

Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы

Часть 5. Новые перспективы бесконтактных угловых измерений в диапазоне угла 360 градусов: снова датчики Холла — угловые магнитные энкодеры

Светлана СЫСОВЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Данная публикация завершает обзор интегральных магнитоуправляемых датчиков и посвящена описанию новых технологий датчиков и энкодеров Холла, реализующих измерительный принцип двумерного сканирования магнитных полей в диапазоне угла 360°, идентичный магниторезисторам АМР и ГМР. Специальное внимание уделяется обоснованию перспективности будущей коммерциализации устройств данного типа в автоэлектронике, а также ответам на ряд теоретических и практических вопросов. Аспекты разработки новых устройств на основе ИС Холла абсолютных магнитных энкодеров проиллюстрированы актуальными примерами новых автомобильных датчиков угла.

Введение

Требования современного автомобильного рынка акцентируют значительные усилия разработчиков на создании датчиков углового и линейного положения. Эта группа включает угловые энкодеры (абсолютные и инкрементальные), линейные энкодеры и аналоговые датчики углового и линейного положения. Данные устройства основываются на различных принципах, используют множество различных технологий, включая резистивные (потенциометры), магнитные, индуктивные, емкостные, оптические и т. д.

Тем не менее, среди всего многообразия технологий, подходящих для детектирования любого параметра движения цели в автомобильной мехатронной системе — индикации абсолютного положения, определенного положения, перемещения, скорости, направления, ускорения, ориентации и т. д. — только некоторые типы датчиков могут обеспечить в совокупности высокую точность, малый размер, надежность и бесконтактность.

Эффективным решением является комбинация магнитоуправляемого датчика (Холла, АМР, ГМР) и постоянного магнита, установленного на движущейся части системы.

Интегральные технологии, представленные значительным количеством коммерчески доступных высокоинтегрированных ИС Холла,

датчиков АМР и ГМР, формируют одно из самых перспективных направлений в разработке новых устройств. Все перечисленные выше признаки плюс высокая чувствительность и стабильность, широкий разброс допусков монтажа в бесконтактных измерениях, быстроедействие, безынерционность, помехоустойчивость и помехозащищенность, нечувствительность к вредным факторам окружающей среды и готовый электрический интерфейс характеризуют современный технологический уровень магнитоуправляемых датчиков и определяют их текущий приоритет в решении многих автомобильных задач.

Одной общей тенденцией в развитии данного направления является интегрирование в ИС максимально возможного набора функций, необходимых для последовательного решения конкретной автомобильной задачи, максимальное объединение сенсорных и ASIC-функций. Другой тенденцией, сопровождающей увеличение числа и выделение в класс «Smart» новых датчиков положения среди множества появляющихся на рынке ИС, является наличие интегрированной цифровой коррекции аналогового сигнала, в том числе и микроконтроллерной с EEPROM.

И наконец, третья, самая недавняя тенденция определяет превалирование новых интегральных магнитоуправляемых датчиков положения с уже готовым импульсным выходом, максимально пригодным для непосредствен-

ной обработки данных микроконтроллерным блоком управления автомобильной мехатронной системы, над традиционными аналоговыми ИС.

Существование данной тенденции логически обосновывается тем, что размещение ступени АЦП и ЦОС в ИС датчика с возможностью получения различных типов готовых выходов позволяет уменьшить нагрузку автомобильного блока управления, рассчитанного на обработку сигналов с достаточно большого (и с каждым годом возрастающего) числа датчиков. Если же и оцифровка аналогового сигнала осуществляется интегрированными средствами, данный тип преобразователя есть энкодер: выходной сигнал энкодера представляет собой цифровой код. Таким образом, под энкодерами в первом приближении понимаются устройства импульсного отображения информации об абсолютном положении (абсолютные энкодеры) или датчики относительных перемещений (инкрементальные энкодеры).

Другой предпосылкой тенденции является тот факт, что даже обычные цифровые и ШИМ-выходы ИС обеспечивают более стабильный и, в конечном итоге, более точный сигнал, чем аналоговый выход, менее пригодный для передачи на значительные расстояния, особенно если это биполярный и нелинейный выход моста или недостаточно усиленный сигнал датчика Холла с началь-

ным смещением в условиях электромагнитных помех, например, вследствие вибрации. (Данный факт значим как для встроенных, так и для распределенных сенсорных систем). Гистерезис в материале в этом случае оказывается полезным, а преобразование аналогового сигнала в цифровой или токовый интерфейс еще на ступени ИС является средством минимизации электронных шумов. Цифровой энкодер может обеспечить высокую точность сигнала, зависящую от его разрешения (чувствительности).

И наконец, решающим фактором в выборе любой технологии по-прежнему остается системная цена, снижению которой, безусловно, способствует уменьшение количества внешних дискретных компонентов электронной схемы управления.

Так, всеми этими предпосылками обусловлено появление новых автомобильных датчиков положения с ШИМ-интерфейсом (типа HAL810 и HAL856 Micronas, AKL00x-12 NVE). Интерфейс с тремя выводами — питания, сигнала и «земли», используемый в стандартных линейных датчиках, частично вытесняется двухпроводным, который передает выходной сигнал модуляцией общего тока потребления ИС и отвечает требованиям компактности и экономичности (энергопотребления) современных автомобильных систем. Для обработки двухпроводного сигнала не требуется АЦП. В цепи питания датчика падение напряжения на последовательном резисторе в контрольном блоке отслеживает компаратор, с выхода которого снимается сигнал.

Но КМОП-датчики Холла благодаря совместимости с технологией, допускающей их интеграцию в ИС, и текущей интегрируемости сложных электронных интерфейсов, включая АЦП, микроконтроллеры, PROM, EEPROM или калибровочные таблицы, снова предлагают интегральное решение проблемы минимизации компонентов и имеют сегодня огромное преимущество по сравнению с датчиками АМР и ГМР: один КМОП-чип Холла легко делает все необходимые измерения и расчеты, он отличается также малым размером и низкой ценой.

Обычные линейные датчики Холла имеют достаточно много недостатков, таких как, например, низкая чувствительность, дрейфы чувствительности, смещения и значительная нелинейность. Новые автомобильные системы уже требуют осуществления измерения абсолютного положения с погрешностью менее 1%. Для получения высокой точности на основе эффекта Холла непрерывно разрабатываются новые методы, предназначенные для построения эффективных интегральных измерительных систем, — не только концепции интегрированной цифровой коррекции, двойного преобразования АЦП-ЦАП, программирование и применение таких инструментальных средств, как интегрированный микроконтроллер и EEPROM, но и специальные техники снижения смещения и дрей-

фов — например, автообнуления и «spinning current» (см. далее).

Ключевой проблемой одноэлементных аналоговых датчиков Холла является их принципиальная неспособность измерять углы поворота магнита за пределами 180°, в то время как для решения большого числа автомобильных задач необходима информация об угловом положении в пределах 360° и более, и часто именно цифровая [92–93]. Измерительный принцип магниторезисторов ГМР с точки зрения механики позволяет детектировать угловой диапазон 360°; альтернативно необходимы, как минимум, два датчика Холла. Многие другие технологии и их различные комбинации также могут быть использованы с данной целью (рис. 29).

Классическими примерами автомобильных задач, решаемых с помощью энкодеров, являются датчики абсолютного положения угла поворота руля, которые переводят вращательное движение в цифровой сигнал, например, в формате CAN [92]. Этот класс датчиков (рис. 29) может представлять собой обычный инкрементальный энкодер, многооборотный датчик, измеряющий углы 360° и более — несколько полных оборотов руля — или многофункциональный смарт-модуль.

Энкодеры рулевого колеса Bosch (рис. 20. — см. «КиТ» № 4'2005. С. 61) измеряют углы $\pm 720 \dots 780^\circ$, Delphi — $\pm 900^\circ$ (рис. 29а) и обеспечивают этой информацией систему динамической стабилизации, что помогает обнаруживать и корректировать отклонения между курсом, предполагаемым водителем, и фактическим курсом машины.

Датчики рулевой колонки измеряют предполагаемый курс, датчики угла рыскания измеряют фактический курс угла поворота машины. Система динамической стабилизации по входной информации от этих и других датчиков нажимает или отпускает передний тормоз для удержания автомобиля в желаемом курсе.

В перспективе — детектирование приложенного к рулю крутящего момента. Это современное требование многих автомобильных систем в модулях управления. Например, компания First Technology разработала бесконтактный оптический метод определения дифференциального угла между двумя валами для измерений приложенного к валу крутящего момента (рис. 29е). Датчик измеряет с валами кручения дифференциальный угол до 8° и детектирует абсолютное положение свыше 2000°.

Другим классическим примером абсолютного энкодера является датчик выбора передачи, например, потенциометрический, который обычно состоит из резистивного элемента, движка и печатной платы с микроконтроллером (пример разработки Texas Instruments показан на рис. 20. — См. часть 1 статьи в «КиТ» № 2'2005). Переключение в автоматической коробке передач отделяется от механической трансмиссии: когда необходимо, водитель может выбирать различные положения передачи, игнорируя автоматическое переключение.

Инкрементальные энкодеры широко применяются в автомобиле для детектирования положения сиденья, зеркал, систем климат-контроля и т. д.

Типичные функциональные признаки позволяют выделить многооборотный энкодер, датчик или энкодер с отверстием под вал (hollow shaft или through hole) и датчик углового положения (рис. 29). Для всех типов новых устройств характерна программируемость. Немногочисленность линейных датчиков (например, данные устройства выпускаются компанией Power Components и др.) конструктивно объясняется их значительной длиной (подробнее поясняется в продолжении статьи).

По-прежнему эффективные решения в классе перечисленных выше задач может предоставить комбинация датчика Холла с постоянным магнитом, установленным на движущейся части системы. Многие компании, такие как Encoder Devices, TWK (рис. 29м), Renishaw и др., активно внедряют новый измерительный принцип эффекта Холла, аспектам реализации которого посвящена настоящая публикация.

В новой интерпретации датчик Холла, подобно АМР и ГМР, сканирует двумерное распределение магнитного поля, параллельное поверхности ИС, что допускает измерение углов в диапазоне 360° и обеспечивает получение квадратурных синусно-косинусных сигналов, которых, в принципе, достаточно для построения любого энкодера (см. текст, относящийся к рис. 34). В большинстве случаев ИС датчика обеспечивает готовый абсолютный или инкрементный выходной интерфейс. Объединение данных функций делает новый двухосевой угловой магнитный энкодер Холла интегральной магнитной микросистемой (ИМС) с высокой разрешающей способностью, информативностью, значительными интерфейсными возможностями.

ИМС Холла — двухосевые угловые энкодеры — логически завершают описание технологического уровня, достигнутого в разработке современных магнитоуправляемых датчиков. Преимущества ИМС-технологии Холла складываются из преимуществ как собственно технологии ИМС и специальных средств ЦОС, так и различных методов сканирования параллельного поля, информативности и интерфейсных возможностей, заложенных в теоретические принципы энкодеров, а также других схмотехнических решений, реализованных на подчиненном уровне.

Целью настоящей статьи, кроме обзора состояния рынка автомобильных ИМС Холла — угловых энкодеров и датчиков параллельного поля, является анализ объективных предпосылок появления данного типа устройств и иллюстрация преимуществ магнитных угловых энкодеров, актуальных для автоэлектроники, в сравнении с исполнениями датчиков положения в классических версиях эффекта Холла, магниторезисторов АМР и ГМР.

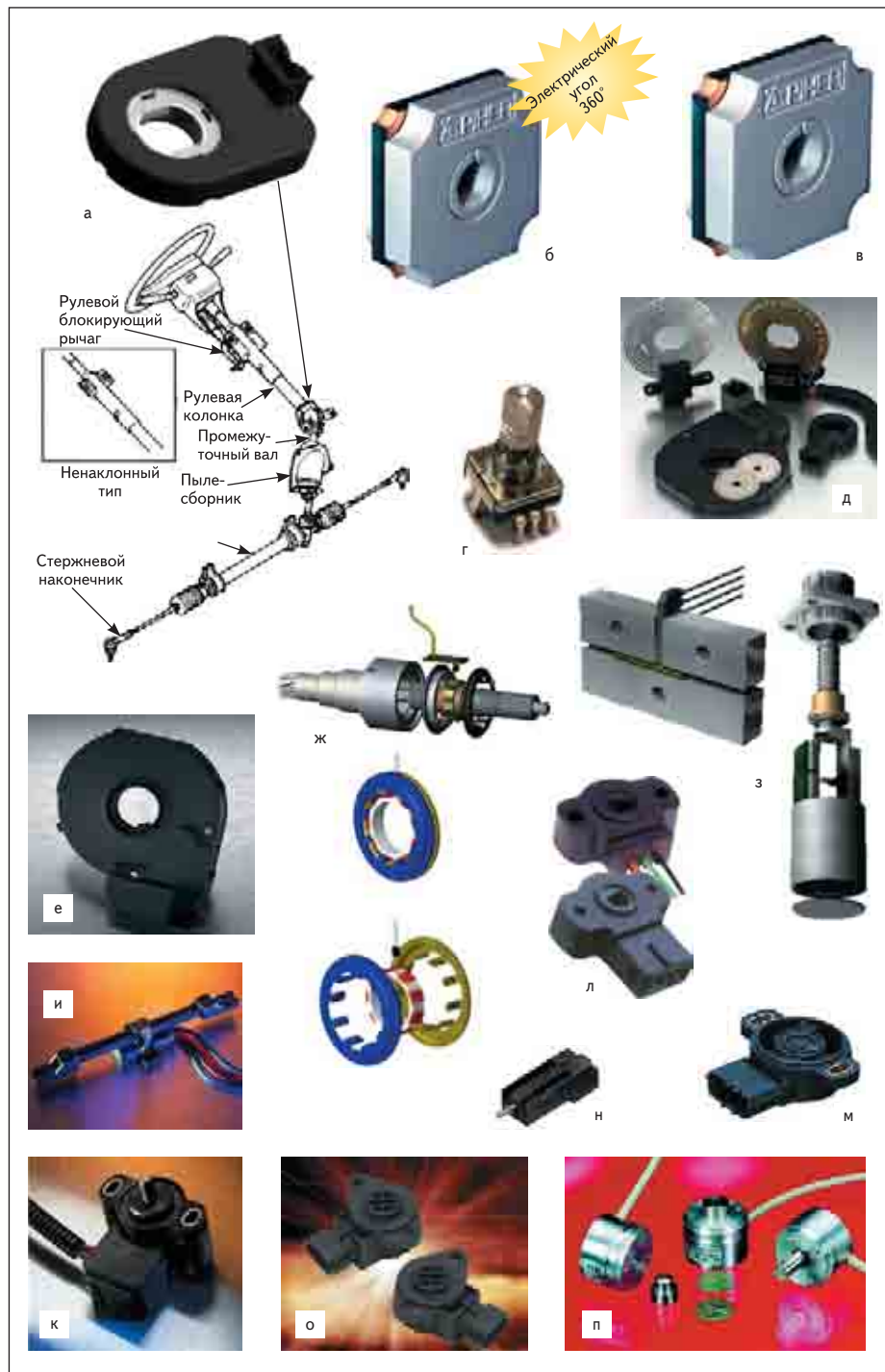


Рис. 29. Некоторые примеры автомобильных угловых датчиков и энкодеров:
 а — многооборотный угловой датчик рулевой колонки Delphi;
 б, в, г — датчики Piher-Nacesa:
 б — автомобильный потенциометрический датчик положения A15;
 в — инкрементальный энкодер E15 систем климат-контроля;
 г — инкрементальный энкодер CA-11 — переключатель климат-контроля;
 д, е — датчики First Technology:
 д — оптический датчик абсолютного положения руля;
 е — оптический дифференциальный датчик угла и абсолютного положения;
 ж — принцип измерения крутящего момента рулевой колонки с помощью эффекта Холла MMT;
 з — базовая структура и линейный датчик Холла MMT;
 и — программируемый линейный датчик Холла LD50 Power Components;
 к — дуальный датчик Холла с ШИМ-выходом RS50 Power Components;
 л — потенциометрический датчик углового положения Wabash RPS 971;
 м — датчик положения педали ALPS;
 н — многооборотный датчик углового положения ALPS;
 о — программируемый датчик углового положения AN1011 Cherry;
 п — угловой магнитный энкодер Холла с внешним магнитом RXM36 TWK.

Датчики Холла параллельных полей

Значительные перспективы в автоэлектронике наблюдаются в разработке автомобильных датчиков на основе альтернативного измерительного принципа эффекта Холла (рис. 30–32). Данный принцип состоит в измерении магнитного поля постоянного магнита, помещенного во фронте датчика на вращающемся валу. Магнит генерирует вращающееся магнитное поле, параллельное поверхности чувствительного элемента. (Обычные аналоговые датчики Холла, называемые планарными или платами, измеряют магнитное поле, перпендикулярное поверхности ИС.) Измерение вдоль двух ортогональных осей позволяет вычислять угловой диапазон в 360° с использованием функции арктангенса — как с применением калибровки, так и без нее. Следовательно, этот принцип устойчив к механическим допускам, вариациям чувствительности датчика и напряженности поля постоянного магнита.

Чтобы измерять магнитное поле в двух ортогональных направлениях, необходимо, по крайней мере, два датчика, помещенных ортогонально и в совокупности образующих двумерный (двухосевой) датчик.

В настоящее время разработано три технологических варианта двухосевых измерений на базе эффекта Холла:

- технология вертикальных элементов Холла (рис. 30);
- технология интегрированных магнитоконцентрирующих (ферромагнитных) концентраторов (ИМК) (рис. 31);
- технология планарных элементов Холла, объединенных в массив (рис. 32).

Все названные технологии, по существу, измеряют перпендикулярное поле, что является необходимым условием достижения эффекта Холла, но в первых двух случаях для этого использованы специальные приемы: активное преобразование ИМК параллельного поля в ортогональное плану ИС или адаптивное считывание (за счет вращения тока достигается формирование вертикальных плоскостей Холла перпендикулярно поверхности ИС, но на самом деле они также измеряют не параллельное поле, а перпендикулярное).

Все технологии подходят для двухосевых аналоговых измерений (с образованием синусных и косинусных сигналов) и дополнительно обеспечивают получение информации о направлении поля. Применение массива с четырьмя попарно ортогональными элементами Холла, объединенными в крестообразный массив, ассоциируется с чисто угловыми измерениями, при этом погрешность смещения магнита минимальна.

Технология вертикальных элементов Холла

В вертикальном датчике Холла один из питающих токоподводов разделяется, и крем-

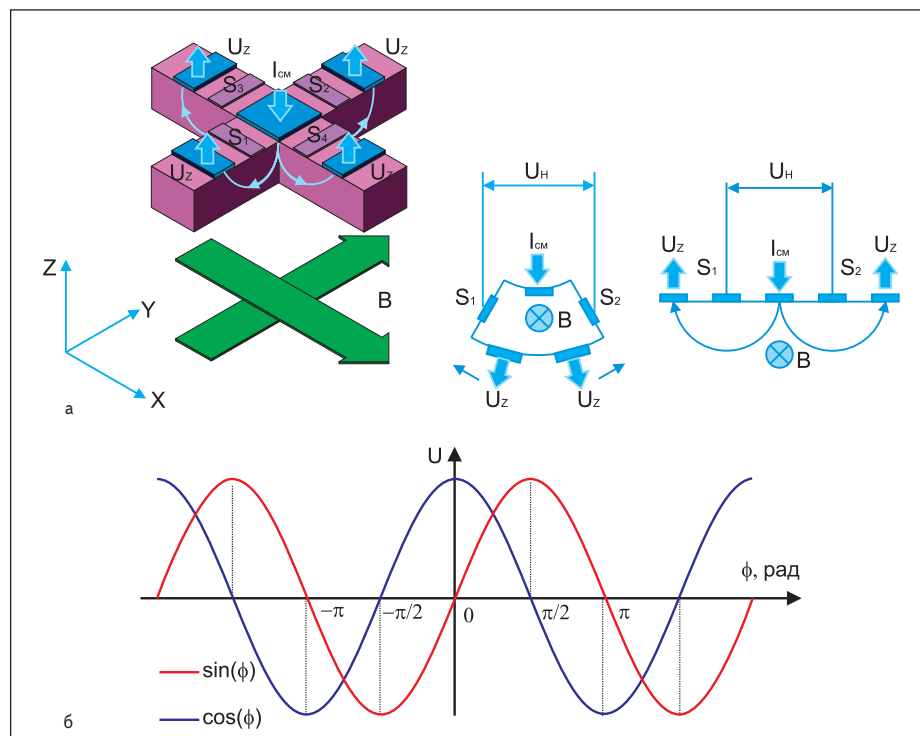


Рис. 30. Технология вертикального датчика Холла:
а — конструкция элемента и рабочий принцип;
В — магнитная индукция;
 I_{cm} — смещающий ток;
 U_z — вертикальное напряжение;
 U_H — напряжение Холла между контактами S_1 и S_2, S_3 и S_4 ;
б — выходные сигналы.

ниевая микросхема датчика «развертывается» так, чтобы токоподводы оказались в одной плоскости (рис. 30) [94–97]. Направление магнитного потока для носителей при этом не меняется. В результате магнитное поле измеряется параллельно плоскости токоподводов. Напряжение Холла между контактами S_1 и S_2, S_3 и S_4 зависит от направления поля.

Вертикальный датчик Холла характеризуется применением крестообразной структуры, закрепленной непосредственно на кремниевой подложке. Такая структура позволяет измерять X - и Y -составляющие магнитного поля с образованием синусо-косинусных сигналов для формирования любого энкодерного интерфейса.

Технология вертикальных элементов описана в нескольких работах [94–97] и реализована в датчиках VX22 и RSC2200 Novotechnik (рис. 4в) [94]. Достигается точность $\pm 0,35^\circ$ с температурным коэффициентом менее чем $50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (с применением калибровки).

Высокая точность, малый размер сенсорного элемента, бесконтактный принцип и возможность абсолютных угловых измерений в диапазоне 360° открывает новые перспективы для ее будущего использования [95–97].

Недостатками сенсорного элемента является его изначальная несовместимость с технологией КМОП и методом «spinning current» (см. далее), что не позволяет автоматически

компенсировать смещение и обязывает использовать только специфические технологии. (Например, в вертикальном элементе 2D-VH-11¹ Sentron реализована специфическая топология.)

В то же время и объединение вертикальных элементов с КМОП-обрабатывающей электроникой, и комбинирование с планарными элементами Холла при создании трехмерных ИС, сканирующих пространственное распределение магнитного поля, становится успешным [97].

Датчики Холла с ИМК

Интегрированные магнитоконцентрирующие диски (ИМК) из магнитомягких ферромагнитных металлов с высокой магнитной проницаемостью (>100) и полем насыщения более $0,5 \text{ Тл}$ преобразовывают внешнее магнитное поле, параллельное поверхности чипа, в перпендикулярное, для его измерения стандартной платой Холла, а также выполняют функцию пассивного магнитного усилителя (рис. 31) [96, 98–101].

Эффект концентрации зависит от диаметра ИМК (порядка $0,2\text{--}0,4 \text{ мм}$). Диапазон магнитного поля ограничен насыщением ИМК, которое вводит нелинейность. Следователь-

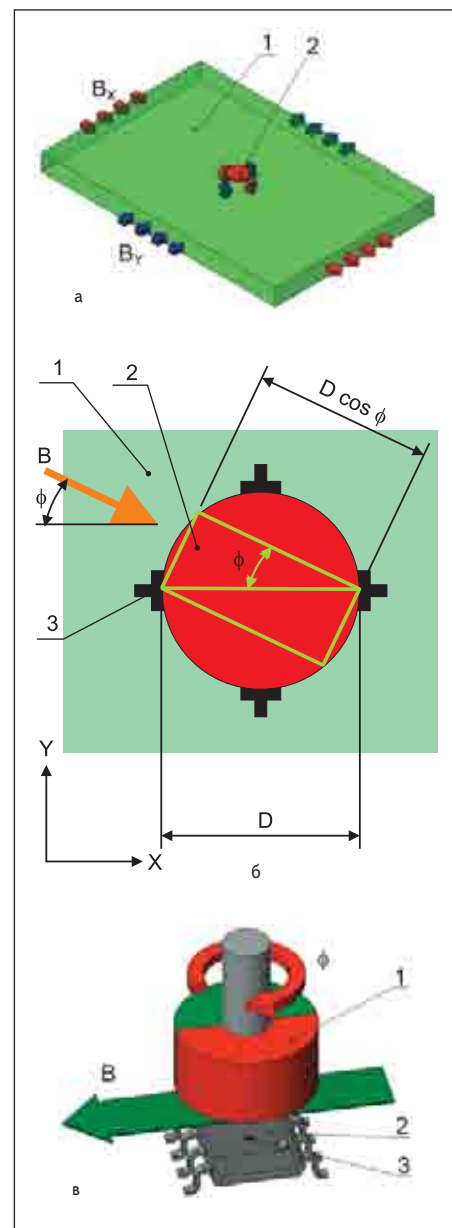


Рис. 31. Технология двухосевых измерений датчиков с ИМК:
а — принцип действия ИМК;
1 — КМОП ИС; 2 — ИМК;
б — измерительный принцип:
1 — КМОП ИС; 2 — ИМК; 3 — элементы Холла;

но, датчики с ИМК более адаптированы для измерений малых магнитных полей ($<1 \text{ Тл}$).

Чтобы получать синусный и косинусный выход, четыре платы Холла размещены крестообразно по периферии ИМК (рис. 31). Данный принцип совместим с КМОП, что реализовано в элементной базе гибридных ИС Sentron (табл. 10) [14, 99–101]. Новые функциональные возможности датчиков добавляются с учетом специфики и по мере расширения класса задач, которые они призваны решать.

¹ Элементы Холла серий Planar Hall, Vertical Hall, Cylindrical Hall (2D-VH-11, CYH22, 2D-HMC-10) более не выпускаются. Компания Sentron как часть Melexis активно ведет научно-исследовательскую работу по созданию новых трехмерных датчиков Холла.

Таблица 10. Текущее состояние элементной базы аналоговых датчиков Холла параллельных полей

HQ-4220	2D-NMC-10**	2D-VH-11**	2SA-10	1SA-1V	Датчик Холла
Многоэлементный датчик Холла	Двухосевой датчик Холла	Интегрированный двухосевой элемент Холла	Двухосевой магнитный датчик	Одноосевой магнитный датчик	Функциональное описание
3; 7 В max	5 (1–6)	15 В max	5 (4,5–5,5); 0–6 В	— рабочие пределы	Напряжение питания, В
—*	1–1,4	входной ток 2–4	16–18	11–16	Ток потребления, мА
0,05–1,15	4,5 (4–5)	2,2	—	—	Входное сопротивление в отсутствие поля, кОм
0,05–1,15	2,5 (2–3)	8,5	—	—	Выходное сопротивление в отсутствие поля, кОм
Выходы напряжения от каждого из четырех элементов Холла	Два ратометрических аналоговых выхода напряжения 400 мВ	Два аналоговых выхода напряжения 400 мВ; 4 вывода от элементов	Два ратометрических аналоговых сигнала: синусоидальный и косинусоидальный	Два выходных сигнала: аналоговый и цифровой (цифровой гистерезис — 0,4–0,6 мТл)	Выходной интерфейс
			Программирование в заводских условиях		Программируемые параметры и дополнительные режимы
—	—	—	10–18; частота вращения — 10000 об/мин	10	Верхняя рабочая частота, кГц
—*	10; частота вращения — 10000 об/мин	30	Линейный диапазон — 80 мТл (±40); полный диапазон ±45 мТл; (Вmax < 1000 мТл)	Линейный диапазон — 10 мТл (±5); полный диапазон ±7,5 мТл	Рабочее магнитное поле, мТл
±50 мТл	Линейный диапазон — ±50 мТл; ±40 мТл; (Вmax < 1000 мТл)	—*	350–450 мВ/Тл	290–310	Магнитная чувствительность мВ/мТл
—*, данные для справки 90–130 мВ при В=50 мТл и 3 В	200–300 мВ/Тл	0,1	±0,05	±0,03	Температурный дрейф чувствительности, %/°С
—*, дрейф напряжения Холла ±0,2	±0,1	—*	0–2	—	Несоответствие чувствительностей, %
—*	0–3	—*	±10	±15 (±50 мкТл)	Напряжение смещения, мВ
6%	±5	±3	±0,05	±0,2	Температурный дрейф смещения, мВ/°С
—*, дрейф напряжения Холла ±0,2	±0,05	1%/°С	0,5–1 в полном диапазоне	0,5–1 (в полном диапазоне)	Магнитная нелинейность, %
—*	0,5–1 в полном диапазоне	—*	1° max	—	Угловая ошибка, °
—*	<1°	1° max	0,03% от полного магнитного диапазона	0,4–0,6 мТл (цифровой)	Гистерезис, °
—*	—*	—*	—40–150	—40–150	Рабочий температурный диапазон, °С
–40–125	–40–125	–40–110	SOIC-8		Типы корпусов
16-пиновый SMD	SOIC-8	SOIC-8		Производитель	
Asahi	Sentron				

—* Не специфицируется

** Элементы Холла, коммерчески недоступные в данный момент; их технические характеристики приводятся с целью сравнения

Датчики Холла с массивом планарных элементов

Ось вращения цилиндрического дипольного магнита центрирована с массивом измерительных элементов и является точкой отсчета полярной системы координат для определения угла φ поворота легкой оси, что ассоциируется с конфигурацией внешнего датчика, специально предназначенного для монтажа на торце вала. Четыре платы Холла установлены на периферии постоянного магнита, два — для каждого ортогонального направления (рис. 32) [96, 102]. Они измеряют вертикальный компонент поля (HQ8220 Asahi; энкодеры Austriamicrosystems, RLS, iC-Haus).

Стандартные платы Холла имеют преимущество совместимости со стандартными технологиями КМОП. Именно данный принцип реализован во всех ИС магнитных угловых энкодеров².

Применение квадратичного массива соответствует получению двух синусных и двух косинусных сигналов, что увеличивает функциональные возможности датчика, но и требует увеличения вычислительной мощности. Выходы массива датчиков подсоединяются, например, к двум сумматорам, чтобы получить синус и косинус угла вращения φ . Угол вычисляется с применением функции арктангенса и CORDIC-алгоритма (Coordinate Rotation Digital Computer).

На практике эффективная комбинация методов устранения смещения в сенсорной и усилительной части, а также возможности высокоразрешающего кодирования позволяют получать типичную угловую точность $\pm 0,3...0,7^\circ$, уже не менее $\pm 0,5^\circ$ (Austriamicrosystems).

Новые ИС Холла обеспечивают самое компактное решение для сканирования углового положения постоянного магнита, разме-

щенного выше или ниже чувствительной поверхности ИС: используемый при этом магнит, диаметрально намагниченный и цилиндрической формы, может быть значительно меньших размеров по сравнению с магнитами для традиционных АМР-датчиков. (Необходимо отметить, что в двухосевых измерениях все же обязательным условием является абсолютная гомогенность силовых линий поля для ортогональных элементов.)

Высокая чувствительность датчиков позволяет использовать рабочий воздушный зазор, достаточный для изоляции механической и электрической частей друг от друга, во всех конфигурациях.

Подробнее о схмотехнических методах компенсации датчиков Холла

Устройства Холла функционируют с высокой линейностью (как минимум, до 1 Тл). Их срабатывание характеризуется наклоном (чувствительностью), смещением и их соответствующими дрейфами.

Как упоминалось выше, недостатками КМОП-датчиков Холла являются низкая чувствительность, дрейфы чувствительности, смещения и нелинейность. Смещение датчика Холла может составлять до десяти процентов от внешнего поля (10–40 мВ). Двумерный датчик дополнительно предполагает наличие таких недостатков, как неортогональность измерительных осей, несовпадение чувствительностей X- и Y-элементов.

Дрейфы чувствительности и смещения являются развивающейся проблемой, для решения которой разрабатываются новые инструментальные средства [96]:

- калибровочные катушки на основе слоев металлизации для самокалибровки ИМС;
- эффективное снижение смещения датчика Холла, достижение высокой точности и малого температурного дрейфа с использованием техники быстровращающегося тока «spinning current».

Усилители КМОП также наводят смещение в ИС (порядка 2 мВ; эквивалентный магнитный сдвиг составит 25 мТл со смещающим током 1 мА) и страдают от 1/f шума. Методы, используемые для уменьшения смещения и 1/f шума от электроники, могут быть разделены на три группы:

- прерыватель (chopper);
- методы автообнуления (auto-zero techniques);
- согласованная двойная дискретизация.

Метод прерывателя основывается на модуляции сигнала перед источником смещения и $1/f$ шума и демодуляции сигнала после усиления.

Автообнуление — метод уменьшения смещения, формируемый фазами калибровки и оценки.

² Тот же самый принцип может быть расширен для массива плат Холла, помещенных вдоль окружности. (Принципы построения абсолютных и инкрементальных угловых энкодеров будут рассматриваться подробнее в продолжении данной части настоящей публикации.)

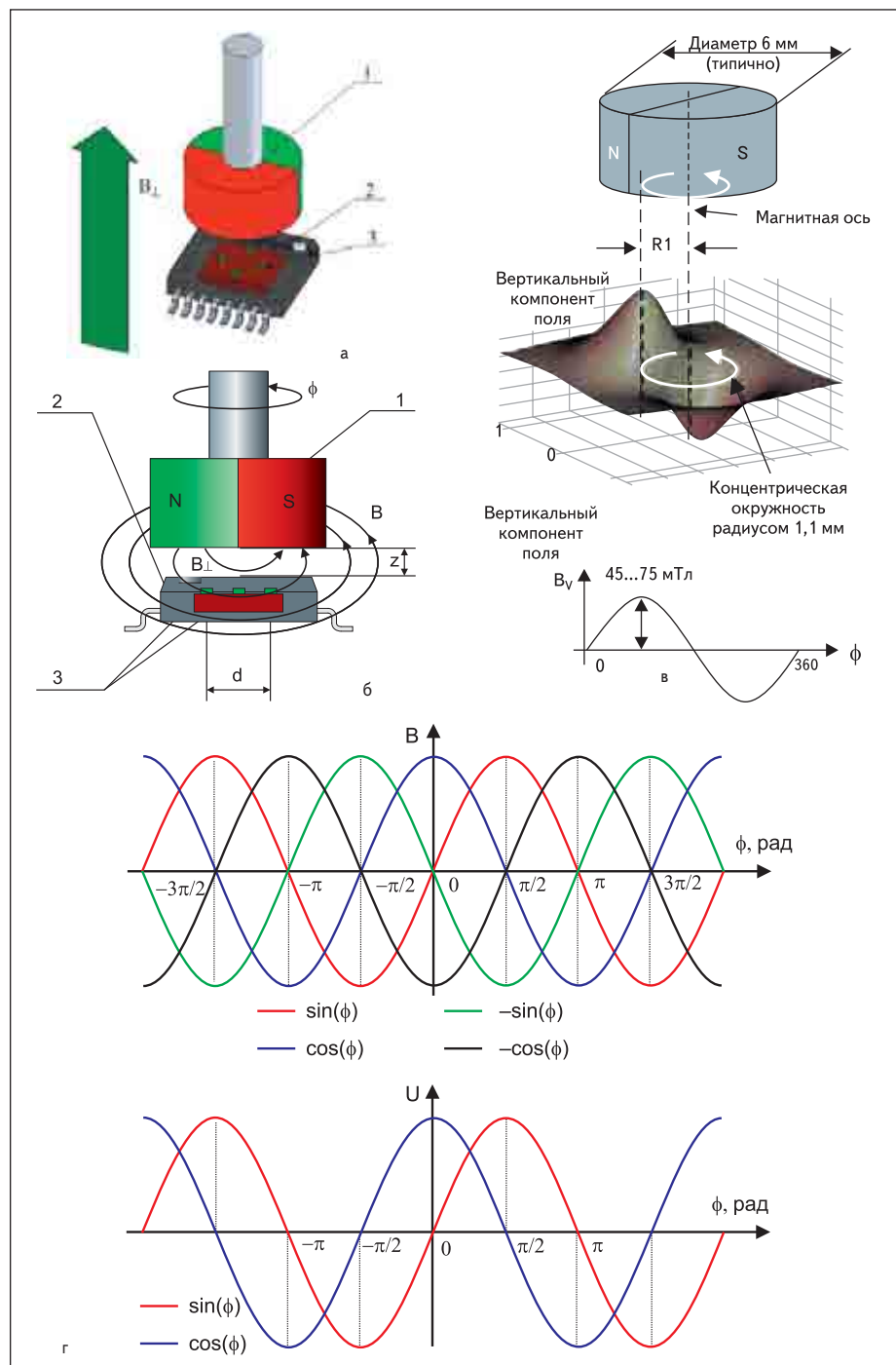


Рис. 32. Датчики Холла с массивом планарных элементов: 1 — магнит; 2 — ИС; 3 — массив планарных элементов Холла; а — рабочий принцип ИС с планарными элементами Холла; В — магнитная индукция; z — расстояние между магнитом и ИС; б — расположение планарных элементов в ИС; в — синусоидальное пространственное распределение при вращении магнитного поля относительно чувствительного массива. г — выходные сигналы элементов Холла и синусно-косинусные входы АЦП.

Для измерения смещения в течение калибровки входы электроники являются короткозамкнутыми (фаза автообнуления). Смещение сохраняется в конденсаторе с выборкой и хранением, либо в цифровом регистре. В течение периода оценки смещение вычитается из сигнала. (Для работы в непрерывном времени используется техника разделения: вход электро-

ники продублирован.) Автообнуление реализовано, например, в новой ИС iC-MA iC-Haus. Коррелированная двойная дискретизация (CDS) — автообнуление, сопровождаемое выборкой и хранением (широко используется в системах сбора данных).

Все эти методы подавляют смещение от электроники, но они не в состоянии уст-

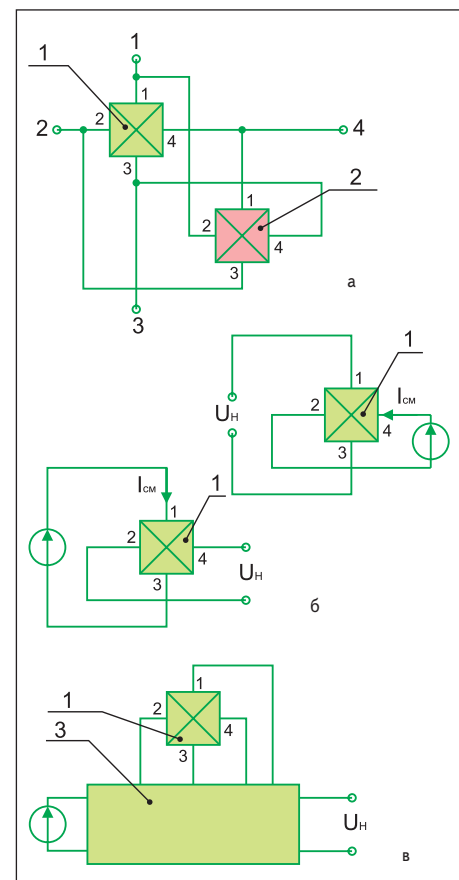


Рис. 33. Схематические приемы компенсации смещения датчиков Холла: а — ортогональное объединение двух ячеек Холла; б — «обмен» терминалов смещения и сенсорного выхода симметричного датчика Холла; в — метод «spinning current» — периодический «обмен» терминалов смещения и выхода: 1, 2 — ячейки Холла; 3 — переключающий блок; $I_{см}$ — смещающий ток; U_H — напряжение Холла между контактами; 1, 2, 3, 4 — контакты (терминалы).

ранить смещение сенсорной области датчика. Для этого существует специальный chopping-метод, названный «spinning current».

Метод «spinning current»

Основной недостаток датчиков Холла — высокое напряжение смещения в несколько десятков мТл.

Чтобы подавлять это смещение, разработаны специальные техники (рис. 33) [96]:

- ортогональное объединение двух ячеек;
- обмен терминалов смещения и выхода;
- техника «spinning current».

По сравнению с ортогональным объединением, метод «spinning current» имеет преимущество гарантированного согласования параметров, вследствие, например, механического напряжения, поскольку один сенсор использован для всех фаз. (Сенсоры в ортогональном объединении не полностью идентичны, отчего имеют смещение из-за несоответствия их параметров).

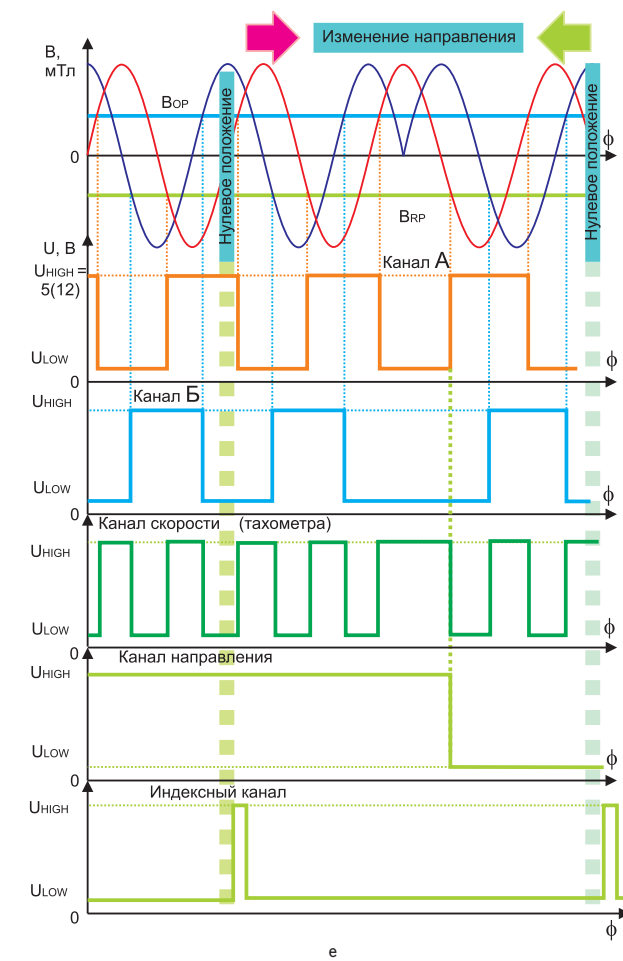
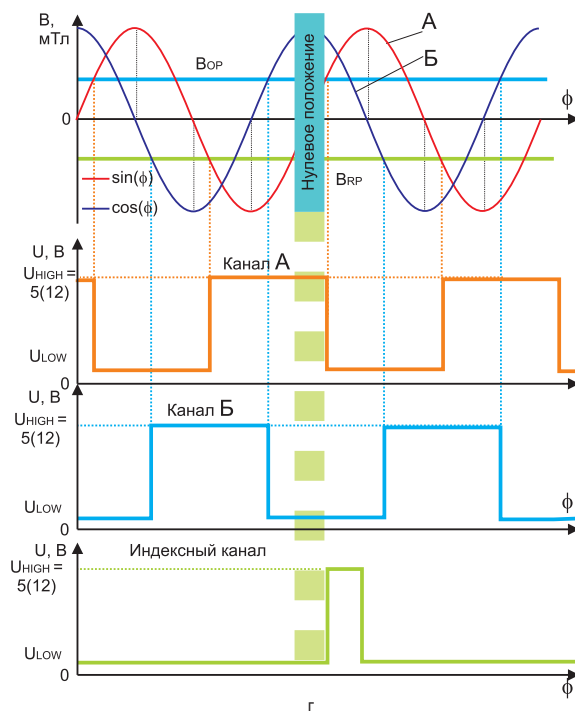
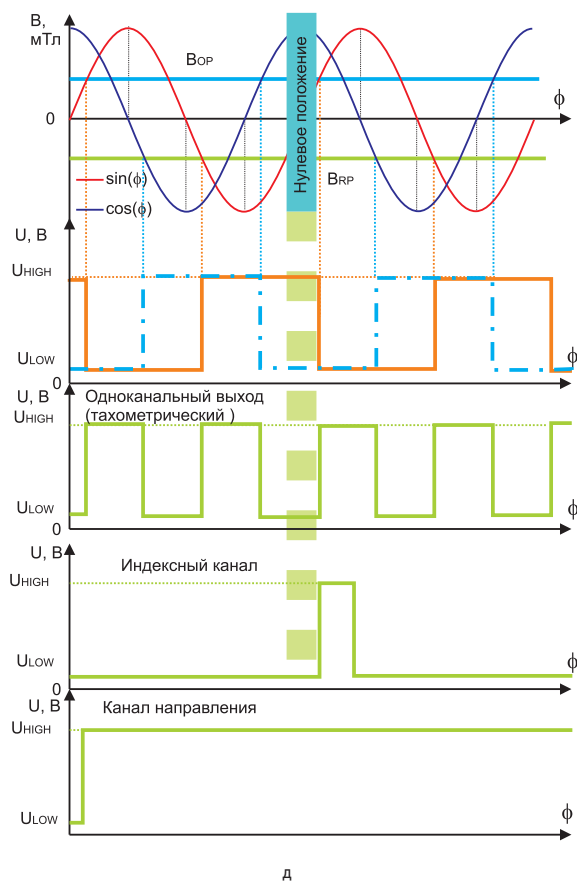
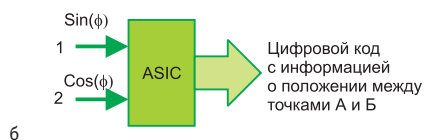
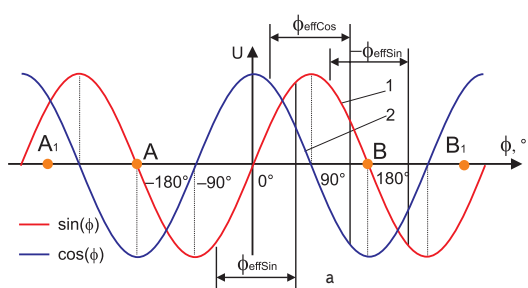


Рис. 34. Иллюстрация теоретических рабочих принципов абсолютного и инкрементального угловых энкодеров:

а-в — абсолютный энкодер;

а — синусно-косинусный входной интерфейс;

б — однооборотный энкодер;

в — многооборотный энкодер;

г-е — инкрементальный энкодер;

г — стандартный квадратурный выход с дополнительным индексным каналом;

д — одноканальный выход с двумя дополнительными каналами — индексным и направления;

е — формирование канала направления на инкрементальном интерфейсе.

Таблица 11. Энкодеры		
Тип энкодерного устройства	Абсолютный энкодер	Инкрементальный энкодер (угловой формирователь импульсов)
Функциональное описание	Формирует уникальный цифровой сигнал о положении в пределах полной шкалы; информация об абсолютном положении прочитывается при циклической инициализации питания, доступна при включении и не теряется после выключения	Формирует последовательность периодических сигналов при угловых приращениях механического вращения энкодерного диска. Инкрементальный энкодер обнуляется после выключения питания и использует информацию, предоставляемую другим переключателем или энкодером, о начальной (индексной) точке, для регистрации относительных перемещений или детектирования направления
Важнейшие параметры	<ul style="list-style-type: none">• Измерительный диапазон (линейный диапазон)• Разрешение — число битов, используемых для кодировки положения• Точность позиционирования — максимальная угловая ошибка в угловых градусах или секундах• Максимальная скорость обновления — скорость, на которой формируется считывание и обновляется информация о новом положении	<ul style="list-style-type: none">• Измерительный диапазон (линейный диапазон)• Разрешение в счетах за оборот — число линий или меток на энкодерном диске; минимальное различимое увеличение в линейном положении; число импульсов за оборот• Разрешение в линиях за оборот — количество кодированных физических отметок элемента• Точность позиционирования (определяется аналогично абсолютному энкодеру)• Максимальная скорость обновления (определяется аналогично абсолютному энкодеру)
Типы сигналов	Синусно-косинусные или оцифрованные импульсные выходы сигнала об абсолютном положении (рис. 34а–в)	<ul style="list-style-type: none">• Квадратурные (рис. 34г)• Одноканальные (рис. 34д)• Импульсные и направления (рис. 34е)
Поддерживаемые интерфейсы	последовательный, параллельный, SSI, шины (CAN и др.), аналоговое напряжение, аналоговый ток и т. д.	цифровая импульсная последовательность, последовательный, параллельный, SSI, шины типа CANbus, аналоговое напряжение, аналоговый ток и т. д.
Используемые коды	Двоичный, двоично-десятичный, Грэй	Зависит от типа сигнала
Обычные характеристики	Многооборотный энкодер, энкодер с отверстием под вал, программируемость	

¹ Могут быть специфицированы либо счеты, либо линии. Они не являются одним и тем же — к примеру, в квадратурных системах одна линия эквивалентна четырем счетам или импульсам.

Эффективно устраняются пьезорезистивный сдвиг, термоэлектрическое смещение, соединительный полевой эффект. Остаточное смещение может быть снижено дальнейшим увеличением числа смещающих направлений и может достигать всего нескольких мкТл.

Метод «spinning current» реализован, например, во всем семействе новых угловых энкодеров Austriamicrosystems.

Энкодеры

Теория абсолютных, инкрементальных, цифровых, угловых и линейных энкодеров будет обобщаться в последующих публикациях настоящего цикла; обзору рынка энкодеров, применяемых в автоэлектронике, и оценке неинтегральных технологий, используемых для разработки данного типа устройств, в дальнейшем будет уделено специальное внимание.

Краткое введение в теорию энкодеров, необходимое для понимания их функционального назначения и сопутствующей терминологии, отражено в таблице 11 и проиллюстрировано рис. 34.

Различают угловые и линейные энкодеры. Ключевой проблемой, ограничивающей использование линейных энкодеров, является их значительная длина.

Наиболее известны следующие технологии:

- оптическая;
- магнитная;
- индуктивная (электромагнитная);
- механическая;
- резистивная (потенциометры).

Оптическая технология энкодеров является классической (один из примеров — рулевой энкодер BEI Duncan — показан на рис. 2м (см. част 1 статьи в «КиТ» № 2’2005), другие — на рис. 29), в то время как магнитная технология только развивается в настоящее время. Надежность и точность работы оптических энкодеров снижается от пыли и загрязнений или при высоких температурах (не более 80 °С). Поскольку новые магнитные энкодеры даже

не требуют физических отметок, таких как непрозрачные метки и даже полюса, они обеспечивают высокое разрешение; высокая степень интегрирования датчика выгодно отличает их, например, от индуктивных, исторически возникших первыми, или широко распространенных потенциометрических датчиков (рис. 29).

Но самое важное — функциональные возможности новых ИС и гибкость, которую они проявляют при интегрировании с любой системой.

Литература

92. Madni Asad M., Wells Roger F. An Advanced Steering Wheel Sensor. www.sensorsmag.com.

93. Fakhry L. Control Potentiometer/Position Sensor Supplies Full Endless Rotation. www.elecdisain.com. July 8, 2002.

94. The Vert-X Technology. www.novotechnik.de/index.asp?lang=2. pdf

95. Demierre M., Schurig E., Schott C., Besse P.-A., Popovic R. S. Contactless 360° absolute angular CMOS microsystem based on vertical Hall sensors. Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Microelectronics and Microsystems, CH-1015 Lausanne, Switzerland. March 2004. [ht tp:/ /lmis3.epfl.ch](http://lmis3.epfl.ch).

96. Demierre M. Thesis. Improvements of CMOS Hall Microsystems and Application for Absolute Angular Position Measurements. LMIS — Microsystems Laboratory. September 2003. [htt p:/ /w ww.t echt.ch/michel/pro/these_2844.pdf](http://www.t-echt.ch/michel/pro/these_2844.pdf).

97. Burger F. New Fully Integrated 3-D Silicon Hall Sensor for Precise Angular Position Measurements. Institute of Microsystems, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland. [ht tp:/ /lmis3.epfl.ch](http://lmis3.epfl.ch).

98. Law L. Angular Position Sensing with 2-Axis Hall ICs. www.sensorsmag.com.

99. 1SA-1V Single-Axis Magnetic Sensor. Data Sheet Sentron. August 2004. [ht tp:/ /w w .sentron.ch/ sup-port/downloads/1SA-1V.pdf](http://www.sentron.ch/support/downloads/1SA-1V.pdf).

100. 2SA-10. Integrated 2-Axis Hall Sensor. Data Sheet Sentron, November 2004. [ht tp:/ /w w .s -entron.ch/ support/downloads/ 2SA-10.pdf](http://www.w.s-entron.ch/support/downloads/2SA-10.pdf).

101. Hall Sensors (IMC-Hall®). [ht tp:/ /w ww .sentron.ch/ products/sensors/default.htm](http://www.sentron.ch/products/sensors/default.htm).

102. Steele C., Rossmann S. An ultra-miniature rotary encoder, based on magnetic microsystems technology. Published at Sensors Expo, US. 2002. [www.w w .sensorsmag.com](http://www.sensorsmag.com). March, 2003.