

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПАВ-ДАТЧИКИ TRANSENSE/HONEYWELL



Н.Елисеев, к.т.н.

Датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) служат для измерения целого ряда физических и химических величин: давления, температуры, химического состава и др. Недавно английская компания Transense разработала новую серию ПАВ-датчиков, в которой используется ряд новых конструктивных решений и технологий. В производство и использование этих устройств по лицензии Transense включились такие крупнейшие корпорации как Honeywell, Michelin, Texas Instruments и ряд других компаний. Рассмотрим особенности и области применения таких ПАВ-датчиков.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ДАТЧИКОВ

Принцип работы ПАВ-датчиков основан на двух физических явлениях, открытых независимо, но почти одновременно, в 80-х годах XIX века: поверхностных акустических волнах (ПАВ) и пьезоэлектричестве.

Напомним, что ПАВ представляет собой акустическую волну, распространяющуюся в тонком приповерхностном слое среды. Частицы среды в ПАВ совершают колебания в плоскости, проходящей через линию распространения волны и перпендикулярной к поверхности среды (рис.1) [1]. Скорость распространения ПАВ примерно на пять порядков меньше, чем у электромагнитных волн – характерная скорость ПАВ составляет около 3000 м/с. При этом частота ПАВ находится в радиочастотном диапазоне электромагнитных волн – обычно от 30 МГц до 3 ГГц. Соответственно, длина ПАВ может составлять от одного до нескольких десятков микрон. Амплитуда ПАВ лежит в нанометровом диапазоне. Энергия ПАВ уменьшается экспоненциально с увеличением глубины – большая ее часть сосредоточена в приповерхностном слое толщиной примерно в одну длину волны.

Если средой распространения ПАВ является пьезоэлектрический материал, то ПАВ могут возбуждать электромаг-

нитные волны, и, наоборот, для генерации ПАВ могут использоваться электромагнитные колебания. Для возбуждения и детектирования ПАВ в пьезоэлектрике применяют так называемые встречно-штырьевые преобразователи (ВШП) [2]. ВШП состоит из плоских параллельных металлических электродов, расположенных на поверхности пьезоэлектрического материала и попеременно соединенных друг с другом через общие шины (рис.2). Если к двум соседним электродам приложено постоянное напряжение, то возникающее между ними электрическое поле вызывает упругую деформацию пьезоэлектрика (обратный пьезоэффект) (рис.2б). Если же приложить переменное напряжение к шинам, то в пьезоэлектрике возникают гармонические механические колебания. Эти колебания порождают ПАВ, которая распространяется в обе стороны от ВШП. Процесс детектирования ПАВ происходит в обратном порядке: акустическая волна, входя в ВШП, генерирует распределение электрического заряда между двумя гребенками электродов (прямой пьезоэффект) и тем самым формирует выходной электромагнитный сигнал в радиочастотном диапазоне.

Эффективность генерации и детектирования ПАВ максимальна, когда период ВШП p (см. рис.2а) совпадает с половиной длины акустической волны $\lambda = v_{ph}/f$, где v_{ph} – фазовая скорость волны. Следовательно, резонансная частота ВШП определяется выражением $f_0 = v_{ph} / 2p$. Таким образом, изменяя период ВШП, можно подбирать необходимую частоту ПАВ.

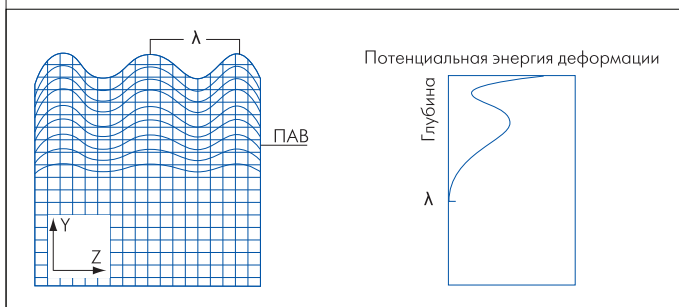


Рис. 1. Поверхностная акустическая волна: а – форма, б – распределение энергии по глубине среды

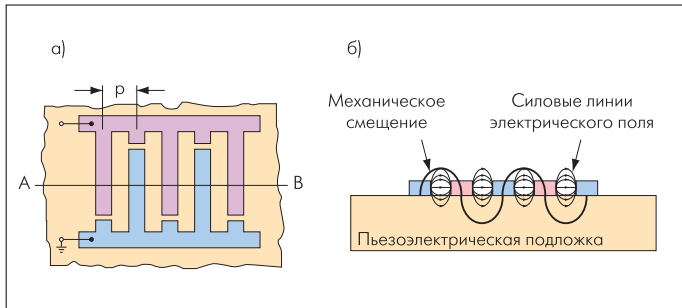


Рис.2. Встречно-штырьевой преобразователь: а – вид сверху, б – поперечное сечение А-В

В качестве пьезоэлектрика используют в основном монокристаллический кварц (SiO_2). Среди других пьезоэлектрических материалов – оксид цинка (ZnO), ниобат лития (LiNbO_3), танталат лития (LiTaO_3) и др. Для изготовления ВШП применяют фотолитографический метод.

В основе работы ПАВ-датчиков лежит свойство поверхностных акустических волн изменять свою скорость и частоту в зависимости от состояния среды, по поверхности которой они распространяются. Так, ПАВ чувствительны к таким параметрам среды, как механическое напряжение и температура. Это позволяет использовать ПАВ-датчики для измерения крутящего момента, давления и температуры. Рассмотрим устройство разных типов ПАВ-датчиков, производимых компанией Honeywell по лицензии фирмы Transense [3, 4].

ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Чувствительным элементом в датчиках крутящего момента, разработанных Transense, является так называемый однопортовый резонатор. Он состоит из ВШП и двух отражателей, расположенных симметрично справа и слева от ВШП (рис.3) на едином кристалле кварца [5, 6]. Каждый отражатель представляет собой набор алюминиевых полосок с определенным периодом. За счет подбора периода можно изготавливать сенсоры с различными резонансными частотами. У ВШП есть выводы, к которым подключается внешняя антенна (см. рис.3). Работает резонатор следующим образом. На антенну с опрашивающего устройства подается внешний радиочастотный импульс (на

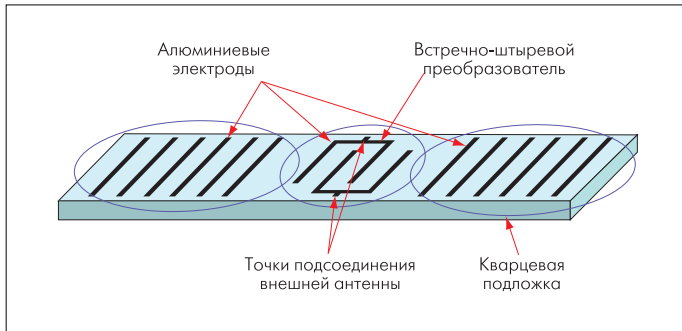


Рис.3. Резонатор ПАВ-датчика

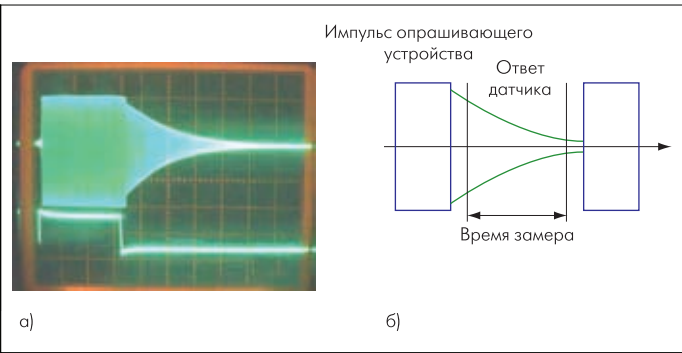


Рис.4. Импульс опрашивающего устройства и ответный сигнал резонатора: а – форма сигнала на экране осциллографа, б – последовательность опроса датчика

частоте около 400 МГц). Импульс длится достаточно долго, чтобы сигнал имел узкий спектр – это позволяет опрашивать одновременно только один сенсор с соответствующей резонансной частотой. Посредством ВШП сигнал опрашивающего устройства преобразуется в ПАВ, которая распространяется по подложке в сторону отражателей. За время действия внешнего сигнала происходит многократное отражение ПАВ, и формируется стоячая волна на резонансной частоте. После окончания опрашивающего импульса колебания в резонаторе продолжают в течение некоторого времени. Именно этот сигнал переизлучается ВШП в виде РЧ-импульса и детектируется опросным устройством (рис.4). Отметим, что такой резонатор не имеет никаких источников питания и никаких проводов для подключения. По сути это беспроводной пассивный транспондер. Данная особенность является важным преимуществом датчиков Transense/Honeywell – их установка и эксплуатация намного проще и дешевле, чем аккумуляторных и/или проводных устройств.

Резонансная частота ПАВ-сенсора является функцией механического напряжения в кварцевой подложке. Поскольку сенсор крепится плотно к поверхности устройства, в котором измеряется крутящий момент, напряжение в подложке характеризует напряжение в самом устройстве. При возникновении в устройстве механического напряжения изменяется резонансная частота сенсора. Это изменение связано с двумя факторами – изменением расстояния между электродами и изменением фазовой скорости

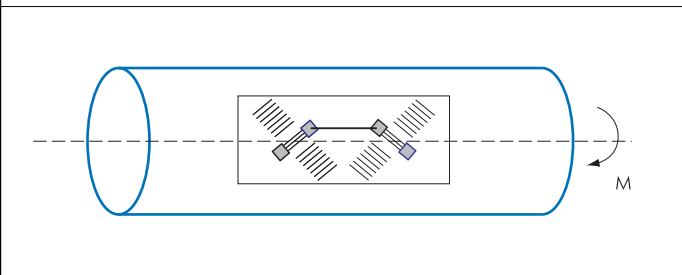


Рис.5. Кристалл кварца с двумя резонаторами в ПАВ-датчике крутящего момента

Таблица 1. Типичные параметры ПАВ-датчика крутящего момента Transense для систем рулевого управления

Параметр	Значение
Диапазон рабочих температур, °С	-40...150
Диапазон измерения крутящего момента, Н·м	±10
Допустимая перегрузка, Н·м	±200
Погрешность измерений, Н·м	<0,15

Таблица 2. Типичные параметры ПАВ-датчика давления и температуры Transense

Параметр	Значение
Диаметр, мм	12
Толщина, мм	2
Масса с антенной, г	3
Диапазон рабочих температур, °С	- 40...150
Погрешность измерения температуры, °С	<2
Диапазон измерения давления, бар	0–10
Погрешность измерения давления, бар	<0,1



Рис.6. Датчик крутящего момента

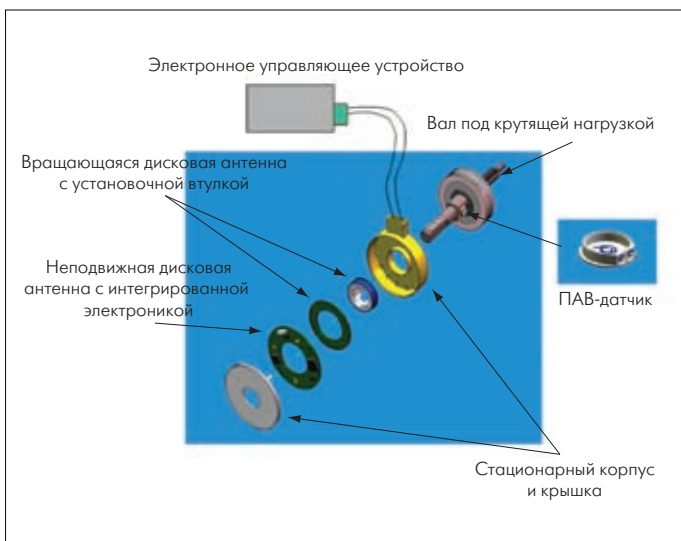


Рис.7. Вращающееся волноводное соединение

ПАВ. Колебания, которые излучает сенсор после окончания импульса опрашивающего устройства, излучаются на изменившейся в результате возникновения напряжения резонансной частоте. Таким образом, измерив эту частоту, можно определить значение крутящего момента.

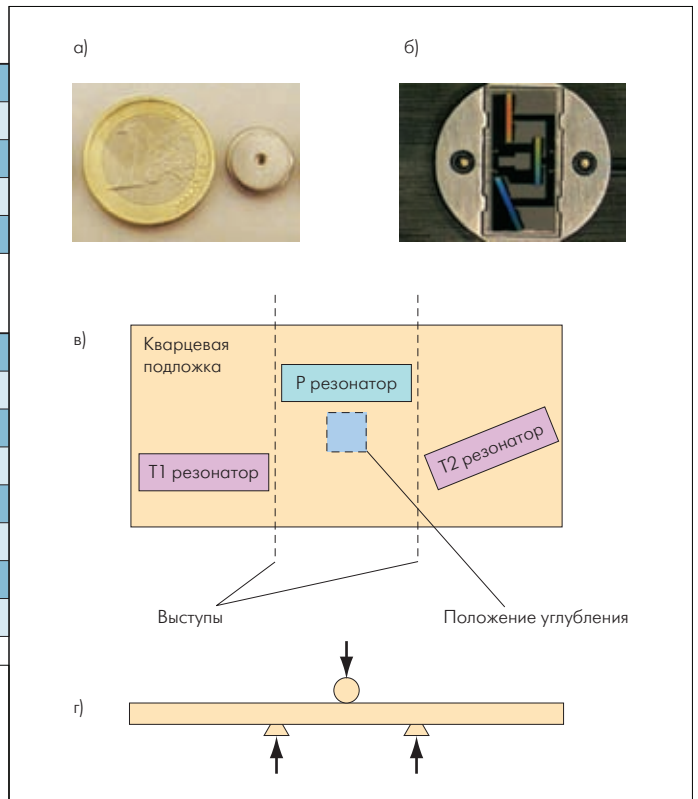


Рис.8. ПАВ-датчик давления: а – общий вид, б – внутреннее устройство, в – кристалл кварца с тремя резонаторами, г – поперечное сечение

В ПАВ-датчиках крутящего момента Transense/Honeywell применяется дифференциальное измерение резонансных частот двух резонаторов, расположенных на одном кристалле кварца под углом $\pm 45^\circ$ к оси вала устройства, в котором производятся измерения (рис.5). Это позволяет компенсировать влияние изменений температуры и изгиба вала [6].

Сенсоры помещают в корпуса, которые защищают чувствительный элемент от внешних воздействий и в то же время обеспечивают плотное прилегание к поверхности измеряемого устройства (рис.6). Для того чтобы обеспечить прилегание, подложка сенсора должна быть достаточно эластична. Это весьма непростая техническая задача, на решение которой разработчики датчиков потратили немало усилий [6].

Основные технические характеристики сенсоров представлены в табл. 1 [7].

Для передачи сигнала между сенсором и опросным устройством используют вращающееся волноводное соединение (rotary coupler). Оно состоит из вращающейся дисковой антенны с установочной втулкой и неподвижной дисковой антенны с интегрированной электроникой (рис.7). Зазор между вращающейся и неподвижной антеннами составляет около миллиметра. Возможны различные модификации этого устройства [6]. Конкретная конструкция зависит от места измерения крутящего момента и доступно пространства для установки датчика.

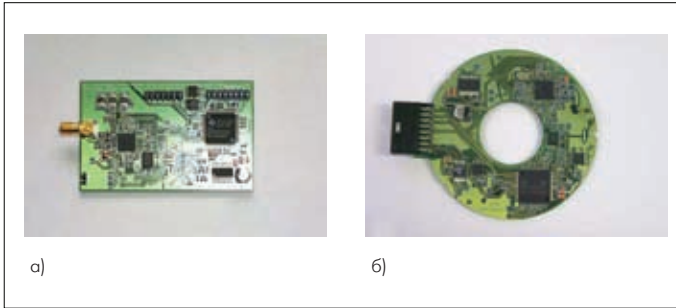


Рис.9. Платы опрашивающих устройств: а – датчика давления, б – датчика крутящего момента

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Резонаторы в датчиках давления Transense/Honeywell аналогичны резонаторам датчиков крутящего момента (см. рис.3). Сами же датчики имеют иную конструкцию. В них присутствуют три резонатора, которые предназначены для одновременного измерения температуры и давления (рис.8) [8]. Все резонаторы размещены на едином кристалле кварца. Датчик выполнен в герметичном цилиндрическом корпусе (рис.8а,б). Кварцевая подложка размещена на двух выступах, которые составляют одно целое с дном корпуса (рис.8в). В крышке корпуса имеется углубление. Когда к датчику прилагают давление, это углубле-

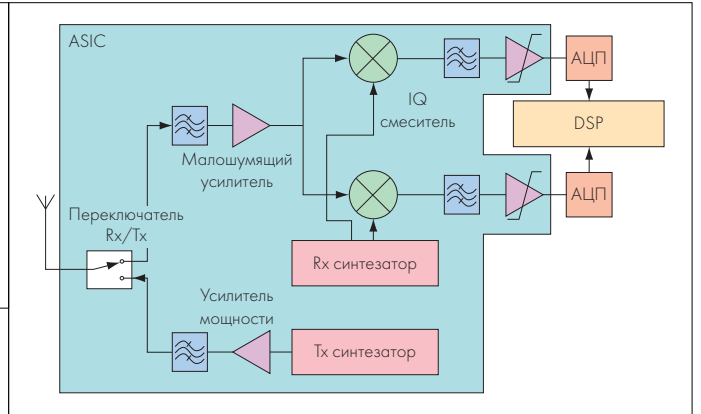


Рис.10. Схема опрашивающего устройства

ние воздействует на центральную часть сенсора (рис.8г). Таким образом, все три резонатора чувствительны к температуре, но только центральный реагирует на изменение давления. При этом показания двух боковых резонаторов, расположенных под углом друг к другу, различны благодаря анизотропии кварцевой подложки. Разности частот сигналов, генерируемых резонаторами, являются функцией давления и температуры. Следовательно, определив частоты сигналов трех резонаторов, можно решить систему двух уравнений с двумя неизвестными и определить

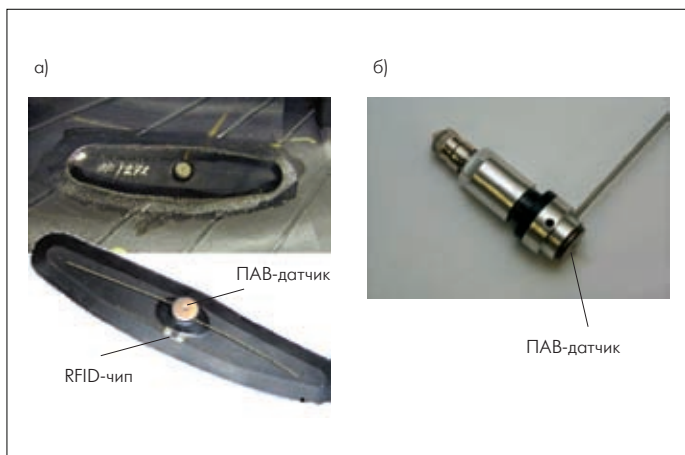


Рис. 11. Установка ПАВ-датчиков давления с антенной: а – на заплатке внутри шины, б – в вентиле шины

одновременно давление и температуру среды, в которой расположен датчик.

Технические характеристики датчика приведены в табл.2 [7].

ОПРАШИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Основное назначение опрашивающих устройств – формирование РЧ-сигнала для передачи в резонаторы ПАВ-датчиков и обработка ответного сигнала, который поступает с резонаторов. Печатные платы, на которых реализованы опрашивающие устройства, различны для разных типов сенсоров (рис.9). Основные модули опрашивающих устройств – заказная ИС (ASIC) и сигнальный процессор (DSP) (рис.10). ASIC отвечает за прием и передачу РЧ-сигналов. Transense передала лицензию на выпуск ASIC для разработанных ею ПАВ-датчиков компании Melexis – крупному европейскому производителю интегральных схем, в том числе для датчиков различных типов. В качестве DSP используется контроллер Texas Instruments серии F28x [1]. Такой контроллер имеет ряд преимуществ для использования в подобных системах: высокопроизводительный DSP, интегрированный 12-битный ЦАП, достаточное количество встроенной памяти, хорошее соотношение "цена/качество". В составе опрашивающего устройства он помогает решить множество задач: заполнение регистров конфигурации ASIC; самотестирование системы; установка частот синтезаторов ASIC; переключение ASIC между режимами приема и передачи; вычисление крутящего момента, температуры и давления; передача данных к внешним устройствам (например, через CAN-интерфейс) и др.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Описанные датчики в основном применяются в системах мониторинга технических параметров автомобилей. Здесь можно выделить два основных направления: измерение крутящего момента в системах рулевого управления

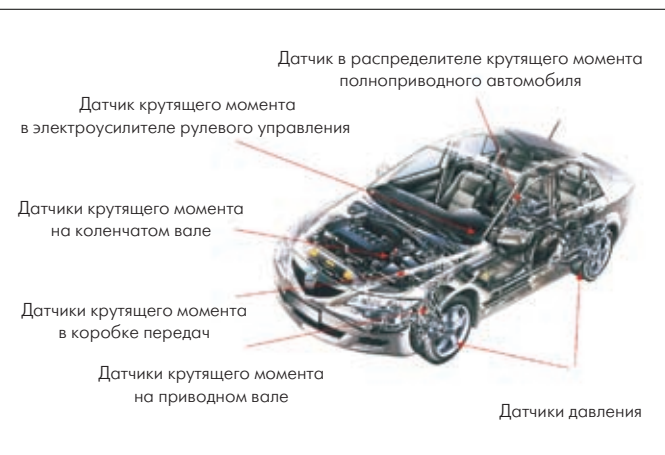


Рис. 12. ПАВ-датчики крутящего момента и давления в автомобильных системах управления и контроля

и трансмиссии, а также измерение давления в шинах.

Сегодня все больше автомобилей оснащаются рулевым управлением с электрическим усилителем. Применение электрических усилителей снижает расходы на производство и установку систем рулевого управления, сокращает эксплуатационные затраты и уменьшает расход топлива. Важной частью систем с электроусилителем является датчик крутящего момента, который измеряет усилие, прилагаемое водителем к рулю.

Датчики крутящего момента применяют и в системах трансмиссии, таких как коробка передач, редуктор, дифференциал.

Автоматическое измерение давления в шинах – весьма актуальная проблема на транспорте. Мониторинг давления позволяет снизить расход топлива на несколько процентов, а также повышает безопасность движения. Поэтому понятен интерес к системам измерения давления, который проявляют и транспортные компании, и производители шин. Так, компания Michelin – крупнейший мировой производитель шин – приобрела у Transense лицензию на применение ПАВ-датчиков давления и заключила соглашение с Honeywell об оснащении такими датчиками своей фирменной системы мониторинга давления eTire II [9]. Датчик давления устанавливается в шине либо на резиновой заплатке, либо в вентиле (рис.11). Отметим, что здесь отсутствие источников питания в конструкции датчика особенно существенно: это позволяет уменьшить размер устройства и упростить его обслуживание. Для идентификации ПАВ-датчика рядом с ним можно установить RFID-чип (см. рис.11).

Таким образом, ПАВ-датчики позволяют контролировать целый ряд систем автомобиля – от колес до редукторов (рис.12).

Итак, ПАВ-датчики Transense/Honeywell имеют ряд важных преимуществ: отсутствие источников питания, беспровод-



ное соединение с опрашивающим устройством, возможность подбора различной резонансной частоты для разных датчиков, малые размер и масса, плотное прилегание к измеряемой среде, нечувствительность к электромагнитным помехам, защищенность от внешних воздействий и т.д. Компания Honeywell активно участвует в разработке и выпуске таких устройств. В 2008 году Honeywell готовится начать их массовое производство [10]. По прогнозам, объем производства датчиков давления Transense/Honeywell к 2010–2012 годам может достигнуть от нескольких десятков до нескольких сотен миллионов штук в год, а датчиков крутящего момента – до десятков миллионов [11, 12]. Так что можно ожидать, что применение ПАВ-датчиков Transense/Honeywell, в частности в автомобильной индустрии, будет весьма масштабным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kalinin V., Beckley J.** Wireless Interrogation of SAW Strain Sensors for Automotive Applications Using TMS320C28x Controller. – TI Developer Conference, Dallas, 2006. – <http://www.transense.co.uk/downloads/articles/TIDC.pdf>.
2. **Reindl L.M.** Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors. – http://www.ieee-uffc.org/freqcontrol/tutorials/Reindl_2002_files/frame.htm.
3. www.transense.co.uk/licensees/honeywell.
4. Surface Acoustic Wave (SAW) sensors. – sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/142333/la_id/1.htm.
5. **Qasimi J.** SAW (Surface Acoustic Wave) Sensors in Automotive Applications. – Honeywell presentation at the Sensors Expo & Conference, June 2007. – sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/144347/la_id/1.htm.
6. **Geirut J., Lohr R.** Automotive Powertrain & Chassis Torque Sensor Technology. – Joint Honeywell & Transense paper, Nuremberg, 2005. – sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/138398/la_id/1.htm.
7. Wireless SAW Sensors. – www.transense.co.uk/downloads/articles.
8. **Lohr R., Vickery P.** SAW based TPMS. – Tire technology EXPO 2005, Cologne, Germany 22-24 February 2005. – www.transense.co.uk/downloads/articles.
9. Michelin launches TPMS. – www.advfn.com/news_Michelin-launches-TPMS_17525430.html.