

Автомобильные датчики положения.

Современные технологии и новые перспективы

Часть 1. Потенциометры и датчики Холла — лидеры современного рынка

В статье дается обзор автомобильных датчиков положения, назначение и принцип действия которых предусматривает получение линейной передаточной функции напряжения от входной характеристики механического положения объекта — дроссельной заслонки, педали акселератора, клапана системы рециркуляции отработавших газов и др. Первая часть статьи, предлагаемая сегодня вниманию читателей, содержит обзор популярных потенциометрических и магнитоуправляемых датчиков на эффекте Холла, широко применяемых в автомобиле для измерения абсолютного углового положения.

Светлана Сысоева

S.Sysoeva@mail.ru

Введение

Развитие электронных систем управления различными автомобильными подсистемами и агрегатами, такими, как двигатель, коробка передач, тормозная система, противобуксовочная система, система динамической стабилизации и адаптивный круиз-контроль, многорежимность и многозадачность их работы создают необходимость в координации и согласовании управляющих сигналов в отдельно взятый момент времени — все это объективные факторы появления целого класса автомобильных аналоговых датчиков. Эти устройства, которые в настоящее время являются неотъемлемой частью каналов обратной связи практически любой автомобильной

системы, должны отвечать растущим потребностям рынка в надежных, прецизионных, линейных, компактных и недорогих датчиках, способных функционировать в жестких условиях эксплуатации автомобиля (повышенная температура, вибрация, загрязнение, влажность и т. д.) [1–5].

Например, необходимость в повышенном расходе воздуха для осуществления экономичного непосредственного впрыска с послойным смесеобразованием требует большего открытия дроссельной заслонки. Возникает необходимость в электронной системе управления положением дроссельной заслонки (ETCS — Electronic Throttle Control System) с датчиком обратной связи, которым в настоящее время оборудуется практически каждый автомобиль.

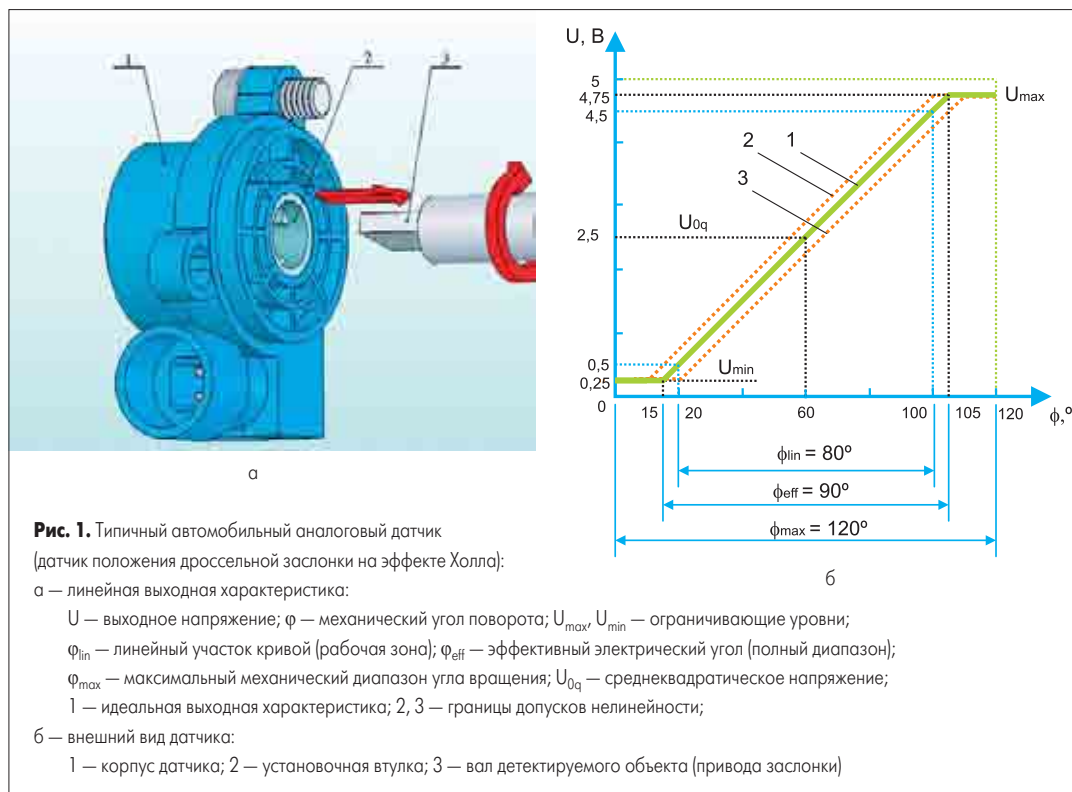




Рис. 2. Массив современных автомобильных датчиков положения:

- а, б — магнитоуправляемые датчики положения дроссельной заслонки Delphi SS10355 (а) и SS10553 (б);
 в, г, д — датчики CTS Corporation: сборка педали акселератора серии 556 (в), многооборотный датчик положения сиденья 505 (г) и клапана EGR серии 564 (д);
 е — датчики углового положения (подвески) American Electronic Components; ж — датчик педали акселератора Hella;
 з — линейный датчик положения тормоза Hella; и — автомобильные LVDT компании Penny+Giles;
 к — индуктивный датчик положения дросселя R60D RVIT Shaevitz;
 л — емкостной датчик положения 0605 Trans-Tek;
 м — датчик рулевого колеса серии 7000a BEI Duncan;
 н — переключатели положения педали тормозных цилиндров и сцепления Tyco Electronics; о — датчик выбора передачи Texas Instruments

Датчик положения дроссельной заслонки (TPS — throttle position sensor) (рис. 1) преобразует угловое положение дросселя в напряжение постоянного тока в пределах, ограниченных двумя крайними положениями: от полного открытия дроссельной заслонки до ее полного закрытия (см. рис. 1а).

Система управления двигателем (ECU — Electronic Control Unit или ECM — Electronic Control Modul) по информации с датчика рассчитывает степень открытия дроссельной заслонки (дроссельного клапана) и осуществляет основные функции управления двигателем на динамичных режимах разгона-торможения автомобиля:

- идентификация режима работы (частично открытая заслонка, широко открытая заслонка);
- регулирование соотношения воздуха и топлива в смеси;
- коррекция увеличения мощности;
- автоматическое задание угла опережения зажигания.

Во многих автомобилях положение дроссельной заслонки полностью определяется степе-

нью нажатия механически связанной с ней педали газа. ECM в автомобилях, оборудованных «электронной» педалью газа (E-Gas), получает сигналы с двух датчиков — датчика положения педали акселератора (APPS — Accelerator Pedal Position Sensor) и положения дроссельной заслонки — и управляет сервоприводом заслонки, выбирая наибольшее значение угла поворота. Ряд других систем автоматического управления предназначен для уменьшения крутящего момента и частоты вращения двигателя (ПБС — противобуксовочная система¹), для чего E-Gas или система управления двигателем по сигналам от ПБС вырабатывает команды закрытия дроссельной заслонки, выбирая и обрабатывая из двух сигналов (с педали и от ПБС) меньшее значение угла поворота.

Количество поданного воздуха измеряется датчиком массового расхода воздуха, использующим тот же принцип измерений.

Для нейтрализации отработавших газов в автомобилях применяется система рецирку-

ляции (EGR — Exhaust Gas Recirculation), в которой необходимо контролировать высоту клапана. Датчик положения клапана EGR (VPS — Valve Position Sensor) закрепляется на EGR-клапане и определяет его высоту, преобразуя положение и перемещение клапана от его полного открытия до закрытия в электрический сигнал.

Таким образом, в автомобиле существует множество датчиков (рис. 2), функционирующие которых идентично датчику положения дроссельной заслонки и которые отличаются только по тому признаку, какой объект для них является активирующим (например, EGR VPS приводится во вращение клапаном EGR). Они называются датчиками положения: под этими датчиками понимаются именно аналоговые датчики линейного или углового абсолютного положения (см. рис. 1а, рис. 2а–л), в отличие от энкодеров, датчиков перемещений или близости, имеющих импульсную выходную характеристику (рис. 2м, н, о).

¹ Известная как ASR (Bosch), Traction Control (Opel), Dynamic Traction Control (BMW) — противобуксовочная система или система контроля сцепления.

Принцип действия линейных датчиков положения

Основные понятия и определения

Аналоговые линейные датчики абсолютно-го углового или линейного положения (перемещения) обеспечивают одну и ту же функциональную характеристику — линейную зависимость выходного напряжения, например в зависимости от угла поворота детектируемого объекта (рис. 1а) или его линейного перемещения. Оба варианта широко используются в автомобильных системах, но, ввиду специфики многих функциональных задач (см. рис. 2), очевидно, угловые системы имеют перевес. В то же время между ними нет принципиальных отличий, так как вращательное и линейное движение описывают траектории, допускающие их взаимное преобразование: вращательное движение может рассматриваться как линейное на бесконечно малых приращениях угла и, наоборот, в дополнение к физическому преобразованию движения из одного вида в другой, осуществление которого возможно с помощью автомобильных механизмов. Например, известны датчики положения дроссельной заслонки, измеряющие линейные перемещения, датчики положения цилиндров сцепления вращательного типа и т. д.

При анализе свойств датчика, имеющего подобную выходную характеристику, принимаются во внимание следующие основные понятия и определения:

- Полный механический диапазон (угол поворота) подвижной системы датчика.
- Полный диапазон или полная шкала — линейный участок выходной характеристики (то же, что эффективный электрический угол поворота подвижной системы).
- Функциональный диапазон — участок с наибольшей линейностью, рекомендуемый в спецификации датчика.
- Чувствительность к угловому или линейному перемещению, определяемая как единичное приращение (наклон или фактор масштаба) кривой:

$$S = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta \varphi \quad (1)$$

или $S = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta s$.

- Среднеквадратическое напряжение U_{0q} — среднее из ограничительных уровней (среднее из магнитного диапазона для магнитоуправляемых датчиков).
- Смещение характеристики — отклонение по оси выходного напряжения от теоретического нулевого значения, например взятого при температуре T в сравнении со значением 25°C :

$$\Delta U_{0q(\Delta T)} = \frac{U_{0q(T)} - U_{0q(25^\circ\text{C})}}{S_{(25^\circ\text{C})}} \quad (2)$$

- Линейность (то же, что нелинейность, или ошибка линейности) — отклонение от пропорциональной линейной функции

(прямой линии), выраженное в процентах верхнего или нижнего предела измерительного диапазона (полной шкалы):

$$L+ = \frac{U_{\text{max}} - U_{0q}}{2 \times (0,75 U_{\text{max}} - U_{0q})} \times 100\% \quad (3)$$

$$L- = \frac{U_{\text{min}} - U_{0q}}{2 \times (0,75 U_{\text{min}} - U_{0q})} \times 100\%$$

- Симметричность:

$$Sym = \frac{U_{\text{max}} - U_{0q}}{U_{0q} - U_{\text{min}}} \times 100\% \quad (4)$$

- Чувствительность к напряжению питания и ратиометричность («rail-to-rail») — пропорциональность напряжению питания чувствительности и среднеквадратического напряжения:

$$\Delta U_{0q(\Delta V)} = \frac{U_{0q(V_{cc})} / U_{0q(5B)}}{V_{cc} / 5B} \times 100\% \quad (5)$$

$$\Delta S_{(\Delta V)} = \frac{S_{(V_{cc})} / S_{(5B)}}{V_{cc} / 5B} \times 100\%$$

и другие важнейшие характеристики, например разрешение и повторяемость (особенно важно для датчиков с обратным ходом), магнитная чувствительность (для магнитоуправляемых датчиков) $S_M = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta B$, температурная чувствительность или температурный дрейф смещения, для большинства магнитоуправляемых датчиков эквивалентный точности — см. (2), дрейфы чувствительности к перемещениям:

$$\Delta S_{(\Delta T)} = \frac{S_{(T)} - S_{(25^\circ\text{C})}}{S_{(25^\circ\text{C})}} \times 100\% \quad (6)$$

магнитной чувствительности (определяется аналогично) и т. д.

Конструкция автомобильных аналоговых датчиков положения

Очевидно, датчики положения не могут иметь такую простую конструкцию, как, например, бесконтактные датчики угловой скорости (см. рис. 2). Как будет ясно далее из анализа имеющейся базы физических эффектов, конструктивная общность устройств этого типа предполагает механическое задание нулевого положения датчика и в ряде случаев ограничение максимальной измеряемой величины (в том числе угла, если не требуется измерять угол поворота 360° в несколько оборотов) [6–11, 15–22]. Эти признаки должны быть реализованы в корпусе датчика — например, нулевым считается положение подвижной системы датчика, когда лыски оси дросселя совмещаются с выступами в установочной втулке датчика (см. рис. 1б).

Установочная втулка или установочный вал датчика в общем случае будут иметь ориентирующие выступы, лыску или паз, которые при установке датчика совмещаются с лысками или выступами на оси вала детектируемого объекта (типа дроссельной заслонки)².

При вращении вала управляющего привода установочный компонент осуществляет вращательное движение внутри неподвижного корпуса датчика, жестко закрепленного, например, на двух винтах; в датчиках линейного положения предусмотрена аналогичная механическая связь посадочного компонента с линейно перемещаемым объектом.

Поскольку не удастся полностью избавиться от механического контактирования, датчики положения не могут иметь теоретически бесконечный срок службы, как бесконтактные датчики угловой скорости ферромагнитного зубчатого ротора. Надежность устройства оценивается в млн полных циклов работы датчика до его наработки на отказ и в системах с ограниченным углом ($<360^\circ$) составляет обычно более 1 млн циклов. Для повышения надежности движение установочного компонента подпружинивается — в корпус датчика вводится пружина, работающая на кручение (для противодействия крутящему моменту двигателя) или растяжение — сжатие (в линейных датчиках), а для обеспечения строгих допусков крайние положения рабочего хода дублируются, например, ограничительными ребрами. Следует отметить, что в типичных конструкциях имеются существенные ограничения на допустимый крутящий момент, прикладываемый к несущей части датчика в течение срока его службы (обычно не более 120 Н·мм), и возвратный момент пружины (порядка 20–120 Н·мм).

Установочный компонент является несущей частью, на которой расположен активный электрический компонент (движок потенциометрического датчика) или бесконтактный магнитный или другой компонент (бесконтактные датчики).

Потенциометрические и бесконтактные датчики положения

Для измерения положения в автомобильных системах подходят самые различные технологии, значительное распространение среди которых получили потенциометрические датчики (угла и линейных перемещений). Этот тип датчиков характеризуется наличием подвижных механических контактов, перемещение которых вдоль длины переменного резистора изменяет его сопротивление пропорционально положению контактов. До недавнего времени контактные датчики положения сохраняли лидирующие позиции на автомобильном рынке, чему способствовали такие значительные достижения потенциометрической технологии, как малые размеры корпуса и низкая цена.

В ответ на растущие требования надежности, с целью уменьшения износа и реструктуризации компонентов современные автомобильные датчики стремятся использовать бесконтактные конструкции, в которых электрическая и механическая части физически отделены друг от друга. Наиболее известными из бесконтактных технологий датчиков являются:

- твердотельные магнитоуправляемые датчики: — датчики Холла;
- датчики, использующие эффекты изменения магнитосопротивления (эффекта Гаусса, АМР, ГМР);

² Должен быть упомянут еще один вариант монтажа, популярный в промышленных системах: установочная втулка отделена от датчика, то есть подвижный элемент соединен непосредственно с валом. Но из-за специальных автомобильных требований уплотнения этот вариант не является предпочтительным в рассматриваемой предметной области.

- индуктивные преобразователи, в том числе:
 - дифференциальные трансформаторные датчики LVDT/RVDT;
 - индуктивные преобразователи (LVIT/RVIT);
 - индуктивные преобразователи с вихревыми токами;
- радиочастотные трансиверы с индуктивным аттенуатором;
- магнитоиндуктивные датчики (MVIT);
- емкостные трансиверы;
- магнитостриктивные датчики;
- оптические датчики.

Каждая из этих технологий имеет как свои преимущества, так и свои ограничения при ее использовании в том или ином автомобильном устройстве, оценка которых относится к задачам настоящей статьи.

Потенциометрические датчики

К движущейся части датчика, такой, как установочная втулка датчика угла³, жестко механически связанной с валом управляющего привода или активатора клапана, прикрепляется подвижный рычаг — токосъемник, одновременно осуществляющий скользящий электрический контакт на специально нанесенном резистивном слое, как правило, с помощью контактирующих щеток (рис. 3а).

При перемещении скользящего контакта по радиусу токопроводящего сектора поверх резистивного слоя потенциометра его выходное сопротивление R_{ϕ} изменяется в зависимости от угла поворота детектируемого объекта ϕ . Потенциометрическое напряжение благодаря пропорциональной связи между длиной проволоки или дорожки с ее электрическим сопротивлением и в соответствии с законом Ома представляет собой линейное напряжение постоянного тока $U_{\text{вых}}$. Чем ближе находится движок к уровню напряжения питания $U_{\text{пит}}$, тем выше выходной сигнал датчика. Стандартное подключение подвижного контакта выполняется с помощью второй контактной дорожки, состоящей из того же резистивного материала.

Наиболее известны две технологии датчиков: проволоочные потенциометры (wire-wound — реохорд) и потенциометры с резистивными дорожками, выполненными способом нанесения резистивной пасты по радиусу токопроводящего сектора, контакт с которыми осуществляется при помощи подвижных контактных щеток. Потенциометрические датчики выпускаются известными фирмами Bosch, Novotechnik, CTS Corporation, Duncan, Wabash, Ruf Electronics и др. (некоторые примеры приведены в таблице 1 и показаны на рис. 3).

Обе технологии являются контактными, что означает непосредственный механический контакт движущейся части, осуществляющей формирование электрического сигнала, и, следовательно, подвержены износу. Работа контактов сопровождается акустическим, а также электромагнитным шумом, поскольку нет никакой обрабатывающей электроники. Во избежание износа и погрешности измерений ток в зоне контакта минимизируют ($I_{\text{конт}} < 1 \text{ мА}$). Напряжение на измерительной дорожке обычно трассируется несколькими последователь-

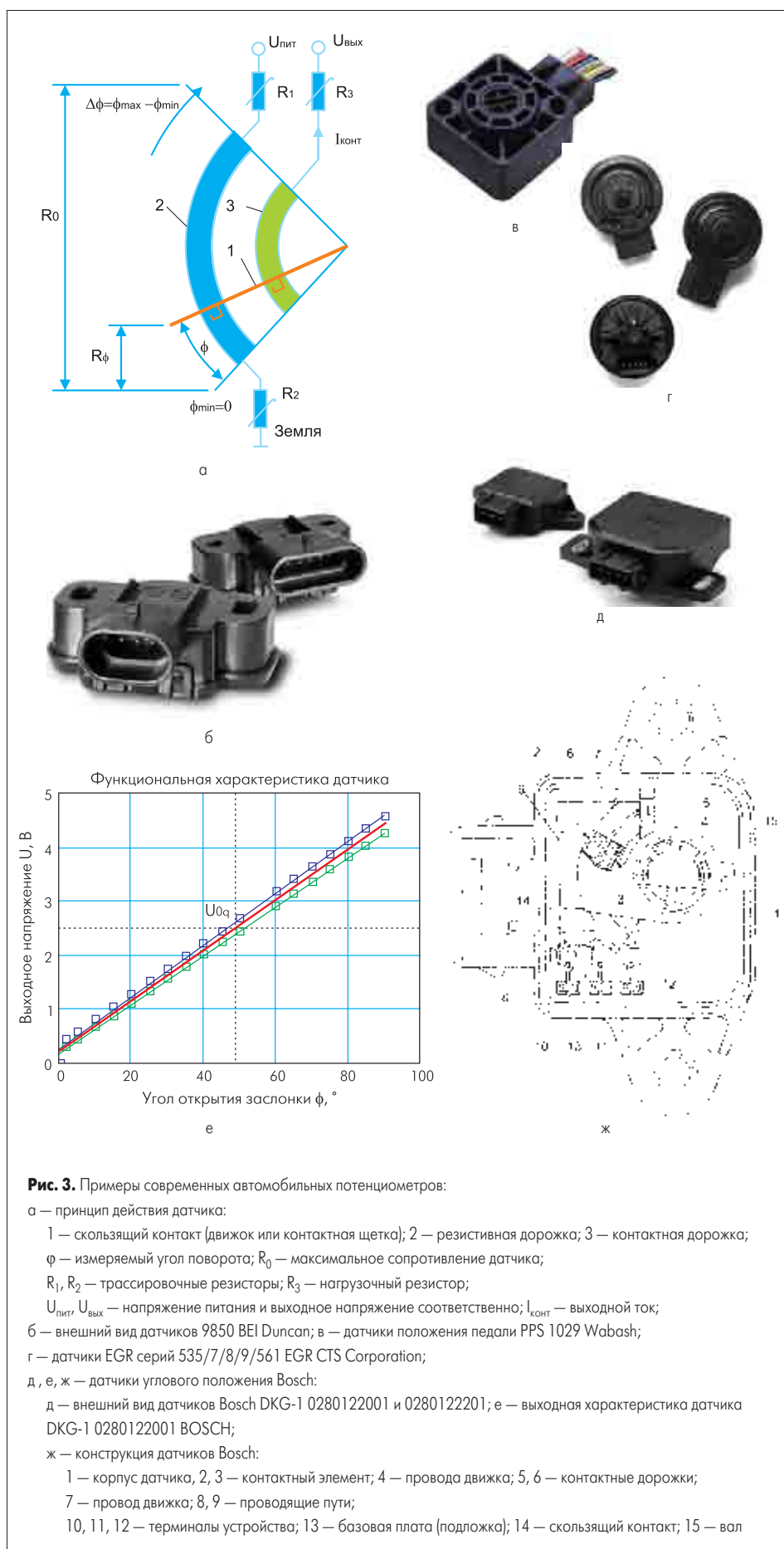


Рис. 3. Примеры современных автомобильных потенциометров:

а — принцип действия датчика:

1 — скользящий контакт (движок или контактная щетка); 2 — резистивная дорожка; 3 — контактная дорожка; ϕ — измеряемый угол поворота; R_0 — максимальное сопротивление датчика;

R_1, R_2 — трассировочные резисторы; R_3 — нагрузочный резистор;

$U_{\text{пит}}, U_{\text{вых}}$ — напряжение питания и выходное напряжение соответственно; $I_{\text{конт}}$ — выходной ток;

б — внешний вид датчиков 9850 BEI Duncan; в — датчики положения педали PPS 1029 Wabash;

г — датчики EGR серий 535/7/8/9/561 EGR CTS Corporation;

д, е, ж — датчики углового положения Bosch:

д — внешний вид датчиков Bosch DKG-1 0280122001 и 0280122201; е — выходная характеристика датчика DKG-1 0280122001 BOSCH;

ж — конструкция датчиков Bosch:

1 — корпус датчика, 2, 3 — контактный элемент; 4 — провода движка; 5, 6 — контактные дорожки;

7 — провод движка; 8, 9 — проводящие пути;

10, 11, 12 — терминалы устройства; 13 — базовая плата (подложка); 14 — скользящий контакт; 15 — вал

ными резисторами R_1, R_2 для защиты от перегрузок [11].

В то же время обе они подходят для высокотемпературной работы, обеспечивают ста-

бильный линейный выход (см. рис. 3е) и допускают большой диапазон угловых измерений (даже более 360° для проволоочных потенциометров). Известны также линейные потен-

³ Очевидно, этот тип датчиков может быть легко линеаризован простым разворачиванием кругового сектора вдоль его длины.

Таблица 1. Сравнительные технические данные некоторых автомобильных потенциометров

Потенциометрический датчик	9850 BEI Duncan	PPS 1029 Wabash	Линейные датчики 535/7/8/9/561 EGR CTS Corporation	DKG-1 0280122001 BOSCH
Напряжение питания, В	5*	13,5 max	5,0 ±0,1	5±0,1
Ток потребления, мА	—*	20	5	—*
Полное (входное) сопротивление, кОм	5 ±20%	Потенциометр 1: 2,5 кОм±15%; Потенциометр 2: 2,5 кОм±15%	4,0 кОм ±40%	Сопротивление между выводами по цепи питания 2,0±0,2; по цепи выхода 0,7...1,38
Температурный коэффициент сопротивления, ×10 ⁻⁶ °C ⁻¹	—*	±600	—*	±1500
Выход: линейный диапазон, в % от напряжения питания	Дуальный или одиночный выход	Дуальный (два потенциометра)	Линейный диапазон 2,5...95%	(0,25...0,65)...(3,9...4,8) В; линейный диапазон 10...90 %
Полный диапазон, ° или мм	180° или 120°	85	6,6 ...9,5 мм	0...95°
Функциональный диапазон, ° или мм	85° или 130° с одиночным выходом; 85 с дуальным выходом	—*	6,3 ...7,0	0...85
Чувствительность, мВ/° или в % от напряжения питания	—*	Потенциометр 1: 1,048% /° ± 0,05% /°; Потенциометр 2: 1,205% /° ±0,05% /°	—*	0,00927 ^{±1}
Линейность (нелинейность), % от напряжения питания	±2 (независимая линейность ±0,5)	—*	±2,0 (абсолютная)	—*
Рабочая температура, °C	-40...125	-40...85 (-40...105)	-40...175	-40...130
Полный механический путь, ° или мм; наличие пружины (Крутящий момент пружины, Н·мм); начальный момент /момент останова	180° или 120°; момент останова 0,68 Н·м max; крутящий момент 0,11 Н·м max	83° ±2°; момент возвратной пружины 20 мН·м; момент останова 5 Н·м мин	Линейный механический путь 6,6–9,5 мм; разный момент возвратных пружин	0...100°
Вибрация	15 г; 50 ...1000 Гц	—*	40 г, 10...2000 Гц, 96 ч по каждой оси	50г; 50...250 Гц
Наработка на отказ	1 (5) млн полных циклов	5 (10) млн полных циклов	10 млн полных циклов	2 млн полных циклов

* Данные не специфицируются производителем

циометры, предназначенные для измерения линейных перемещений (см. табл. 1).

Проволочные потенциометры могут принимать самые разнообразные формы, зависящие от количества витков, но обычно имеют более высокий профиль и значительные размеры, что ограничивает их применение в качестве автомобильных датчиков.

Потенциометры, снабженные контактными дорожками из резистивной пасты, имеют более низкий профиль, линейный выход с умеренными шумовыми свойствами, вследствие чего получили широкое распространение среди автомобильных устройств. Специальные технологические приемы позволяют избавиться от их недостатков. Например, эти датчики в принципе измеряют углы только менее 360°, поэтому для увеличения точности и расширения углового диапазона применяются двухдорожечные потенциометры (как 9850 BEI Duncan или PPS 1029 Wabash). Тем не менее щеточные потенциометры с контактными дорожками чувствительны к загрязнению (пыли) и имеют особенно короткий срок службы по сравнению со всеми остальными потенциометрическими устройствами, но этот недостаток полностью компенсируется низкой ценой датчика; известны новые разработки в этой области, ориентированные на снижение цены (см. рис. 3ж) [12].

Линейные датчики Холла

Классический датчик положения на эффекте Холла использует наработанную технологию самого популярного физического эффек-

та, в которой магниточувствительный статор определенно реализует весь потенциал элементной базы интегральных датчиков, что позволяет упростить, улучшить измерительные системы и удешевить их [13, 14]. Бесконтактные, магнитоуправляемые ИС Холла, снабженные интегрированными средствами компенсации, позволяют делать точные измерения в жестких условиях автомобильной окружающей среды (температура, вибрация, загрязнение), отличаются низкой ценой компонентов и материалов, технологичностью монтажа, функционируют при температурах от -40 до 150 °C и выше (хотя для большинства автомобильных датчиков положения практически достаточно 125 °C), обеспечивают интерфейс, адаптированный к автомобильному электронному оборудованию, и требуют минимум обрабатывающей электроники без установленного на плате микроконтроллера, который в настоящее время интегрируется непосредственно в ИС.

Удобный путь для создания рабочего магнитного поля в датчиках положения обеспечивают подвижные постоянные магниты (рис. 4–6), механически соединенные с детектируемым объектом. За счет собственной высокой линейности эффекта Холла в первом приближении для получения аналоговой выходной характеристики требуется только усиление слабого первичного сигнала (в выражении $U_H = \sigma B$ чувствительность σ эффекта Холла составляет всего 0,4–0,7 мВ/кА/м).

Таким образом, эффект Холла особенно широко используется ведущими производителями автомобильных датчиков, такими, как



Рис. 4. Примеры современных автомобильных линейных датчиков Холла:

а — датчик углового положения серии RPN Honeywell;

б — датчики положения серии 581 CTS;

в — датчики Холла с вертикальными элементами Холла RSC2200 U.S. Novoteknik;

г — программируемый датчик 9900 BEI Duncan;

д — датчики положения (педаль акселератора, сцепления, подвески и т. д.) RPS 1047 Wabash Technologies;

е — программируемый датчик серии HRS100 Invensys (Honeywell);

ж — программируемые датчики углового положения серии NCR SHLR-0008 AEC

BEI Duncan, American Electronic Components, Delphi Technologies, Hitachi, CTS Corporation, Siemens VDO, Wabash и другими. Некоторые примеры приведены в таблице 2 и показаны на рис. 4.

При вращении магнита датчик генерирует первичное синусоидальное напряжение пропорционально изменению углового положения ротора, но именно в связи с применением магнитов линейный диапазон датчика угла на практике составляет не более 120°, а линейность датчиков Холла колеблется в пределах 2%, и даже до 3% — из-за их повышенной температурной чувствительности (см. табл. 2). Если требуется измерять углы 360° и более, по-

Таблица 2. Сравнительные технические данные автомобильных линейных датчиков Холла

Линейные датчики Холла	Серия RPN Honeywell	Серия 581 CTS	RSC2200 U.S. Novotechnik	Серия 9900 BEI	Серия RPS 1047 Wabash	Серия HRS100 Invensys (Honeywell)	Серия NCR SHLR-0008 AES и серия Ride-hide (отлич. параметры для датчиков Ride-hide в скобках)
Напряжение питания, В	10...30	5±0,5	5±0,5; или 12...30	5±0,25	4,5...5,5	5±0,5	4,5...5,5
Ток потребления, мА	15 max	2...6 (15 max)	10	20 max (10 мА max на выход)	—*	5	7 ...10
Выход; линейный диапазон, в В или % от напряжения питания	0,25...4,75 В	5...95%	0,5...4,5 (0...10)В, аналоговый или ШИМ, многовариантный; 10...90%	Дуальный (шестиконтактный); с датчика 1 — 0,5...4,5 В; с датчика 2 — 0,25...2,25 В	Трехпроводной	5...95%	Стандартный трехпроводной (аналоговый или ШИМ); 10...90%
Полный угловой диапазон, °	90	0...110	360 (возможны другие варианты)	–90...+90	0...120	90° ± 2°, 180° ± 2°	0...100 (0...120)
Функциональный диапазон, °	± 45	0...90	360	–90...+90	—*	—*	0...85 (0...90)
Линейность (нелинейность), % от напряжения питания	± 2,5	±3 – линейность в полном диапазоне; (±1 при 25 °С; ±2 при –30...120 °С); независимая линейность ±1	определяется как точность ±0,35°	2% при комн. температуре, 3% во всем температурном рабочем диапазоне	±3 – абсолютная линейность (±1,5 – независимая линейность)	±2	±3
Рабочая температура, °С	–25...85° (–40...+125)	–40...85°	–40...85°	–40...85° (–40...125)	–40...130	–40...85°	–40...150
Программируемость (Программируемые параметры)	Нет	—*	Программируемый	Однократно программируемый	«Программируемый»	«Программируемый»	«Программируемый (Ограничительные уровни, чувствительность (наклон), смещение, температурная компенсация)»
Разрешение °	бесконечное	10...12 бит	±0,09 (°)	бесконечное	бесконечное	бесконечное	бесконечное
Повторяемость, % от напряжения питания	± 0,5	—*	±0,35 (°)	—*	<0,4	—*	±0,2 (в одном направлении при пост. температуре)
Гистерезис, % от напряжения питания	—*	—*	0,1(°)	—*	<0,2	—*	1 (с резистивной нагрузкой при пост. температуре)
Полный механический угол, ° наличие возвратной пружины (Крутящий момент пружины, Н·мм); начальный момент; другие сведения	360	0...110; С пружины (20...120); момент останова 0,8 Н·м	360; начальный момент <0,05 Н·м; максимальная скорость 6000 об/мин	–90...+90; по требованию	0...120; с пружины (20...115)	90° ± 2°, 180° ± 2°;	0...120 (360); с пружины (без пружины)
ЭМС, В/м	DIN 40 839	<50 мВ от 100 В/м и 200 В/м, 1 МГц... 2 ГГц	—*	100 В/м; 14 кГц...1 ГГц	—*	30 В/м, 10 кГц...1000 МГц	200 В/м, 1–512 МГц; 100 В/м, 512 МГц; 1 ГГц ±10 кВ, 250 пФ/1,5 кОм
Вибрация	—*	>144 ч 14 г, 20...2500 Гц	3 г; 20...2000 Гц	5g пиковое ускорение, 60...2000 Гц	—*	15g, 10 ...2000 Гц	14 г (20 г пик); 40 Гц; 8 часов по каждой оси
Наработка на отказ	—*	1 млн полных циклов	360 млн циклов при 60 об/мин	—*	>5 млн полных циклов	50 млн полных циклов	10 млн. полных циклов

* Данные не специфицируются производителем

требуется несколько чувствительных элементов (см. рис. 4–6)⁴.

Особо следует отметить уникальную технологию вертикальных элементов Холла VERT-X от Novotechnik для угловых измерений, преодолевающую этот недостаток. Один из уникальных признаков этой технологии — измерение углов в 360° в совокупности с прочими достоинствами эффекта Холла, другой — ее исключительная надежность в 360-градусном диапазоне (см. табл. 2).

Но на практике конструирование датчика положения на эффекте Холла является далеко не простой задачей.

Известно множество конструкций, применяющих различные комбинации активного (в схеме обработки сигнала) и пассивного усиления (с применением ферромагнитных концентраторов магнитного потока), и различные средства компенсации [15–18, 20, 21]. Например, достаточно сложные магнитные системы с массивными магнитопроводами, в зазоре между которыми размещается датчик Холла, описаны патентами [15, 16, 17]. Во многих случаях применяется более одного магнита (как минимум, два) [20], с концентраторами магнитного потока [21].

Практический интерес представляют наиболее простые устройства [21, 22], показанные на рис. 5.

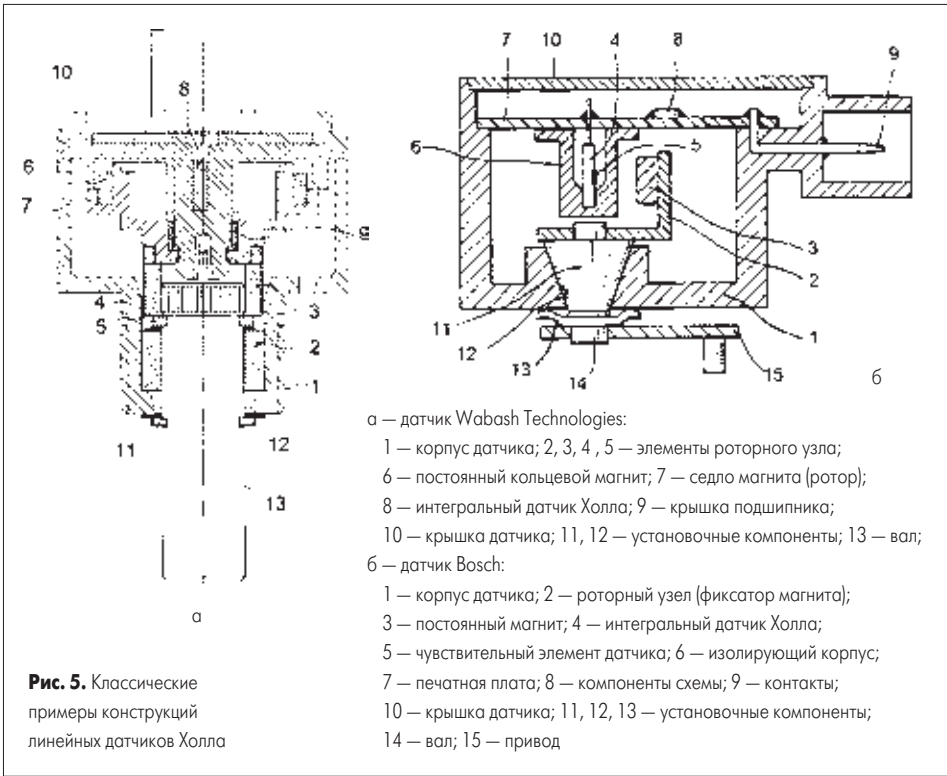
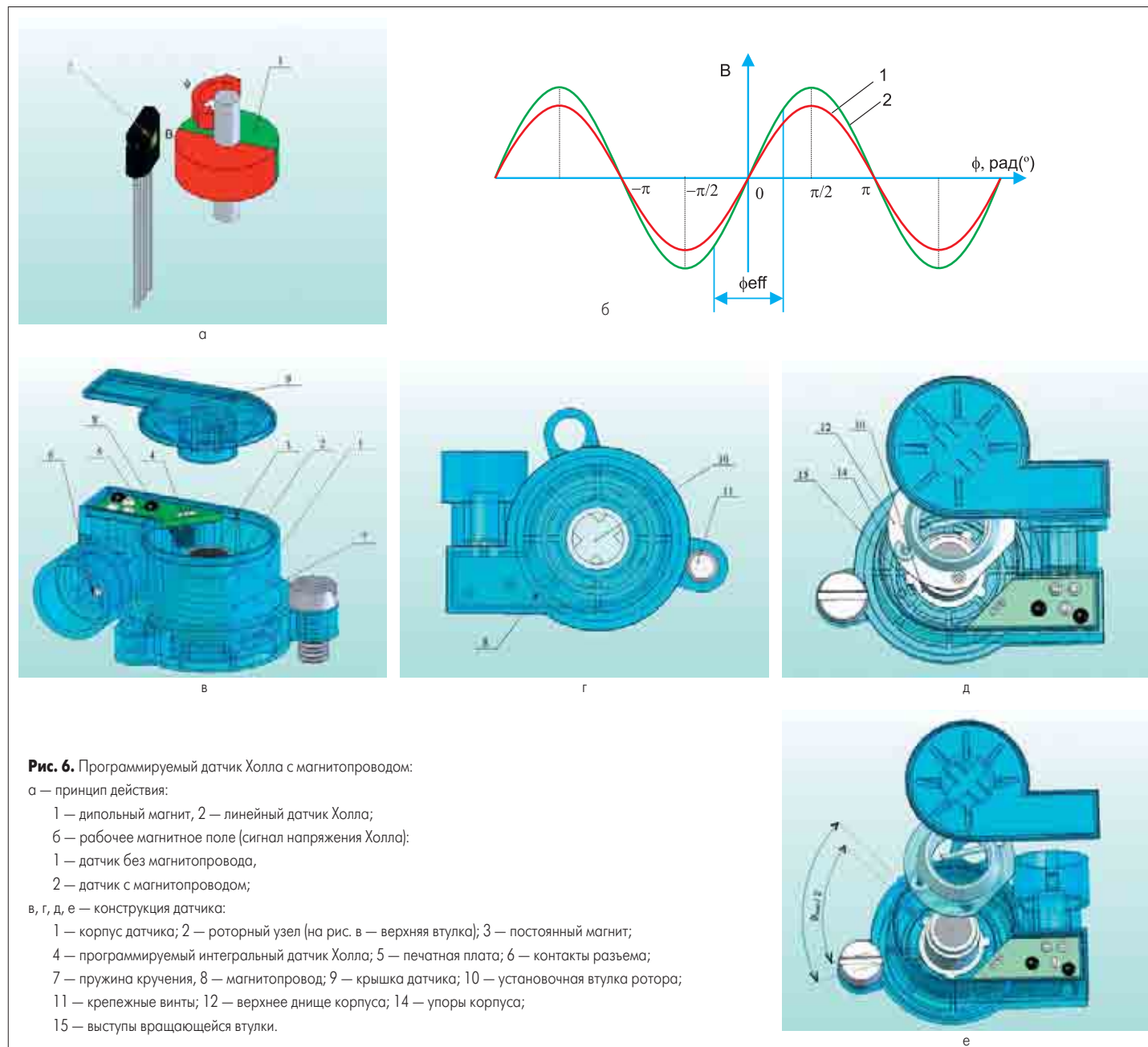


Рис. 5. Классические примеры конструкций линейных датчиков Холла

⁴ Для датчиков линейного положения нет подобных ограничений, но необходимо отметить, что зависимость магнитной индукции поля величины линейного перемещения может быть синусоидальной только в режимах типа Slide-by; во фронтальном режиме зависимость является обратно пропорциональной (не синусоидальной, без линейного участка), что преодолевается в режимах типа Push — Push и Push-Pull [14].



Измерительное устройство Bosch (рис. 5) для бесконтактного определения угла вращения [22] отличается особенной простотой и отсутствием ферромагнитных концентраторов, но обеспечивает линейный участок кривой порядка 80°.

В большинстве автомобильных систем с ограниченным угловым перемещением автомобильный датчик должен эффективно измерять углы порядка 110–120°. Специально для таких систем разработан вариант конструкции датчика (новая разработка автора для автомобилей ВАЗ 2112), показанный на рис. 6. Устройство реализует классический режим вращения дипольного магнита (рис. 6а) [14, 19] и в ограниченном угловом диапазоне ϕ образует однородный синусоидальный магнитный сигнал без присутствия характерных плоских участков (рис. 6б).

Предлагаемый датчик отличается от ряда уже существующих вариантов применением ферромагнитного концентратора (магнитопровода) специальной формы совместно с программируемым датчиком Холла. За счет применения концентратора, других функцио-

нальных и конструктивных особенностей (см. рис. 6в–е) устройство отличается увеличенной чувствительностью и надежностью. Это означает, при прочих стандартных возможностях в конструкции можно использовать более слабые (по величине остаточной намагниченности) и меньшие по размеру магниты.

Бесконтактный датчик положения (рис. 6в) состоит из неподвижного корпуса 1, роторного узла 2 с диаметрально намагниченным постоянным магнитом 3, интегрального датчика Холла 4, печатной платы 5, контактов разъема 6, пружины 7, ферромагнитного концентратора 8 (магнитопровода) и крышки 9. Ротор 2, состоящий из двух частей⁵ (позиция 2 указывает на верхнюю втулку), механически связан с вращающимся валом детектируемого объекта (цели) и имеет возможность поворота в основании корпуса 1. С обратной стороны ротора 2 (рис. 6г) в нижней втулке 10 имеется паз для установки устройства на вал с заданной начальной ориентацией, определяемой внутренними ребрами паза. Корпус 1 жестко крепится двумя

Для механического ограничения осевых перемещений роторного узла в корпусе 1 выполнено двойное днище. Верхнее днище 12 (рис. 6д) фиксируется поверх роторного узла 2 на оплавляемых штырях и приклеивается к днищу корпуса 1. Механический угол ϕ ограничивается упорами 14 в основании корпуса и выступами 15 втулки 10 ротора 2.

Постоянный магнит 3 жестко устанавливается (запрессовывается и вклеивается) в верхней втулке ротора 2 поверх пружины кручения 7, расположенной вне рабочей зоны бесконтактного взаимодействия магнита 3 и датчика 4. Осевое перемещение верхней втулки ротора 2 механически ограничивается кольцевым выступом на внутренней стороне верхней крышки 9 датчика.

В конструкции особенно важным является начальное размещение магнита 3: в нулевом положении должны быть совмещены механическая плоскость симметрии датчика 4 и магнитная плоскость симметрии магнита 3 с нулевым значением магнитной индукции поля (или средним из магнитного диапазона датчика). Это положение показано на рис. 6а, е и соответствует

⁵ Роторный узел может быть также выполнен как одна деталь

среднеквадратическому напряжению выходной характеристики (см. рис. 1 и 6б). Начальная ориентация магнита 3 относительно датчика 4 обеспечивается в процессе сборки: непосредственно перед его жесткой установкой определяется по результатам измерений магнитного поля, например, тесламетром, гауссметром, калиброванной линейной ИС Холла или с помощью специальных аппаратно-программных средств.

Повышение чувствительности датчика достигается только за счет использования ферромагнитного концентратора 8, но при оптимальном подборе других параметров магнитной системы. Следует отметить, что в системах на эффекте Холла с постоянным магнитом из обычного материала типа NdFeB (в промышленности обычно выпускаются магниты с намагниченностью 1000–1200 мТл) можно использовать рабочие зазоры порядка 5–8 мм и нет смысла максимально приближать датчик к магниту. Оптимальный наклон выходной характеристики под углом порядка 45° (чувствительность) рассчитывается с использованием средств программирования датчика.

Дальнейшее увеличение линейного участка, показателя линейности, повышение точности, повторяемости и надежности реализуется через схемотехнику датчика. Развитие адаптационных признаков к конкретным условиям работы, упрощение конструкции, технологии сборки и монтажа обеспечиваются с применением современной элементной базы программируемых ИС Холла, текущее состояние рынка которой отражено в одной из статей автора [14], а особенности применения будут рассмотрены во второй части статьи.

Заключение

Растущий спрос на надежные и точные электронные системы управления в последние годы приводит к увеличению числа бесконтактных датчиков положения, используемых в автомобильных системах. Производители автомобильного оборудования исследуют все новые пути для разработки надежных, компактных, недорогих и более точных электронных датчиков, а также обрабатывающих блоков управления с целевым интерфейсом.

Рассмотренные датчики широко используются в настоящее время, но благодаря устойчивым темпам научных исследований и конструкторских разработок в недалеком буду-

щем будут вытеснены множеством новых устройств, наследующих их лучшие признаки и разрабатываемых уже сегодня.

Литература

1. Bannatyne R. The Sensor Explosion and Automotive Control Systems. Sensors Magazine. www.sensorsmag.com.
2. Frank R., Krohn N., Shukman H. The Role of Semiconductor Sensors in Automotive Power Train and Engine Control. www.sensorsmag.com.
3. Prosser Stephen J., Lucas Control Systems, Schaevitz Sensors. The Evolution of Proximity, Displacement, and Position Sensing. www.sensorsmag.com.
4. Madni Asad M., Vuong Jim B., Wells Roger F. The Next Generation of Position Sensing Technology. Part 1: Theory and Design. www.sensorsmag.com.
5. Kanelas G., AlmanD. New Sensors help put pedal into metal. www.sensorsmag.com.
6. Electronic throttle control. United States Patent 6 289 874. Оpubл. 18.09.2001. (BorgWarner, Inc.).
7. Accelerator pedal module. 6 834 564. Оpubл. 28.12. 2004. (Robert Bosch GmbH.)
8. Sensor assembly with a universal sensor module for sensing angular position of an object. United States Patent 6 836 111. Оpubл. 28.12. 2004. (Delphi Technologies, Inc.)
9. Pedal with integrated position sensor. United States Patent 6 809 512. Оpubл. 26.10.2004. (CTS Corporation.)
10. Throttle assembly for internal combustion engine, and throttle sensor. United States Patent Application 20040123838. Оpubл. 1.07.2004. (Hitachi Ltd.)
11. Автомобильный справочник компании Robert Bosch GmbH.
12. Potentiometer. United States Patent 6 838 973. Оpubл. 4.01.2005. (Robert Bosch GmbH.)
13. Graham C., Feltus J., Allegro Microsystems, Inc. Position Monitoring with Hall Effect Sensors. Sensors Magazine. 2002. No. 9.
14. Сысоева С. Новые интегральные датчики Холла специального назначения. Компоненты и технологии. 2004. № 9.
15. Magnetic rotational position sensor with improved output linearity. United States Patent 5 444 369. Оpubл. 22.08.1995.
16. Magnetic rotational position sensor. United States Patent 6 310 473 Оpubл. 30.10.2001. (Kearney-National, Inc.)
17. Non-contact rotational position sensor and throttle valve assembly including non-contact rotational position sensor. United States Patent 6 559 637. Оpubл. 6.05.2003. (Hitachi, Ltd.)
18. Magnetic position sensor. United States Patent 6 703 829. Оpubл. 9.03.2004.
19. Rotational position sensor with a Hall Effect device and shaped magnet. United States Patent 5 159 268. Оpubл. 27.10.1992. (Honeywell Inc.)
20. Angular position sensor including rotor with spaced bar magnets. United States Patent 6 518 750. Оpubл. 11.02.2003. (Delphi Technologies, Inc.)
21. Magnetic rotational position sensor having a peripherally interrupted outer pole piece. United States Patent 6 417 664. Оpubл. 9.07.2002. (Wabash Technologies, Inc.)
22. Measurement device for the non-contact detection of an angle of rotation. United States Patent 6 534 971. Оpubл. 18.03.2003. (Robert Bosch GmbH.)