

# Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы.

Часть 13. Магнитостриктивные преобразователи —  
актуальные измерители линейных и нелинейных  
перемещений и детекторы крутящего момента

Светлана СЫСОВЕВА  
S.Sysoeva@mail.ru

**В данной части статьи рассмотрены измерительные принципы и аспекты функционирования магнитостриктивных преобразователей — относительно нового в автоэлектронике класса датчиков на основе прямых и обратных физических эффектов, связанных с явлением магнитострикции. Физические свойства магнитостриктивных компонентов и разработанные в последние годы эффективные измерительные принципы обосновывают актуальность этого типа датчиков, предназначенных для решения многих задач автоэлектроники — детектирования линейного и нелинейного положения (криволинейного и углового), а также крутящего момента.**

## Введение

В последние годы интерес многих автомобильных производителей и инженеров-разработчиков вызывают магнитостриктивные датчики, применение которых в автоэлектронике и промышленности обычно связано с предоставляемой ими возможностью детектирования значительных линейных перемещений [185–191]. Как было показано в предыдущих частях цикла, многие эффективные измерительные принципы реализованы именно в угловых системах автоэлектроники (эффект Холла, АМР, ГМР, оптические энкодеры, планарные индуктивные и емкостные датчики). Линейные датчики обычно отличаются значительной длиной (потенциометры, LVDT, энкодеры). За исключением потенциометров, реализация многих линейных систем связана также с важнейшим конструктивным ограничением, которым является значительная длина цели и, следовательно, цена. Уменьшение длины цели накладывает сопутствующие функциональные ограничения, такие как компромисс измерительного диапазона и разрешения (датчики Холла и некоторые другие известные концепции индуктивных, емкостных, оптических преобразователей и т. д.).

В качестве примера задач линейных автомобильных систем можно назвать контроль подвески (положения кузова и колес), линейные датчики положения педалей акселератора и тормоза, сиденья, хода линейных двигателей рулевого управления и переключения

коробки передач. Еще одно применение линейных датчиков относится к области автомобильного тестирования — для контроля размеров, поверхностей и зазоров.

На современном автомобильном рынке растет спрос на чисто линейные системы, поскольку в противном случае требуется включение системы прецизионных редукторных механизмов для преобразования линейного перемещения в многооборотное угловое движение. При этом получение компактного и недорогого измерительного сенсорного блока, напротив, означает увеличение системного пространства, сложности и цены. Включение системы редукторов также сопровождается некоторой потерей точности датчика в реальном времени, поскольку ее значение прямо пропорционально числу звеньев механизма, увеличивающих сумму цепочки допусков, и обратно пропорционально его цене.

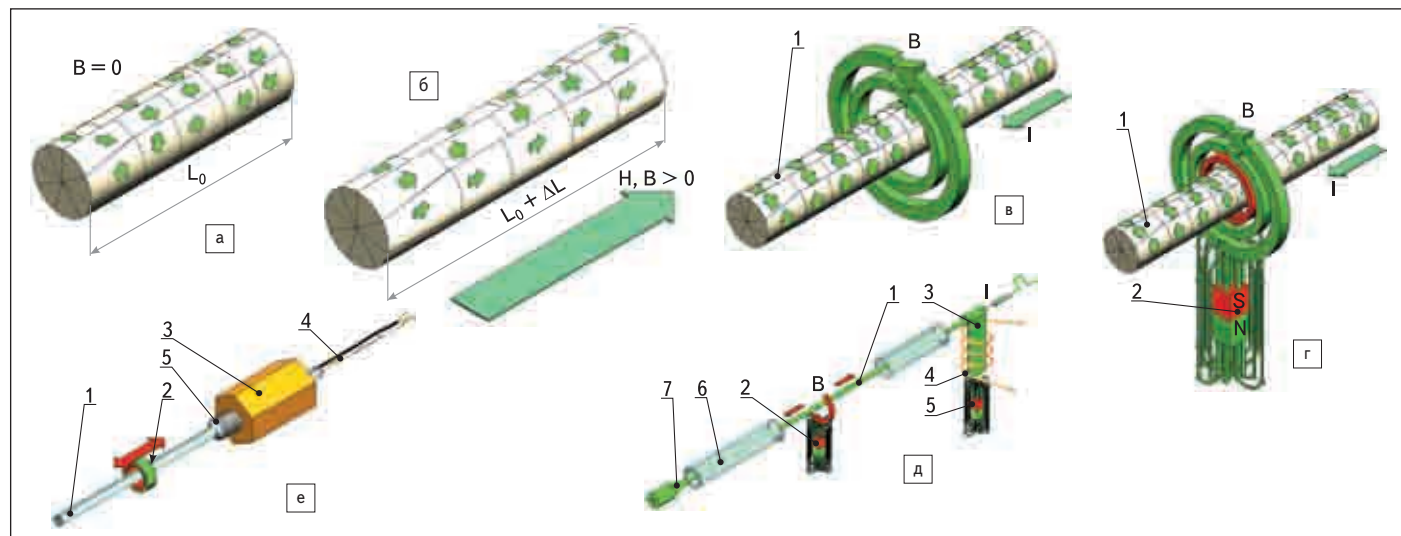
Магнитостриктивные датчики — новая возможность для эффективного решения в первую очередь именно линейных задач. Благодаря бесконтактности, особенностям физических свойств компонентов и рабочего принципа, основанного на измерении времени распространения прямой и отраженной от цели волны (времени импульсного отклика), магнитостриктивные преобразователи отвечают растущим потребностям автомобильного рынка в датчиках с высокой надежностью, отличающихся значительным сроком службы, в течение которого обеспечивается стабильность временных и температурных ха-

рактеристик. Магнитостриктивные датчики характеризуются высокой точностью, обусловленной высокими показателями качества сигнала: высокой линейностью, разрешающей способностью, ограничиваемой только обрабатывающей электроникой, высокой повторяемостью, малым гистерезисом, достаточной электромагнитной совместимостью.

Магнитостриктивные датчики позволяют детектировать значительные линейные перемещения (1–3 м и более), но вследствие своей природы работают менее эффективно на диапазонах до 150 мм.

До недавнего времени магнитостриктивные устройства предназначались в основном для применения в заводской автоматизации, выпускались в монолитном заказном исполнении в относительно малых партиях и продавались по достаточно высокой цене. Однако необходимость увеличения объемов и снижения цены — важнейших составляющих коммерческого успеха в автомобильной сфере — привела к интенсивному развитию магнитостриктивной технологии. Так, компания MTS создала модульную конструкцию датчика, предназначенного для непосредственного встраивания в автомобильные системы. Адаптация к условиям работы и уменьшение стоимости конструкции достигнуты за счет комбинирования различных исполнений взаимозаменяемых модулей с адаптируемым выходом.

Таким образом, для применения магнитостриктивных линейных измерителей в авто-



**Рис. 83.** Иллюстрация теории и принципа действия магнитостриктивных преобразователей:

а, б — иллюстрация магнитостриктивного эффекта в ферромагнитном стержне под действием внешнего магнитного поля В:

а — хаотичное распределение магнитных моментов доменов в отсутствие поля;

б — упорядочение магнитных моментов доменов при намагничивании внешним полем;

$L_0$  — начальная длина стержня при  $B = 0$ ;  $\Delta L$  — удлинение при намагничивании;

в, г — иллюстрация магнитостриктивного эффекта в ферромагнитном проводнике с током I;

в — распределение магнитных моментов доменов под действием магнитного поля тока В;

г — скручивание магнитных моментов доменов под действием аксиального магнитного поля: 1 — доменный стержень; 2 — аксиальный постоянный магнит;

д — измерительный принцип магнитостриктивных датчиков MTS: 1 — волновод; 2 — постоянный магнит-цель; 3 — измерительная лента; 4 — сенсорная обмотка;

5 — постоянный магнит, смещающий обмотку; 6 — изоляционная трубка; 7 — демпфер; I — импульсный ток;

В — скручивающий импульс (направление распространения импульса показано стрелками);

е — типичный магнитостриктивный датчик абсолютного линейного положения: 1 — сенсорный стержень (волновод в защитной трубке); 2 — постоянный магнит-цель;

3 — электронный блок — магнитостриктивный датчик и интегрированная электроника обработки сигнала в корпусе; 4 — терминалы преобразователя; 5 — элемент крепления устройства

электронике сегодня практически не существует ограничений.

К числу важнейших применений встраиваемых магнитостриктивных датчиков относится производство амортизаторов, где требуются бесконтактный дизайн датчика, высокие характеристики, абсолютный принцип измерений.

Для многооборотных угловых систем разработаны также методы детектирования углового положения, как в диапазоне менее  $360^\circ$ , так и свыше  $360^\circ$ . Помимо угловых и линейных перемещений магнитостриктивные датчики способны детектировать и любые нелинейные и уникальные траектории, что является их принципиальным отличием от всех прочих типов датчиков положения.

Еще одно актуальное и уникальное применение магнитостриктивных преобразователей в автоэлектронике — детектирование крутящего момента в системах рулевого управления и коробки передач. В отличие от методов вычислений дифференциальных углов двух валов кручения по сигналам от двух датчиков положения, применяемых в оптических, индуктивных или любых других системах, надежные и стабильные магнитостриктивные преобразователи позволяют с высокой точностью измерять крутящий момент единственного вала, используя при этом только один износостойкий магнитоупругий элемент и единственный бесконтактный датчик магнитного поля, что способствует снижению системной сложности и цены.

Поиск наиболее подходящего датчика положения для конкретной автомобильной системы — одна из насущных задач, которую решают современные инженеры. Она требует от них знаний о существующих преимуществах и ограничениях, а также о возможностях технологий, обеспечивающих рабочие характеристики.

Основная цель данной статьи — предоставление информации о современном технологическом уровне магнитостриктивных датчиков, иллюстрация преимуществ и недостатков преобразователей, которые необходимо учитывать разработчику при оптимизации конкретной автомобильной системы.

## Теория магнитостриктивных датчиков

Магнитострикция — это свойство некоторых кристаллических, обычно ферромагнитных материалов, таких как железо, никель и кобальт, изменять размер и (или) форму при взаимодействии с внешним магнитным полем. Явление изменения размера и формы материала в магнитном поле представляет собой магнитостриктивный эффект.

Явление магнитострикции было открыто Дж. Джоулем в 1842 году. Наибольших значений магнитострикция достигает в ферро- и ферримагнетиках (Fe, Ni, Co, Gd, Tb и других, а также ряде сплавов и ферритах). Эта характеристика материала не изменяется со временем.

Считается, что материал характеризуется положительной магнитострикцией, если он расширяется при помещении в магнитное поле, и отрицательной магнитострикцией, если размеры материала уменьшаются. Средняя величина магнитострикции в основных металлах и простых магнитострикционных сплавах небольшая — порядка 1 мкм/м.

Для того чтобы объяснить явление магнитострикции, ферромагнитный материал рассматривается как физическая совокупность доменов — областей из многих атомов — малых постоянных магнитов, характеризующихся магнитными моментами [185–186, 190–195]. В отсутствие магнитного поля магнитные моменты доменов в пространстве располагаются хаотично. При намагничивании материала домены выстраиваются вдоль своих легких осей намагниченности так, что магнитные моменты стремятся к параллельности друг другу и внешнему магнитному полю (рис. 83а, б).

На рис. 83б показано, что напряженность магнитного поля H при  $B > 0$  вызывает изменение размеров тела (длины стержня  $L_0$ ) вследствие выравнивания магнитных моментов доменов.

Таким образом, магнитостриктивные материалы преобразуют магнитную энергию в механическую, и наоборот. Намагничивание вызывает механическое напряжение магнитостриктивного материала, которое и приводит к изменению длины.

Поскольку приложение магнитного поля вызывает механическое напряжение, которое

изменяет физические свойства магнитостриктивного материала, существует и обратный магнитостриктивный эффект, называемый эффектом Виллари: приложение внешней силы, образующей напряжение в магнитостриктивном материале (растяжение, кручение, изгиб и т. д.), изменяет магнитные свойства (магнитную проницаемость) материала.

Это двунаправленное сочетание магнитных и механических свойств обеспечивает преобразовательную способность и используется для создания как магнитостриктивных датчиков, так и исполнительных устройств.

Для создания магнитостриктивных датчиков положения применяются и прямой магнитостриктивный эффект, и эффект Виллари.

Магнитостриктивный эффект, представляющий собой взаимодействие внешнего магнитного поля с доменами, зависит от свойств материала — состава и способов обработки сплава (термического отжига, холодной обработки), а также от напряженности магнитного поля. Управление упорядочением доменов может быть оптимизировано правильным подбором перечисленных свойств и параметров.

Ферромагнитные материалы, используемые в магнитостриктивных датчиках положения, — это переходные металлы: никель, железо, кобальт. В переходных металлах третья электронная оболочка, удаленная от ядра, не заполнена на 100%, что допускает образование магнитного момента электрона. Магнитное поле вызывает изменение энергетического состояния электронов и увеличение расстояний между узлами в кристаллической решетке. Для того чтобы возвратить состояние низкой энергии электронов на поверхности, в кристалле возникает механическое напряжение.

Для создания датчиков линейного положения на основе проводов с током, изготовленных из магнитостриктивного материала, используется обусловленный магнитострикцией эффект Видемана — механическое закручивание ферромагнитного магнитостриктивного стержня с протекающим вдоль стержня электрическим током при одновременном действии на него кругового магнит-

ного поля, созданного током, и продольного (спирального) магнитного поля (рис. 83 в, г).

На рис. 83г проиллюстрирован эффект Видемана, который состоит в скручивании вследствие аксиального магнитного поля, приложенного к ферромагнитному стержню, по которому протекает электрический ток.

Известен также эффект, обратный эффекту Видемана, — эффект Матисси (Matteucci), сходный с эффектом Виллари. Он состоит в создании магнитного поля, когда материал подвержен крутящему моменту.

На практике способность магнитостриктивных материалов преобразовывать механическую энергию в магнитную используется в датчиках крутящего момента, а способность преобразовывать магнитную энергию в механическую делает их подходящими для создания исполнительных устройств.

Если к магнитостриктивному стержню приложить импульс тока короткой длительности в 1 или 2 мкс, будет получено скручивание в месте локализации аксиального магнитного поля, обычно от постоянного магнита, вследствие взаимодействия магнитного поля магнита с полем тока в стержне [185–186, 190–195]. Минимальная плотность тока наблюдается вдоль центра проводов, максимальная (вследствие скин-эффекта) — на поверхности проводов. Интенсивность магнитного поля также наибольшая на поверхности проводов. Поскольку к стержню прикладывается импульсный ток, механические скручивания распространяются в стержне, вызывая ультразвуковую волну, для которой магнитостриктивный стержень является волноводом. Скорость распространения волны составляет приблизительно 3000 м/с.

Принцип действия магнитостриктивного датчика линейного положения проиллюстрирован рис. 83г, д.

Аксиальное магнитное поле обеспечивает целью — постоянным магнитом, связанным с детектируемым объектом, например, гидравлическим цилиндром. Положение цели изменяется и детектируется.

Волновод представляет собой стационарную часть датчика, размещенную внутри корпуса —

защитной изоляционной трубки, изолирующей волновод (экранирующей) от внешней среды. Присутствие магнита определяется при первом приложении токового импульса к волноводу, поскольку благодаря возникающему в стержне эффекту Видемана отраженная волна достигает импульсного измерительного блока в концевой части волновода. Для точного измерения положения момент подачи токового импульса регистрируется микроконтроллером, который включает таймер до момента регистрации датчиком отраженного импульса, после чего микроконтроллер выключает таймер. Зафиксированное таймером время распространения волны на известной скорости соответствует расстоянию между магнитом и датчиком, или абсолютному положению магнита.

На рис. 83д показан индуктивный импульсный измеритель в сенсорном блоке датчика, который функционирует на основе эффекта Виллари. В индуктивном измерителе лента из магнитостриктивного материала приваривается к волноводу близ одного его конца. Магнитостриктивная лента является сердечником для обмотки, смещаемой постоянным магнитом. Ультразвуковая волна распространяется, достигая окончания ленты, и механическое напряжение, наводимое в ленте волной, вызывает волну изменения магнитной проницаемости ленты — эффект Виллари, что приводит к изменению в плотности магнитного потока обмотки и образованию импульса выходного напряжения на терминалах обмотки (эффект Фарадея).

В качестве детектора ультразвуковой волны может быть использован и любой другой подходящий тип измерителя — например, пьезоэлектрический, пьезорезистивный или емкостной датчик, а также другие конфигурации. Так, компания MTS Temposonics использует индуктивные измерители, показанные на рис. 83д, а компания Sprix на основе комбинации магнитостриктивных и пьезоэлектрических преобразователей разработала линейку пассивных регистраторов импульсного магнитного поля PSSM — датчиков скорости, тока и расхода [196].

Ультразвуковая волна распространяется также и в противоположном направлении. Для того чтобы избежать интерференции сигнала с волнами, распространяющимися в противоположном направлении, их энергия поглощается демпфером (рис. 83д).

Внешний вид типичного магнитостриктивного преобразователя, известного также как MLDT (magnetostrictive linear displacement transducers), показан на рис. 83е. Подвижный элемент MLDT — постоянный магнит — создает скручивающий импульс в металлическом волновомоду с импульсным током. Импульс тока, сгенерированный в сенсорном блоке, перемещается по волноводу на известной скорости до цели и обратно к волновому детектору. Измеряя время отклика, MLDT обнаруживает выход, пропорциональный положению магнита относительно детектора<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Другие типы датчиков времени распространения.

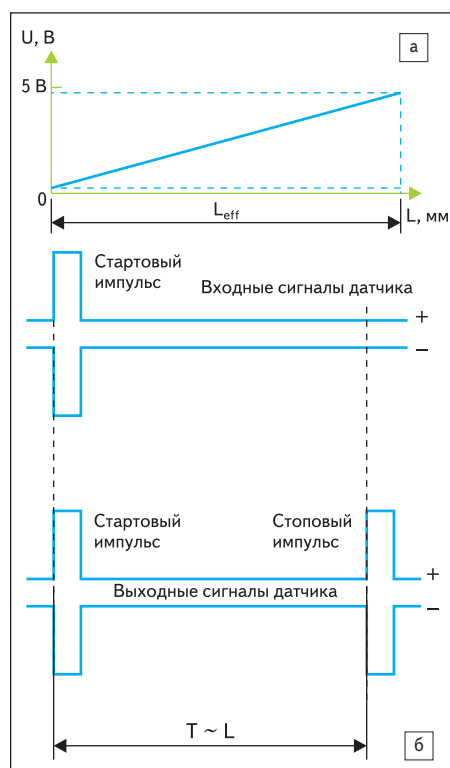
Датчики времени распространения или времени отклика (time-of-flight sensors) функционируют, посылая некоторые типы волн (звуковые или световые) к движущейся цели, и затем измеряют время, затраченное на ожидание получения волны, отраженной от цели. Поскольку физический контакт между целью и сенсорным элементом отсутствует, все преобразователи данного типа относятся к бесконтактным датчикам.

Широко распространенный тип датчиков времени отклика — это магнитостриктивные датчики линейного положения MLDT, рассмотренные выше. Магнитостриктивные линейные датчики предлагают высокое разрешение, высокую повторяемость, хорошую температурную стабильность в ограниченном температурном диапазоне. MLDT полезны для измерения относительно длинных диапазонов, от 150 мм до 3 м или даже более, но измерение коротких диапазонов повышает их стоимость.

Другие типы датчиков времени отклика — это ультразвуковые и лазерные датчики, которые измеряют время отражения ультразвука, звука и света соответственно. В отличие от магнитостриктивных преобразователей оба типа названных устройств зависят от цели, направления излучения и чувствительны к интерферирующим волнам (например, вследствие препятствий). Для ультразвуковых датчиков существенными факторами, влияющими на точность, являются также температура воздуха, влажность, ветер. Ультразвуковые датчики, в зависимости от рабочей частоты, детектируют диапазоны от 0,1 до 10 м и являются достаточно экономичными и надежными измерителями при детектировании уровня и расхода жидкости, обнаружения препятствий при парковке автомобиля, где точность не является ключевым фактором качества измерений.

Лазерные датчики расстояния, работающие по принципу радара (в отличие от оптической триангуляции), обеспечивают высокую точность, высокую повторяемость в типичных диапазонах от нескольких мм до десятков метров, но они относительно дорогостоящи, и обычно для достижения оптимальных результатов предполагают детектирование целей с правильной поверхностью геометрий и высокой отражательной способностью. При детектировании внешних по отношению к автомобилю препятствий должно учитываться также, что лазеры представляют опасность для человеческого зрения.

Оба названных типа датчиков измеряют кратчайшее расстояние между двумя точками (перемещение), и для отслеживания нелинейных траекторий, каковыми являются угловые и криволинейные пути, потребуют специальных вычислений, поэтому оба типа датчиков целесообразно отнести к датчикам расстояний или датчикам перемещений (если речь идет о чисто линейных системах), а не к датчикам положения.



**Рис. 84.** Стандартные выходные сигналы магнитостриктивных датчиков положения:  
а — аналоговый выход;  
б — цифровой выход импульсов «старт–стоп»;  
L — детектируемое положение магнита;  
 $L_{\text{eff}}$  — эффективная длина стержня — рабочий диапазон, предоставляющий сигнал;  
 $T \sim L$  — время между стартовым и стоповым импульсами, измеряемое датчиком, пропорциональное положению магнита

Импульсный сигнал напряжения с выхода магнитостриктивного преобразователя или другого измерителя в сенсорном блоке датчика обрабатывается электронной схемой и преобразуется посредством ASIC в требуемый выходной формат.

Стандартным выходным форматом сигнала абсолютного положения является пропорциональное аналоговое напряжение (рис. 84а), но магнитостриктивные преобразователи поддерживают многие другие типы выхода: постоянное напряжение, постоянный ток, ШИМ, цифровые импульсы старт-стоп (рис. 84б), CANbus, Profibus, SSI, HART и другие.

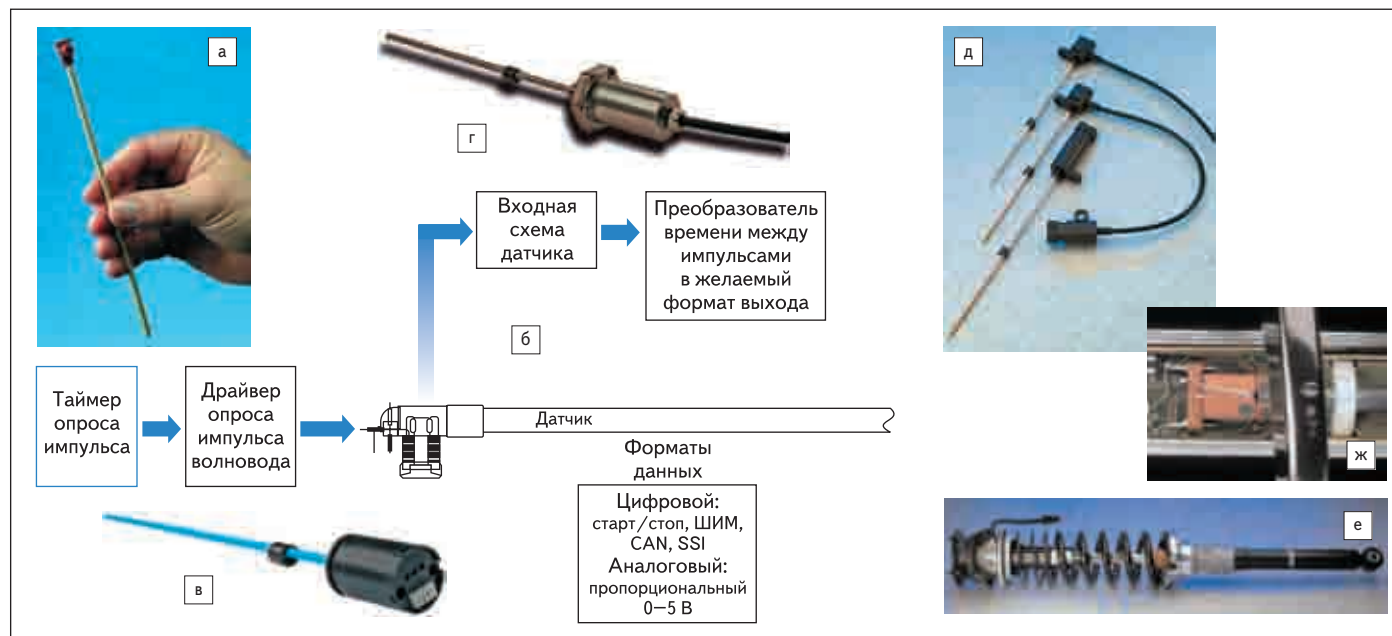
### Магнитостриктивные датчики в автоэлектронике

В последние годы увеличивается спрос на магнитостриктивные преобразователи в автоэлектронике. Применение магнитостриктивных технологий в автомобильных системах обосновали компании Bosch, General Motors, Ford и другие компании, применяющие эти датчики для самых различных задач [197–206].

Основное применение автомобильные магнитостриктивные датчики находят в детектировании линейных перемещений — это подвески, линейные системы рулевого управления, переключение передач и контроль положения колес, где в первую очередь для повышения точности желательна минимизация числа угловых преобразователей с механизмами преобразования одного вида движения в другой [197–202].

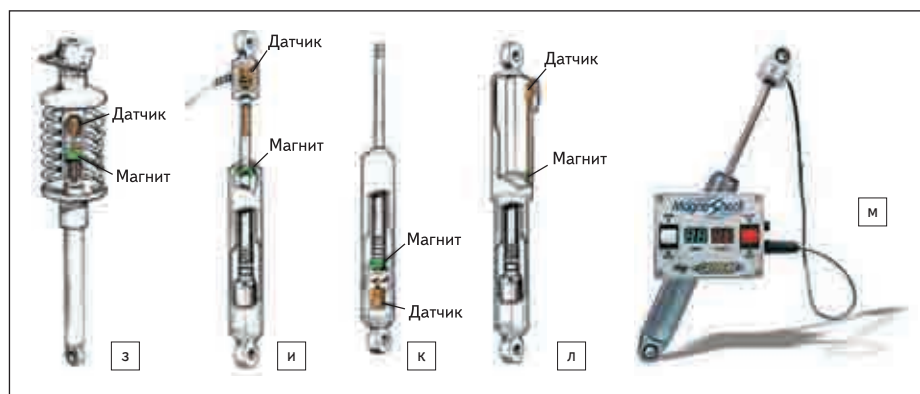


**Рис. 85.** Примеры разработок стандартных коммерческих версий автомобильных магнитостриктивных линейных преобразователей:  
а — датчики CSPR семейства CSP MTS в металлическом корпусе с классом защиты IP67 для автомобильных задач;  
б — магнитостриктивные преобразователи линейного положения Micropulse AT Balluff, рассчитанные на работу в автомобильных системах



**Рис. 86.** Иллюстрация концепции модульности MTS Temposonics линейки датчиков серии С и примеры разработок линейных автомобильных систем на основе встраиваемых модульных преобразователей:  
а — базовый модуль — сенсорный элемент CSE; б — типичная функциональная диаграмма электронного модуля датчика;  
в — типичный внешний вид модульных датчиков серии С для высокообъемных сфер применения; г — датчик серии С в защитном металлическом корпусе для жестких условий эксплуатации;  
д — типичные датчики семейства CSP на основе модуля CSE; е, ж — иллюстрация применения датчиков MTS в гидравлических цилиндрах автомобилей Mercedes





**Рис. 86.** Иллюстрация концепции модульности MTS Temposonics линейки датчиков серии С и примеры разработок линейных автомобильных систем на основе встраиваемых модульных преобразователей:  
з — л — идеи по применению магнитостриктивных датчиков MTS в автомобильной подвеске;  
з — крепление в цилиндре стойки с предварительным нагружением пружины;  
и — крепление датчика и привязка к штоку амортизатора;  
к — крепление датчика и привязка к корпусу амортизатора;  
л — крепление датчика в противоположном кожухе амортизатора;  
м — применение модуля CSE в гоночных амортизаторах MagneShock Carrera

Спектр разработок автомобильных магнитостриктивных датчиков положения проиллюстрирован рис. 85–89.

Некоторые линейные преобразователи, разработанные для автомобильных условий эксплуатации, показаны на рис. 85–87. Сравнительные технические данные некоторых автомобильных и промышленных линейных датчиков приведены в таблице 18.

Относительная немногочисленность стандартных коммерчески доступных версий автомобильных преобразователей объясняется высокой ценой монолитных магнитостриктивных устройств с уникальным дизайном датчика, оптимальное конфигурирование которого для конкретной задачи в условиях ручной или полуавтоматической сборки ограничивало возможность уменьшить стоимость. До недавнего времени магнитостриктивные преобразователи выпускались в основном для обслуживания автоматизированных производств, окупавших выпуск относительно малых партий с высокой ценой единичного устройства. Для автоэлектроники, напротив, представляют интерес устройства, отличающиеся невысокой ценой и производимые в массовых объемах.

Впервые снижения цены добилась компания MTS, разработавшая модульное исполнение датчиков серии С, что позволило производить унифицированные и взаимозаменяемые модули средствами автоматизированного производства и осуществить выпуск датчиков в массовых объемах по более низкой цене [185–186, 188–190, 193–195, 197–201]. Датчики серии С также отличаются меньшими размерами по сравнению с прочими промышленными аналогами. Модульность обеспечивает интегрируемость модулей в различные автомобильные системы, а также формирует рыночный потенциал спроса на магнитостриктивные устройства для целого ряда новых областей.

Идеи MTS по применению датчиков серии С в автомобильной подвеске, коробке передач и рулевом управлении проиллюстрированы рис. 86–88.

Новейшей технологией Novotechnik является магнитостриктивная технология Novostrictive, применение которой компания адаптировала как для промышленных (серии TLM, TMI), так и для автомобильных систем. Ряд других компаний, например, Balluff и TR Electronic, также разработали собственные технологии производства магнитостриктивных датчиков, в том числе и с целями завоевания автомобильного рынка.

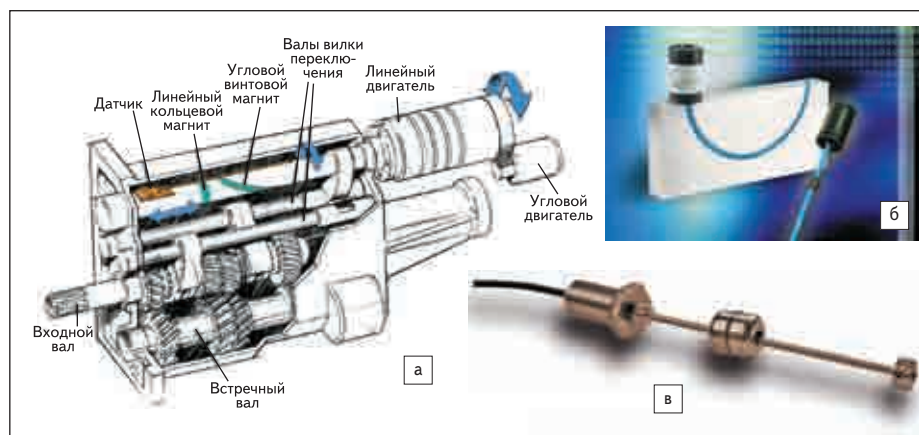
Актуальность магнитостриктивных датчиков положения в автоэлектронике во многом обусловлена (или определена) их физической природой и конструктивными и функциональными особенностями, являющимися следствием базового измерительного принципа.

Поскольку магнитостриктивные преобразователи относятся к типу устройств, рабо-

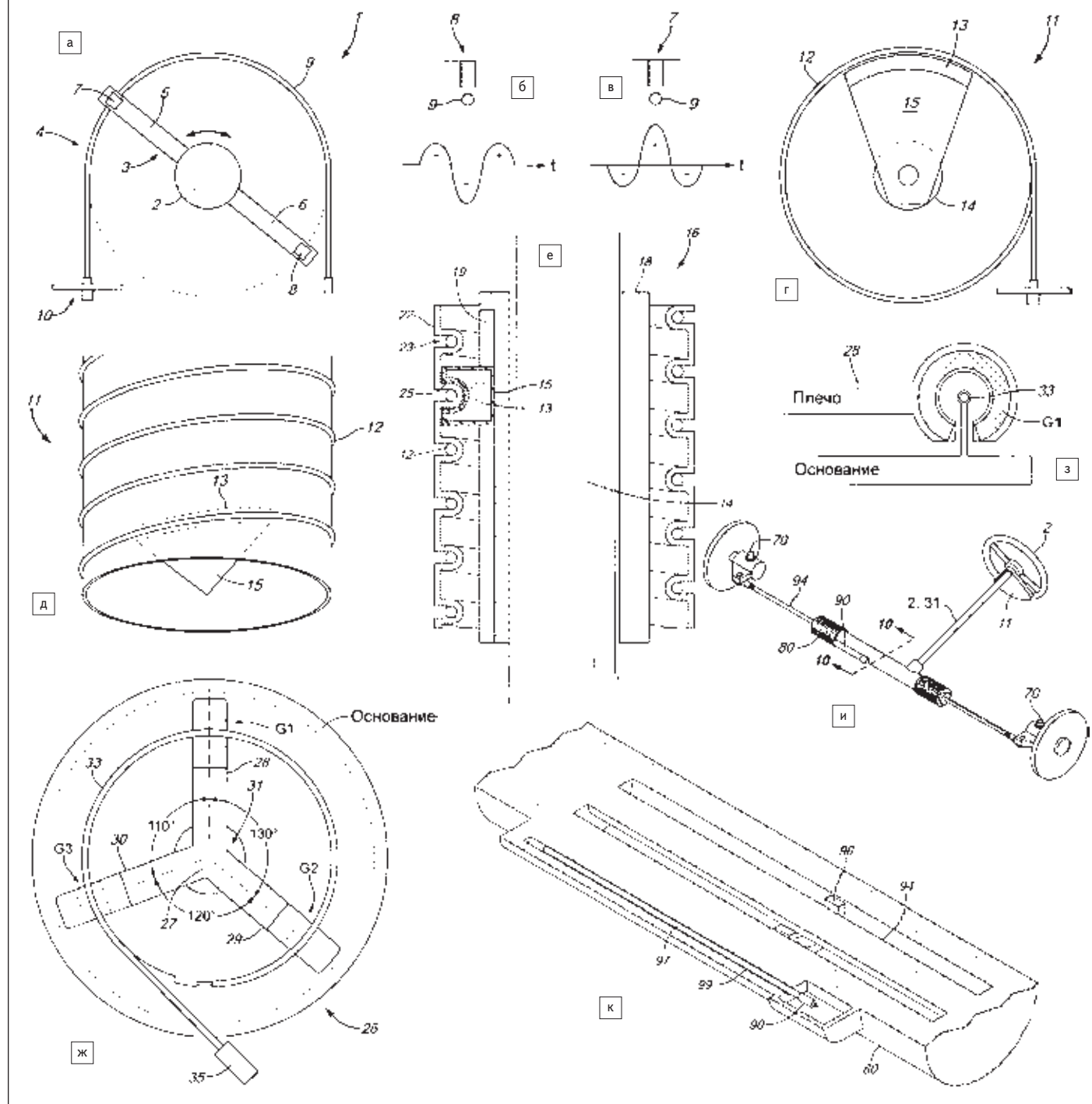
тающих по принципу измерения времени распространения волны от цели до датчика и обратно, цель не отличается значительной длиной и ценой. Принцип измерения времени распространения отраженной волны позволяет получить абсолютный тип датчиков положения, который, в отличие от инкрементальных оптических и магнитных энкодеров, характеризуется устойчивостью к шумам и не требует индексной отметки и/или программы подключения или обучения.

В противоположность ультразвуковым радарам, измеряющим время распространения ультразвуковой волны в воздухе, магнитостриктивные преобразователи используют ферромагнитный стержневой волновод, обеспечивая таким образом ход цели по определенной траектории, экранирование, увеличение скорости распространения, высокую линейность и точность измерения расстояния от датчика до цели, пропорционального длине волновода. Кроме того, минимизируются потери энергии, амплитуды и точности вследствие рассеяния волны на соседние объекты. С помощью магнитостриктивных датчиков можно получить практически бесконечное разрешение, ограниченное только цифровой обрабатывающей электроникой и шумами.

Выходной сигнал после обработки ASIC может быть как аналоговым, ШИМ, так и еще более простым — в виде двух цифровых импульсов старт–стоп, время между которыми для идентификации положения измеряет микроконтроллер. Включение Smart-ASIC в сенсорный блок датчика позволяет программировать измерительный диапазон, детектировать дополнительные параметры движения (механическое нулевое положение, смещение, чувствительность) и формировать любой энкодерный интерфейс. Магнитные и ферромагнитные сенсорные компоненты нечувствительны к влажности и загрязнениям, типичным для автомобильных окружающих условий. Временные допуски (старение) практически не оказывают влияния на измерительную точность датчика.



**Рис. 87.** Некоторые уникальные идеи по применению датчиков MTS Temposonics:  
а — идеи по применению датчиков положения MTS в коробке передач;  
б — датчик серии С с гибким валом для криволинейных измерений;  
в — датчик серии С с поплавком для детектирования уровней жидкости



**Рис. 88.** Магнитоэластичные датчики положения МТС для систем рулевого колеса [200]:

а-в — магнитоэластичный датчик углового диапазона 360° или менее;

а — вид магнитоэластичного датчика в плане;

1 — измерительное устройство для точной оценки положения рулевого колеса; 2 — вал рулевого колеса; 3 — опора постоянных магнитов, соединяемая с рулевым колесом;

4 — магнитоэластичный преобразователь; 5, 6 — плечи опоры 3; 7, 8 — магниты положения; 9 — стационарный волновод; 10 — преобразователь импульсного сигнала;

б, в — кривые измерительных импульсов магнитов положения;

г-е — магнитоэластичный датчик углового диапазона более 360° (или менее 360°);

11 — магнитоэластичная измерительная система; 12 — спиральный волновод; 13 — магнит положения; 14 — вал рулевого колеса;

15 — опора магнита положения, соединяемая с рулевым колесом; 16 — схема, иллюстрирующая применение в реальных условиях; 18 — оболочка для вала рулевой колонки;

19 — продольный паз для перемещения магнита; 22 — пластмассовое покрытие оболочки; 23 — спиральный рукав; 25 — бороздка на поверхности магнита;

ж, з — вариант измерения углового диапазона 360° с тремя магнитами или углового диапазона 180° с двумя магнитами;

26 — измерительное устройство для точной оценки положения рулевого колеса; G1, G2, G3 — магниты положения с различным угловым смещением — 110°, 120° и 130°;

28, 29, 30 — плечи опоры магнитов; 31 — вал рулевой колонки; 33 — волновод; 35 — сенсорная головка (магнитоэластичный преобразователь и преобразователь импульсного сигнала);

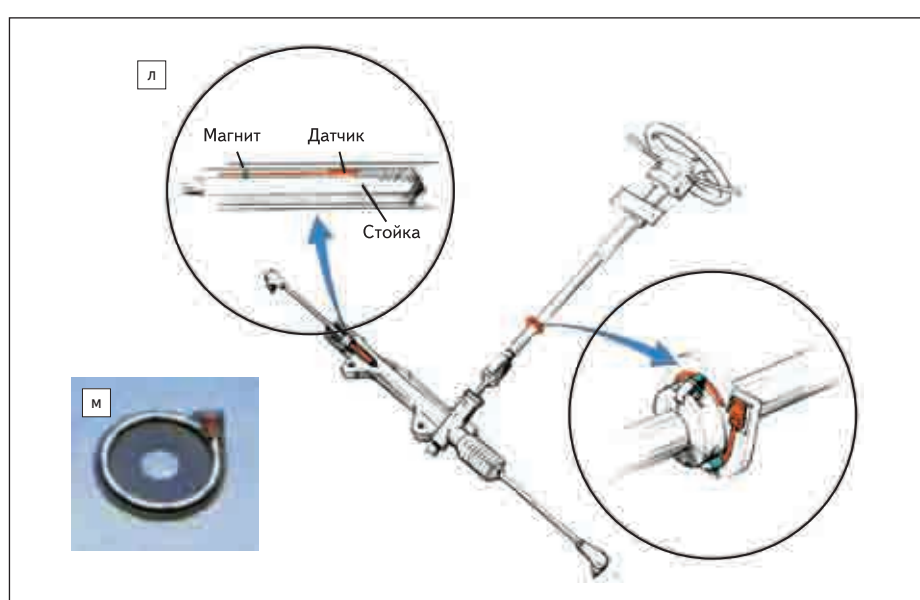
и-л — измерительные схемы для детектирования углов более 360° в комбинации с устройствами грубого определения углового положения;

2, 31 — рулевое колесо, рулевая колонка и вал рулевого колеса; 11 — магнитоэластичная измерительная система для точного определения положения в пределах 360°;

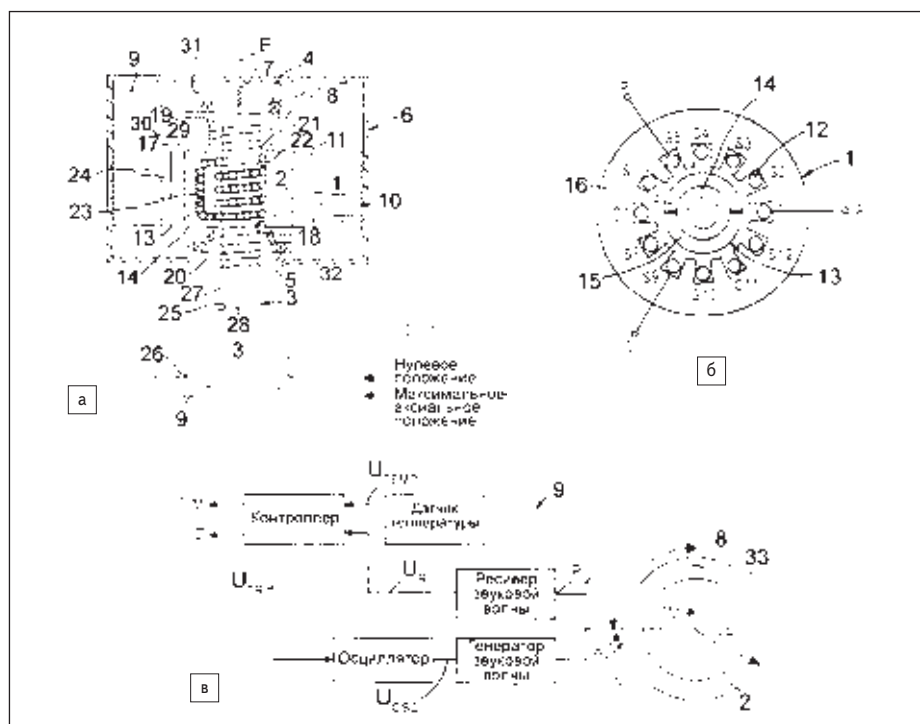
70 — угловой датчик для грубого определения углового положения; 80 — система шестерен рулевого колеса;

90 — линейный датчик для грубого определения углового положения — альтернатива угловому датчику 70;

94 — вал; 96 — магнит положения; 97 — волновод; 99 — магнитоэластичный датчик



**Рис. 88.** Магнитоэластичные датчики положения МТС для систем рулевого колеса [200]:  
л — эскизы комбинированной магнитоэластичной измерительной системы с угловым и линейным преобразователями;  
м — внешний вид магнитоэластичной системы для точного определения положения в пределах 360°.



**Рис. 89.** Магнитоэластичный датчик положения клапана и/или ротора клапана двигателя внутреннего сгорания Ford Global Technologies [202]:  
1 — статор клапанной сборки; 2 — ротор; 3 — клапан; 4, 5 — подшипники; 6 — защитное ограждение;  
7 — центрирующая пружина; 8 — вращающийся постоянный магнит для индикации углового положения ротора;  
9 — магнитоэластичный датчик аксиального положения клапана 2 и/или углового положения ротора 1 электрохимической клапанной сборки; 10 — стек многослойного листового металла статора;  
11 — центральное отверстие статора; 12 — обмотки статора; 13 — кольцевой магнит ротора; 14 — шаровая гайка;  
15, 16 — сегменты магнита; 17 — цилиндрическая часть тела шаровой гайки; 18 — центральное отверстие шаровой гайки;  
19, 20 — плечи для опоры; 21 — спиральная канавка цилиндрического тела; 22 — плоские участки — разделители спиральной канавки; 23 — возвратный канал для кольцевой прокатки примыкающих шаровых подшипников 24;  
25 — апертура в головной части двигателя для установки клапанного штока; 26 — седло клапана; 27 — клапанный шток;  
28 — антикрутящийся волновод; 29 — спиральная канавка клапанного штока; 30 — плоские участки — разделители спиральной канавки клапанного штока; 31 — верхнее опорное плечо; 32 — отверстие для клапанного штока;  
Е — ось вращения ротора (по часовой стрелке или против часовой стрелки); 33 — звуковой канал радиусом R;  
G — зазор в звуковом канале;  $\theta_M$  — детектируемое угловое положение; L — соответствующая длина пути;  
 $U_{OSC}$ ,  $U_{TEMP}$ ,  $U_{TR}$ ,  $U_R$  — сигналы напряжения;  $P_1$ ,  $P_2$  — точки схемы (с нулевой длиной проводника);  
Z — детектируемое аксиальное положение

Датчики на основе ферромагнитных материалов практически не нуждаются в повторной и периодической калибровке. Температурные допуски вследствие расширения металла могут быть компенсированы, например за счет встраивания в сенсорный блок или ASIC интегрированного датчика температуры.

Поскольку сенсорный элемент датчика включает стержневой волновод, в пределах которого происходит распространение ультразвуковой волны, фактически измеряется путь, пройденный прямой и отраженной волной, а не перемещение импульса — кратчайшее расстояние между двумя точками — концевым преобразователем и целью. Следовательно, сенсорный стержень не обязательно должен быть линейным. Магнитоэластичный датчик может измерять и криволинейные траектории, повторяемые криволинейным волноводом, что относится к его уникальным особенностям. Предполагается также значительная нечувствительность волновода к радиальным допускам, биениям, изгибающим и крутящим моментам на стадии производства и монтажа датчика (в реальных условиях эксплуатации крутящие моменты изменяют магнитные свойства материала, что может привести к интерферирующим волнам, от которых стержень желательно защищать).

Дуговой или круговой сенсорный волновод позволяет детектировать угловое положение в любом угловом диапазоне до 360°, спиральный волновод — детектировать положение в многооборотных угловых системах.

Примеры разработок угловых магнитоэластичных преобразователей проиллюстрированы рис. 87–89, включая датчики, комбинирующие измерение обоих видов движения — линейного и углового. Комбинирование линейных и угловых измерений уменьшает число необходимых датчиков, количество проводных выводов и входных портов контроллера.

Таким образом, актуальность магнитоэластичных датчиков в автоэлектронике обоснована следующими преимуществами:

- бесконтактностью;
- абсолютным выходом;
- высокой точностью;
- высокой надежностью;
- высокой долговременной стабильностью;
- высокой температурной стабильностью;
- нечувствительностью компонентов датчика (кроме электроники) к влажности и загрязнению;
- возможностью полного интегрирования — встраивания датчика в детектируемую систему;
- простотой адаптации к детектируемому диапазону, программируемостью;
- возможностью получения любого типа выходного интерфейса;
- возможностью детектирования линейного и нелинейного положения, включая криволинейное, угловое и многооборотное (свыше 360°).



MTS Sensors, подразделение корпорации MTS Systems Corporation, — мировой лидер в области разработки новейших концепций магнитостриктивных датчиков положения. Подразделение MTS Sensors основано в 1984 году в связи с приобретением MTS Systems компании Tempsonics, Inc., и сегодня является ведущим поставщиком на автомобильный рынок магнитостриктивных датчиков, выпускаемых под брендом Tempsonics.

В 1975 году основатель компании Tempsonics Д. Теллерман разработал магнитостриктивный датчик линейного положения и линии задержки для использования в запасных устройствах микроконтроллеров.

В середине 1990-х MTS перешла от монолитных структур датчиков к модульным — на основе единственного базового сенсорного элемента, что сегодня позволяет в кратчайшие сроки разрабатывать и производить новые модели.

В 1998 году MTS ввела базовый модуль сенсорного элемента CSE (рис. 86а), предназначенный для растущих потребностей автомобильного рынка и выпуска на автоматизированной производственной линии [185]. Введение автоматизированного производства (автоматизированной сборки, клейки, сварки, тестирования), оптимизации последовательности операций и переходов позволило MTS Systems изготовить недорогую линейку магнитостриктивных датчиков, стоимость которых при заказах в 2500–10 000 единиц заметно снижается и составляет несколько десятков долларов (в единичном экземпляре цена датчика серии С около \$110).

Автоматизированное производство позволяет производить один модуль CSE за 17 с и гарантирует качество изделий.

Датчики на основе модулей CSE комбинируются с различными модулями электроники (для получения требуемых выходных интерфейсов) и разнообразными типами корпусов, также ориентированные на производство больших объемов и получение конечной сборки по запланированной цене. Датчики серии С вы-

пускаются как для встраиваемого, так и внешнего монтажа, для различных условий эксплуатации, поддерживается как аналоговый, так и цифровой выходной формат (рис. 86б–г). Автомобильные объемы (обычно от 50 000 до нескольких сотен тысяч устройств в год) часто оправдывают клиентское корпусирование и заказную электронику и НИОКР.

Чтобы достичь коммерческих продаж объемом 2500–30 000 экз. в год, MTS комбинирует модуль CSE со стандартной электроникой в недорогом корпусе и выпускает линейку стандартных датчиков CSP (рис. 86д).

Впервые линейка датчиков на основе модуля CSE была использована в подвеске автомобиля Mercedes S, в системе автоматического управления корпусом Automatic Body Control system (ABC system), а затем и в системе ABC автомобиля Mercedes CL [185, 186] (рис. 86е–ж).

Каждый угол автомобиля снабжен амортизационной стойкой, интегрированной с гидравлическим приводом для регулирования высоты подвески, и датчиком на основе модуля CSE, который измеряет высоту подвески.

Информация, полученная магнитостриктивными датчиками, передается в локальный микрокомпьютер. Он вычисляет сумму давления, прикладываемого к гидравлическим сервоцилиндрам, осуществляющим перемещение корпуса, и регулирует длительность воздействия на каждую пружину. Каждый цилиндр может перемещаться на частотах вплоть до 5 Гц, чтобы реагировать на вибрации.

Благодаря системе ABC можно регулировать жесткость подвески, тем самым повышая комфорт и скорость при езде, и контроль высоты, а также быстро (в пределах нескольких микросекунд) стабилизировать корпус. Угол крена снижается на 68%.

Система также включает автоматическую систему самовыравнивания. Водитель может изменять высоту автомобиля на низких скоростях (в пределах 25–50 мм). На высоких скоростях корпус автомобиля автоматически опускается; при превышении 140 км/ч корпус снижается на дополнительные 10 мм, чтобы уменьшить сопротивление воздуха.

При высокой цене и значительных возможностях системы магнитостриктивные датчики, применяемые в ней, недороге (\$50) и надежны. Это позволяет применять их в менее дорогих системах контроля активной или полуактивной подвески, системах самовыравнивания или адаптивного управления спортивных автомобилей и машин среднего или нижнего ценового класса.

Активный контроль амортизаторов и контроль высоты подвески может быть совмещен в дизайне стойки, если привод управления подвеской установлен соосно с амортизатором (рис. 86з–л). Встраивание датчика серии С в амортизационную стойку и гидравлический цилиндр предварительного нагружения пружины предоставляет водителю информацию о положении подвески и ее реакции на условия местности, то есть обеспечивает удобную высоту посадки и хорошее качество езды.

Размещение датчика в амортизаторе позволяет также снимать переменную информацию о положении и скорости амортизатора и контролировать таким образом амортизацию.

Возможны два коаксиальных с амортизационным штоком варианта монтажа датчика: 1) датчик крепится в штоке, магнит крепится в корпусе амортизатора; 2) датчик крепится в корпусе, магнит прикрепляется к штоку поршня. (При креплении в штоке датчик не подвержен влажности.)

Третий вариант крепления датчика — в противопыльном кожухе амортизатора; магнит прикрепляется к корпусу амортизатора.

Таким образом, компоненты датчика позволяют пользователю полностью интегрировать датчик в механическую систему. Обрабатывающая электроника может быть размещена в системном контроллере.

Еще одно из применений модулей CSE — в гоночных амортизаторах MagneShock Carrera (рис. 86м), которые предоставляют водителю возможность двухуровневого контроля и регулировки подвески и обеспечивают лучшие характеристики слежения [185]. Для того чтобы динамически изменять скорость демпфирования удара, Carrera в устройствах MagneShock использует свойство магнитореологической жидкости изменять свою





| Таблица 18. Сравнительные технические данные некоторых коммерчески доступных магнитостриктивных преобразователей   |  |  |   |   |
|--|--|--|---|---|
| Параметр / Датчик  | Модульные датчики серии С<br>MTS Temposonics   | Преобразователи<br>Micropulse AT Balluff   | Датчики EP2 MTS<br>Temposonics  | Компактные датчики положения<br>серии МН MTS Temposonics  |
| Функциональные признаки  | Датчик для встраиваемых систем   | Датчики для линейных измерений   | Одноточечные и многоточечные измерения  | Датчики линейного положения и скорости для гидравлических цилиндров с высоким давлением   |
| Выходной интерфейс   | Аналоговый: СS: 0,1–4,9 В при питании пост. напряжением 5 В, пропорциональный; СМ: 0,1–4,9 В фиксированный при питании пост. напряжением 12 В ( $\pm 25\%$ ), пропорциональный 5 В; также определяемый пользователем; ШИМ: активный высокий уровень $> 60\%$ Vs, неактивный низкий на $< 30\%$ Vs; высокий период ШИМ = скорость волны (2702–2890 м/с; в среднем 2794 м/с или 0,3579 мкс/мм)×(положение + нулевое положение); частота обновления: 2,6 кГц (период 385 мкс) | Аналоговое напряжение 0–10 В и 10–0 В/ Цифровой сигнал импульсов Start/Stop/ШИМ  | Start/Stop: RS-422 дифференциальный сигнал; для форматов RS-485/422 доступны последовательно извлекаемые параметры сигнала: измерительный диапазон, смещение, градиент (обратная скорость), статус; частота обновления зависит от контроллера | Аналоговый: 0–5 В, 0–20 мА, 4–20 мА, настройки аналоговых характеристик программируются при производстве, полностью обратимы. Скорость: 0–5 В, 0–20 мА, 4–20 мА (только для аналогового выхода) ШИМ (2048); частота обновления $> 488$ Гц |
|  | 4-выводный гнездовой соединитель JST PHR-4   | 8-выводный соединитель   | 6-выводный штыревой D60   | 3 или 4 провода (положение или положение и скорость)  |
| Измерительные диапазоны  | (72,3; 109,3; 128,3; 148,0; 162,3; 186,3; 194,3; 217,3; 250,1) мм  | 51–1524 мм   | (101,6; 152, 4; 228,6; 304,8; 381; 457,2; 533,4; 609,6; 762; 914,4; 1066,8; 1219,2; 1371,6; 1524) мм  | (50–2500) мм  |
| Разрешение   | —*   | $< 10$ мкм для аналогового выхода; для цифрового зависит от контроллера  | 0,1; 0,01; 0,005 мм (зависит от контроллера)  | бесконечное, ограничивается выходными шумами — до $< 0,04\%$ полной шкалы   |
| Нелинейность, % от полной шкалы или мм   | $\pm 0,15$ мм без коррекции, в диапазоне 5–95% эффективного рабочего хода  | $\pm 200$ мкм в диапазоне до 510 мм, $\pm 0,02\%$ типично, $\pm 0,04\%$ максимум в диапазоне (510–1524) мм             | $< \pm 0,02\%$ полной шкалы, минимум $\pm 60$ мкм   | $< \pm 0,04\%$ полной шкалы; минимум $\pm 0,100$ мм   |
| Повторяемость  | $\pm 25$ мкм   | разрешение + гистерезис $< 10$ мкм; $< 20$ мкм точность  | $< \pm 0,001\%$ полной шкалы  | $< \pm 0,005\%$ полной шкалы  |
| Гистерезис   | $\pm 25$ мкм   |  | —*  | —*  |
| Напряжение питания, В постоянного тока   | СS: 5–5%, +10%; СМ: 5–5%, +10% или 12 $\pm 25\%$   | 24 $\pm 20\%$  | +24 В (–15...+20%)<br>Защита от обратной полярности: до –30 В<br>Защита от обратного напряжения: до 36 В<br>Ток утечки: Start/Stop, 50–100 мА   | 12/24 В (10–32 В)<br>Защита от обратной полярности: до –36 В<br>Защита от обратного напряжения: до 36 В<br>Ток утечки: 80 мА типично для аналогового выхода, 110 мА максимум для цифрового выхода   |
| Ток потребления, мА  | 40   | Аналоговый интерфейс: 70;<br>Цифровой интерфейс: 60 (на 1 кГц скорости обновления)                                     | —*  | —*  |
| Допуски нулевого положения   | $\pm 1,0$ мм   | —*   |   | —*  |
| Температурный дрейф характеристики   | Аналоговое напряжение: $\pm 20$ мкм/°С, ШИМ: $\pm 10$ мкм/°С   | Аналоговый выход**:<br>[150 мкВ/°С + {5ppm/°С*Р*V/NL}]*ΔТ;<br>Цифровой выход:<br>[0,6 мкА/°С + {10 ppm/°С*Р*V/NL}] *ΔТ |   | —*  |
| Рабочая температура  | –40...+75 °С;<br>по специальному заказу возможны более высокие температуры: –40...+105 °С для IP67   | –32...+160 °F (≈–32 ...+70° С)   | –40...+75 °С  | –40...105 °С (датчик)<br>–40...80 °С (PUR кабель)<br>–50...125 °С (GXL проводные выводы)  |
| Относительная влажность/ точка росы  | —*   | 90%  | $< 90\%$  | 90%   |
| Класс защиты   | IP40 стандартный;<br>по специальному заказу возможны более высокие классы исполнений, до IP67  | IP67   | IP67  | IP 67 (проводные выводы), IP 65 (кабельный выход)   |
| Стандартный магнит   | кольцевой; $\varnothing 9$ мм, внешний диаметр, $\varnothing 6,5$ мм, внутренний диаметр   | —*   | Блоковый со штампованным металлическим носителем  | —*  |
| Дополнительные рабочие условия   | —*   | Удары 50 г/6 мс, IEC 60068 2–27<br>Вибрация 12 г, 10–2000 Гц, IEC 60068-2-6  | Удары: 50 г (одиночный удар)<br>IEC-Standard 68-2-27<br>Вибрация: 5 г/10–2000 Гц<br>IEC-Standard 68-2-6   | Удары: 100 г (одиночный удар)<br>IEC-Standard 68-2-27<br>Вибрация: стержень $\varnothing 10$ мм — 25 г, стержень $\varnothing 7$ мм — 15 г/10–2000 Гц<br>IEC-Standard 68-2-6<br>ЭМС: 200 В/м  |
| —* Данные не специфицируются производителем или нет данных<br>** V — выходной диапазон в В; I — выходной диапазон в мА; ΔТ — температурный диапазон; Р — положение магнита |  |  |   |   |

вязкость под действием магнитного поля встроенной обмотки. Для измерения ударов и хода штока MagneShock включает модуль CSE, размещаемый в поршневом штоке. Провода обмотки и датчика выходят через специальное отверстие монтажа; в месте их выхода размещена электроника датчика, на другом конце устройства помещен магнит.

Другие применения датчиков MTS: автоматизированная ручная передача (automated manual transmissions) и система EPAS (electrically assisted power steering systems).

Существует направление перехода к автоматизации ручных передач и переключения посредством приводов, что позволяет уменьшить вес по сравнению с автоматическими коробками и снизить цену. На рис. 87а проиллюстрирована возможность одновременного измерения линейного и углового движения одним магнитостриктивным датчиком с двумя магнитами. Магнит в форме спирали позволяет датчику детектировать

вращение вала, линейное движение измеряется посредством обычного кольцевого магнита.

С помощью датчиков MTS детектируются уникальные пути измерения, которые могут быть выполнены только на основе магнитострикции, что, в частности, востребовано в медицине (рис. 87б). Снабженные магнитным поплавком, датчики серии С легко адаптируются для измерений уровней жидкостей (рис. 87в).

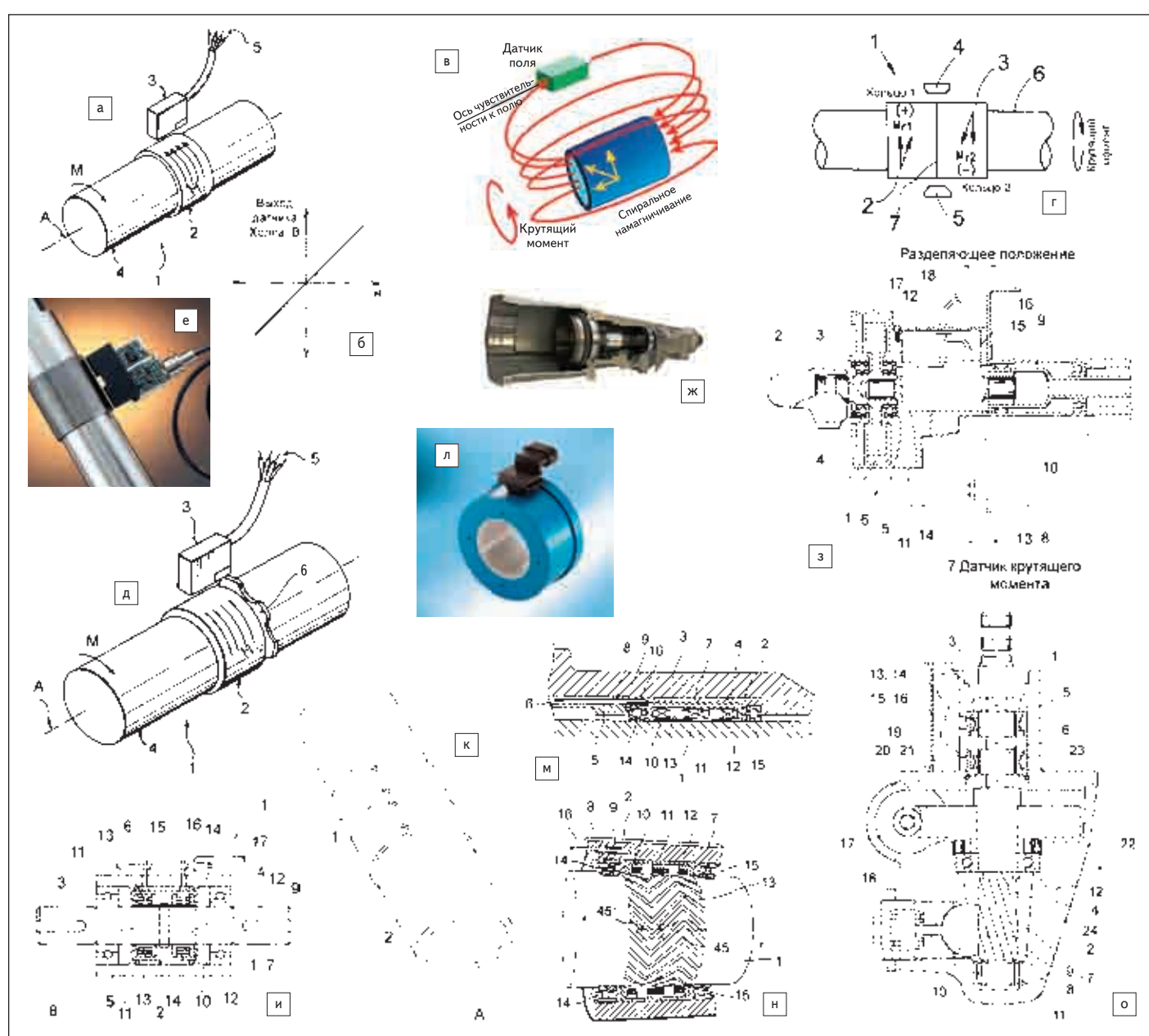
В угловых системах, например, для измерения угла рулевой колонки волновод датчика серии С формируется в окружность. Разработаны методы для детектирования дуги (части окружности менее 360°), полного оборота и многооборотного детектирования (см. рис. 88) [200–201].

Новое поколение магнитостриктивных датчиков MTS представляет собой датчики с более высокими характеристиками и сниженной ценой, включая smart-модели, кото-

рые, благодаря лучшей электронике и автоматизированным методам высокообъемных автомобильных датчиков, размещаются в более компактных корпусах, по сравнению с их промышленными аналогами по цене от нескольких сотен долларов [195]. Примеры датчиков данного направления включают Commerical/Auto-SE, МН и EP2 (рис. 90, табл. 18). Магнитостриктивные датчики могут применяться для измерения как положения, так и скорости движения (МН).

### Магнитоупругие датчики крутящего момента

Точное измерение крутящего момента — одна из важнейших задач в автомобильной электронике. Сферы применения включают контроль крутящего момента выходного вала двигателя, входного и выходного валов автоматической коробки передач, типичные задачи рулевого управления (рис. 91).



**Рис. 91.** Примеры применения магнитоэластичных датчиков крутящего момента в автоэлектронике:

а–ж — магнитоупругие датчики крутящего момента Magnetoelastic Devices;

а — классический вариант датчика [207]: 1 — датчик крутящего момента; 2 — магнитоупругий преобразователь; 3 — датчик магнитного поля (датчик Холла);

4 — вал, соединяемый с детектируемым объектом; А — ось вращения; М — крутящий момент;  $H_{ост}$  — круговое тангенциальное направление остаточного намагничивания;

5 — проводные выводы датчика; 6 — выходная характеристика датчика Холла; в — спиральное намагничивание магнитоупругого кольца;

г — версия с поляризованным магнитоупругим кольцом с двумя противоположно намагничиваемыми областями [210]: 1 — конструкция датчика;

2, 3 — два противоположно поляризованных кольца; 4, 5 — один или два датчика магнитного поля; 6 — вал; 7 — непрерывная поверхность материала колец;

$Mr1(+)$ ,  $Mr2(-)$  — остаточная намагниченность колец;

д — версия с зубчатым кольцом, модулирующим магнитное поле для измерения скорости вращения [211]: 6 — модулирующее кольцо;

е — типичный внешний вид сенсорного модуля датчика, установленного на валу; ж — применение датчика MDI для детектирования крутящего момента вала коробки передач;

з — магнитоэластичный датчик крутящего момента в системе рулевого управления Suzuki [215]: 1 — цилиндрическое прямозубое колесо; 2 — шестерня;

3 — выходной рулевой вал, управляемый двигателем; 4, 5 — подшипники; 6 — рулевая колонка; 7 — датчик крутящего момента; 8 — вал датчика; 9 — рулевой вал;

10 — соединительная часть рулевого вала с валом датчика; 11 — двигатель; 12 — соединительная часть вала рулевого управления; 13 — корпус датчика; 14, 15 — шпоночные соединения;

16 — кабельный соединитель датчика 7; 17 — люк рулевой колонки для вывода соединителя; 18 — пространство для установки датчика;

и — магнитоэластичный датчик крутящего момента Aisin Seiki [216]: 1 — магнитоэластичное устройство; 2 — группа обмоток; 3, 4 — подшипники; 5 — корпус; 6 — печатная плата; 7 — вал;

8, 9 — участки с магнитной анизотропией; 10 — бобина; 11, 12 — возбуждающие обмотки; 13, 14 — детектирующие обмотки; 15, 16 — проводные выводы; 17 — терминалы печатной платы;

к, л — магнитоупругий датчик крутящего момента Siemens VDO с низким гистерезисом, производимый методом термического распыления [217]:

к — конструкция датчика: 1 — магнитоупругий элемент; 2 — немагнитный вал; А — продольная ось вращения; л — внешний вид;

м, н — магнитоэластичный датчик крутящего момента для автоматической коробки передач [220]: 1 — входной вал коробки передач; 2 — магнитоэластичный датчик; 3 — статор;

4 — цилиндрическая часть статора для установки датчика; 5 — гильза, удерживающая датчик крутящего момента в статоре; 6 — канавка для проводных выводов датчика;

7 — цилиндрический полый корпус датчика; 8, 9 — части корпуса для вывода и прохода проводов; 10, 11, 12 — детектирующие обмотки;

13 — сегментированный магнитоэластичный материал; 14, 15 — шарикоподшипники; 16 — проводные выводы;

о — устройство электрического рулевого управления с механизмом детектирования крутящего момента Honda [222]: 1 — вращающийся вал, соединяемый с рулевым колесом;

2, 3, 4 — нижняя, верхняя, средняя части вала, соответственно; 5, 6 — магнитоэластичные мембраны; 7 — механизм шестерен; 8 — ведущая шестерня; 9 — зубчатая рейка; 10 — вал рейки;

11 — первый подшипник; 12 — второй подшипник; 13, 15 — схемы возбуждения переменным напряжением магнитоэластичных мембран; 14, 16 — схемы детектирования; 17 — двигатель;

18 — ведущий вал; 19 — механизм редуктора; 20 — ведущий червяк; 21 — червячное колесо; 22 — корпус; 23, 24 — верхняя и нижняя части корпуса устройства, соответственно

Выделяется две категории датчиков крутящего момента:

- 1) деформируемые датчики (пьезорезистивные strain gauge, емкостные) — с требованием беспроводного трансмиттера сигнала и ограничениями в прочности<sup>2</sup>, повторяемости и цене таких устройств;
- 2) недеформируемые датчики.

Помимо того датчики делятся на:

- 1) использующие электрические компоненты, закрепленные на валу (адгезивные, оптические, индуктивные), — более сложные и с ограничениями в прочности таких устройств,
  - 2) датчики, которые обходятся без таких компонентов.
- Еще одно классификационное деление:
- 1) датчики со стержнем кручения torsion bar, которые могут вычислять только дифференциальный или полудифференциальный угол закручивания одного вала относительно другого (оптические и индуктивные);
  - 2) датчики, которые измеряют крутящий момент непосредственно (углы закручивания стальных валов очень малы — порядка 0,01°).

Магнитоупругие или магнитостриктивные преобразователи согласно всем классификациям относятся к датчикам второго типа.

Важнейшими характеристиками датчиков крутящего момента этого типа являются:

- высокая долговременная стабильность;
- работа при температурах до -40...150 °C;
- устойчивость к электромагнитным помехам.

Для создания магнитоупругих датчиков крутящего момента используется эффект Виллари — наведение изменений в магнитной проницаемости под действием момента, которые регистрируются бесконтактным датчиком магнитного поля, вырабатывающим пропорциональный моменту аналоговый сигнал.

Магнитостриктивный материал допускает высокую надежность и повторяемость измерения значения крутящего момента, поскольку магнитострикция — это свойство материала, которое не изменяется со временем.

Спектр разработок магнитостриктивных преобразователей проиллюстрирован рис. 91. Описания работы подобных устройств содержатся в патентной и технической литературе [207–222].

Ведущий разработчик и производитель датчиков крутящего момента — Magna-lastic Devices, Inc. (MDI), подразделение Methode Electronics, Inc., выпускает датчики крутящего момента вращающихся и невращающихся

валов для многих применений и отраслей промышленности [207–210].

Типичный датчик крутящего момента показан на рис. 91а–в [207]. В стандартной конфигурации используется поляризованное магнитоупругое кольцо, которое прочно прикрепляется к валу и намагничивается импульсным током через вал. Создается легкая ось намагниченности кольца в тангенциальном направлении.

В рабочих условиях под действием крутящего момента остаточная намагниченность в кольце переориентируется по спирали (рис. 91в), что создает магнитное поле, пропорциональное крутящему моменту. Величина и направление поля определяются бесконтактным магнитоуправляемым датчиком, линейный выходной сигнал которого обрабатывается в электронной схеме.

Для того чтобы избежать зависимости от магнитной проницаемости вала (зависимости от температурных эффектов, свойств материала, величины и частоты возбуждающего поля, а также поля Земли) и повысить чувствительность датчика, используется поляризованное кольцо с двумя областями с противоположными направлениями намагниченности, которые намагничиваются двумя идентичными постоянными магнитами при медленном вращении вала (рис. 91г) [209].

Чувствительность зависит от размера кольца и свойств материала. Насколько подходит конкретный материал для использования в датчиках крутящего момента — зависит от его насыщающей магнитострикции, определяемой как частичное изменение в длине при увеличении намагниченности до насыщающего значения. Наибольшее значение магнитострикции насыщения составляет для никеля ( $4 \times 10^{-3}$ ).

Siemens VDO разработала собственный метод термоциклического распыления магнитостриктивного никельсодержащего материала для производства недеформируемого магнитоупругого датчика с высокой линейностью магнитного поля, пропорционального крутящему моменту (детектируемому магнитометром), и стабильностью характеристик при циклическом нагружении — в первую очередь, малым гистерезисом (рис. 91к, л) [217–218].

## Заключение

Применение магнитостриктивных датчиков в автомобильных системах становится все более актуальным благодаря их бесконтактности, неограниченному сроку службы, долговременной и температурной стабиль-

ности, широким диапазоном детектирования различных диапазонов и траекторий, а также в связи со снижением цены, что особенно важно для высокообъемных систем.

Возможности магнитостриктивной технологии, обеспечиваемые рабочие характеристики, множество преимуществ и минимум ограничений позволяет автомобильным инженерам рассматривать вопрос применения магнитостриктивных датчиков во множестве существующих и вновь разрабатываемых автомобильных системах детектирования положения и (или) крутящего момента. ■

## Литература

185. Magnetostrictive Position Sensors Enter the Automotive Market. Russell Jesse MTS Systems Corp. Sensors, Dec. 2001.
186. Magnetostriction in Automotive Position Measurement. Russell J., MTS Systems Corporation, TECHNICAL PAPER, Part Number: 08-02 M1163 Revision A. [ht tp:/ /ww w.mtssensors.c om/pdfs/550947.pdf](http://www.mtssensors.com/pdfs/550947.pdf)
187. Finding the right sensor for linear displacement. Les Schaevitz, Design-for-Application Product Manager Macro Sensors Div. Howard A. Schaevitz Technologies Inc. Pennsauken, N.J. Machine Design, 7/8/2004. [ht tp:/ /ww w.machinedesign.c om/ASP/strArticleID/56940/strSite/MDSite/viewSelectedArticle.asp](http://www.w.machinedesign.com/ASP/strArticleID/56940/strSite/MDSite/viewSelectedArticle.asp)
188. Linear Position Sensor suits automotive applications. [ht tp:/ /news.thomasnet.c om/fullstory/26732/2468](http://news.thomasnet.com/fullstory/26732/2468)
189. Magnetostriction positions the ride chassis, transmission shifting, and steering controls leaving rotary transducers. Russell J. Intech, 01 Feb 2003. [ht tp:/ /ww w.isa.o rg/InTechTemplate.cfm?section=8&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=23361](http://www.isa.org/InTechTemplate.cfm?section=8&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=23361)
190. Magnetostrictive Linear Position Sensors. Nyce D. S., MTS Systems Corp. Sensors, Nov 1999.
191. Linear Position Sensors: Theory and Application. Nyce D. S. ISBN: 0-471-3326-9 Wiley US, Aug 2004.
192. Magnetostriction, How it Works. Technical Paper 550947 A [ht tp:/ /ww w.mtssensors.c om/pdfs/550947.pdf](http://www.mtssensors.com/pdfs/550947.pdf)
193. Sizing and Applying Magnetostrictive Linear Position Sensors. David S. Nyce. MTS Systems Corporation, TECHNICAL PAPER 551045 A [ht tp:/ /w ww .mtssensors.c om/pdfs/551045.pdf](http://www.mtssensors.com/pdfs/551045.pdf)
194. Good positioning magnetostrictive position sensors are poised to lower the cost barrier in medical appliances, mobile hydraulics, and industrial automation. David Edeal, MTS Systems Corp. Cary, N.C. [ht tp:/ /w ww.mtssensors.c om/Published/7/10/2003](http://www.mtssensors.com/Published/7/10/2003) [ht tp:/ /ww w.machinedesign.c om/asp/viewSelectedArticle.asp?strArticleId=55983&strSite=MDSite&catId=2/TechnicalPaper551043A](http://www.machinedesign.com/asp/viewSelectedArticle.asp?strArticleId=55983&strSite=MDSite&catId=2/TechnicalPaper551043A) [ht tp:/ /ww w.mtssensors.c om/pdfs/551043.pdf](http://www.mtssensors.com/pdfs/551043.pdf)
195. Smarter Sensors reduce costs for Motion Control Integrators. Edeal D. MTS Systems Corporation, TECHNICAL PAPER, Part Number: 08-02 M1167 Revision A. [w ww .mtssensors.c om/pdfs/M1167.pdf](http://www.mtssensors.com/pdfs/M1167.pdf)

2 По сходным причинам ранее отклонялось использование в автомобильных системах SAW (Surface Acoustic Wave) датчиков, например, разработанных Sensor Technology Ltd.

Honeywell разработала технологию SAW для производства беспроводных автомобильных датчиков крутящего момента входного/выходного валов коробки передач, компонентов двигателя, углового вращения колес, мониторинга сцепления, рулевого управления и т. д. SAW-датчики представляют собой резонаторы, резонансная частота которых изменяется под действием механического напряжения. Опрос датчиков осуществляется беспроводным методом — радиочастотными импульсами. Резонансная частота отклика позволяет вычислить крутящий момент.

Датчики характеризуются резонансной частотой 433 Гц, полосой пропускания до 1кГц, рабочей температурой до 150 °C, высокой точностью, прочностью, малым размером и весом, долговременной стабильностью, способностью работать в жестких условиях окружающей среды, а также технологичностью и низкой ценой.

196. An Innovative Passive Solid-State Magnetic Sensor. Li Yi-Qun, Spinix Corp. O'Handley R., Massachusetts Institute of Technology. Sensors, Oct 2000.
197. Vehicle suspension strut having a continuous position sensor. US Patent 6 401 883. Опубликовано. 11. 06. 2002 (MTS Systems Corporation)
198. Magnetostrictive linear displacement transducer for a shock absorber. US Patent 5 952 823. Опубликовано. 14.09.1999 (MTS Systems Corporation)
199. Magnetostrictive linear displacement transducer for a vehicle strut suspension. US Patent 6 707 290. Опубликовано. 16.03.2004 (MTS Systems Corporation)
200. Magnetostrictive linear displacement transducer for a vehicle steering system. US Patent 6 528 990. Опубликовано. 4.03.2003 (MTS Systems Corporation)
201. Rotary position sensor. US Patent 6 501 263. Опубликовано. 31.12.2002 (MTS Systems Corporation).
202. Position sensor. US Patent 6 590 387. Опубликовано. 8.07.2003 (Ford Global Technologies L.L.C.).
203. Seat belt tension sensor. US Patent 6 843 143. Опубликовано. 18.12.2005 (Automotive Systems Laboratory, Inc.).
204. Position sensing with magnetostrictive stress sensor. US Patent 5 412 999. Опубликовано. 9.05.1995 (Sensortek L.P.).
205. Active magnetostrictive sensor for automotive horn or occupant weight sensor. US Patent 6 867 690. Опубликовано. 15.03.2005 (Key Safety Systems, Inc.).
206. Active magnetostrictive sensor for automotive horn or occupant weight sensor. US Patent 7 034 708. Опубликовано. 25.04.2006 (Key Safety Systems, Inc.).
207. Circularly magnetized non-contact torque sensor and method for measuring torque using same. U.S. Patent 5 351 555 Опубликовано. 4.10.1994 (Magnetoelastic Devices, Inc.).
208. Circularly magnetized non-contact torque sensor and method for measuring torque using same. U.S. Patent 5 465 627. Опубликовано. 14.11.1995 (Magnetoelastic Devices, Inc.).
209. Circularly magnetized non-contact torque sensor and method for measuring torque using same. U.S. Patent 5 520 059. Опубликовано. 28.05.1996 (Magnetoelastic Devices, Inc.).
210. Circularly magnetized non-contact torque sensor and method for measuring torque using same. US Patent 5 708 216. Опубликовано. 13.01.1998 (Magnetoelastic Devices, Inc.).
211. Development of a magnetoelastic torque transducer for automotive transmission applications. Garshelis I. J., Magnetoelastic Devices, Inc., Aleksonis J. A., Jones Ch. A., Methode Electronics, Inc., Rotay R. M., Chrysler Corporation.
212. Magnetoelastic torque sensor. US Patent 6 330 833. Опубликовано. 18.12.2001 (Mannesmann VDO AG).
213. Magnetoelastic torque sensor. US Patent 6 598 491. Опубликовано. 29.07.2003.
214. Magnetostrictive torque sensor and electric power steering apparatus including the same. US Patent 6 422 095. Опубликовано. 23.07.2002 (Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha).
215. Steering force detecting magnetostrictive torque sensor. US Patent 6 484 592. Опубликовано. 26.11.2002 (Suzuki Motor Corporation).
216. Magnetostrictive device for torque sensor and method of manufacture of the same. US Patent 6 595 073. Опубликовано. 22.07.2003 (Aisin Seiki Kabushiki Kaisha).
217. Magnetoelastic non-compliant torque sensor and method of producing same. US Patent 6 516 508. Опубликовано. 11.02.2003 (Siemens VDO Automotive Corporation).
218. A Magnetostrictive Torque Sensor. Andreescu R., Gupta M. C., Old Dominion University, Spellman B., Siemens VDO. Sensors, Nov 2004.
219. Magnetoelastic torque sensor. US Patent 6 698 299. Опубликовано. 2.03.2004 (Methode Electronics, Inc.).
220. Automatic transmission. US Patent 6 846 260. Опубликовано. 25.01.2005 (JATCO Ltd).
221. Rotational torque detection mechanism and power steering apparatus. US Patent 6 959 781. Опубликовано. 1.11.2005 (Honda Motor Co., Ltd.).
222. Torque sensor. US Patent 7 013 741. Опубликовано. 21.03.2006 (Honda Motor Co., Ltd.).