены при финансовой поддержке МОН РФ по Соглашению №2.4176.2017/4.6

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Andrey I. Vlasov, Anton V. Yudin, Maria A. Salmina, Vadim A. Shakhnov and Konstantin A. Usov Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Considering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices // *International Journal of Applied Engineering Research*. — 2017. — Volume 12, Number 20. — PP. 9390-9396.
- [2] Григорьев П.В., Власов А.И. Оценка потенциального объема рынка систем на базе радиочастотной идентификации и его динамика // В сборнике: Энергосбережение и эффективность в технических системах Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. — Тамбовский государственный технический университет. — 2017. — С. 389-390.
- [3] Власов А.И., Григорьев П.В., Жалнин В.П. Применение методов и средств радиочастотной идентификации в корпоративных информационных производственных системах // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. — 2017. Том 1. — С.272-277.
- [4] Аваева Л.Г., Милешин С.А., Сергеева Н.А., Цивинская Т.А. Математическое моделирование сенсора давления повышенной надежности при эксплуатации в экстремальных условиях // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. — 2017. Том 1. — С.233-237.
- [5] Кальнов В.А., Шахнов В.А., Денисов А.А. Проектирование наносенсоров — М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2011. Том 6. Сер. Библиотека "Наноинженерия".
- [6] Luís M. L. Oliveira, Joel J. P. C. Rodrigues Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring // *Journal of communications*. — 2011. — Volume 6, Number 2.
- [7] G. Mois, S. Folea, T. Sanislav Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2017. — Volume 66, Issue 8.
- [8] M. Arslan, Z. Riaz, S. Azhar Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction h&s management // *Journal of Information Technology in Construction*. — 2014. — Volume 19, Page 74.

- [9] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, K.S.J. Pister Smart Dust: communicating with a cubic-millimeter computer // Computer. — 2001. — Volume 34, Pages 44-51.
- [10] Дшхунян В.Л., Шаньгин В.Ф. Электронная идентификация. - NTPress, Москва, 2004. - 345 с.
- [11] Balanis K. Antenna Theory: Analysis and Design. 2nd Edition. - John Wiley and Sons, 2001. - 68 с.
- [12] Датчики: Справочное пособие / В.М. Шарапов, Е.С. Полищук, Н.Д. Кошевой, Г.Г. Ишанин, И.Г. Минаев, А.С. Совлуков. - Москва: Техносфера. 2012. 624 с.
- [14] Nikitin P. V. and Rao K. V. S. Performance of RFID Tags with Multiple RF Ports. - Proc. Int. Symp. IEEE AP. - June 2007, Honolulu, HI, USA. - С. 5459-5462
- [15] Шарфельд Т. Системы RFID низкой стоимости. - Москва, 2006. - 423 с.
- [16] Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. Учебное пособие / под ред. А.А. Емельянова. — М.: Финансы и статистика. 2002. — 368 с.

Development of Hybrid Sensor Multi-Assemblies Construction with Elements of Radio Frequency Identification

A.I. Vlasov, P.V. Grigoryev, V.A. Shakhnov

Moscow State Technical University N.E. Bauman, shakhnov@iu4.bmstu.ru

Abstract — The article is devoted to the consideration of the peculiarities of the construction of hybrid sensor multi-assemblies with elements of radio frequency identification. An overview of the topologies of wireless sensor networks is presented, on the basis of which it is proposed to use a topology with several main nodes. The article describes the approach to the development of the topology of the sensor network with radio frequency identification, and also describes the element base of the sensor network. Based on the comparison of wireless communication modules and readers, the structure of the sensor system control unit has been developed. The variant of arrangement of the block of the circuit of amplification and signal processing consisting of cells of the voltage converter, the converter of interfaces and the converter of signals CHE, collected on the basis of microprocessor Milander 1986E93Y is presented. The authors proposed the use of a hybrid layout scheme, which minimize the overall characteristics of the sensor. The concept of a RFID-based measuring sensor circuit is described as a basic element in the development of a sensor line for monitoring and measuring protective systems, which can serve as the basis for various modifications of sensors adapted to a wide range of parameters of the measured media. In conclusion, an assessment is given of the application areas of hybrid sensor multi-assemblies with RFID elements.

Keywords — sensor multi-assemblies, wireless communication channels, signal processing, wireless sensor networks.

REFERENCES

- [1] Andrey I. Vlasov, Anton V. Yudin, Maria A. Salmina, Vadim A. Shakhnov and Konstantin A. Usov Design Methods of Teaching the Development of Internet of Things Components with Considering Predictive Maintenance on the Basis of Mechatronic Devices // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Volume 12, Number 20. — PP. 9390-9396.
- [2] Grigoryev P.V., Vlasov A.I. Ocenka potencialnogo obyema rynka sistem na baze radiochastotnoi identifikacii i ego dinamika (Assessment of potential market volume of systems based on radio frequency identification and its dynamics) // V sbornike: Energoberejenie i effektivnost v tehnikeskikh sistemah Materialy IV Mejdunarodno-nauchno-tehnicheskoi konferencii studentov, molodyhuchenyh i specialistov. — Tambovskii gosudarstvenny i tehnikeskii universitet.
- [3] Vlasov A.I., Grigoryev P.V., Jalnin V.P. Primenenie metodov i sredstv v radiochastotnoi identifikacii v korporativnyh i informacionnyh proizvodstvennyh sistemah (Application of methods and means of radio-frequency identification in corporate information production systems) // Trudy Mejdunarodnogo simpoziuma «Nadejnost i kachestvo». — 2017. Tom 1. — S.272-277.
- [4] Avaeva L.G., Milewin S.A., Sergeeva N.A., Civinskaya T.A. Matematicheskoe modelirovanie sensoradveniya povyshennoinadejnostipri ekspluatcii v ekstremalnyh usloviyah (Mathematical modeling of the pressure sensor of increased reliability in operation under extreme conditions) // Trudy Mejdunarodnogo simpoziuma «Nadejnostikachestvo». — 2017. Tom 1. — S.233-237.
- [5] Kalnov V.A., Shakhnov V.A., Denisov A.A. Proektirovanienanosensoren (Designing of nanosensors) — М.: Izd-vo MGTU im.N.E.Baumana. 2011. Tom 6. Ser. Biblioteka "Nanoinzheneriya".
- [6] Luis M. L. Oliveira, Joel J. P. C. Rodrigues Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring // Journal of communications. — 2011. — Volume 6, Number 2.
- [7] G. Mois, S. Folea, T. Sanislav Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2017. — Volume 66, Issue 8.
- [8] M. Arslan, Z. Riaz, S. Azhar Real-time environmental monitoring, visualization and notification system for construction h&s management // Journal of Information Technology in Construction.— 2014. — Volume 19, Page 74.
- [9] B. Warneke, M. Last, B. Liebowitz, K.S.J. Pister Smart Dust: communicating with a cubic-millimeter computer // Computer. — 2001. — Volume 34, Pages 44-51.
- [10] Dwhunyan V.L., Wangin V.F. Elektronnayaidentifikaciya (Electronic identification) - Press, Moskva, 2004. - 345 s.
- [11] Balanis K. Antenna Theory: Analysis and Design. 2nd Edition. - John Wiley and Sons, 2001. - 68 s.
- [12] Datchiki: Spravochnoe posobie (Sensors: legal aid) / V.M. Warapov, E.S. Politshuk, N.D. Kowevoi, G.G. Iwanin, I.G. Minaev, A.S. Sovlukov. - Moskva: Tehnosfera. 2012. 624 s.
- [13] Nikitin P. V. and Rao K. V. S. Performance of RFID Tags with Multiple RF Ports. - Proc. Int. Symp. IEEE AP. - June 2007, Honolulu, HI, USA. - 5459-5462 s.
- [14] Sharfeld T. Sistemy RFID nizkoistoimosti (RFID low cost systems). - Moskva, 2006. - 423 s
- [15] Anfiatov V.S., Emelyanov A.A., Kukuwkin A.A. Sistemnyianaliz v upravlenii. Uchebnoeposobie (System analysis in management. Tutorial) / pod red. A.A. Emelyanova. — М.: Finansy i statistika. 2002. — 368 s.