

Автомобильные датчики давления

Эволюция технологий для массовых применений MAP/ВАР

Светлана СЫСОВЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

В статье представлен обзор технологий автомобильных датчиков давления. MAP/ВАР используются для измерения давления воздуха во впускном патрубке, где применяются технологии различного уровня интеграции, но объединенные тем, что в их основе лежит пьезорезистивный принцип. Статья также включает сравнительный анализ примеров коммерчески доступной элементной базы интегральных MEMS-устройств.

Введение

Системы Powertrain и контроля эмиссии — наибольший и стабильный рыночный сегмент для сбыта автомобильных датчиков, включая датчики давления [1]. Электронные системы, управляющие двигателем и трансмиссией, составляют приблизительно треть всей электроники автомобиля. Причем датчики этой группы относительно общего числа датчиков в автомобиле составляют более чем 50%. Процентное соотношение датчиков Powertrain относительно общего числа датчиков сохраняется неизменным в течение первой декады XXI века. Хотя и ожидалось заметное снижение темпов роста продаж датчиков этой группы на фоне других сегментов автомобильной сенсорной платформы.

Электронные системы Powertrain выполняют две основные задачи — достижение максимальной топливной эффективности и снижение эмиссии.

Оптимизация процессов сгорания (топливная эффективность) — это возможность и улучшить характеристики транспортного средства в процессе вождения, и сэкономить дорожающее бензиновое топливо, и снизить эмиссию. Поэтому практически все датчики систем контроля двигателя работают и на систему Powertrain, и на систему контроля эмиссии (в первую очередь датчик концентрации кислорода, а также датчики массового расхода воздуха и давления). Параллельно развивается второе стратегическое направление систем Powertrain — расширение функциональности диагностики (OBDII) для соответствия более высоким стандартам эмиссии, что оказывает влияние на электронику Powertrain,

усложняя ее и увеличивая количество функций и датчиков. Используемые технологии также претерпевают изменения вместе с устойчивой эволюцией систем.

Как правило, датчики давления применяются в отсеке двигателя, при контроле эмиссии, шин или пассажирского отделения (датчики давления систем подушек безопасности). Системы Powertrain и контроля эмиссии потребляют весьма значительное число датчиков давления, важнейшим из которых является датчик давления воздуха во впускном патрубке двигателя Manifold Air Pressure sensor (MAP) (1–5 бар), который используется в системах Powertrain для регулирования соотношения ТВС.

MAP разрешает вывод масс воздуха, поступающих в двигатель, и допускает определение топлива и опережение зажигания, необходимые для оптимальной работы. Каждый автомобиль, использующий прямое измерение массового расхода, включает и датчик барометрического (атмосферного) абсолютного давления (Barometric Absolute Pressure sensor, ВАР) — для компенсации высоты.

Помимо широко распространенных датчиков MAP/ВАР, существуют применения датчиков для контроля чрезвычайно высоких давлений, к примеру, в магистралях впрыска дизельных систем Common-rail. Датчики давления — это ключевой компонент системы контроля эмиссионных паров, они служат для защиты окружающей среды от гидрокарбонатной эмиссии из топливного бака. Они также помогают очищать от частиц сажи выхлопные газы, переключая регенерацию фильтров в дизельных двигателях.

Важнейшее массовое применение датчиков давления — для проверки оптимального давления в шинах (до 5 бар) с целью повышения безопасности: Tire Pressure Sensor (TPS) [2].

С помощью датчиков давления разворачиваются боковые подушки безопасности. Эти же устройства делают управление более комфортным, осуществляя контроль накачанного воздухом подушек в динамических сиденьях или контролируя процессы в системах кондиционирования воздуха HVAC.

Датчики давления осуществляют контроль:

- давления воздуха во впускном патрубке двигателя MAP (1–5 бар)/ВАР;
- давления накачки шин (0–5 бар);
- давления в системах EGR;
- утечки топлива в бензобаке для контроля эмиссии летучих паров и диагностики фильтра ($\approx 0,5$ бар или 0–100 мбар дифф.);
- давления в камере сгорания — 100 бар¹;
- воздуха в подвеске (160 бар) и амортизаторах (200 бар);
- управляющего давления автоматической трансмиссии (35 бар) и давления смазочной жидкости трансмиссии 100–700 psi² и более;
- давления в тормозных цилиндрах (200 бар);
- давления в электропневматических и гидравлических тормозах;
- давления масла двигателя (50 мбар — 2 бар);
- давления охладителя;
- электрического рулевого управления;
- давления впрыска в обычном бензиновом двигателе (5–6 бар);
- давления впрыска в дизеле (1000 бар);
- топливной иньекции под высоким давлением: давления в магистрали систем Common-rail двигателей с искровым зажиганием (100–200 бар) и дизельных (1400–2800 бар);
- давления в топливной магистрали газовых двигателей;
- давления в системах разворачивания воздушных подушек безопасности;
- давления веса пассажира;
- системы кондиционирования воздуха и т. д.

¹ 1 бар ≈ 1 атм. = 10^5 кПа

² 1 атм. $\approx 14,5$ psi

Непрерывное увеличение роли автоэлектроники в повышении характеристик и комфорта автомобилей влечет за собой спрос и на более высокое число датчиков в автомобиле. Исследование 2006 года компании Strategy Analytics — “Automotive Sensor Demand Forecast 2004 to 2013” — предсказывает, что ввиду планируемого законодательного повышения автомобильной безопасности, характеристик и уровня элементов/атрибутов новых машин увеличится спрос на автомобильные датчики, объемы продаж которых уже в 2013 году достигнут более чем 3,4 млрд единиц и \$17,1 млрд в денежном выражении.

Увеличивается спрос и на датчики давления, предъявляются более высокие требования к надежности и точности их работы.

Так, главный компонент автомобильных выхлопов — углекислый газ CO_2 — ранее не регулировался европейскими стандартами. Но, согласно недавнему исследованию, опубликованному в 2007 году консалтинговой фирмой Frost&Sullivan, сфокусированному на европейском рынке автомобильных датчиков давления, положения и температуры, новые тенденции рынка датчиков давления и положения, ограничения и проблемы для связанных автомобильных сенсорных применений связаны с влиянием регуляций эмиссии — для снижения эмиссии CO_2 , в комбинации с законодательными требованиями в отношении TPMS и индикаторов переключения передачи. Причем отмечено, что рост европейского рынка обусловлен именно применениями — в связи с увеличением объема используемой управляющей электроники, а не с появлением новых технологий. То есть на рынке автомобильных датчиков растет число электронных управляющих модулей для различных применений — контроля двигателя и трансмиссии, шасси, комфорта и безопасности (<http://www.automotive.frost.com>). Но увеличение числа и повышение сложности электронных блоков, закономерный рост требований к системной надежности и точности накладывает и новые ограничения на надежность и точность сенсорных устройств. Поэтому технологии датчиков также развиваются — в связи с необходимостью обеспечения повышенных требований к надежности, точности и быстродействию устройств в конкретном применении. Развитие как датчиков положения, так и датчиков давления — это повышение интеллектуальности сенсорных устройств и электронных систем. А массовость автомобильных применений приводит к одновременному снижению цены. Разрабатываются законченные электронные модули, которые эффективны в стоимостном решении и надежно обеспечивают как измерительные функции, так и функции формирования сигнала. Появляются интегральные и MEMS-датчики.

MEMS-датчики применяются сейчас не только в области автомобильной, но и потре-

бительской и медицинской электроники [3]. Автомобильный рынок MEMS-компонентов включает в первую очередь датчики давления и датчики инерции. Компания Frost&Sullivan прогнозирует, что рынок автомобильных датчиков давления, помимо модулей TPMS, превысит \$700 млн в 2012 году с приростом 12,8% (включая датчики управления двигателем, контроля давления тормозной жидкости, системы рециркуляции отработавших газов). Осуществление норм эмиссии Euro-4 и последующих, а также удорожание топлива повышают спрос на MEMS-датчики, которые сегодня объединяются с перепрограммируемой памятью и цифровыми ASIC.

С целью показать текущий уровень развития технологий автомобильных датчиков давления для массовых применений и проанализировать возможные пути разработки новых датчиков давления и был написан данный обзор, сконцентрированный на примерах датчиков MAP/ВАР, где доминируют пьезорезистивные технологии. Состояние, предпосылки и перспективы развития сегмента рынка MAP/ВАР приближенно отражают тенденции развития большого числа других применений автомобильных датчиков давления, хотя параллельно развиваются и альтернативные технологии (емкостные), и новые применения (оптические способы мониторинга процессов в камере сгорания).

Общая классификация датчиков давления

Самая общая классификация предполагает деление устройств по типу и профилю измерений:

- датчики абсолютного давления;
- датчики относительного давления Gage Pressure Sensors;
- датчики дифференциального давления.

По типу используемой технологии выделяются следующие автомобильные датчики давления:

- пьезорезистивные;
- емкостные;
- металлические тонкопленочные тензорезистивные;
- оптические;
- другие (пьезоэлектрические, электромеханические).

Среди технологий для автомобильных применений доминируют пьезорезистивные [4–7].

Пьезорезистивные датчики давления могут обеспечивать высокий срок службы, надежность и стоимостную эффективность.

Емкостные и тонкопленочные металлические устройства существуют как альтернатива для ряда применений. Оптические (волоконно-оптические) — перспективные устройства для мониторинга процессов сгорания топлива непосредственно в камере сгорания.

Можно выделить следующие распространенные автомобильные модификации:

- монолитные пьезорезистивные датчики на основе кремния;
- составные (Bonded) пьезорезистивные полупроводниковые датчики;
- толстопленочные пьезорезистивные датчики;
- датчики давления с тонкопленочным металлическим сенсорным элементом;
- керамические емкостные;
- поверхностные микромеханические емкостные датчики давления.

Эволюция конструкций, схем обработки и технологий пьезорезистивных датчиков MAP, ВАР и смежных применений

Модуль контроля двигателя ECU использует входные сигналы датчиков давления впускного патрубка (MAP), который и допускает течение топлива для оптимальной работы. MAP-датчик контролирует поступление масс воздуха, и по его сигналам ECU определяет необходимое количество топлива и процесс зажигания. Барометрический датчик абсолютного давления (ВАР) используют вместе с MAP, преимущественно для компенсации высоты.

Датчики MAP обычно применяется в так называемых Speed/Density или Manifold Pressure Controlled системах управления двигателем, которые не используют датчик массового расхода воздуха. MAP-датчик измеряет абсолютное, но не относительное давление (относительно нормального атмосферного в 1 бар). Он применяется также на машинах с турбонагнетением, в которых давление во впускном патрубке выше атмосферного. Датчик при этом измеряет до 2 бар давления или более. Обычный двигатель редко использует давления выше 1 бар.

Несмотря на разнообразие конструкций, как правило, в датчиках MAP/ВАР применяется кремниевый MEMS пьезорезистивный сенсорный элемент давления. Он широко распространен и для измерений давления в системе рециркуляции газов, и в топливной системе для контроля эмиссионных паров, и для контроля давления впрыска.

Различные производители стремятся разрабатывать модели, в которых датчик и вся обработка сигнала размещаются на той же самой подложке (одном кристалле). Эта концепция повышает уровень интеграции и защиты, включая схемы защиты на основе пассивных компонентов и механическую защиту, позволяет уменьшать размер и цену устройства.

Сегодня эволюция датчиков MAP, например от Bosch, проявляется в интегрировании датчиков температуры и MAP-датчика в модификации T-MAP (рис. 1–2). Эти датчики (рис. 2) позволяют системе управления двигателя точно измерять давление и температуру входящего воздуха.

При разработке новых пьезорезистивных датчиков первыми стали использоваться пла-

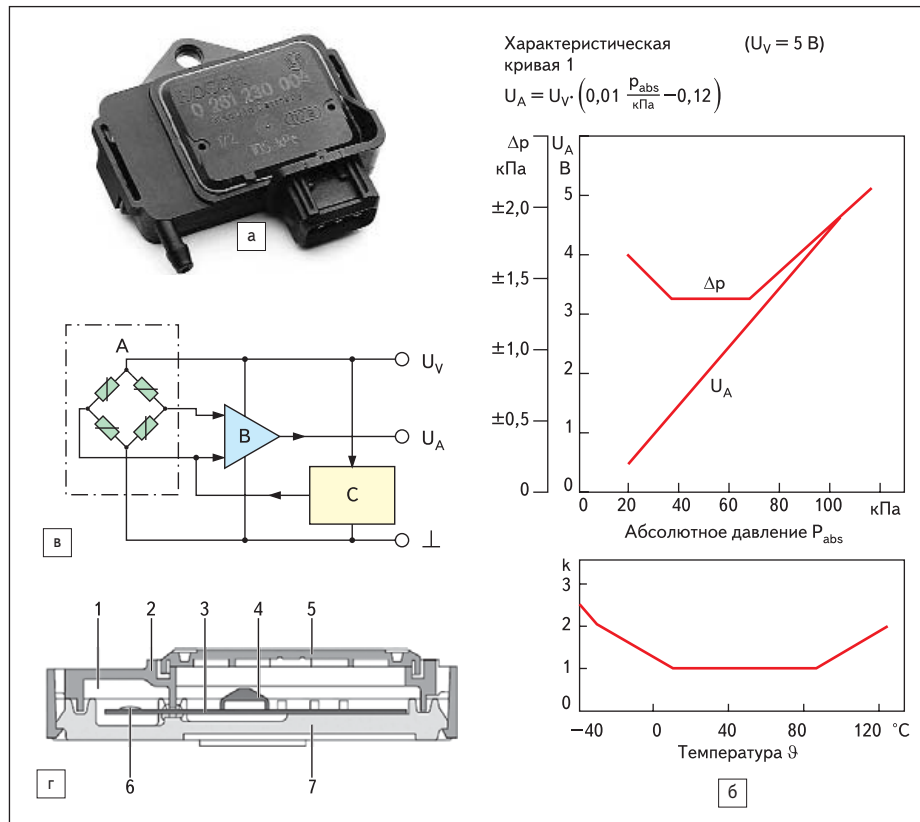


Рис. 1. Пьезорезистивные датчики MAP Bosch абсолютного давления до 250 кПа, производимые по толсто пленочной технологии:

- а) внешний вид;
- б) характеристические кривые: U_V — напряжение питания; U_A — выходное напряжение; P_{abs} — абсолютное измеряемое давление; Δp — точность в диапазоне температур 10...85 °С; k — коэффициент расширения допусков в зависимости от рабочей температуры;
- в) функциональная диаграмма:
 А — ячейка измерения давления на основе измерителей strain-gauge; В — усилитель;
 С — схема температурной компенсации; U_V — напряжение питания; U_A — выходное напряжение; \perp — «земля»;
- г) конструкция: 1 — ячейка измерения давления на основе измерителей strain-gauge; 2 — пластмассовый корпус; 3 — толсто пленочный гибридный датчик (датчик и схема оценивания); 4 — операционный усилитель; 5 — крышка корпуса; 6 — толсто пленочный сенсорный элемент (сенсорный пузырек); 7 — алюминиевая плата-основание

ты с дискретными компонентами, затем — толсто пленочные резисторы на керамике, позднее настало время полностью интегрированных ИС.

Стабильность и точность толсто пленочных резисторов адекватны, тем более что развитие технологий гибридных схем сделало возможным производство керамической подложки, допускающей включение и толсто пленочных резисторов, и монтаж ИС обработки сигнала. Эти гибридные сенсорные модули стали компактнее, чем устройства на печатных платах, что дало возможность производить их в высоких объемах для применений с требованиями низкой цены и умеренными требованиями к размерам. В связи с тем, что габариты MAP-датчика не могут быть минимизированы, так как отводятся некоторые размеры на соединитель, порт подачи давления, схему монтажа, остается место, которое и допускает конструктивное использование толсто пленочных гибридов, производимых и по сей день.

Например, датчики абсолютного давления MAP Bosch (рис. 1) изготавливаются по тол-

сто пленочной пьезорезистивной технологии. Толсто пленочный сенсорный элемент и ИС размещаются на одной подложке. Интегрированная схема оценки сигнала включает усиление и температурную компенсацию передаточной характеристики.

Дизайн и функционирование MAP-датчика основаны на включении сенсорного элемента — некоего толсто пленочного пузырька (sensor bubble), герметично уплотненного на керамической подложке и включающего данный объем воздуха с опорным давлением приблизительно в 20 кПа. Пьезорезистивные толсто пленочные измерители напряжения strain gauges напечатаны на диафрагме пузырька и защищены от агрессивной среды стеклом (стеклянным керамическим покрытием). Когда прикладывается давление, они преобразуют механическое напряжение в электрический сигнал. Чувствительность пьезорезисторов к давлению — высока (с фактором более 12), эти измерители отличаются линейностью и отсутствием гистерезиса. Мостовая схема дает сигнал, пропорциональный приложенному давлению и усиливается ги-

бридной схемой, отделенной конструктивно от измерительной среды, но размещенной на той же самой керамической подложке. Это делается для того, чтобы минимизировать любые шумы, включая электромагнитные, на пути от проводов датчика к ECU.

Датчики давления Bosch измеряют давления до 250 кПа и устойчивы к давлениям выше атмосферного (gauge pressures) до 600 кПа. Необходимо заметить, что крайне высокие или крайне малые давления измерять с помощью пузырьковых камер не рекомендуется, для этих целей более подходят плоские, а не куполообразные диафрагмы, получаемые за счет подбора соответствующих коэффициентов расширения керамической подложки и керамической пленочной крышки.

Схема датчика с DC-усилением и индивидуальная температурная компенсация в диапазоне $-40...+125$ °С обеспечивает аналоговый пропорциональный ратиометрический сигнал (рис. 1б-в).

За пределами температурного диапазона в 10...85 °С увеличены разрешенные допуски устройства (рис. 1б). Для того чтобы защитить датчики от окружающих условий, заданные максимальные значения для напряжений питания, рабочей температуры и давления не должны быть превышены.

Датчики абсолютного давления T-MAP (рис. 2) выполняются в микромеханическом гибридном дизайне и позволяют измерять давления в газах до 400 кПа. Их отличительные признаки — высокая точность, защита от электромагнитных помех лучше, чем 100 В/м, температурная компенсация. Существуют версии без датчика температуры, хотя основные микромеханические исполнения включают интегрированный датчик температуры.

Микромеханические устройства — технология для высокообъемных продуктов. Достижимый с ее помощью уровень интеграции допускает создание модулей с многими датчиками, объединение сенсоров и актуаторов, управляющих функций, причем значительные вложения в разработку методов и технологических процессов неизменно окупаются высокими объемами продаж компонентов.

Пьезорезистивный сенсорный элемент и электронная схема для усиления и температурной компенсации сигнала закреплены на одном кремниевом чипе (рис. 2а). Датчики включают полупроводниковую кремниевую диафрагму вместе с чувствительными к давлению резисторами. Коэффициент чувствительности таких резисторов достигает 100. Измеренное давление прикладывается сверху к активной поверхности диафрагмы. Опорный вакуум примыкает к обратной ее стороне и стеклянной основе. Благодаря специальному покрытию, и датчик давления, и датчик температуры NTC — резистор — оказываются защищенными от газов и жидкостей, неизменно присутствующих во впускном патрубке. Схема обработки может быть

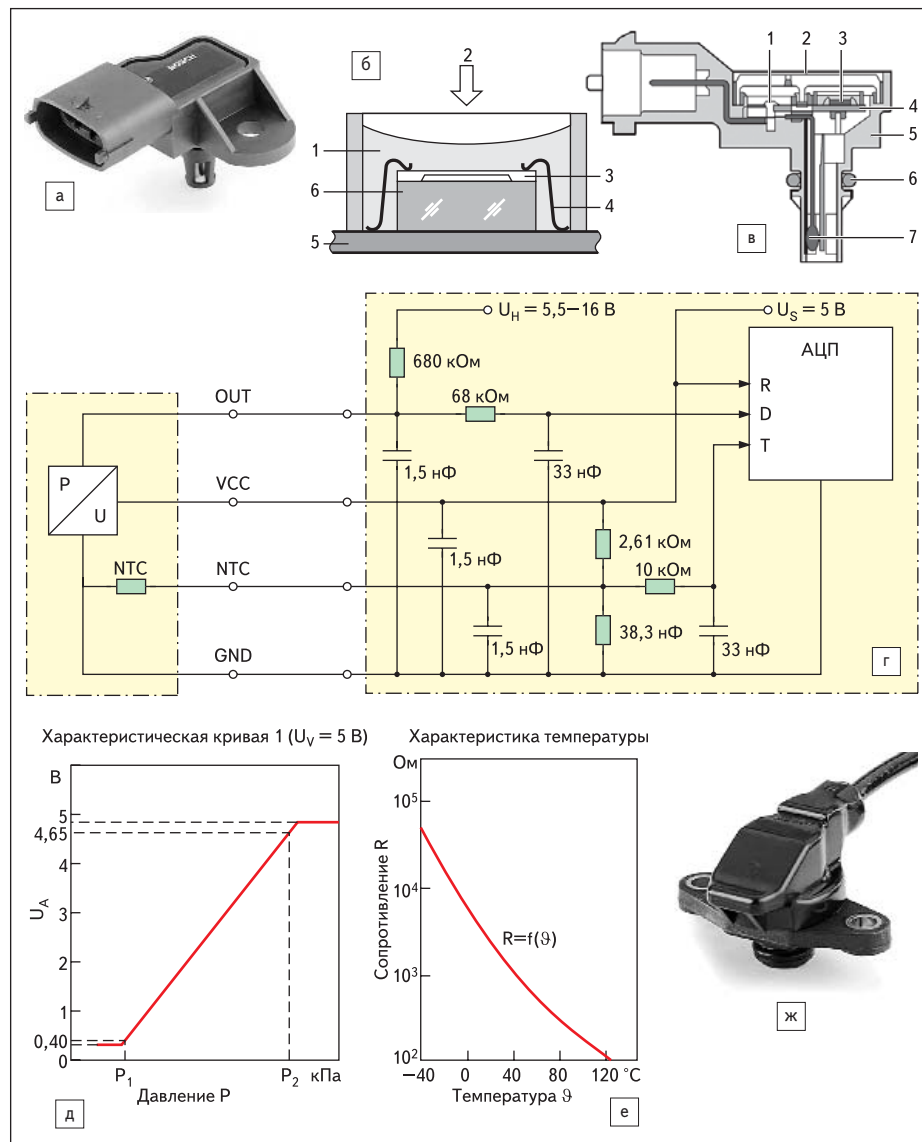


Рис. 2. Пьезорезистивные датчики T-MAP Bosch абсолютного давления до 400 кПа, производимые на основе микромеханической технологии:

- а) типичный внешний вид датчика;
- б) конструкция сенсорной ячейки: 1 — защитный гель; 2 — давление; 3 — сенсорный чип; 4 — присоединяемые выводы; 5 — керамическая подложка; 6 — стеклянное основание
- в) конструкция датчика давления: 1 — присоединяемые выводы; 2 — крышка; 3 — сенсорный кристалл; 4 — керамическая подложка; 5 — корпус с фитингом измеряемого давления; 6 — прокладка; 7 — NTC-элемент;
- г) рекомендованная схема применения: R — опорный сигнал; P — сигнал давления; T — сигнал температуры;
- д, е) примеры характеристических кривых давления (д) и температуры (е): U_v — напряжение питания;
- ж) версия пьезорезистивного микромеханического датчика абсолютного давления с формованным кабелем (без датчика температуры)

интегрирована в кристалл датчика или выведена на отдельный кристалл, но в устройстве, показанном на рис. 2, реализован первый вариант.

Датчик сконструирован для крепления на горизонтальной поверхности впускного патрубка автомобилей. Фитинг давления вместе с датчиком температуры расширяется во впускной патрубок и уплотняется O-образным кольцом. Корректное крепление в автомобиле должно гарантировать, что конденсаты не будут собираться в ячейке давления.

Рекомендации по схеме оценки сигнала давления датчика ECU, данные Bosch, таковы:

электрический выход датчика давления был сконструирован так, что сбой, вызванный обрывом кабеля и закорачиванием, обнаруживались в следующей электронной схеме (рис. 2г). Диагностические области за пределами характеристической кривой (рис. 2д–е) обеспечивают диагностику сбоев.

Пьезорезистивные датчики абсолютного давления с формованным кабелем (рис. 2ж) измеряют давления газов до 400 кПа, как T-MAP, но при этом отличаются особо прочной конструкцией. Сенсорный элемент этого датчика микромеханический, с кремниевой диафрагмой.

Устойчивые к средам датчики давления микромеханического типа от Bosch (рис. 3) измеряют давления жидкостей и газов до 600 кПа. Их отличительные признаки включают различные опции корпусирования — с готовыми к монтажу в автомобиле внешними корпусами или только в металлических корпусах для OEM-использования, защиту ЭМС до 100 В/м, встроенную температурную компенсацию и ратиометрический выходной сигнал. Все датчики и топливные ячейки устойчивы к топливу, включая дизельное, и маслам, например к маслу двигателя.

Применения для этих монолитных интегрированных датчиков давления — высокоточные измерения абсолютного давления в жестких условиях, включая MAP. Дизайн и функционирование датчиков (рис. 3б–д) предполагают включение кремниевого чипа с вытравленной диафрагмой давления (рис. 3б). При изменении в давлении диафрагма растягивается, и результирующее изменение в сопротивлении регистрируется оценочной схемой (рис. 3д). Эта оценочная схема интегрирована на кремниевом чипе вместе с электронными калибровочными элементами, поэтому датчик является монолитным.

Различные производители датчиков давления, не только Bosch, разработали модели, в которых датчик и вся обработка сигнала размещаются на той же самой подложке (одном кристалле). Как уже упоминалось, эта концепция повышает уровень интеграции и защиты, включая схемы защиты на основе пассивных компонентов и механическую защиту, позволяет уменьшать размер и цену.

Программируемая логика, интегрированная в чипе, делает возможной калибровку, при этом калибровочные параметры записываются посредством тиристоров и вытравленных проводящих путей.

Калиброванные и тестированные датчики затем закрепляются в специальном корпусе, предназначенном для монтажа во впускном патрубке, при работе в котором датчик давления будет поставлять аналоговый выходной сигнал, ратиометричный по отношению к напряжению питания (рис. 3е–и). Во входной ступени электроники ECU рекомендуется использовать RC ФНЧ с постоянной времени $t = 2 \text{ мс}$, для того чтобы подавить навязанные гармоники. Устройство заключено в прочный корпус. В версии с интегрированным датчиком температуры используется NTC-резистор. Для датчика без корпуса давление должно прикладываться через центральный фитинг.

Разработанная в компании Bosch технология производства объемных микромеханических элементов включает жидкостное изотропное химическое травление в кислотной ванне с последующим точным формованием и анизотропным химическим травлением в щелочной среде (рис. 3к). Далее в процессе производства кремниевого чипа кремниевая подложка, на которой располагается

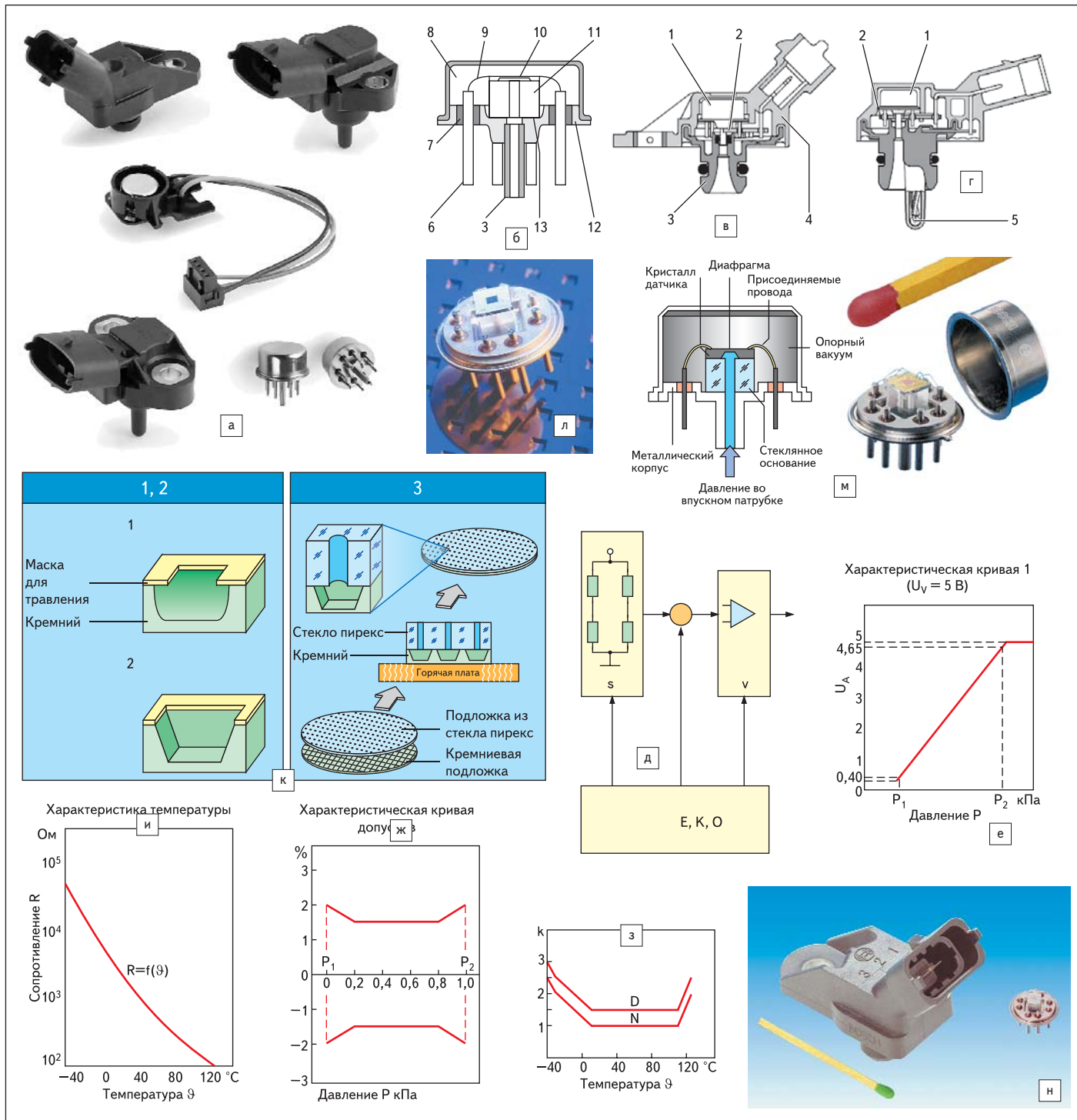


Рис. 3. Устойчивые к средам датчики абсолютного давления жидкостей и газов до 600 кПа микромеханического типа от Bosch:

- а) варианты внешнего вида и исполнений;
- б-г) конструкции сенсорной ячейки (б) и исполнения датчиков давления (в-г), г — исполнение с датчиком температуры: 1 — датчик давления; 2 — печатная плата; 3 — фитинг подачи давления; 4 — корпус; 5 — датчик температуры; 6 — электрический вводный изолятор; 7 — стеклянный изолятор; 8 — опорный вакуум; 9 — алюминиевое соединение (присоединяемые выводы); 10 — сенсорный чип; 11 — стеклянное основание; 12 — сварное соединение; 13 — паяное соединение;
- д) схема оценки сигнала: E — характеристическая кривая, чувствительность; K — компенсационная схема; O — характеристическая кривая, смещение; S — сенсорный мост; V — усилитель;
- е-и) характеристические кривые давления (е), допусков (ж, з), температуры (и); U_V — напряжение питания; U_A — выходное напряжение; P — давление; R — сопротивление; Δр — точность; к — коэффициент расширения допусков в зависимости от рабочей температуры; N — новое состояние; D — перед испытаниями на надежность;
- к-н) технология производства объемных микромеханических элементов Bosch:
- к) этапы технологического процесса производства объемных микромеханических элементов:
 - 1, 2 — жидкостное химическое травление:
 - 1 — изотропное травление в кислотной ванне (непрецизионные формы); 2 — анизотропное травление в щелочной ванне (прецизионные формы); 3 — анодное соединение;
 - л, м) сенсорная ячейка, полученная методами объемной микромеханики;
 - л) внешний вид с подложкой;
 - м) внешний вид с корпусом и детали конструкции;
 - н) сопоставление размеров датчика MAP и сенсорной ячейки

некоторое число сенсорных элементов, в виде анодно присоединяется к стеклянной плате (рис. 3к-н). После распиловки платы отдельные чипы припаиваются к металлическому основанию с соединительным фитингом давления. Когда давление прикладывается, оно направляется через фитинг и основание к обратной стороне диафрагмы давления. Опорный вакуум улавливается под колпачком, приваренным к основанию, и это допускает измерение абсолютного давления, колпачок при этом обеспечивает защиту фронтальной стороны диафрагмы давления (рис. 3ж).

Таким образом, технологии производства пьезорезистивных преобразователей на кремниевой подложке с объемной микромеханической диафрагмой и задней опорной вакуумной полостью, предназначавшиеся вначале только для измерений абсолютного давления для MAP/ВАР, затем трансформировались в обратную собранную конструкцию, для них же существует возможность создавать пьезорезистивные преобразователи типа gauge. Существует также дифференциальная конфигурация датчиков с объемной кремниевой диафрагмой и опорным основанием для снятия влияния механических напряжений на опоры диафрагмы — также в микромеханическом исполнении.

Развитие методов обработки пьезорезистивных сигналов датчиков MAP/ВАР и переход к ИС с MEMS и ЦОС

Применение схем обработки сигнала, температурной компенсации и индивидуальная калибровка каждого датчика при производстве позволяют уменьшить вариации параметров датчиков — под влиянием температуры, других окружающих условий, разброса внутри партии, а также повысить унификацию и взаимозаменяемость модулей.

Условия производства, методы сборки, требования к электрическим характеристикам датчиков и технология интегрирования — биполярная, КМОП или BiCMOS — и определяют, каким образом будет осуществлена схема обработки.

Обычный метод обработки сигнала состоит в использовании схем подгонки. В устройствах на печатных платах выполняли лазерную подгонку толсто пленочных резисторов, нанесенных на керамическую подложку и вставленных затем в печатную плату. По мере развития гибридных технологий стали осуществлять лазерную подгонку толсто пленочных резисторов, нанесенных на керамическую подложку, на которой были и схемы обработки. Вначале автомобильные пьезорезистивные датчики давления включали чисто аналоговые схемы обработки сигнала, построенные с использованием закорпусированных биполярных ИС, закрепленных на печатной плате или, затем, на керамической подложке.

Существуют два базовых подхода к монтажу сенсорного элемента и электроники в модуле. Рассмотренный ранее — мультикристалльный, так как подложка используется для крепления сенсора и компонентов, вставляется и прикрепляется к корпусу и проводному фрейму, при этом во внешней схеме могут потребоваться дополнительные пассивные компоненты для защиты от перенапряжения или для обеспечения ЭМС. Также необходимы множественные уплотнения, для того чтобы можно было гарантировать точные измерения давления и поддержать целостность модуля, не допуская его разрушение внешними загрязнениями или утечкой. В целом мультикристалльные решения дороже двух- или однокристалльных, и они в меньшей степени согласуются с автомобильными применениями, если речь идет об одном измерении (одного параметра), хотя значительное число этих датчиков находится в производстве.

Снижение цены компонентов и сборки требует более высоких уровней интеграции, поэтому дальнейшие перспективы открыли двух- или однокристалльные подходы, согласно которым аналоговые схемы стали интегрироваться с пассивными, тонко пленочными резисторами, подгоняемыми так же, лазерным методом, которые характеризуются высокой стабильностью. Двухкристалльные решения состоят из сенсорного элемента на одном чипе и ИС с тонко пленочными резисторами на другой, однокристалльные, или так называемые монолитные решения объединяют сенсорный элемент, активную схему и тонко пленочные резисторы на одной кремниевой подложке. Оба решения допускают высокие объемы производства, но монолитные открывают большие перспективы для снижения размеров и цен, а двухкристалльные дают производителю возможность более гибко реагировать на клиентские требования к схеме обработки.

Существует также дискретная аналоговая подгонка резисторов в схеме обработки пьезорезистивных датчиков давления с плавкими связями для пошагового изменения сопротивления или тока. Обработка сенсорных сигналов производится в аналоговой форме, то есть непрерывно во времени, но калибровка и подгонка (триммирование) делаются дискретно, через дискретные шаги. Этот способ ограничивает точность, разрешение и диапазон датчика, но уровни регулировки могут быть внесены в память и регулировка может осуществляться по КМОП-технологии. Пьезорезистивные датчики давления производятся в соответствии с дискретным аналоговым подходом, и в них применяют технологии смешивания сигнала, обычно в двухкристалльном исполнении — один CMOS-чип запасает калибровочные коэффициенты в EPROM; сенсорный элемент и усилители представляют собой содержимое второго кристалла, который изготавливают по биполярной технологии.

Добавление памяти означает, что сигналы пьезорезистивных датчиков давления могут обрабатываться и с использованием ЦОС и микроконтроллера, которые предназначены для выполнения калибровки сенсорных функций. Этот метод предполагает оцифровку входов ЦОС-сигналов давления и температуры. Калибровка и температурная компенсация осуществляются с использованием арифметических операций, вслед за чем цифровой сигнал преобразуется обратно в аналоговый. Использование памяти ассоциируется с КМОП-технологией и технологией смешивания сигнала BiCMOS.

Интегральный датчик с ЦОС обеспечивает более высокие рабочие характеристики по сравнению с лазерной и электронной подгонкой (цифровой обработкой аналогового сигнала), а цена при высоких объемах оказывается низкой. Кроме того, оцифровка делает простым переход от аналогового к актуальным в настоящее время цифровым интерфейсам типа SPI или I²C. Индивидуальная калибровка собранных датчиков с EEPROM возможна после сборки в рабочих условиях через автомобильные соединители. Индивидуальная калибровка датчиков по-прежнему выполняется, для того чтобы гарантировать взаимозаменяемость, что всегда несколько затормаживает во времени процесс и повышает цену производства, но делается более просто — как таковая лазерная подгонка при сборке исключается, осуществляется только масштабирование и программирование рабочих условий с привлечением таких аппаратных средств, как комплекты разработчика и ПК.

Лазерная подгонка тем более нежелательна, что необходим оптический доступ к модулю на промежуточном этапе сборки с приложением температуры и давления. Для монолитных и тонко пленочных устройств важную роль играют и малые размеры, требующие высокую точность подгонки.

Кроме того, в процессе производства может произойти дополнительное смещение выхода любого датчика, поэтому возможность калибровки полностью собранного устройства весьма актуальна для автомобильных сенсорных устройств.

Таким образом, эволюция технологий обработки сигнала автомобильных пьезорезистивных датчиков давления соответствует общим направлениям развития ИС — от толсто пленочных биполярных в 1980-х годах к тонко пленочным BiCMOS в 1990-х и КМОП-датчикам с памятью и ЦОС в XXI веке.

Однокристалльные монолитные датчики, интегрирующие КМОП-схему и одно- или многофункциональное MEMS-устройство, — перспективное решение с точки зрения рабочих характеристик и цены датчиков давления для таких ключевых автомобильных применений, как MAP/ВАР. Но таких устройств пока еще мало производится, в отличие от датчиков положения или акселерометров.

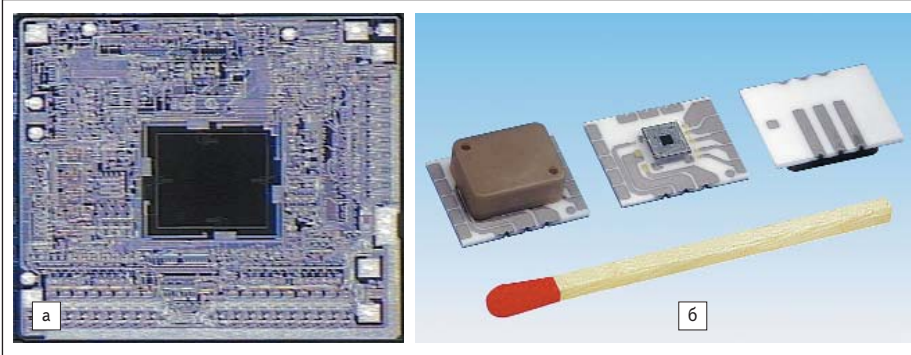


Рис. 4. SMD08x — семейство микромеханических барометрических датчиков абсолютного давления Bosch в SMD-корпусах: а) датчик SMD085 — типичный представитель семейства; б) пример монтажа датчика SMD082

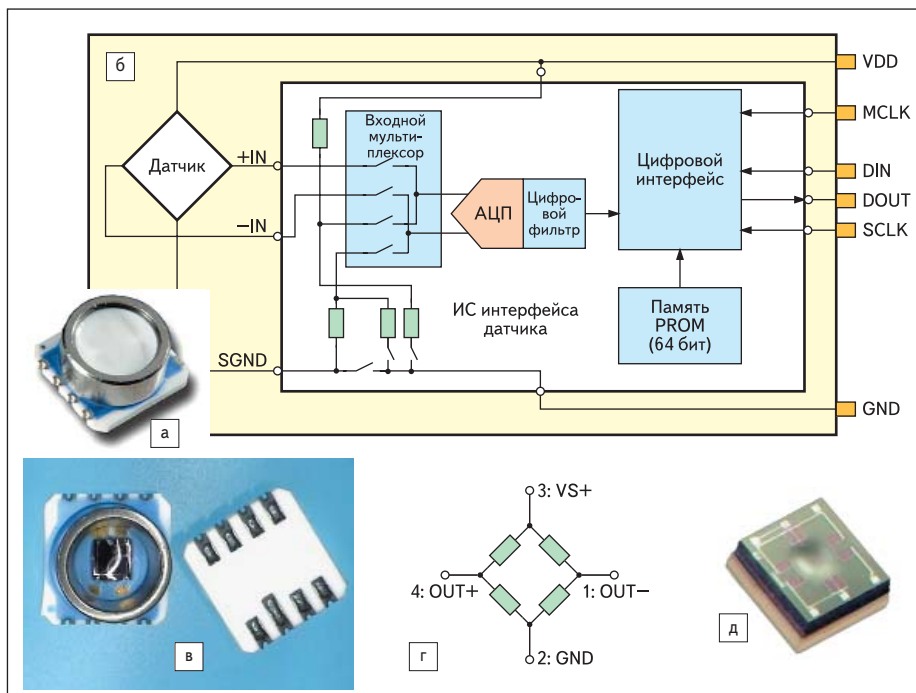


Рис. 5. Автомобильные датчики давления Intersema различного уровня интеграции: а, б) интегральный датчик — модуль измерения давления MS5541 Intersema: а) внешний вид; б) функциональная диаграмма; в, г) миниатюрный некомпенсированный SMD-датчик MS5407: в) внешний вид; г) схема; д) подложка MS7812

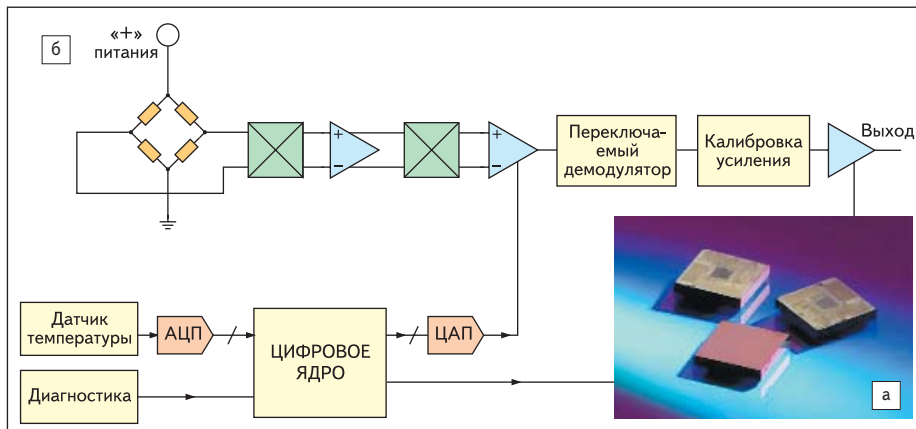


Рис. 6. MLX90269 Melexis — пример интегрального КМОП-датчика с микромеханическим сенсорным элементом: а) внешний вид датчиков; б) функциональная диаграмма

Примеры интегральных MAP/ВАР-датчиков

Примером интегрального устройства может послужить SMD08x — семейство микромеханических барометрических датчиков абсолютного давления Bosch, которые выпускаются в SMD-корпусах (рис. 4). Их в основном применяют для измерения барометрического давления в дизельных или бензиновых ECU.

Принцип действия этих устройств — пьезорезистивный. В состав SMD08x входят интегрированный сенсорный элемент, логический управляющий блок, схема температурной компенсации и компенсации смещения. Аналоговый калиброванный выход позволяет получать выходное напряжение 0,3–4,8 В, соответствующее диапазону 60–115 кПа (возможны другие диапазоны по специальному заказу). Вследствие концепции полностью интегрированного устройства дополнительные схемы не нужны. Для схемы обработки используется биполярная технология с высокой электростатической защитой — до 2 кВ в модели человеческого тела и до 200 В в машинной модели.

Выходная схема защищена против короткого замыкания к выводам Vdd, GND и Vddmax. Датчик имеет защиту от напряжения обратной полярности до тока потребления в 300 мА.

Аналогичные интегральные устройства, реализующие биполярную технологию для калибровки сигнала, разработали и другие компании — Freescale, Intersema. Но преимущества цифровой калибровки объясняют усилия производителей, направленные на создание интегральных CMOS и BiCMOS-датчиков, в двух- и однокристальном исполнении.

Например, датчик давления MS5541 Intersema (рис. 5а–б) содержит 15-битный АЦП и память для коэффициентов, обеспечивая трехпроводный последовательный интерфейс с 4-битным микроконтроллером (15-битные данные о давлении и температуре). Рабочий температурный диапазон — $-40 \dots +85$ °С, но так как этот датчик измеряет определенный диапазон давлений, компания рекомендует его для автомобильных применений. Причем по сравнению с «предшественниками» — MS5535B и MS5535A — датчик MS5541 усовершенствован, а технология позволяет достигать диапазона $-40 \dots +125$ °С.

Другие улучшения включают минимизацию электростатической чувствительности, токопотребления и повышение точности. Применяется специальное антимагнитное кольцо из нержавеющей стали для уплотнения.

Диапазон измеряемых давлений высокий (0–14 бар) для интегральных датчиков. (Для измерений чрезвычайно высоких давлений по-прежнему актуальны металлические и полукремниевые тонкопленочные и толстопленочные датчики; диафрагмы изготавливаются из пружинной стали.) Сенсорный элемент

датчиков Intersema представляет собой микромеханическую кремниевую диафрагму на пирекс-стекле, поверх которой размещены пьезорезисторы. Сенсорный элемент наклеивается на керамическую подложку и защищается металлическим колпачком, на этой же керамической подложке размещается ИС обработки сигнала, формируя SMD-модуль для поверхностного монтажа.

SMD-устройства типа MS5407 (рис. 5в-г) представляют собой промежуточное решение между полным модулем с ИС и подложками датчиков (рис. 5д), которые компания выпускает и для OEM-использования (типа MS767 или MS7812).

Производство сенсорных MEMS-подложек с целью последующего встраивания в клиентские интегральные корпуса — популярное среди производителей датчиков давления направление.

Например, компания Silicon Microstructures также выпускает как линейку стандартных изделий в интегральных корпусах, так и для OEM-использования — в виде подложек, некомпенсированных и скомпенсированных датчиков.

MLX90269 Melexis (рис. 6) — это пример коммерчески доступного высокоинтегрированного датчика абсолютного давления с микромеханическим сенсорным элементом, реализованного по КМОП-технологии, в котором аналоговый путь прохождения сигнала комбинируется с цифровым ядром.

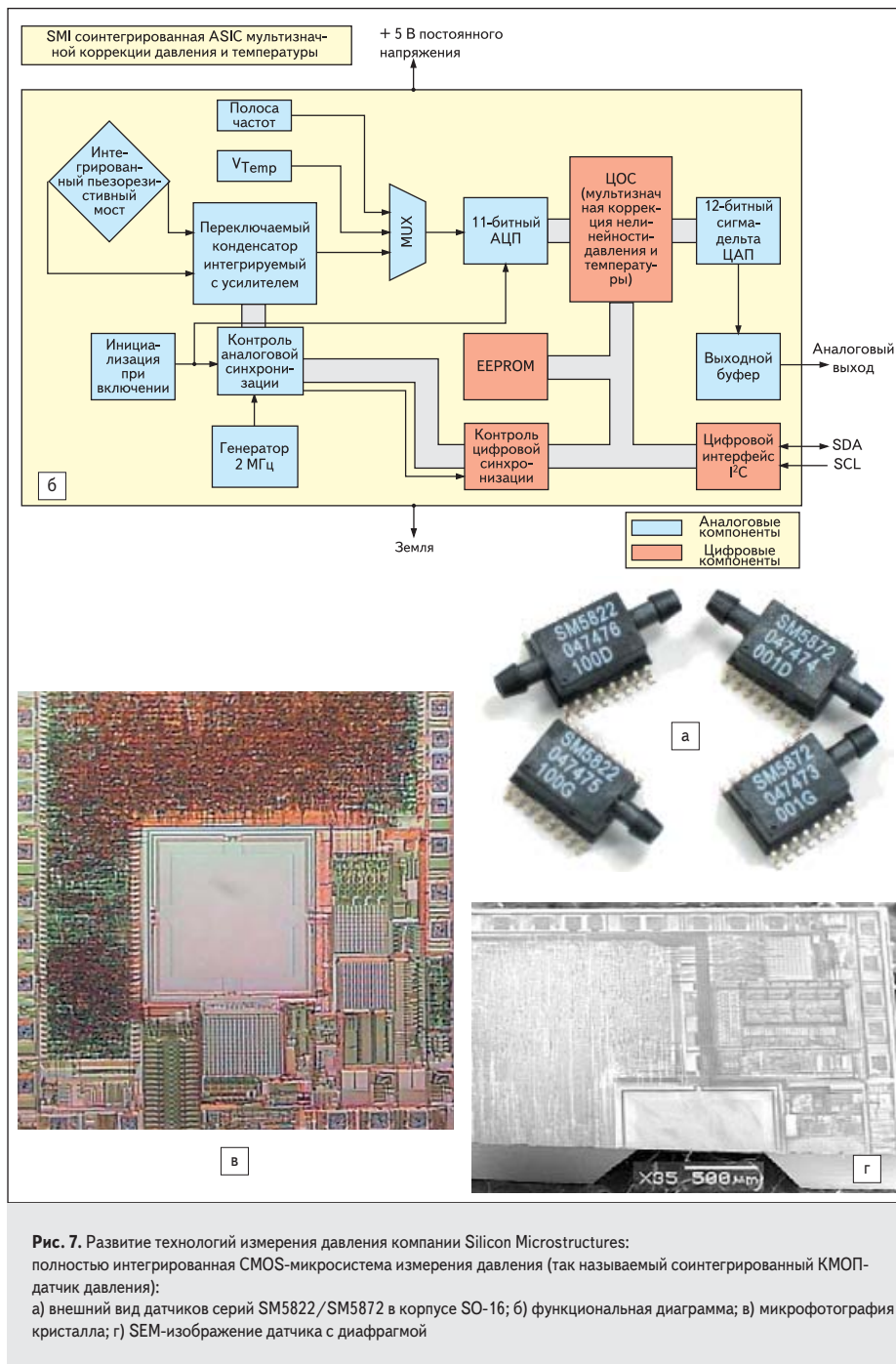
Silicon Microstructures, Inc. и ELMOS ведут разработку однокристалльных КМОП-микросхем или точнее — микросистем, представляющих собой полностью калиброванный датчик для поверхностного монтажа, в котором пьезорезистивный сенсорный элемент размещен на одной подложке с КМОП- или BiCMOS-схемой с EEPROM и ЦОС-машиной на одном кремниевом кристалле. Данная концепция позволяет уменьшить размер и снизить цену для высокообъемных применений.

Более ранние датчики давления Silicon Microstructures — SM5812 и SM5852 OEM-серий — представляют собой комбинацию пьезорезистивных MEMS- и CMOS-технологий. Конфигурация включает датчик давления и температуры, а также ASIC с EEPROM и ЦОС для крепления на керамической подложке.

Одним примером новых разработок ELMOS является датчик e984.01, разрабатываемый для MAP-применений, в котором пьезорезистивный сенсорный мост от Silicon Microstructures преобразует приложенное давление в сигнал входа аналогового инструментального усилителя, далее проходящий аналоговый путь с коррекцией в цифровой схеме с 11-битным АЦП и памятью.

Концепция интегрирования объемного пьезорезистивного датчика с КМОП-схемой представлена в [5].

Так называемый соинтегрированный датчик давления (рис. 7) производится по стан-



дартной 0,65-микронной технологии КМОП, размер чипа 10 мм². Схема выполняет калибровку смещения и чувствительности, запасая корректирующие коэффициенты EEPROM (рис. 7б).

Процесс производства осуществляется по технологии КМОП и включает этапы формирования микромеханической структуры — травление кремния для формирования диафрагмы, анодное присоединение к стеклу для абсолютных конфигураций, защиту и дальнейшие шаги, которые выполняются после завершения схемы. Затем подложки либо продаются, либо корпусируются.

Схема включает все функции обработки сигнала и калибровки, включая предусле-

ние, коррекцию смещения, калибровку диапазона, температурную компенсацию, коррекцию нелинейности.

Встроенная ЦОС обеспечивает высокую точность измерений. В настоящем эта концепция осуществлена в датчиках SM5822/SM5872. Все датчики выполнены в абсолютной, дифференциальной и gauge-конфигурациях.

Модель SM5822 сконструирована для рабочих давлений от 0–5 до 0–100 psi в абсолютной, дифференциальной и gauge-конфигурациях, модель SM5872 сконструирована для работы в диапазонах низких давлений — от 0–0,6 до 0–1,5 psi для дифференциальной, gauge и дифференциальной одноконечной конфигураций.

Выход датчика пропорционален напряжению питания, доступен как аналоговый или I²C.

Как следует из обзора, далеко не все производители интегральных компонентов могут настолько облегчить задачу конечного разработчика нового MAP/ВАР-датчика, как это возможно с элементной базой Silicon Microstructures. Помимо приобретения полностью интегральных решений, типа SM5822/SM5872 или MLX90257/MLX90259, или сборки собственных SMD керамических корпусов, существует еще одна хорошая альтернатива: любой закорпусованный датчик можно подключить к ИС специализированного сигналообработчика типа ZMD21013 или ZMD31xxx, MLX90320, MAX1455, MAX1464, аналоговых микроконтроллеров ADuC7000 и ADuC800 или других.

О рабочих условиях и проблемах защиты автомобильных датчиков давления

Автомобильные датчики давления работают в жестких условиях. Для датчиков отсека двигателя регламентированы температурные пределы от -40 до 150 °С, но для датчиков давления впускного патрубка допустимы температуры -40...+125 °С. Эти устройства подвержены воздействию топлива, масла, и трансмиссионной жидкости — веществ, которые неизменно присутствуют в атмосфере, могут засорять датчики, ухудшать их рабочие характеристики или даже разрушать. Соляная кислота, растворители, загрязнения, влажность, удары, вибрации, электромагнитные помехи, интерференция тормозное давление также влияют на работу этих устройств.

В этих применениях электромагнитные помехи определяются в диапазоне от 2 МГц до 1 ГГц на 200 В/м. Датчики давления в пассажирском отсеке подвержены похожему ЕМІ и также достаточно низким температурам.

Жесткие условия эксплуатации — широкий рабочий температурный диапазон, вибрации, удары, влияние сред, а также электромагнитные условия — создают проблемы защиты датчиков давления, которые должны обеспечивать высокую надежность и долгий срок службы (10–15 лет или более 150 тыс. км (250 000–400 000) пробега), при неизменно низкой цене в объемах массового производства [7].

Под надежностью понимается результат обеспечения в течение заявленного срока службы рабочих характеристик, таких как электрический выход, точность, рабочее окружение, механическая связь в рабочих условиях — стабильность, повторяемость, что подтверждается соответствующими испытаниями.

Электрические требования к датчику следующие:

- параметрическая точность: 2% полной шкалы при температуре 40...–125 °С и 1% в диапазоне 10...–100 °С;

- поддержка требуемого интерфейса (стандартно аналогового пропорционального rail to rail (0–5 В));
- пульсации выходного напряжения — 15 мВ пикового размаха максимум;
- ратиометричность (давлений и температур) 1% ± 0,5% в рабочем диапазоне;
- емкостные нагрузки порядка 0,1 мкФ;
- защита от закорачивания выводов выхода к «земле» и выхода к плюсу питания;
- защита от перенапряжения (16 В постоянного напряжения в течение 1 часа);
- защита от переходных процессов (40 В, 20 мкс);
- электростатическая защита до 4 кВ (250 пФ/1500 Ом);
- ЭМС 200 В/м на 1–1000 МГц.

Состав бензина, высокие давления требуют правильного выбора ИС, материалов и крепления. Для КМОП-схем, работающих в жестких условиях, применяются обычные квалификационные стандарты типа АЕС-Q100.

MAP — это пример высокообъемного применения, развитие технологий для производства которых допускает их последующее широкое распространение. Для высоких объемов массового производства необходимо снижение цены, что вполне согласуется с концепцией MEMS. Перспективные MEMS-датчики включают измерительную структуру, которая защищена корпусом ИС, и, как правило, интегральный датчик не подвергается воздействию среды, давление которой измеряется, например, в MAP- и ВАР-применениях. Популярны методы обратной собранной конфигурации, особенно в gauge-конфигурациях, когда чувствительная к негативным воздействиям среды схема помещается с обратной стороны, под вакуумом, или измеряемое давление подводится к электронно-пассивной полости на боковой стороне датчика.

Для защиты датчика используется дополнительное защитное силиконовое гелевое покрытие, или колпачок. Применяются также экраны для защиты от полей и благородные металлы для защиты электрических структур датчиков от агрессивных сред (для защиты передней стороны датчика, но задняя сторона подвергается воздействию).

Корпусирование законченного устройства — также важный фактор разработки автомобильных датчиков давления, вследствие влияния его на итоговую стоимость, размер, способность надежно работать в жестких окружающих условиях. Стоимость корпусирования и сборки продукта с использованием микромеханического устройства обычно превышает цену устройства. Для того чтобы делать измерения, датчик должен находиться в контакте со средой и одновременно быть устойчивым к ее нежелательным эффектам, таким как коррозия электрических межсоединений или механические напряжения, которые могут вызывать смещение рабочих параметров датчика. Поэтому для крепления и пассивации сенсорного элемента существ-

вует необходимость в полимерных инкапсулянтах. Эти материалы должны противостоять не только маслу и парам газа, которые обнаруживаются во впускной системе двигателя, но и конденсировать кислотные и ионные загрязнения.

Цена уменьшается, если использовать монокристалльный интегрированный датчик. Не требуются специальных инкапсулянтов для противостояния измерительной среде.

Широко распространенный подход к корпусированию модуля — вставлять сформованный корпус, включающий проводной фрейм, который обеспечивает интерфейс к соединителю. Для автомобильных сенсорных модулей получили распространение пластмассовые корпуса и штампованные соединители, металлические корпуса также выпускаются, но для меньшего количества применений.

Заключение

Автомобильные датчики давления — сложные устройства. Хотя современный уровень производства ИС и модулей позволил значительно снизить цену их сборки, разработчик должен провести глубокий анализ задач, схемного и системного дизайна, проработать механическое корпусирование, изучить материалы, аспекты технологии производства и применения ИС, проанализировать элементную базу, организацию калибровки и подгонки системных требований конечного пользователя в условиях высокообъемного производства. ■

Литература

1. Сысоева С. Новые тенденции и перспективные технологии автомобильных датчиков систем Powertrain и контроля эмиссии. Часть 1. Состояние и перспективы рынка датчиков положения, скорости, датчиков концентрации кислорода (газа), массового расхода воздуха и давления // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
2. Сысоева С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 8. Батарейные датчики систем TPMS. Путь к высокоинтегрированным решениям // Компоненты и технологии. 2007. № 8.
3. MEMS in Automotive and Consumer Electronics. Frost & Sullivan, Pr. Venkatesh Sensors, Nov 1, 2007.
4. Keck D. O. Making Sense of Automotive Pressure Sensors. Silicon Microstructures, Inc. Sensors, Aug 1, 2007.
5. A Single-Chip Pressure Sensor for the Automotive Market. Markle Jeffery G., Dunbar Michael L., Allen Henry V., Silicon Microstructures, Inc. Bornefeld R., Schreiber-Prillwitz W., Stöver Olaf, Elmos AG Sensors, Apr, 2004.
6. Parsons M. Design and Manufacture of Automotive Pressure Sensors. Maxim Integrated Products. Sensors, Apr, 2001.
7. Czarnocki W. S., Schuster J. P. The Evolution of Automotive Pressure Sensors. Sensors, May 1, 1999.