

ДАТЧИКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.Багдасарян^{1,2} д.т.н. bagdassarian@mail.ru, С.Багдасарян³ к.т.н.

Требования к мониторингу в режиме реального времени физических параметров современных искусственных сооружений – мостов, тоннелей, эстакад – постоянно повышаются. Принципиально новый подход к обеспечению безопасности такой инфраструктуры и профилактике кризисных ситуаций предусматривает использование современных технологических решений, например, интеллектуальных датчиков на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Эти устройства с расширенными функциональными возможностями найдут широкое применение в автоматизированных системах дистанционного беспроводного мониторинга физических параметров искусственных сооружений и других технических систем.

Поддержание в эффективном состоянии и своевременный ремонт инфраструктуры огромного количества искусственных сооружений, например, мостов, эстакад, тоннелей, требует немалых средств. В этой связи актуальной становится разработка принципиально нового подхода и методов обеспечения безопасности [1], а также мониторинга [2–5] потенциально опасных воздействий на строительные объекты, таких как:

- комплексная диагностика и мониторинг температуры, напряженного состояния и ресурсной способности (наличие трещин, расслоений, дефектов и т.п.) [4, 6–8] узлов и конструкций [4, 5, 9] строительной инфраструктуры;
- мониторинг уровня радиации;
- контроль физических параметров при повышенной радиации объекта [8, 10, 11];
- обеспечение безопасности и расширение адаптивных возможностей обслуживающего персонала благодаря раннему предупреждению с помощью системы интеллектуального

мониторинга потенциально опасных воздействий на объекты [1, 4].

К основным принципам современной концепции обеспечения эффективности и безопасности относятся: постоянство мониторинга состояния искусственных сооружений; оперативность; доступность; достоверность; экономичность; прогнозируемость состояния искусственного сооружения; управляемая безопасность (т.е. не только пассивное наблюдение и фиксирование, но и своевременное реагирование); автоматический режим измерения и контроля; интеллектуальность.

По мере разработки новых технологий, миниатюризации и повышения надежности микроэлектронной техники, использования нанотехнологий во многих производствах, совершенствования широкополосных систем передачи данных предоставляется возможность внедрения элементов искусственного интеллекта на искусственных сооружениях. Все это создает предпосылки к появлению систем интеллектуального мониторинга потенциально опасных воздействий на указанные объекты, включая их инфраструктуру и состав.

Для разработки систем интеллектуального мониторинга возможно применение следующих технологий контроля состояния объектов:

¹ ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,

² ФГУП "НИИР",

³ ООО "НПП "ТРИИС", г. Москва

- систематический визуальный надзор за искусственными сооружениями;
- спутниковый мониторинг;
- сенсорные сети.

При рассмотрении систематического визуального надзора как одного из способов организации мониторинга потенциально опасных природно-технических объектов следует отметить наличие человеческого фактора и низкую эффективность использования человеческих ресурсов, невысокую оперативность мониторинга и отсутствие элементов автоматизации процесса.

В последнее время наблюдается устойчивая тенденция применения для указанных целей мониторинга технологий беспроводных сенсорных сетей (БСС) [12–13]. Технологии БСС позволяют измерять вибрацию и ударные нагрузки искусственных сооружений, анализировать не только загазованность объекта исследования (например, тоннелей), в том числе идентифицировать просачивание на объект грунтовых вод и газов, но и акустическое состояние (безопасный уровень шума оборудования). С помощью БСС можно также оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций, измерять уровень влажности и температуру среды, оказывающие влияние на скорость износа элементов сооружений, определять скорости подвижных единиц и многие иные параметры функционирования объектов инфраструктуры городского транспорта.

Следует отметить еще одну тенденцию, связанную с уменьшением размеров, потребляемой мощностью и удешевлением устройств, функционирующих на основе БСС. С этой целью наиболее часто применяются пассивные беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах (ПАВ), работающие по принципу пассивной радиолокации [3–5, 7–11, 14, 15].

Однако корпус существующих беспроводных пассивных датчиков на ПАВ достаточно сложный и дорогостоящий, чтобы передавать измеряемое физическое воздействие на подложку, где распространяются ПАВ. Данное обстоятельство наряду с повышенным уровнем вносимых потерь требует большой мощности опрашивающих сигналов. Решить проблему, по нашему мнению, можно только путем разработки патенточистых, высокоточных, пассивных (установка в труднодоступных местах) датчиков [16–20] для дистанционного мониторинга с целью раннего обнаружения кризисного явления, первых признаков чрезвычайной ситуации [1]. Эти датчики должны соответствовать следующим требованиям: стабильность,

технологичность и воспроизводимость, малые массогабаритные показатели, невысокая стоимость при массовом производстве. Кроме того, они должны обеспечивать обработку сигнала в реальном масштабе времени, большую зону покрытия, помехозащищенность и множественный доступ. Впервые комплексно эта проблема сформулирована в работах [3–5, 7–11, 14, 15], там же предпринята попытка ее решения с использованием технологии поверхностных акустических волн.

Объединение датчиков (сенсоров) с микропроцессорами привело к появлению интеллектуальных датчиков (ИД) различных физических величин – ИДД (давления), ИДТ (температуры), ИДП (перемещения), ИДС (состава) и др. ИД обеспечивают возможность двустороннего обмена цифровой информацией при настройке и эксплуатации, диагностику датчика и электроники, измерение диапазона показателей в широких пределах, стабильный результат измерений при меняющихся режимах работы, высокую точность измерений (до 0,1%).

В соответствии с этим подходом ИД предлагается рассматривать как совокупность реализуемых в них математических методов, алгоритмов, программных и аппаратных решений [21, 22] (рис.1). На вершине пирамиды – математические методы обработки и преобразования измеряемых переменных, например, методы первичной обработки сигналов и аппроксимации (для построения градуированных характеристик), методы расчетов текущих и программируемых значений и оценок состояний давления, температуры и иных физических параметров системы мониторинга. Выбор математических методов оказывает непосредственное влияние на технические характеристики ИД. При этом технические возможности современной микро- и наноэлементной базы, особенно, на наш взгляд, акустоэлектронных сенсоров – датчиков

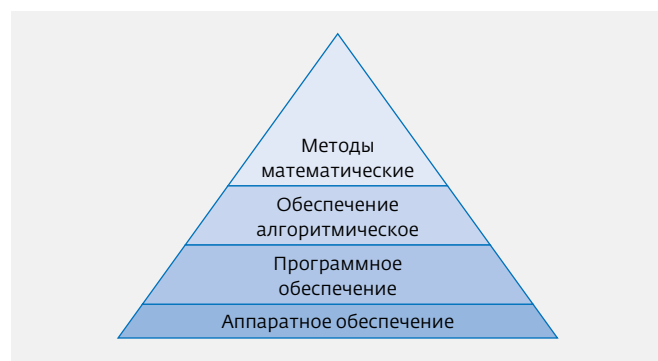


Рис.1. Иерархия интеллектуального датчика

на ПАВ, открывают прежде нереализованные возможности применения в ИД богатого разнообразия численных методов, их модификаций и результатов новых разработок.

Для реализации выбранных математических методов и формул синтезируются микропроцессорные алгоритмы (следующий уровень пирамиды на рис.1), отражающие особенности микропроцессорной обработки информации в проектируемом ИД. В состав алгоритмического обеспечения, кроме вычислительных микропроцессорных алгоритмов, входят логические алгоритмы управления функционированием системы в разных режимах работы с различными сенсорами, прежде всего в режиме онлайн, а также алгоритмы идентификации сенсоров и режимов работы.

Общий принцип действия пассивных датчиков на ПАВ, основанный на пассивной локализации построения беспроводных систем мониторинга и их базовые компоненты представлены на рис.2 [23, 24].

Базовым компонентом пассивного датчика на ПАВ является чувствительный элемент на ПАВ, принцип действия которого основан на том, что время распространения ПАВ между двумя встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) зависит от изменений некоторых физических

величин. На основе этих чувствительных элементов разрабатываются надежные и сравнительно недорогие пассивные датчики для различных областей применения.

Уникальная особенность акустических датчиков – прямая зависимость их выходных характеристик от изменения ряда физических и химических параметров, таких как температура, масса, напряжение, деформация (для жидкостей – плотность, вязкость, проводимость и диэлектрическая проницаемость).

При разработке пассивных датчиков важно правильно выбрать устройство для преобразования ПАВ, в которых заключена информация об изменениях измеряемых физических параметров, в выходной электрический сигнал. Любое малое возмущение, появляющееся в акустических волнах, должно вызывать значительный отклик в преобразованном выходном электромагнитном сигнале. Возможность реализации этого заключена в огромной разности скоростей распространения акустической и электромагнитной волн (порядка 10^5) [4, 7].

Принцип работы пассивных датчиков на ПАВ в составе системы беспроводного мониторинга физических параметров отображен на рис.2. Считывающее устройство (считыватель) посылает опросный РЧ-импульс с центральной частотой,

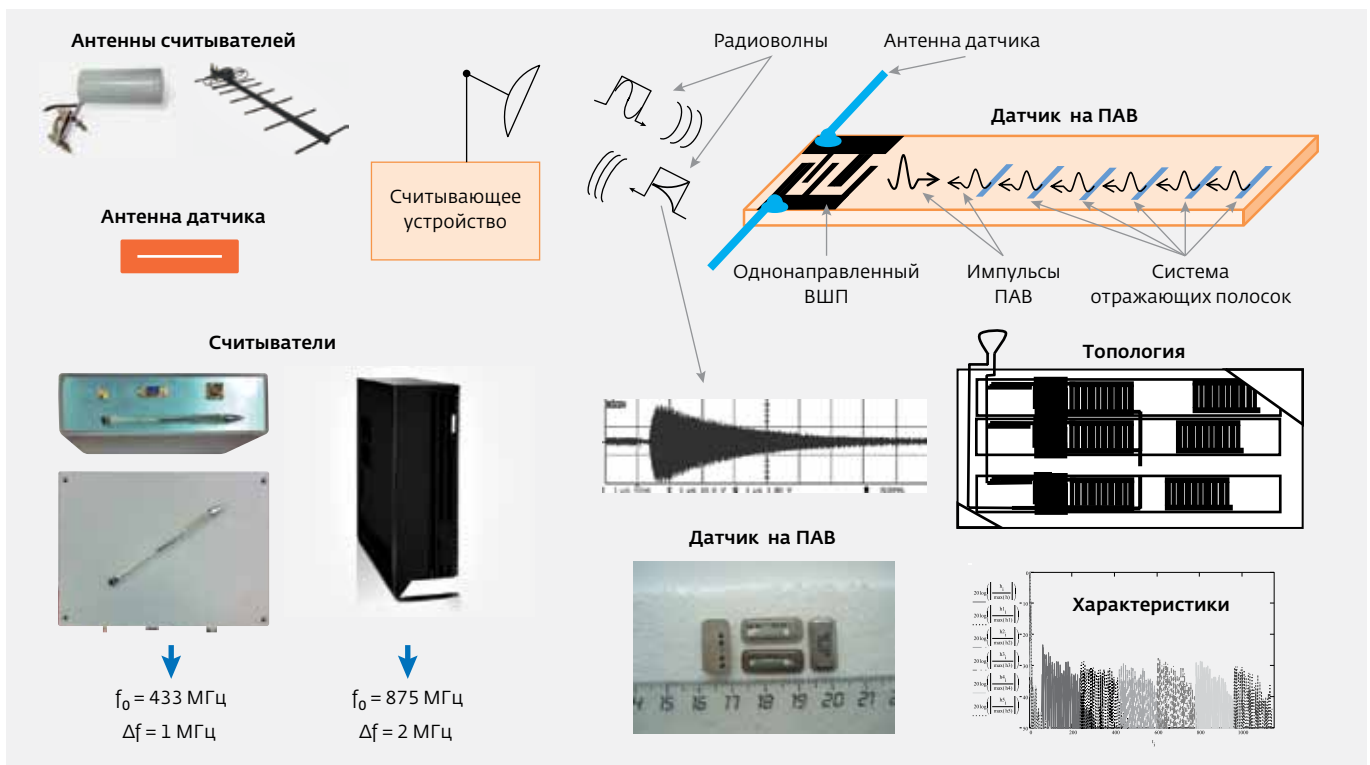


Рис.2. Принцип работы пассивных датчиков на ПАВ и их базовые компоненты

соответствующей центральной частоте ПАВ-датчика. Попадая на антенну датчика, этот импульс за счет пьезоэффекта преобразуется в ПАВ, которая проходит по подложке чипа датчика. Изменение любой физической величины (температуры, давления, перемещения, кручения, деформации, растяжения, вязкости и т.д.) приводит к изменению импульсного отклика ПАВ-датчика. Ответный отклик от ПАВ-датчика представляет собой свертку опросного сигнала и импульсной характеристики ПАВ-датчика. Информация об отклонении того или иного физического параметра содержится в изменении выходного отклика ПАВ-датчика в виде электромагнитной волны в зависимости от оказываемого на него физического воздействия.

Вариант пассивного ПАВ-датчика, работающего по тому же принципу радиолокатора с пассивной целью [24–27], изображен на рис.3. Датчик представляет собой линию задержки (ЛЗ) на ПАВ, содержащую два ВШП. Первый преобразователь соединен с приемо-передающей антенной, второй – отражательный ВШП – нагружен на чувствительный элемент.

Принцип работы: от считывателя на приемо-передающей ВШП подается радиоимпульс (его частота заполнения равна частоте акустического синхронизма преобразователя) и вследствие обратного пьезоэффекта преобразуется в ПАВ, которые, достигая второго преобразователя, нагруженного на импеданс Z чувствительного элемента, отражаются от него (см. рис.3). Коэффициент отражения ПАВ, зависящий от величины нагрузки (кривая этой зависимости представлена на слайде ниже), принимает максимальные значения при коротком и ненагруженном состоянии. При изменении величины нагрузки под действием измеряемой физической величины меняется коэффициент отражения ПАВ от отражательного ВШП. Таким образом, линия задержки на ПАВ служит информационным проводником, преобразующим данные об измеряемой физической величине, которая определяется величиной импеданса Z чувствительного элемента, в амплитуду электромагнитного СВЧ-импульса.

Для мониторинга и контроля уровня износа инфраструктуры объектов и сооружений в режиме реального времени предлагается схема организации передачи и обработки информации, представленная на рис.4.

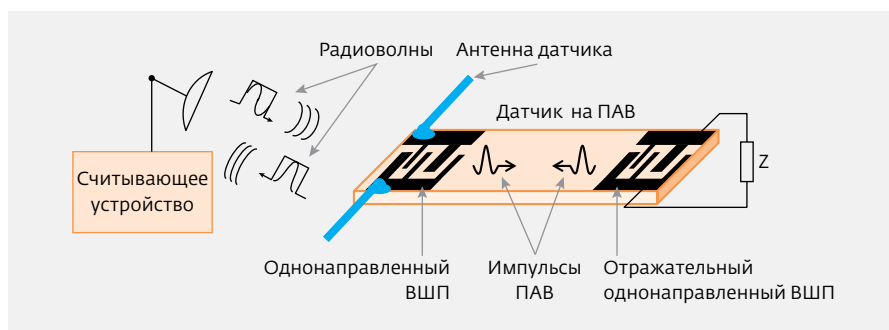


Рис.3. Вариант пассивного ПАВ-датчика

Считыватель посылает через направленную антенну на датчик считывающий радиоимпульс, который, попадая на антенну датчика, подается на подсоединенный к ней ВШП. Далее этот радиоимпульс преобразуется в импульс ПАВ, который распространяясь по линии задержки и отражается от ВШП. Эти отраженные импульсы ПАВ попадают на ВШП, соединенный с антенной и излучаются в виде последовательности радиоимпульсов на антенну считывателя. Далее эта последовательность направляется на считыватель, где и происходит измерение амплитуды и фазы импульса, отраженного от ВШП (нагруженного на импеданс, величина которого зависит от измеряемой физической величины), а также временных интервалов между остальными импульсами для идентификации датчика.

Для увеличения дальности действия сенсорной сети предлагается архитектура, состоящая из пассивных (ПАВ-датчики) и активных узлов, которая расширяет зону контроля [28].

С целью высокоточного определения физических параметров возможна двухступенчатая (двухэтапная) процедура обнаружения откликов от сенсоров, которая позволяет распознать датчики в каждом секторе и удалить мешающие сигналы-отклики

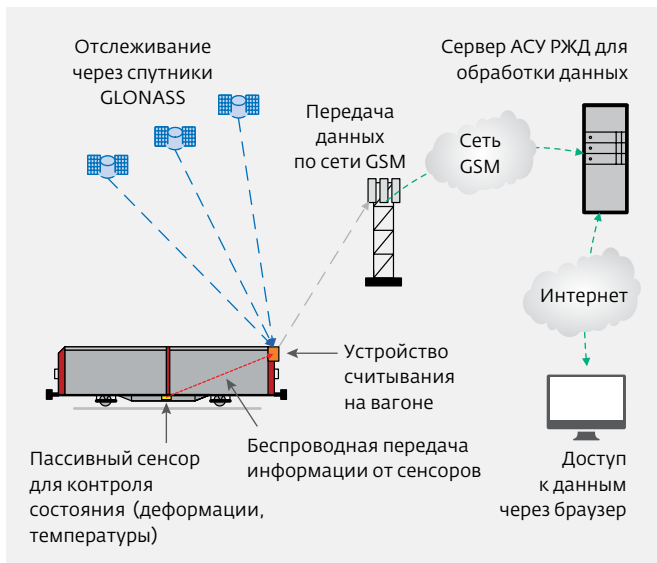


Рис.4. Организация передачи и обработки информации об уровне износа инфраструктуры сооружений и объектов

от других датчиков из отклика искомого (опрашиваемого) датчика.

Первый этап – фаза инициализации. Для распознавания конфигурации системы устанавливается поисковая таблица K для каждого сектора, содержащая все коды. Затем опрашиваются датчики в этом секторе со всеми возможными кодами (для любого кода общим сигналом ответа служит импульс – сигнал с двумя пиками в середине) и в таблице поиска отмечается датчик с определенным кодом. Расстояние между пиками в импульсе позволяет грубо оценить температуру, зафиксированную этим датчиком. В конце шага инициализации таблица поиска включает все коды, соответствующие имеющимся в секторе датчикам.

Второй этап – фаза опроса. В этой фазе каждый датчик опрашивается сигналом с соответствующей кодовой комбинацией. Сигнал ответа поступает на опрашивающее устройство, сохраняется и анализируется. Ответный сигнал $y_i(t)$ включает ответ от целевого датчика. Но в этом ответе есть и нежелательные сигналы ответа от других датчиков, расположенных в этом секторе, а также сигналы шумов. Сигнал ответа представляется в виде:

$$y_i(s_i, t) = x_i(t) * \sum_{k \in K} [a_k h_k(s_k, t) + n_k(t)] + n(t),$$

где $x_i(t)$ – сигнал опрашивающего устройства с кодом реверсирования времени, a_k – эквивалентный коэффициент пути между опрашивающим устройством и k -м датчиком (рассматриваются оба

направления), $h_k(s, t)$ – импульсная характеристика k -го датчика с распознающим параметром, k – температура (T_k в нашем случае), $n_k(t)$ – шумовая составляющая k -го датчика и $n(t)$ – шум в устройстве считывания.

Конфигурационная информация, полученная в фазе инициализации, может использоваться, чтобы более точно локализовать пики в сигнале. Прежде всего оценивается ответ от любого из нежелательных датчиков со значительным уровнем помех. Для этого вычисляется ожидаемый сигнал ответа для каждого из вмешивающихся датчиков. Затем оценивается усиление пути для каждого датчика, сигнал ответа коррелируется с ожидаемым сигналом. Корреляция должна быть максимальной, для этого проверяются сигналы ответа, соответствующие различным значениям параметров обнаружения. Затем данный сигнал уменьшается от принимаемого сигнала, чтобы удалить помехи сигнала этого датчика. Процедура выполняется для всех датчиков в секторе.

Полученный сигнал становится интерференционным свободным или пониженным для интерференции сигналом и включает требуемый сигнал со случайными помехами. Теперь можно найти максимальные пиковые расположения, которые идентифицируют температуру (или другой физический параметр, например, давление), зафиксированную определенным датчиком.

Подробно оригинальная двухступенчатая процедура обнаружения откликов от сенсоров, распознающая датчики в каждом секторе и удаляющая мешающий сигнал-отклик от других датчиков из искомого отклика датчика, описана в работе [29].

Для обеспечения высоких технических требований, предъявляемых к датчикам на ПАВ в части снижения массогабаритных показателей, помехозащищенности, дальности действия, а также для создания базовых конструкций микроминиатюрных модулей датчиков температуры, перемещения, давления, кручения на ПАВ применялась низкотемпературная совместно обжигаемая керамика LTCC (Low Temperature Cofire Ceramic). Использование керамики LTCC для монтажа кристаллов датчиков на ПАВ [23, 30] обеспечило высокие электрические характеристики, надежность, миниатюризацию и возможность применения методов поверхностного монтажа.

Разработаны конструкции и топологии датчиков на ПАВ различных физических параметров:

температуры, давления, внешнего возмущающего воздействия. Сенсоры на ПАВ используются как базовые элементы систем интеллектуального мониторинга потенциально-опасных воздействий на современные искусственные сооружения. Все полученные результаты отражают мировой и российский уровни известных систем мониторинга и технической диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Багдасарян С.А., Бутенко Е.В., Нефедова Н.А., Хананова М.Т., Хлынова М.А., Шварова Е.В.** Проблемы повышения безопасности в условиях современной техногенной среды. – Системы и средства связи, телевидения и радиовещания, 2010, № 1–2, с. 165–170.
2. **Гуляев Ю.В., Кащенко Г.А., Багдасарян А.С., Семенов Р.В.** Интеллектуальные системы мониторинга безопасности на основе ПАВ-технологий. – Информация и безопасность. Труды Воронежского государственного технического университета, 2008, т. 11, № 3, с. 349–354.
3. **Baghdasaryan S.A., Guyaev Ju.V.** Intellectual monitoring mycosystems on the basis of SAW technologies. – International Conference on Electrons, Pozitrons, Neutrons and X-Rays Scattering Under External Influences, Yerevan-Meghry, Armenia, 2009, p. 229–231.
4. **Багдасарян С.А., Бутенко Е.В., Нефедова Н.А., Хананова М.Т., Хлынова М.А., Шварова Е.В.** Датчики на поверхностных акустических волнах для автоматизированных систем дистанционного беспроводного мониторинга физических параметров технических систем. – Информация и безопасность. Труды Воронежского государственного технического университета, 2009, т. 12, № 4, с. 487–496.
5. **Багдасарян С.А., Луканов А.В., Николаева С.О.** Многофункциональный электронный модуль для мониторинга объектов и состояния техногенной среды. – Теория и техника радиосвязи, 2014, № 3, с. 91–98.
6. **Багдасарян А.С., Днепровский В.Г., Карапетьян Г.Я.** Исследование датчиков физических величин на поверхностных акустических волнах. – Материалы 12-й Международной научно-технической конференции "Математические модели физических процессов", 14–15 сентября 2007 года, Таганрогский государственный педагогический институт, т. 1, с. 130–134.
7. **Багдасарян С.А., Днепровский В.Г., Карапетьян Г.Я., Нефедова Н.А., Сеницына Т.В.** ПАВ-датчики дистанционного контроля физических величин. – Электроника: НТБ, 2008, № 1, с. 46–51.
8. **Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Катаева О.В.** Акустические датчики для дистанционного контроля давления. – ТКЭА, 2008, № 2, с. 31–33.
9. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Днепровский В.Г., Карапетьян Г.Я.** Разработка для устройств считывания алгоритмов обнаружения, распознавания сигналов от датчиков физических величин. – Материалы XI Международной конференции "Современные проблемы механики сплошной среды", Ростов-на-Дону, 26–28 ноября 2007 года, с. 153–157.
10. **Бутенко В.В., Багдасарян С.А., Семенов Р.В., Николаева С.О.** Принципы построения системы радиочастотной идентификации на основе ПАВ-технологий с повышенной дальностью действия. – Радиотехника, 2013, № 3, с. 37–41.
11. **Багдасарян С.А., Николаева С.О., Подшивалова Г.В., Семенов Р.В.** Оценка дальности действия систем радиочастотной идентификации в условиях природных и техногенных катастроф. – Теория и техника радиосвязи, 2012, № 4, с. 11–16.

12. **Багдасарян А.С., Кашенко А.Г., Кашенко Г.А., Семенов Р.В., Анциферов Е.Г.** Методика рационального выбора технологии построения сенсорной сети для СКУД критически важных объектов. – Информационно-телекоммуникационные системы и управление: материалы Всероссийской научной школы. – Воронеж: ИПЦ "Научная книга", 2011, с. 104–110.
13. **Багдасарян А.С., Кашенко А.Г., Кашенко Г.А., Семенов Р.В., Анциферов Е.Г.** Решение задачи максимизации времени функционирования беспроводных сенсорных сетей с применением метода вектора спада. – Труды XI международной научно-технической конференции "Кибернетика и высокие технологии XXI века". – Воронеж: ВГУ, 2012, т. 1. с. 591–595.
14. **Багдасарян С.А.** Конструктивно-технологические особенности создания пассивных акустоэлектронных приборов приема-передающих устройств. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2005.
15. **Багдасарян С.А.** Конструктивно-технологические особенности создания пассивных акустоэлектронных приборов приема-передающих устройств. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2005.
16. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Гуляев Ю.В., Карапетьян Г.Я.** Датчики дистанционного контроля физических величин на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение RUS 2296950, приоритет 03.09.2004.
17. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Карапетьян Г.Я., Днепровский В.Г.** Датчик физической величины на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение RUS 2387051, приоритет 01.12.2008.
18. **Карапетьян Г.Я., Днепровский В.Г., Багдасарян С.А., Багдасарян А.С., Сердюков Д.В., Старыгин С.С.** Датчик перемещения на поверхностных акустических волнах. Патент на изобретение RUS 2458319, приоритет 21.12.2010.
19. **Багдасарян С.А., Бутенко Е.В., Назаренко М.А., Нефедова Н.А., Сарьян А.В.** Датчик перемещения на поверхностных акустических волнах с температурной компенсацией. Патент на изобретение RUS 2344371, приоритет 16.11.2006.
20. **Багдасарян Н.А., Багдасарян С.А., Карапетьян Г.Я.** Однонаправленный преобразователь поверхностных акустических волн. Патент на изобретение RUS 2195069, приоритет 08.04.2002.
21. **Пьявченко О.Н., Панич А.Е., Мокров Е.А.** Принципы построения и архитектура перспективных информационно-измерительных систем мониторинга, диагностики и управления на базе интеллектуальных датчиков. – Нано- и микросистемная техника, 2002, № 10, с. 30–33.
22. **Лопатин С.С., Панич А.Е.** Интеллектуальные пьезоэлектрические датчики в системах управления технологическими процессами. – Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2005, № 1 (45), с. 165–177.
23. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Бутенко В.В., Карапетьян Г.Я.** Радиочастотные метки на ПАВ. Особенности конструкции и технологии. – Электроника: НТБ, 2012, № 7 (121), с. 076–082.
24. **Bagdasarian A.S., Bagdasaryan S.A., Dneprovski V.G., Karapetyan G.Y.** To issue on development of piezoelectric devices on surface acoustic waves. В книге: Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications, 2012, с. 189–238. Издательство: Nova Science Publishers, Inc. New York.
25. **Багдасарян А.С., Днепровский В.Г., Карапетьян Г.Я., Богданов М.И., Багдасарян С.А.** Пассивный датчик давления на поверхностных акустических волнах. – Инженерный вестник Дона, 2012, т. 22. № 4-1 (22), с. 68.
26. **Карапетьян Г.Я., Днепровский В.Г., Багдасарян С.А., Багдасарян А.С., Николаев А.Л., Кайдашев Е.М.** Пассивный беспроводный датчик на поверхностных акустических волнах для измерения параметров газовых и жидких сред. – Инженерный вестник Дона, 2012, т. 20, № 2, с. 186–190.
27. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Кашенко А.Г., Кашенко Г.А., Семенов Р.В.** Применение систем радиочастотной идентификации для повышения транспортной безопасности на РЖД. – Нелинейный мир, 2013, т. 11, № 8, с. 588–598.
28. **Бутенко В.В., Багдасарян С.А., Семенов Р.В., Николаева С.О.** Принципы построения приемопередатчика системы радиочастотной идентификации на основе ПАВ-технологий с повышенной дальностью действия. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2013, № 1, с. 10–15.
29. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Голицын В.Ю., Карапетьян Г.Я., Кашенко А.Г., Кашенко Г.А., Николаев В.И., Николаева С.О., Сеницына Т.В.** Физические основы создания сенсоров для единой интеллектуальной системы мониторинга технического состояния инфраструктуры и подвижного состава в режиме реального времени. Грант РФФИ 12-07-13124 офи_м_РЖД http://grant.rfbr.ru/project_info.asp (дата обращения 20.02.2015).
30. **Бутенко В.В., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Карапетьян Г.Я., Николаева С.О.** Акустоэлектронные идентификационные метки в керамике LTCC. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2013, № 1, с. 16–23.

