

# Автомобильные датчики положения

## Современные технологии и новые перспективы

### Часть 3. Физические основы и коммерческие перспективы технологий полупроводниковых и пермалловых магниторезистивных датчиков

Данная часть статьи открывает обзор технологий магнитоуправляемых датчиков, принципиально разных с физической стороны, использующих, по существу, различные физические эффекты, но объединенных термином «магниторезистор» и предоставляющих качественно идентичный конечный результат.

Для оценки перспектив получения будущих коммерческих технических решений анализ состояния магниторезистивных технологий полупроводниковых и пермалловых анизотропных датчиков, выполненный на физическом уровне, проиллюстрирован актуальными примерами реализации новых автомобильных датчиков.

Светлана Сысоева

S.Sysoeva@mail.ru

#### Введение

Поиск бесконтактных методов измерения положения в широком диапазоне задач автомобильных систем, значительную долю которых предназначены решать датчики угла, линейного положения и энкодеры, приводит к необходимости анализа коммерческих перспектив класса актуальных автомобильных магнитоуправляемых датчиков, объединенных используемым качественным эффектом изменения сопротивления под действием магнитного поля и называемых магниторезисторами.

Другим фактором, общим для всех систем, построенных на магниторезисторах, являются значительные затраты времени, денег и усилий, связанные с необходимой для их эффективного применения исследовательской работой, которая в конечном итоге окупает затраты и обеспечивает получение прецизионных, износостойчивых и недорогих автомобильных датчиков.

Магниторезистивные датчики используют магниторезистивный эффект, который проявляется как свойство токнесущих магниточувствительных материалов изменять свое сопротивление в присутствии внешнего магнитного поля. В зависимости от физического эффекта и соответствующего типа материала среди коммерчески доступных датчиков различают:

- полупроводниковые магниторезисторы (используется эффект Гаусса);
- анизотропные магниторезисторы (на основе пермаллоя);
- гигантские магниторезисторы.

Оценка перспектив получения эффективных технических решений на основе любой коммерчески

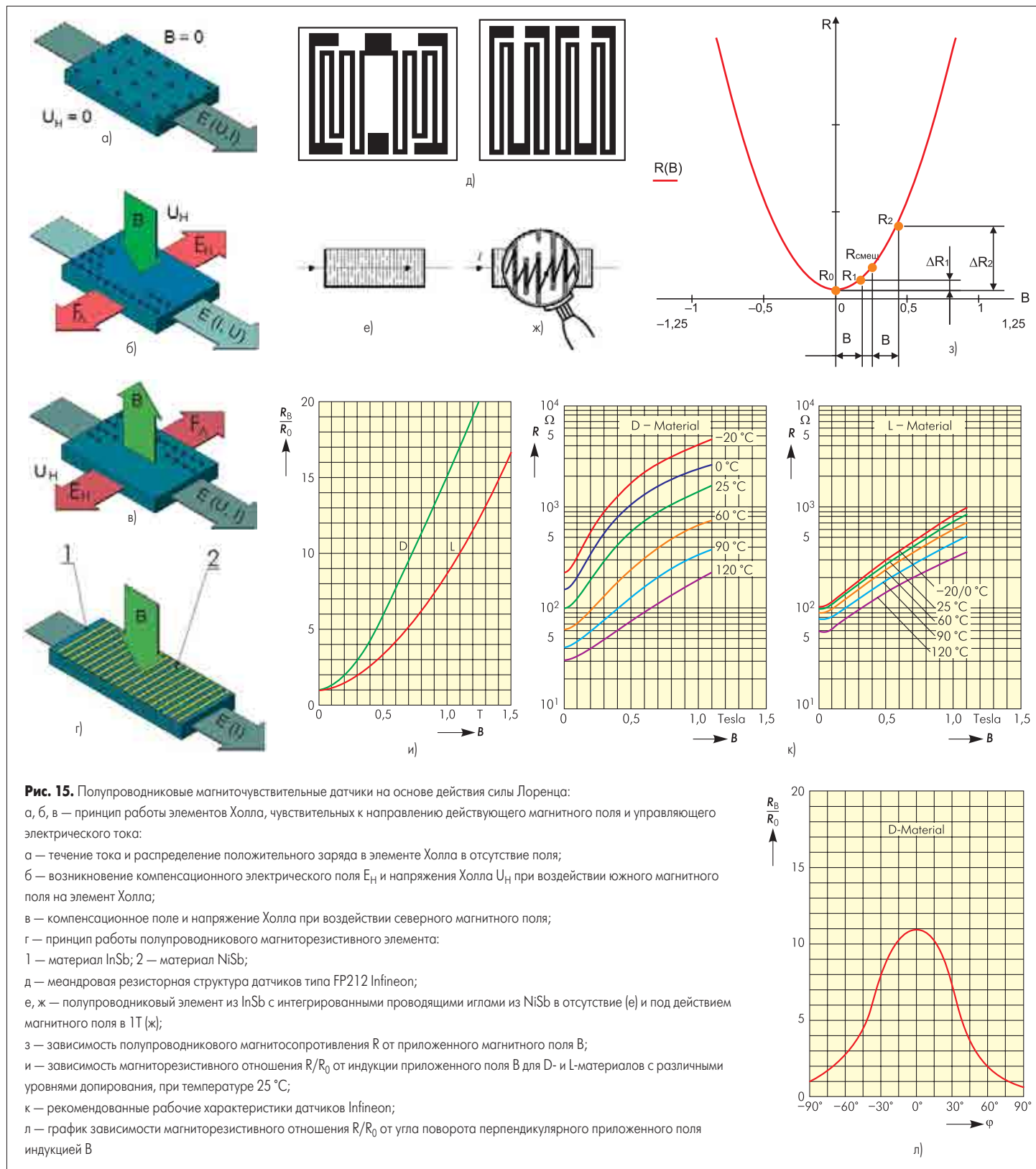
доступной технологии начинается с оценки ее технологического уровня и базовых измерительных принципов. Но из-за сложности магниторезистивных измерительных систем и отсутствия достаточного количества информации на русском языке<sup>1</sup>, предоставляемой производителями автомобильных электронных компонентов, анализ перспектив эффективного применения магниторезистивных технологий разработчик начинает с более ранней стадии оценки их физического уровня.

Основная цель данной статьи — помочь разработчику в выборе подходящей для решения конкретной задачи актуальной элементной базы, имеющейся на современном рынке. В данной части статьи будут обсуждаться аспекты применения в автомобильных системах полупроводниковых и пермалловых анизотропных датчиков.

#### Полупроводниковые магниторезисторы

В полупроводниковых магниторезисторах используется эффект Гаусса, возникающий под влиянием перпендикулярного магнитного поля  $B$  при действии той же силы Лоренца, что и в случае эффекта Холла (рис. 15). Для получения эффекта Гаусса используются материалы InSb и InAs с высокой подвижностью носителей заряда при комнатной температуре — те же, что широко применяются для получения эффекта Холла и создания дискретных генераторов и элементов Холла, интегрированных в ИС. Подробнее о материалах, которые используются в устройствах на основе эффекта Холла, можно прочитать в соответствующей литературе [45–49], а также найти на сайтах фирм-производителей дискретных генераторов Холла Asahi ([www.asahi-kasei.co.jp](http://www.asahi-kasei.co.jp)) и Sypris ([www.sypris.co.m](http://www.sypris.co.m)), так как производители интегральных схем уже не заостряют внимание потребителя на этом вопросе.

<sup>1</sup> Особого внимания заслуживает книга М. Л. Бараночникова «Микромагнитоэлектроника» — единственное руководство по магниточувствительным и магнитоуправляемым датчикам, изданное в России.



Выстраивание «дырок» вдоль одного из краев полупроводника, показанное для эффекта Холла на рис. 15б и 15в, и электронов (не показано) под действием поля  $B$  вдоль противоположного края элемента является результатом действия силы Лоренца  $\vec{F}_L$  на носители заряда  $q$ :

$$\vec{F}_L = q \times \vec{v} \times \vec{B}, \quad (14)$$

где  $\vec{v}$  — скорость носителей заряда.

В результате выстраивания противоположных по знаку носителей заряда возникает электрическое поле  $E_H$ , которое стремится скомпенсировать действие силы Лоренца  $\vec{F}_L$  и приво-

дит к возникновению разности потенциалов между краями элемента — дифференциальному напряжению Холла  $U_H$ . Направление действия компенсационного электрического поля, которое показано на рис. 15б и 15в стрелкой, соответствующей  $E_H$  и  $U_H$ , противоположно направлению силы Лоренца.

При возникновении равновесия дальнейший путь носителей заряда представляет собой приблизительно прямую линию вдоль приложенного электрического поля  $\vec{E}$ , без дополнительного выстраивания вдоль краев.

Оценить магниторезистивный эффект можно, если в полупроводниковом элементе Холла

можно в отсутствие поля  $B$ , если напряжение  $U$  приложено вдоль длины тонкого элемента полупроводникового материала, например InSb; тогда в элементе возникнет ток  $I$  и может быть измерено базовое сопротивление элемента  $R_0$  (рис. 15а).

Существуют два определения сопротивления, принятые для элемента Холла. Отношение приложенного напряжения  $U$  к входному току  $I$  называется входным сопротивлением (то же, что базовое сопротивление  $R_0$  магниторезистивного элемента). Отношение напряжения Холла  $U_H$  к входному току  $I$  называется сопротивлением Холла или выходным сопротивлением  $R$ .

Эффект действия магнитного поля В на элемент InSb, кроме создания на его краях напряжения Холла, состоит также в изменении фактического пути носителей заряда при их выстраивании вдоль краев полупроводникового элемента — отклонении направления тока I, чему соответствует некоторое изменение в сопротивлении  $\Delta R$ .

Угол между оригинальным направлением тока и тем, на которое он изменяется при введении магнитного поля с индукцией В, известен как угол Холла  $\delta$ , зависящий также от электронной подвижности  $\mu$ :

$$\operatorname{tg} \delta = \mu \times B. \quad (15)$$

Исключительно высокая электронная подвижность InSb  $\mu \geq 7 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  дает угол Холла  $\delta = 80^\circ$  при  $B = 1 \text{ Тл}$ .

Для сравнения: кремний имеет электронную подвижность  $\mu < 0,2 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , материал GaAs, применяемый для эффекта Холла, имеет  $\mu < 0,9 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , а материал InAs —  $\mu > 3 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Материал InSb характеризуется высокой чувствительностью из-за высокой электронной подвижности, но малая ширина энергетической зоны (0,17 эВ) вызывает заметный температурный дрейф. Материал GaAs с шириной энергетической зоны порядка 1,43 эВ имеет самую высокую температурную стабильность, но наименьшую чувствительность, и рекомендуется только для эффекта Холла. InAs с шириной зоны в 0,35 эВ характеризуется промежуточными свойствами.

Датчики Холла на основе материала GaAs и п-кремния значительно распространены из соображений цены. В то же время не прекращается поиск новых высокотехнологичных материалов, обеспечивающих получение улучшенных характеристик в ответ на растущие требования автомобильных и промышленных систем. Так, InAs, InSb и другие полупроводниковые материалы используются не только из-за их высокой подвижности носителей заряда и, как следствие, большей чувствительности, но и из-за их способности функционировать при частотах выше 10–20 кГц.

В связи с этим заслуживают внимания материалы 2-DEG («Two-Dimensional Electron-Gas»), производимые AHS [46]: это двумерные электронно-газовые элементы, получаемые по тонкопленочной технологии (10–20 нм) молекулярно-лучевой эпитаксии MBE (Molecular Beam Epitaxy), которые имеют высокую чувствительность и стабильность в широком температурном диапазоне, а также специальные адаптивные свойства, позволяющие варьировать их чувствительность (электронная подвижность  $\mu$  изменяется в диапазоне порядка 0,65–1,3  $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , ширина энергетической зоны составляет 0,6–1,8 эВ). Для получения элементов Холла 2-DEG AHS использует структуры на основе GaAs и InP с дополнительными слоями. При этом носители заряда оказываются в так называемом квантовом колодце, сформированном в слое тонких пленок GaAs или InGaAs, зажатых между двумя слоями полупроводников с большей шириной энергетической зоны (таких, как AlGaAs или InAlAs).

Эти материалы предназначены для элементов Холла, но сама по себе технология имеет потенциал и для магниторезисторов. Квантовый колодец способен перехватывать электроны, которые называются двумерным электронным газом, поскольку квантовый колодец малой толщины является, по сути, плоскостью, ограничивая перемещение электронов в полупроводниковом кристалле в 3-мерном пространстве, как происходит в обычных датчиках Холла.

Каждый компонент структуры датчика Холла рассчитан на функционирование в очень большом диапазоне температурных и магнитных полей. Контроль над системами материалов и над толщинами квантовых колодцев допускает контроль магнитной чувствительности в диапазоне 0,3–1 мВ/мА·мТл (в 2–5 раз отличается от обычных коммерчески доступных датчиков Холла на основе GaAs, InAs или InSb) с очень низким температурным дрейфом ( $< -0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и магнитной нелинейностью  $< 1\%$ .

Эффект действия магнитного поля на магниторезистивный элемент заключается в увеличении пути носителей заряда, и, таким образом, сопротивления:

$$R = R_0 \times (1 + K \times \mu^2 \times B^2), \quad (16)$$

где K — постоянная, зависящая от свойств материала.

Если ширина листа больше его длины, носители заряда будут пересекать лист, но их выстраивание вдоль боковых сторон элемента не будет значительным — таким же малым, как  $U_H$  и изменение в сопротивлении  $\Delta R$ .

Характерно, что элемент Холла использует геометрию, аналогичную показанной на рис. 15а–в, при этом длина в направлении приложенного электрического поля больше, чем ширина. Таким образом, напряжение Холла  $U_H$  линейно увеличивается с приложенным полем всего в несколько мТл, но выходное сопротивление полупроводникового элемента R по-прежнему незначительно изменяется с магнитным полем В.

Кроме того, для создания значительного магниторезистивного эффекта базовое сопротивление  $R_0$  также должно быть высоким. Для создания магниторезистивных датчиков с высоким сопротивлением  $R_0$  (сотнями и тысячами Ом) формируется длинная и узкая полупроводниковая полоса в несколько мкм шириной (реально — менее 80 мкм) с применением метода фотолитографии (рис. 15г, д).

Существует два метода увеличения пути носителей заряда, которые дополнительно отличают полупроводниковый магниторезистор от дискретного генератора Холла (оба метода схематически могут быть проиллюстрированы на рис. 15г, без учета необходимого соотношения длины и ширины:

- Формирование эквипотенциальных (закорачивающих) полос металла с низким сопротивлением вдоль пути — результатом является набор малых полупроводниковых элементов с искомым соотношением длины и ширины, соединенных последовательно [49] (рис. 15г).

- Создание закорачивающих полос с иглоподобными осадками материала с низким сопротивлением NiSb в матрице из InSb, что поддерживает равное распределение носителей заряда в поперечном сечении [45, 48–49] (рис. 15е).

Как видно из рис. 15а–в, элементы Холла чувствительны к направлению действующего магнитного поля В, при этом направление силы Лоренца зависит от направления управляющего поля Е (тока I, напряжения U), в то время как для получения эффекта изменения сопротивления направление обоих векторов внешних воздействий не важно (рис. 15г).

Кроме того, как видно из формулы (16), магниторезисторы из InSb нечувствительны к низким полям, но в высоких полях они показывают сопротивление, которое изменяется приблизительно как квадрат поля. Возможно увеличение сопротивления в несколько сотен процентов (рис. 15з–к).

Таким образом, сопротивление магниторезистора R под влиянием магнитного поля определяется (см. выражение (16) и рис. 15з):

- базовым сопротивлением  $R_0$ ;
- величиной перпендикулярного компонента магнитного поля В, независимо от его полярности;
- свойствами материалов или уровнями допирования, которые принимаются в расчет для получения различий в характеристиках и проводимости [45, 48–49].

Компания Infineon Technologies (ранее Siemens Aktiengesellschaft) известна по широкой номенклатуре полупроводниковых магниторезисторов, выпускаемых до 2003 года на основе D-материала и L-материала с различными уровнями допирования [48].

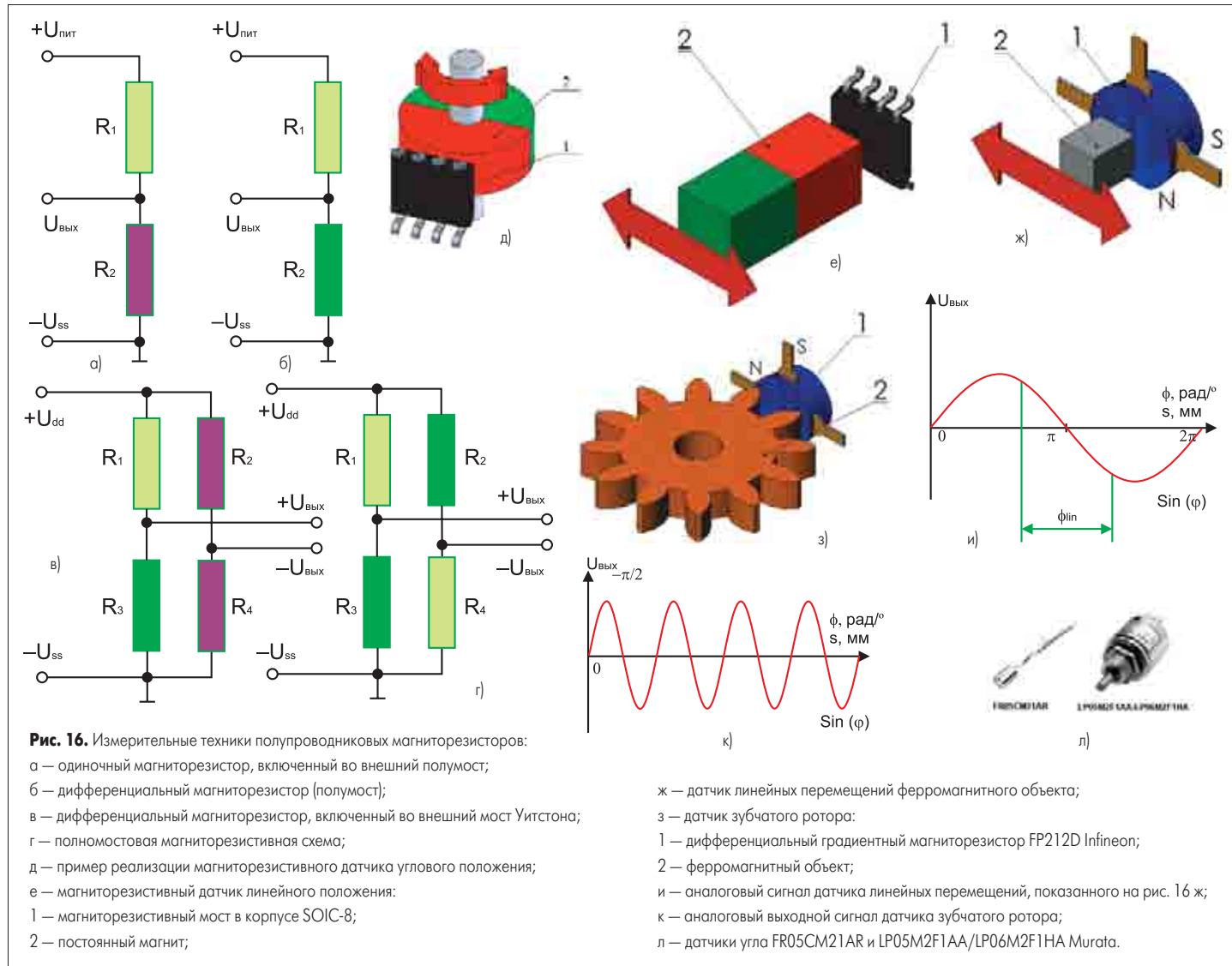
С учетом свойств данных материалов и общих физических основ базовое сопротивление  $R_0$  определяется:

- Удельной электропроводностью материала InSb/NiSb по уровню допирования:
  - 200 (Ом·см)<sup>–1</sup> (недопированный D-Material);
  - 550 (Ом·см)<sup>–1</sup> (L-Material).
- Шириной пути (до 80 мкм).
- Толщиной пути меандров (приблизительно 15–25 мкм).
- Общей длиной активной области (чувствительного пути меандров).

Материал магниторезистора InSb с иглами NiSb (D-материал) имеет значительный отрицательный температурный коэффициент сопротивления, который определяется температурной зависимостью подвижности носителей заряда. С повышением уровня допирования может быть получен положительный температурный коэффициент. Фактически, также имеется зависимость температурного коэффициента от величины магнитной индукции, действующей в магниторезисторе [48–49].

Таким образом, различные материалы и различные уровни допирования в результате являются компромиссом между чувствительностью и температурной зависимостью (рис. 15и, к).

Хотя одного магниторезистора вполне достаточно для создания датчика, управляемого внешним магнитным полем (рис. 16а–е), на практике лучшие результаты обеспечиваются измерительными техниками на основе схемы



моста Уитстона, или при внешнем включении дифференциального магниторезистора в мост. Изменение выходного сопротивления дифференциального магниторезистора представляет собой синусоидальный сигнал напряжения (рис. 16и), температурно не скомпенсированного. Во внешней электрической схеме этот сигнал может быть усилен, температурно скомпенсирован и адаптирован для различных систем.

Важными показателями мостовой и полумостовой схемы являются:

- коэффициент симметрии плеч:

$$M = \frac{(R1 - R2)}{R1} \times 100\% \quad (17)$$

при  $R1 > R2$ , где  $R1$  и  $R2$  — сопротивления плеч;

- смещение — разница между выходами плеч:

$$U_0 = \frac{U_{num}}{2} \times \frac{R1 - R2}{R1 + R2},$$

с учетом которого симметрия выражается как

$$M = \frac{2 \times U_0}{\frac{U_{num}}{2} + U_0}.$$

Компания Infineon Technologies является производителем известных стандартных

МР-продуктов в виде одиночных или двойных резисторных блоков, представляющих собой пары физически разнесенных резисторов для измерения градиентов полей, которые обычно комбинируются с внешними резисторами для формирования моста Уитстона и подходят для детектирования перемещений ферромагнитных объектов (рис. 16ж, з) [48].

Дифференциальные магниторезисторы с физически разнесенными чувствительными резисторами серий FP 210, FP 212 (расстояние между элементами 1,6 мм) и двумя парами резисторов FP 410 (1,2 мм), FP 420 (0,47 мм), FP 425 (0,78 мм) были специально разработаны для детектирования угловой скорости и углового положения ферромагнитного зубчатого ротора с небольшим модулем.

Специально для этих задач применяются под сборки с интегрированным постоянным магнитом (FP 210, FP 212) (рис. 16з). Кроме источника магнитного потока для его модуляции зубчатым ротором постоянный магнит предназначен также для смещения градиентных магниторезисторов в более чувствительную область их кривой (рис. 15з–л). Величина выходного сигнала не зависит от рабочей частоты. Выходной волновой сигнал аппроксимируется синусоидальной волной, с гармоническим эффектом, возрастающим при уменьшении воздушного зазора.

Полупроводниковые магниторезистивные датчики могут также снимать информацию о направлении вращения, детектировать линейное и угловое (см. рис. 15л, рис. 16д, е) положение или перемещение подвижного постоянного магнита.

Например, бесконтактный потенциометр FP 312L100 Infineon на основе двух дифференциальных магниторезисторов предназначен для сканирования углов до 75° с линейностью менее  $\pm 2,5\%$  и гистерезисом менее  $\pm 1\%$  в диапазоне рабочих температур от  $-25$  до  $+70$  °C. Потенциометр включает дифференциальный магниторезистор без усилителя — чувствительный элемент, активируемый магнитом.

В типичных задачах детектирования абсолютного положения также полезно использование смещающего магнита [48, 50] для смещения рабочей точки характеристики линейных МР-датчиков из  $R_0$  в высокочувствительную и линейную часть аналоговой функциональной характеристики, где большее магнитное поле  $B$  вызывает значительно более высокое изменение в сопротивлении  $\Delta R$ .

В то же время наилучшие результаты обеспечиваются при измерении только очень малых перемещений ( $\leq 1,5$  мм), что больше подходит для создания аналоговых датчиков относительных линейных и угловых перемещений или инкрементальных энкодеров — датчиков, обеспечивающих соответствие каждому следу-



ющему угловому положению уникального цифрового кода, определяющего не только величину, но и направление относительного перемещения.

В настоящее время компания Infineon Technologies отказалась от выпуска магниторезисторов с применением данной технологии, равно как и от производства гигантских магниторезисторов GMRB6 и GMRC6 и дискретных генераторов Холла серии KSY, сконцентрировавшись на создании полностью интегрированных решений на основе эффекта Холла и датчиков давления.

Тем не менее, даже после снятия их с производства, и полупроводниковые, и гигантские магниторезисторы Infineon достаточно долгое время находились в продаже, в том числе и в России (до 2004 года), и положительно себя зарекомендовали. Таким образом, отсутствие коммерчески доступной импортной элементной базы и поведение мирового лидера само по себе не является достаточным основанием считать эту технологию непригодной для разработки датчиков положения.

Существуют специальные методы, позволяющие достичь заметного увеличения магниторезистивной чувствительности, например дополнительно, за счет использования ферритовой основы в качестве подложки. Полупроводниковый материал магниторезистивного элемента допускает возможность его интегрирования в ИС, и в принципе совместим с ферритовым или полупроводниковым материалом подложки и другими полупроводниковыми структурами, также как и материалы, широко используемые для создания ИС Холла.

Даже на основе современной технологической базы полупроводниковых магниторезисторов измерительная техника моста Уитстона обеспечивает получение дифференциального выходного сигнала, обработка которого может быть эффективно выполнена с применением внешнего инструментального усилителя или посредством специальных программируемых интерфейсных ASIC и микроконтроллеров, способных линеаризовать любой выходной сигнал, даже нелинейный мостовой (PGA309 Texas Instruments, ZMD31050/ZMD31051 ZMD, MLX90308 Melexis и др.).

Таким образом, полупроводниковые магниторезисторы подходят как для градиентных, так и для чисто аналоговых измерений. К другим достоинствам МР-датчиков относится отсутствие гистерезиса, значимого для АМР (см. далее) и, в меньшей степени, для ГМР-датчиков, технология и коммерчески доступная элементная база которых будут рассмотрены в следующей части настоящей публикации.

Нечувствительность к направлению поля и очень малым полям является существенным недостатком, ограничивающим набор измерительных конфигураций и сужающим рабочий угловой диапазон измерений МР-датчиков по сравнению с эффектом Холла (порядка 70–100°, причем максимум достигим только с использованием микроконтроллера).

С физической стороны, необходимость сложной меандровой резисторной структуры для получения заметного эффекта также ограничивает возможность интегрирования маг-

ниторезистивного элемента в ИС, в сравнении с обычными прямоугольными элементами Холла. Значительная зависимость магнитосопротивления от температуры и дрейф магниторезистивного отношения ограничивают и реальный рабочий температурный диапазон до +60...70 °С. Кроме того, не существует эффективных способов линеаризации функциональной характеристики (рис. 15е) на физическом уровне, что также является очевидным недостатком в сравнении с эффектом Холла или АМР.

В конечном итоге, технологическая сложность полупроводниковых магниторезистивных датчиков, отсутствие адаптированных для детектирования абсолютного положения базовых схем, полностью интегрированных, прецизионных и высоколинейных устройств и, на фоне этого, развитие конкурирующих технологий полностью интегрированных датчиков Холла, высокочувствительных анизотропных и гигантских магниторезисторов, легко интегрируемых в кремниевую ИС, существенно ограничивает перспективы реального использования технологии эффекта Гаусса в новых автомобильных датчиках положения.

Насколько реально будущее технологии полупроводниковых магниторезисторов на более высоком физическом уровне и насколько конкурентноспособным будет ее следующее физическое воплощение, покажет время. Так, например, несмотря на решение мирового лидера Infineon в отношении полупроводниковых магниторезисторов, к возможности проведения исследований в этой области с целью решения круга промышленных задач положительно относятся компания IDAMOS, известная также своими разработками АМР- и ГМР-датчиков. Существует также линейка отечественной элементной базы [45]. Мировой лидер в производстве полупроводниковых магниторезистивных датчиков компания Murata выпускает линейку устройств промышленного класса (рис. 16л) с максимально возможным для полупроводниковых магниторезисторов углом детектирования (до ±50°).

#### Датчики положения на основе эффекта анизотропного магнитосопротивления

Анизотропные магниторезистивные датчики широко используются как для сканирования малых ферромагнитных объектов типа зубьев шестерен, так и для детектирования перемещений крупных объектов в магнитном поле Земли (например, автомобилей), а также измерения электрического тока. Они удачно решают многие задачи определения углового и линейного положения, в том числе автомобильные. Этому способствуют их высокая чувствительность, низкая цена, помехоустойчивость и малый размер. Доступные сегодня в интегральном исполнении благодаря развитию тонкопленочных технологий, АМР-датчики обеспечивают простое применение в корпусе устройства при соблюдении практических рекомендаций и правил, вытекающих из их измерительного принципа [51–59], который рассматривается далее, прежде чем быть

адресованным конкретным задачам из выбранной предметной области, поскольку имеет к ней самое непосредственное отношение.

АМР-датчики изготавливаются из тонких пленок пермаллоя (сплава NiFe) в виде резистивных полос, которые могут размещаться в отдельном интегральном корпусе или на кремниевой подложке.

Сопротивление пермаллоевой полосы зависит от угла  $\varphi$  между вектором намагниченности  $M$  доменов под влиянием внешнего магнитного поля с индукцией  $B$  (или напряженностью  $H$ ) и направлением тока  $I$  в полосе (рис. 17а–в):

$$R = R_0 + \Delta R \times \cos^2 \varphi. \quad (18)$$

где  $R_0$  — сопротивление пленки в отсутствие поля,  $\Delta R$  — изменение сопротивления при воздействии поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля в пермаллоевый вектор намагниченности параллелен течению тока,  $\varphi$  равен нулю,  $\cos \varphi$  равен 1, и сопротивление  $R=R_0$  является максимальным.

Соотношение (18) свидетельствует о нелинейной зависимости между сопротивлением  $R$  и величиной приложенного магнитного поля, а также о неуникальности  $R$  при каждом значении поля, поскольку сопротивление не зависит от направления  $H$ . Тем не менее это базовое соотношение АМР-эффекта успешно используется для измерения абсолютных углов  $\varphi$ , и никакая линеаризация для этого не требуется. Необходимо только соблюдение условия, что вектор  $M$  совпадает с направлением  $H$  ( $B$ ) (рис. 17а–в), но при этом должно быть согласовано направление поля в процессе сборки датчика (см. далее).

Магниторезистивный эффект считается чисто угловым эффектом, но может быть адаптирован и для линейных измерений.

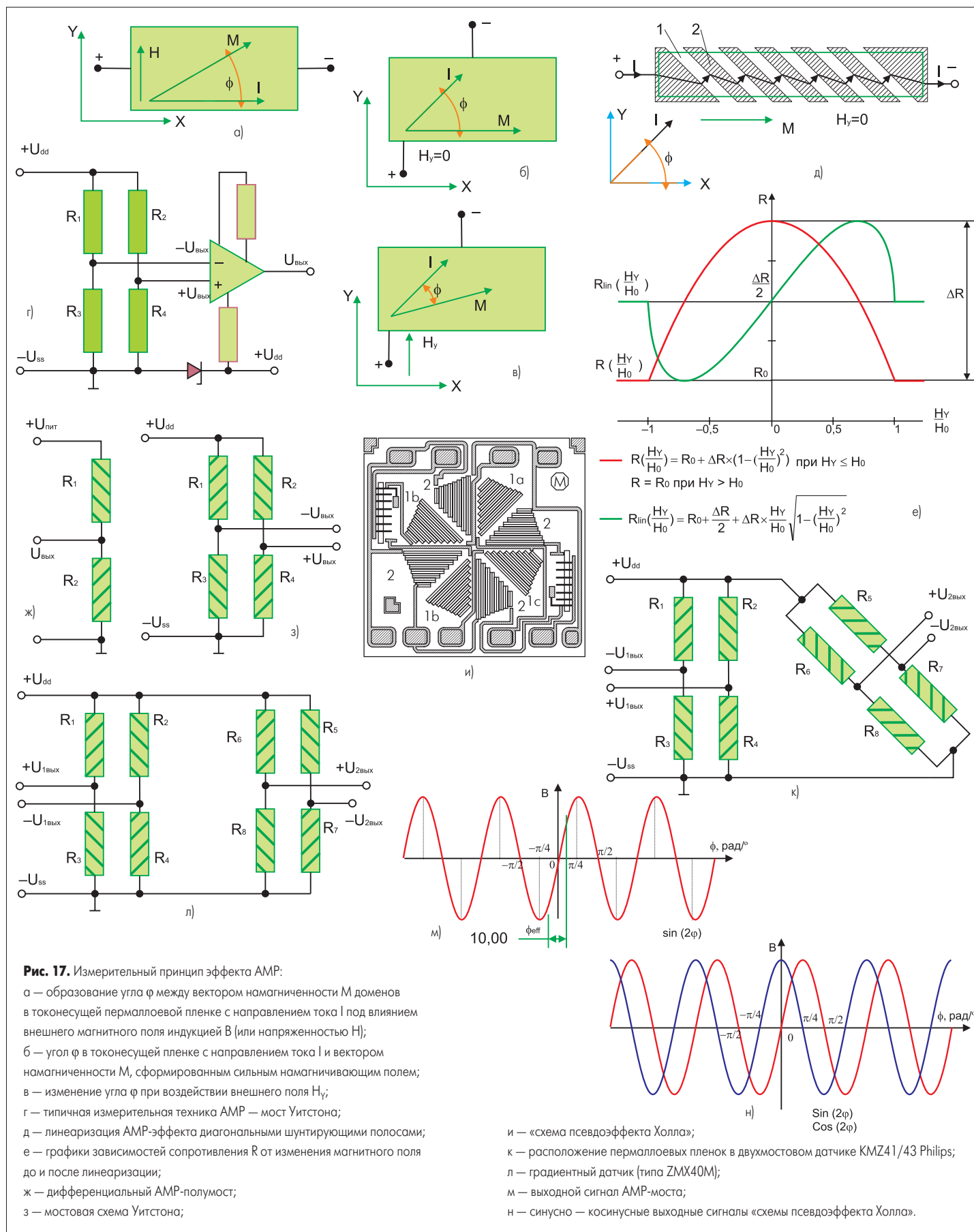
При этом точность измерений не будет зависеть от следующих величин:

- напряженности (индукции) магнитного поля;
- магнитного дрейфа во времени;
- магнитного дрейфа вследствие влияния температуры;
- магнитного старения и механического износа подвижных частей;
- механических и магнитных допусков.

Типичная измерительная конфигурация в большинстве современных датчиков представляет собой мост Уитстона (рис. 17г), который позволяет осуществлять измерение величины и направления магнитного поля вдоль одной оси в частотной полосе от 0 до 1–5 МГц и предоставляет ряд преимуществ, например, по сравнению с дифференциальным полумостом (рис. 17ж):

- снижение температурного дрейфа (температурный коэффициент пленок +0,3 %/°С);
- удвоение выхода сигнала;
- минимизация допусков сопротивления (±30%);
- подгонка на стадии производства.

Для того чтобы пояснить последнее, необходимо отметить, что АМР-свойства хорошо проявляются, только когда магнитные домены пермаллоевой пленки выровнены в одном направлении. Для этого в процессе производ-

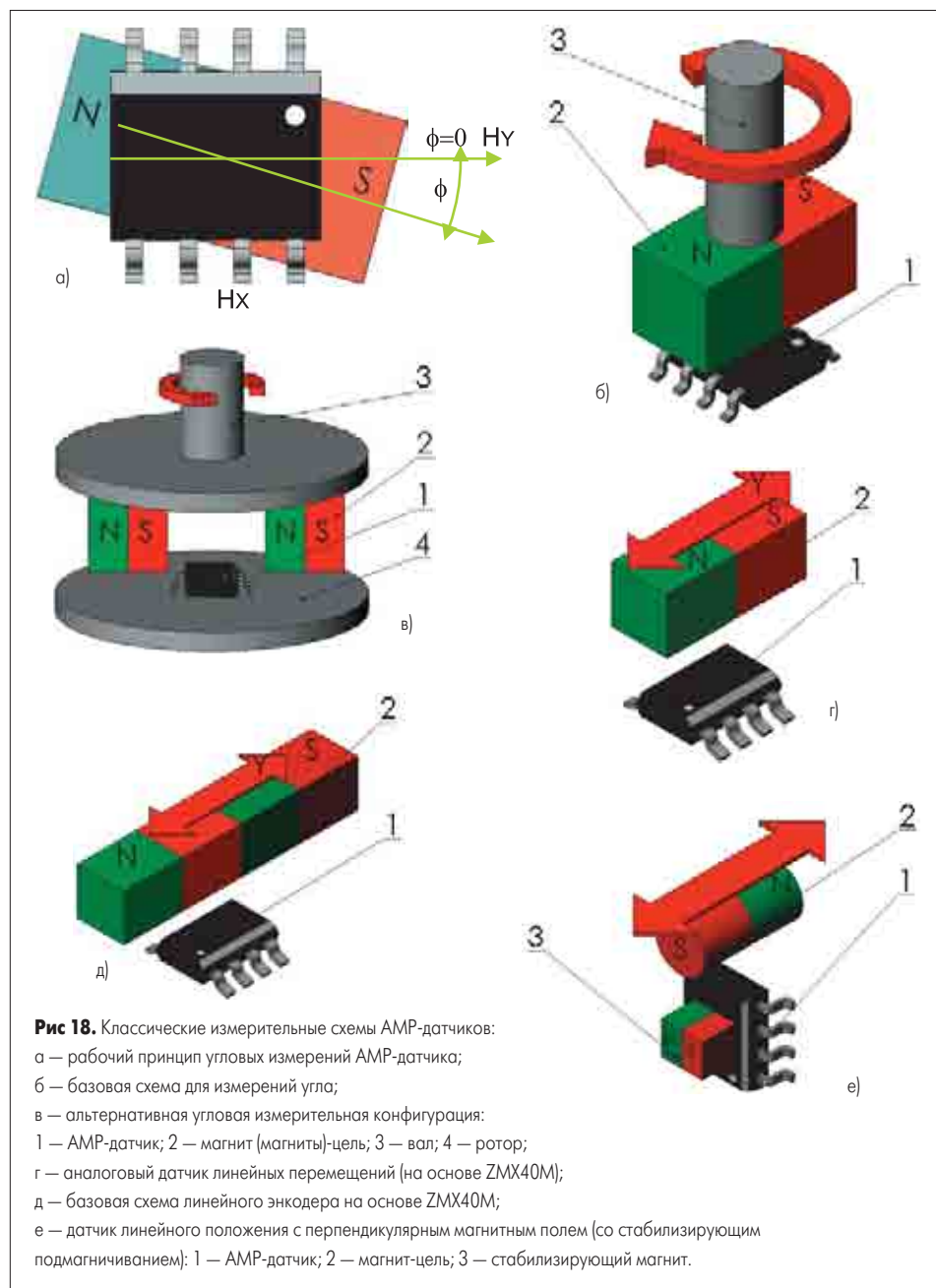


ства пленка обычно подвергается воздействию сильного магнитного поля для формирования предпочтительной ориентации вектора намагничивания  $M$ , или легкой оси (см. рис. 176). Направление и величина вектора  $M$  являются существенными для образования повторяемых, помехоустойчивых, низкогистерезисных выходных сигналов. (Возмущающее магнит-

ное поле для АМР-датчиков может фактически уничтожить предпочтительное направление намагниченности в пермаллоевое, необходимое для нормальной работы датчика. Для того чтобы восстановить нормальное магнитное состояние, вдоль длины пермаллоевой пленки нужно снова приложить сильное магнитное поле. Домены выравниваются вдоль оси

легкой намагниченности в течение 10 нс. Для выравнивания доменов часто используется обмотка вокруг мостовых резисторов, на которую подается значительный импульсный ток — техника флиппинга магнитных доменов с настраивающим импульсом.)

Лучшие характеристики обеспечивает линейаризация моста посредством так называе-



мого метода со смещением зубчатыми участками.

Сущность метода состоит в осуществлении цепочки пошаговых виртуальных поворотов тока  $I$  на углы  $\phi$  и  $(\phi-45^\circ)$ , при этом начальная ориентация вектора намагничивания  $M$  сформирована параллельно длине мостового резистора (рис. 17д). Внешнее магнитное поле  $B$ , приложенное перпендикулярно боковой стороне пленки, соответствует повороту вектора намагниченности  $M$  и изменению угла  $\phi$ , что будет вызывать изменение сопротивления резистора  $\Delta R$  и образовывать выходной сигнал напряжения на терминалах моста (при уменьшении угла сопротивление увеличивается; при  $\phi = 0^\circ$  это изменение составляет порядка 2–3%).

График зависимости сопротивления  $R$  от угла  $\phi$  поворота вектора  $M$  (поля  $H_Y$ ) после линеаризации имеет линейную область порядка  $90^\circ$  (рис. 17, е) [54–55]. Метод, который

используется для искусственного создания течения тока под углом  $45^\circ$ , называемый смещением зубчатыми участками, осуществляется посредством размещения на пути тока шунтирующих полос с низким сопротивлением из алюминия или серебра [51–55]. Благодаря зубчатому расположению полос под углом  $45^\circ$  к длине пленки, ток, выбирая кратчайший путь, на пермалловых участках течет также под углом  $45^\circ$  (рис. 17д).

В одной паре диагональных элементов моста шунтирующие полосы расположены под углом  $+45^\circ$  к оси полосы, в другой паре — под углом  $-45^\circ$  (рис. 17з–к). Увеличение сопротивления одной пары резисторов под влиянием поля соответствует равному уменьшению второй пары. Результирующий дифференциальный сигнал является линейной функцией амплитуды внешнего магнитного поля, нормального к оси полосы в ее плоскости. Мостовая чувствительность  $S$  измеряется в мВ/В/мТл

и является очень высокой (5–7 мВ/В/мТл). Тщательным подбором мостового усилителя можно измерять сигналы уровнем даже в 1 мкВ.

Для выполнения эффективных аналоговых измерений схема обработки мостового сигнала должна эффективно устранять начальное смещение и выполнять регулировку чувствительности. Специальное внимание при этом уделяется компенсации температурного дрейфа чувствительности.

Для устранения нежелательных эффектов предназначена автоматическая регулировка усиления и техники отмены сдвигов:

- добавление подгоночных резисторов;
- методы с использованием компенсационной обмотки с импульсным током (внешней или интегрированной) — флиппинг [53, 54];
- цифровая компенсация (обработка сигнала с использованием микропроцессора: цифровая коррекция аналогового сигнала или двойное преобразование АЦП — ЦАП);
- применение усилителя с обратной связью (высокочастотная модуляция входа моста и последующая демодуляция сигнала).

#### АМР-датчики углового положения

АМР-датчики углового положения конструируются на основе метода, вытекающего из оригинального соотношения (18). Целью угловых измерений является оказание влияния на внутреннее намагничивание датчика  $M$  приложением внешнего магнитного поля — такого, чтобы выполнялось условие соответствия вектора  $M$  внутренней намагниченности пермаллоя вектору  $H$  внешнего поля, и было возможным отслеживание изменения магнитосопротивления.

Точность гарантируется, когда использует внешнее поле напряженностью много большей, чем внутреннее намагничивание (которое обычно оценивается в 3 кА/м; 1 кА/м эквивалентен 1,25 мТл). Когда это сильное поле (обычно более 100 кА/м) насыщает датчик, фактическая напряженность поля уже не играет роли в измерениях. Оценивается только направление. (Если, как рекомендовано, приложено насыщающее поле 100 кА/м, из-за дополнения вектора внешнего поля внутренней намагниченностью, например, 2 кА/м, будет образовываться систематическая ошибка порядка 2%, которая должна корректироваться в процессе производства путем подгонки.)

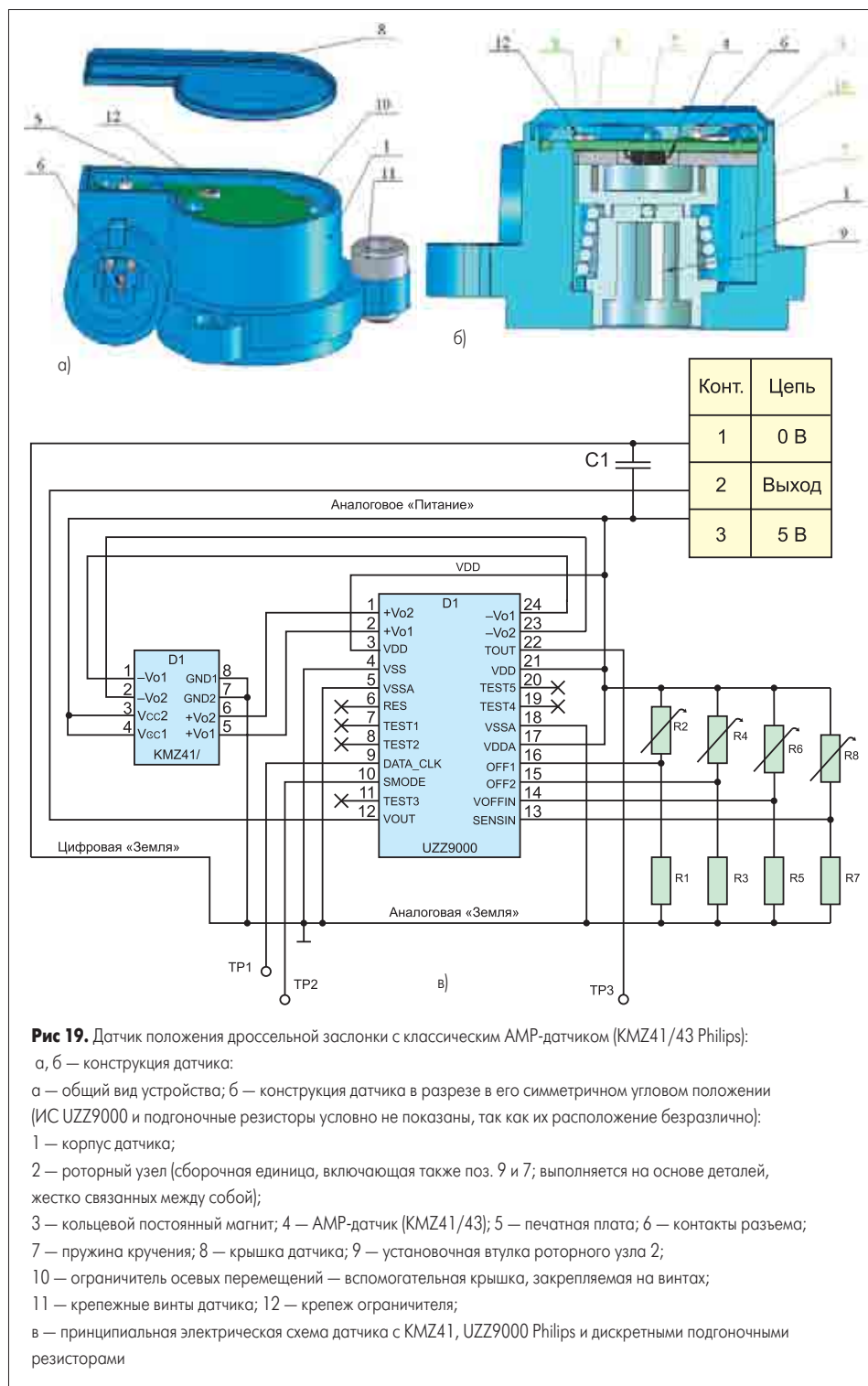
В системах измерения угла магнит на цели, например, из материала  $\text{SmCo}$ , вращается перед датчиком, размещенным так, чтобы внутренний вектор намагничивания был параллелен вектору поля магнита в контрольной точке (взятой на контрольной оси  $Y$ ) (рис. 18а–в) [51–63]. Когда магнит-цель вращается, угол внешнего поля  $\phi$  изменяется относительно внутреннего поля намагничивания пермалловых полос  $M$ . Это вызывает поворот вектора  $M$  датчика на угол  $\phi$  и его выравнивание с внешним полем.

Ведется постоянная разработка датчиков, которые могут быть установлены в их насыщенное состояние с использованием неуклонно меньших напряженностей полей. Это значительно уменьшает системные издержки, по-

<sup>2</sup> Речь идет о специальной технике обращения характеристики в сильных магнитных полях для устранения начального смещения.

Полезный флиппинг следует отличать от нежелательного самопроизвольного эффекта, возникающего в сильных магнитных полях, например близ полюсов.





**Рис 19.** Датчик положения дроссельной заслонки с классическим АМР-датчиком (KMZ41/43 Philips):

а, б — конструкция датчика:

а — общий вид устройства; б — конструкция датчика в разрезе в его симметричном угловом положении (ИС UZZ9000 и подгоночные резисторы условно не показаны, так как их расположение безразлично):

1 — корпус датчика;

2 — роторный узел (сборочная единица, включающая также поз. 9 и 7; выполняется на основе деталей, жестко связанных между собой);

3 — кольцевой постоянный магнит; 4 — АМР-датчик (KMZ41/43); 5 — печатная плата; 6 — контакты разъема;

7 — пружина кручения; 8 — крышка датчика; 9 — установочная втулка роторного узла; 2;

10 — ограничитель осевых перемещений — вспомогательная крышка, закрепляемая на винтах;

11 — крепежные винты датчика; 12 — крепеж ограничителя;

в — принципиальная электрическая схема датчика с KMZ41, UZZ9000 Philips и дискретными подгоночными резисторами

сколько могут быть использованы обычные сравнительно недорогие ферритовые магниты или магниты типа Алнико. Например, KMZ43Т насыщается уже в полях от 25 кА/м. Необходимо пояснить, что уже достигнуты и большие уровни чувствительности АМР с насыщением в полях менее 8 кА/м; но этот класс датчиков, чувствительных даже к малейшим магнитным возмущениям, ориентируется на решение задач навигационных систем и не подходит для измерения углового положения.

Что касается реально измеряемого углового диапазона  $\phi$ , согласно соотношению (18), дифференциальный выходной сигнал ( $+U_o$ ,  $-U_o$ ) моста Уитстона пропорционален  $\sin 2\phi$  (рис. 17м). Это означает, что датчик угла, объединяющий мост Уитстона, может измерять

угловой диапазон только 90°. Амплитуда сигнала моста зависит от температуры, поэтому схема обработки сигнала обязательно должна включать температурную компенсацию. Для исключения этих недостатков используются двухмостовые датчики: два моста в датчике размещаются под смещающим углом 45° друг к другу, тогда два выходных сигнала с электрическим фазовым сдвигом 90° будут пропорциональны  $\sin 2\phi$  и  $\cos 2\phi$  соответственно, и позволяют оценивать угловой диапазон 180° (рис. 17и, м). Эта схема известна под названием «схема псевдоэффекта Холла».

Температурная зависимость амплитуды сигнала в этой схеме не устраняется, но оба моста размещены на одной подложке, имеют сходные свойства, поэтому выходные сигналы никак не смещены (только в их фазе), и неиз-

вестный угол  $\phi$  может быть определен практически без ошибок из сигналов X и Y:

$$\phi = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (19)$$

где сигналы  $X(\phi, T) = X_0(T) \times \sin 2\phi$  и  $Y(\phi, T) = Y_0(T) \times \sin 2\phi$  являются некоторой функцией температуры T.

Результат не будет зависеть от абсолютной амплитуды сигналов, поэтому температурная компенсация не требуется.

### Датчик положения дроссельной заслонки

С использованием изложенных выше принципов разработан еще один виртуальный макет датчика положения дроссельной заслонки для автомобилей ВАЗ с применением KMZ41/43 Philips (рис. 19). Альтернативная коммерчески доступная элементная база АМР-датчиков для конструкции, показанной на рис. 19а, б, приведена в таблице 5. Оптимальный пример реализации принципиальной электрической схемы с применением KMZ41/43 Philips, приведенной на рис. 19в, возможен благодаря существованию специальной интерфейсной ИС UZZ9000 Philips, рассчитанной на одновременную обработку двухмостовых сигналов — в отличие от MLX90308, PGA309, ZMD31050 и других, рассчитанных на обработку только одного мостового сигнала (за исключением ZMD31051).

### Схемотехника UZZ9000

UZZ9000 — ИС со смешиванием сигнала, специально предназначенная для вычисления угла и преобразующая два входных сигнала — синусоидальный и косинусоидальный — в линейный выходной сигнал [56]. Полный аналог — ИС UZZ9001 выполняет точно такое же преобразование с формированием выходного SPI-интерфейса [57].

Дифференциальные сигналы датчика  $\pm U_{o1}$  и  $\pm U_{o2}$  от KMZ41 подаются на входную ступень UZZ9000 и затем оцифровываются с помощью двух одновременно тактируемых  $\sigma$ - $\Delta$  АЦП. Для вычисления угла используется специальный итеративный алгоритм CORDIC вычисления арктангенса двух сигналов. Затем угол в виде 13-битного цифрового значения преобразуется снова в аналоговую форму.

Выходной ЦАП и входной АЦП обеспечивают ратиометричность аналоговых сигналов аналоговому напряжению (VDDA, VSSA).

В нормальном режиме работы механический угловой диапазон линейно преобразуется в аналоговые напряжения 5,5–94,5% VDDA. За пределами указанного диапазона лежит диагностическая область — ошибки случаются либо из-за закорачивания выхода VOUT на шину питания или земли, либо когда магнит не обеспечивает корректные входные сигналы.

Для адаптации UZZ9000 к рабочим условиям механический входной угловой диапазон программируется пользователем как 0–30° и 0–180° с шагом 10°. Данная функция адаптирует фиксированный диапазон выходного напряжения к различным входным угловым ди-



Таблица 5. Элементная база современных АМР-датчиков

Датчик АМР	Функциональное описание	Насыщающее поле, кА/м	Угловой диапазон, °	Напряжение питания, В	Мостовое сопротивление, кОм	Выходной интерфейс	Рабочая частота, МГц	Угловая чувствительность, мВ/В, °	Выходное напряжение, мВ	Чувствительность, мВ/В/кА/м	Напряжение смещения, мВ/В	Гистерезис, ° (мкВ)	Угловая неточность, °	Разрешение, °	Потребление мощности, мВт	Температурный коэффициент мостового сопротивления, %/К	Температурный коэффициент чувствительности, %/К	Температурный коэффициент смещения, мкВ/В/К	Рабочая температура, °С	Типы корпусов	Производитель
НМС1501	Датчики линейного, углового и вращательного положения с низким потреблением мощности	8 мТл	90	5 (1...25)	5 (4...6,5)	Синусоидальный выход	0..5	2,1 мВ/°	120 мВ (100...140)	12 мВ/В	3 (-7...7)	30 (0,017°)	-*	0,07	5	0,28	-0,32	-0,01	-40...+125	8-пиновый корпус пов. монтажа	Honeywell
			180	5 (1...25)	2,1 (2...2,8)	Синусоидальный и косинусоидальный выход		2,1...2,6 мВ/°	68	-*	2,5 (-4...5)		-*	0,05	23						
КМЗ43Т	Датчик магнитного поля	25	180	5...9	3,2 (2,7...3,7)	Синусоидальный и косинусоидальный выход	0..1			-*	±2	0..0,18% полного диапазона	0..0,1	-*	-*	0,32 (0,28...0,35)	-0,29(-0,25...-0,33)	±4	-40...+150	SOT96-1 (SO8)	Philips
КМЗ41	Датчик магнитного поля	100 (>40)	180	5...9	2,5(2...3)	Синусоидальный и косинусоидальный выход	0..1	2,44...3	70...86		±2	0,01 (0..0,4% полн. диапазона)	0,1 (0..0,25)	-*	90	0,32 (0,3...0,34)	-0,31(-0,25...-0,37)	±2	-40...+150	SOT96-1	Philips
ZMT31	Датчик угла	50	180	5	3 (2...4)	Синусоидальный и косинусоидальный выход	-*	0,2	1,6 мВ/В	-*	±2	2	≤2	-*	120	0,3	-0,3 (при постоянном напряжении питания); -0,05 (при постоянном входном токе)	±3	-25...+100	SM-8	Zetex
ZMX40M	Двухканальный дифференциальный аналоговый выход	30	-	12	1,4...2,2		0..1	-	18 (12...24)	3...5	±1,5	50	-*	-*	240	0,3	-0,3 (при постоянном напряжении питания); -0,1 (при постоянном входном токе)	±3	-25...+125	SM-8	Zetex
ZMY20, ZMZ20	Датчик магнитного поля	-*	90	12		Аналоговое выходное напряжение моста	0..1	-	20 (1,6...24)	4,7(3,7...5,7)	±1	50	-*	-*	120	0,3	-0,3 (при постоянном напряжении питания); -0,1 (при постоянном входном токе)	±3	-40...+150	SOT223S – ZMY20, 4-выводной E-Line – ZMZ20	Zetex
ZMY20M, ZMZ20M	Датчик магнитного поля с интегрированным магнитом	30 (вспомогательное поле магнита ZMY20M – 2 кА/м, ZMZ20M – 2,5 кА/м)	90	12	1,2...2,2	Аналоговое выходное напряжение моста	0..1	-	18 (12...24)	ZMY20M – 5,5 (3...7); ZMZ20M – 5 (3...7)	±1,5	50	-*	-*	120	0,3	-0,3 (при постоянном напряжении питания); -0,05 (только для ZMY20M при постоянном входном токе)	±3	-25...+125	SOT223S – ZMY20M, 4-выводной E-Line – ZMZ20M	Zetex
IM_700	Магниторезистивный датчик	-*	-*	-*	0,7	Аналоговое выходное напряжение моста	-*	-*	-*	1% при 10Э; 1,5% при 20Э	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	-*	HPLPlanar Technik
КМТ 31	Магнитный датчик угла	50	180	5	3 ± 1,0	Синусоидальный и косинусоидальный выход	-*	-	≥24	0,418 мВ/В/°	±2,0	1	≤2	-*	120	0,3	-0,3 (при постоянном напряжении питания); -0,05 (при постоянном входном токе)	±3	-40...+125	SM-8	HPLPlanar Technik
КМТ32В	Магнитный датчик угла	8..25	180	5...8,5 (10 max)	3 (2,4...3,6)	Синусоидальный и косинусоидальный выход	-*	-*	17...20	-*	±1	0,1	0,05..2	-*	-*	0,32 (0,27...0,37)	-0,32(-0,28...-0,36)	±4	-40...+150	8-пиновый чип; SW-8	HPLPlanar Technik
КМУ 20 S/ КМЗ 20 S (КМЗ 20 M1/ КМУ 20 M)	Датчики магнитного поля	-*	90	12	1,4...2,0	Аналоговое выходное напряжение моста	-*	-	20,0±4,0	4,7±1,0	±1	50	-*	-*	120	0,3	-0,3 (при постоянном напряжении питания); -0,05 (при постоянном входном токе)	±3	-40...+125	SOT223S – КМУ20, 4-выводной E-Line – КМЗ20	HPLPlanar Technik
КМР 360	Датчик магнитного поля	25	360°	10 max	1 (0,8...1,2)	Три синусоидальных выходных сигнала с фазовым сдвигом 60°	-*	-*	15	-*	±5	-*	2	-*	-*	0,32 (0,28...0,36)	-0,32(-0,29...-0,35)	-*	-40...+125	SM 14	HPLPlanar Technik
МЛS-8	Магнитный датчик длины	10	-*	5...10	40 (30...50)	Синусоидальный и косинусоидальный выход	-*	-*	8	-*	1	-*	-*	-*	-*	0,33 (0,29...0,37)	-0,33(-0,29...-0,37)	-*	-40...+85	керамический гибридный модуль 17,8x8,1x2,2	HPLPlanar Technik
МЛS-5000	Магнитный датчик длины	10	-*	5...10	1,5(1...2)	Синусоидальный и косинусоидальный выход	-*	-*	16	-*	1,5	-*	-*	-*	-*	0,33 (0,29...0,37)	-0,33(-0,29...-0,37)	-*	-40...+85	керамический гибридный модуль 17,8x8,1x2,2	HPLPlanar Technik

\* Не специфицируется.

апазонам для снижения абсолютной угловой погрешности ЦАП и, таким образом, снижает системную цену. Кроме того, нулевая точка выходной кривой может быть также запрограммирована в диапазоне  $\pm 5^\circ$  для минимизации допусков сборки.

Компенсация статических сдвигов синусоидальных входных сигналов (для UZZ9000) от KMZ41 должна быть выполнена на специальных выводах UZZ9000 для каждого канала, к примеру, с использованием резисторного делителя с лазерной подгонкой. Напряжения OFF1, OFF2 и другие (рис. 19в) должны обеспечиваться непрерывно в течение работы.

В процессе подгонки для передачи последовательного протокола могут задействоваться выводы DATA\_CLK, SMODE и TOUT, которые отпаиваются перед установкой крышки 8 датчика, показанного на рис. 19.

Так как KMZ41 и UZZ9000 не продаются вместе как одно устройство, за обеспечение правильного компенсационного напряжения отвечает потребитель.

UZZ9000 имеет также интегрированный RC-генератор, генерирующий тактирование для ИС, блок автоматической инициализации при включении и выключении со встроенным гистерезисом.

Максимальная угловая ошибка UZZ9000 при температурах  $-40...+150^\circ\text{C}$  составляет менее  $0,45^\circ$ .

### АМР-датчики линейного положения

Принцип, лежащий в основе работы датчиков линейного положения, сходен с принципом угловых измерений в том, что вектор  $M$  выравнивается в соответствии с внешним магнитным полем, и таким образом изменяется сопротивление пермалловых пленок.

Если магнит ориентирован так, что ось вспомогательного направления поля  $X$  параллельна пермалловой полосе, то любое движение в направлении  $Y$  может быть видно как флуктуации поперечного поля, что эквивалентно положению магнита относительно датчика (рис. 18г). Линейная область выходного сигнала датчика приблизительно определяется длиной магнита. За пределами этой области аксиальное магнитное поле, образованное магнитом, становится слабее и близ полюсов изменяет направление; при этом полюса могут вызывать флиппинг. Тот же принцип может быть адаптирован для детектирования перемещений линейных или угловых многополюсных магнитов (рис. 18д).

Если используется сильное магнитное поле или датчик помещен слишком близко к магниту, есть опасность превышения аксиальным полем значения, достаточного для флиппинга, и образования гистерезиса на выходе датчика. При определенных обстоятельствах это может быть использовано и как положительный эффект, блокирующий интерференцию внешних электромагнитных помех.

Ориентацией оси датчика под углом  $45^\circ$  относительно магнита можно индицировать расстояние между магнитом и датчиком.

Существуют две базовые системы измерения положения, в которых выход датчиков

(например, типа KMZ10B и KMZ10C) является функцией перемещения датчика параллельно магнитной оси [53–54, 59]:

- с заданием магнитного поля параллельно датчику (как описано выше);
- с магнитным полем, перпендикулярным датчику.

Во втором случае датчик ориентирован так, что его плоскость перпендикулярна магнитной оси, и обеспечивать вспомогательное магнитное поле с помощью подвижного магнита-цели невозможно. Для создания вспомогательного поля используется дополнительный стабилизирующий магнит (рис. 18е).

Особенностью второго режима является отсутствие гистерезиса переключения — частично из-за использования дополнительного магнита, а также из-за того, что ориентация магнита-цели не образует магнитное поле в направлении  $X$  и, таким образом, оно не может влиять на датчик. Эта схема хорошо подходит для измерений с высоким разрешением и высокой чувствительностью с очень малыми рабочими расстояниями [54].

### ZMX40M Zetex

Содержащая два высокочувствительных датчика магнитного поля, ZMX40M специально сконструирована для точного измерения линейного положения и токов. Интегрированный магнит создает перпендикулярное поле  $H_z$ , которое подавляет гистерезис и смещает датчик в линейную область. ZMX40M в корпусе SM8 содержит два АМР-чипа, параллельных друг другу и разделенных на 3 мм в направлении оси  $Y$  (рис. 17л, рис. 18г, д).

Движение магнита над поверхностью корпуса вызывает увеличение выхода каждого элемента (рис. 18г, д). Два импульса одинаковой амплитуды на выходе соответствуют среднему положению магнита между элементами. ZMX40M может также оценивать перемещения в зубчатых системах с разрешением до 30 мкм.

### АМР-энкодер

Как и любая другая технология магниточувствительных датчиков, технология АМР-эффекта может быть адаптирована для построения на его основе абсолютных или инкрементальных угловых энкодеров — преобразователей с импульсным выходным сигналом, индицирующим абсолютное значение угла поворота или линейного перемещения (абсолютные энкодеры) или перемещения относительно выбранной индексной отметки (инкрементальные энкодеры). (Подробнее тема энкодеров будет обсуждаться в следующих частях статьи).

Одним из самых интересных устройств среди широкого круга магниторезистивных датчиков различного назначения [60–72] является датчик угла поворота рулевого колеса LWS 3 (рис. 20), разработанный Bosch для его использования в системах динамической стабилизации ESP (Electronic Stability Program) и иллюстрирующий применение эффекта АМР в устройстве абсолютного энкодера.

Поворот руля вращает шестерню, ведущую две другие шестерни, на которых установле-

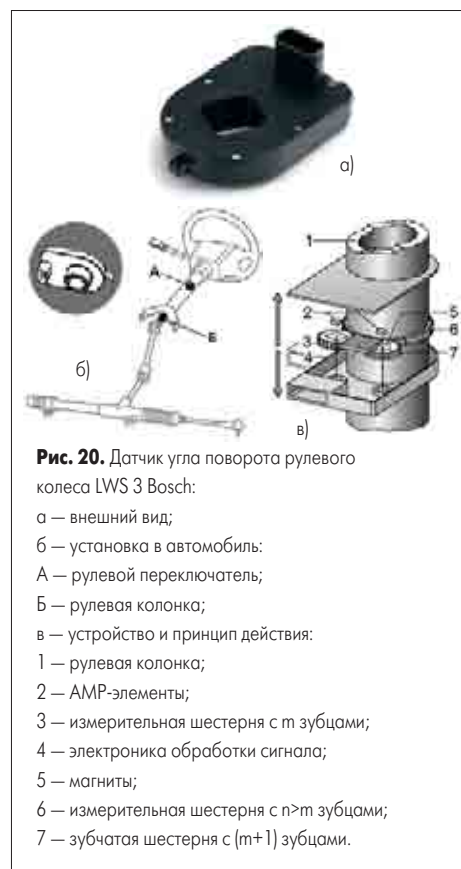


Рис. 20. Датчик угла поворота рулевого колеса LWS 3 Bosch:

- а — внешний вид;
- б — установка в автомобиль;
- А — рулевой переключатель;
- Б — рулевая колонка;
- в — устройство и принцип действия:
- 1 — рулевая колонка;
- 2 — АМР-элементы;
- 3 — измерительная шестерня с  $m$  зубцами;
- 4 — электроника обработки сигнала;
- 5 — магниты;
- 6 — измерительная шестерня с  $n+1$  зубцами;
- 7 — зубчатая шестерня с  $m+1$  зубцами.

ны магниты. АМР-элементы регистрируют угловые положения магнитов и вырабатывают аналоговые сигналы, через АЦП подаваемые на вход микроконтроллера.

Количество зубьев в ведомых шестернях различно, что обеспечивает их вращение с разными скоростями. Сканируя оба фактических угла поворота, можно вычислить общий угол поворота руля даже без счетчика оборотов. После нескольких оборотов руля каждая шестерня возвращается в свое начальное положение.

Благодаря системе шестерен и функции самодиагностики обеспечивается высокая точность измерений в угловом диапазоне  $\pm 780^\circ$  с угловым ускорением  $1016^\circ/\text{с}$  (до  $\pm 2000^\circ/\text{с}$ ). В полном измерительном диапазоне угловая чувствительность устройства оценивается как  $0,1^\circ$ , чувствительность к угловому ускорению —  $4^\circ/\text{с}$ , гистерезис —  $0-5^\circ$ , нелинейность —  $\pm 2,5^\circ$ .

Одна из специальных характеристик датчика — возможность немедленной оценки угла при включении зажигания даже в отсутствие перемещений руля (функция «True-Power-On»). Угол и скорость поворота руля выводятся в формате CAN.

### Заключение

Вероятно, в обозримом будущем оценка перспектив коммерциализации технических решений автомобильных магниторезистивных датчиков будет начинаться с анализа физических основ и базовых измерительных принципов, реализованных в коммерчески доступной магниторезистивной технологии и ориентированных на ее эффективное воплощение.

Текущее состояние элементной базы полупроводниковых и пермалловых магниторезистивных датчиков не подлежит однознач-

ному определению. Оба типа датчиков проигрывают программируемому ИС Холла в отношении базовой линейности эффекта, степени интегральности компонентов, общей развитости технологической базы эффекта Холла, сводящей усилия потребителя к минимуму.

В то же время обе проанализированные магниторезистивные технологии могут иметь конкурентоспособный потенциал для их будущего использования в автомобильных системах, требующих непрерывного повышения технологического уровня и значительных качественных улучшений существующей элементной базы.

Следует отметить, что уже сейчас благодаря собственной высокой чувствительности, эффективной линеаризации эффекта на физическом уровне, эффективной температурной компенсации, значительной нечувствительности к величине магнитного поля (оце-

нивается только направление) и рабочим зазором и допускам, существованию специального мостового интерфейса, текущее состояние пермалловых магниторезистивных датчиков, использующих эффект АМР, может быть охарактеризовано как представляющее собой конкурентоспособную альтернативу датчикам Холла, причем достаточно высокого уровня.

### Литература

45. Баранчиков М. Л. Микромагнитоэлектроника: В 2 т. М.: ДМК Пресс. 2001.
46. Advanced Hall Sensors Limited. The Quantum Hall Effect World Leader. <http://www.w.ahsld.com/documents/AHS%20Ltd%20E-Brochure%20Sec.pdf>.
47. An Introduction to the Hall Effect. <http://www.w.sypris.com/library/documents/hallcatalog.pdf>.
48. Semiconductor Sensors Data Book. Infineon. July 2000.
49. Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R. A new perspective on magnetic field sensing. [www.sensorsmag.com](http://www.sensorsmag.com).
50. Method for embedding wires within a powder metal core and sensor assembly produced by such a method. US Patent 5 210 493. 11.05.1993. General Motors Corporation.
51. Holman P. A. Magnetoresistance (MR) Transducers And How to Use Them as Sensors. Honeywell International. July 2004.
52. Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R. AMR magnetic field sensors. [www.sensorsmag.com](http://www.sensorsmag.com).
53. Sensor systems. General. Angle Measurement. Philips. January 1997. [http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/various/SC17\\_GENERAL\\_ANG\\_1996\\_3.pdf](http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/various/SC17_GENERAL_ANG_1996_3.pdf)
54. Magnetic field sensors. General. Philips. June 1998. [http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/various/SC17\\_GENERAL\\_MAG\\_1998\\_1.pdf](http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/various/SC17_GENERAL_MAG_1998_1.pdf).
55. Mason H. Basic Introduction to the use of Magnetoresistive Sensors. Application Note 37. Zetex. September 2003. <http://www.w.zetex.com/3.0/appnotes/apps/an37.pdf>.
56. Dietmayer K., Weser M. Contactless Angle Measurement Using KMZ41 and UZZ9000. Application Note AN00023. Philips. March 2000. [http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/applicationnotes/AN98097\\_1.pdf](http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/applicationnotes/AN98097_1.pdf)
57. Dietmayer K., Weser M. Contactless Angle Measurement Using KMZ41 and UZZ9001. Application Note AN 00004. Philips. January 2000. [http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/applicationnotes/UZZ9001\\_APPNOTE00004.pdf](http://www.w.semiconductors.philips.com/acrobat/applicationnotes/UZZ9001_APPNOTE00004.pdf).
58. Linear / Angular / Rotary Displacement Sensors HMC1501/HMC1512. <http://www.w.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/hmc1501-1512.pdf>
59. Linear position sensing using magnetoresistive sensors. <http://www.w.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/linearpositionensing.pdf>.
60. Rotary magnetic position sensor having pole differentiated magnets. US Patent 6 777 928. 17.08.2004. Delphi Technologies, Inc.
61. Magnetic differential field sensor using hysteresis field in AMR films. US Patent 6 831 458. 14.12.2004. Honeywell International Inc.
62. Magnetic angular position sensor apparatus. US Patent 6 806 702. 19.10.2004. Honeywell International Inc.
63. Angular position detecting apparatus for linearly detecting angular position in a wider range. US Patent 6 646 435. 11.11.2003. Nippon Soken, Inc., Denso Corporation.
64. AC-coupled sensor signal conditioning circuit. US Patent 6 657 476. 2.12.2003. Honeywell International Inc.
65. Sensor assembly with a universal sensor module for sensing angular position of an object. United States Patent Application 20040196030. 7.10.2004. Delphi Technologies, Inc.
66. Magnetic position sensor having shaped pole pieces to provide a magnetic field having a varying magnetic flux density field strength. US Patent 6 653 830. 25.11.2003. Wabash Technologies, Inc.
67. Position detecting apparatus using a magnetic sensor and a closed magnetic circuit with non-uniform magnetic flux distribution. US Patent 4 810 965. 7.03.1989. Fujitsu Limited.
68. Compact rotary magnetic position sensor having a sinusoidally varying output. US Patent 6 720 763. 13.04.2004. Delphi Technologies, Inc.
69. Geartooth sensor with angled faced magnet. United States Patent Application 20040085061 A1. 06.05.2004.
70. Torque/position transducer. US Patent 5 931 044. 3.08.1999. T&R Solutions, Inc.
71. Saturated magnetoresistive approach for linear position sensing. US Patent 6 833 697. 21.12.2004. Honeywell International Inc.
73. Sensors. Karanor Robert Bosch GmbH.