

Автомобильные датчики положения.

Современные технологии и новые перспективы

Часть 6. Концепции создания магнитных угловых энкодеров на основе эффекта Холла

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

В данной публикации освещены принципы функционирования абсолютных и инкрементальных магнитных угловых энкодеров Холла в диапазоне угла 360° , с фокусом, в свете новейших тенденций рынка датчиков для автомобильных систем, на аспекты разработки новых цифровых, аналоговых или ШИМ — устройств, с применением новейшей элементной базы интегральных датчиков.

Абсолютный угловой энкодер

Угловой энкодер состоит из ИС энкодера (см. табл. 12), измеряющей изменение магнитного поля, распределенного на торцевой поверхности стандартного диаметрально намагниченного цилиндрического магнита (рис. 32, 35) [102].

В интегральных датчиках технология эффекта Холла реализована в виде кругового сенсорного массива чувствительных элементов, центрированных вокруг кремниевой подложки в центре ИС [102–114]. Крестообразный сенсорный массив, состоящий из попарно ортогонально ориентированных элементов Холла (рис. 32а–б), формирует двумерное распределение электрического напряжения, соответствующего синусоидальному пространственному распределению рабочего магнитного поля B (рис. 32в), которое математически моделируется выражением [102]:

$$B = B_{\max} \times \sin(\varphi + x) + B_{\text{off}} \quad (20)$$

где B_{\max} — амплитудное значение магнитного поля, B_{off} — ненулевое смещение поля, φ — фазовый сдвиг магнитного поля от нулевой оси при вращении магнита относительно неподвижного энкодера (измеряемый угол), $x = \omega t + \varphi_0$ — приведенная независимая переменная, ω — угловая скорость, t — собственно независимая переменная (время), φ_0 — угловая координата нулевой плоскости в полярной системе отсчета.

При интегрировании магнитного поля по x в четырех элементах ортогонально ориентированных пар и суммировании получен-

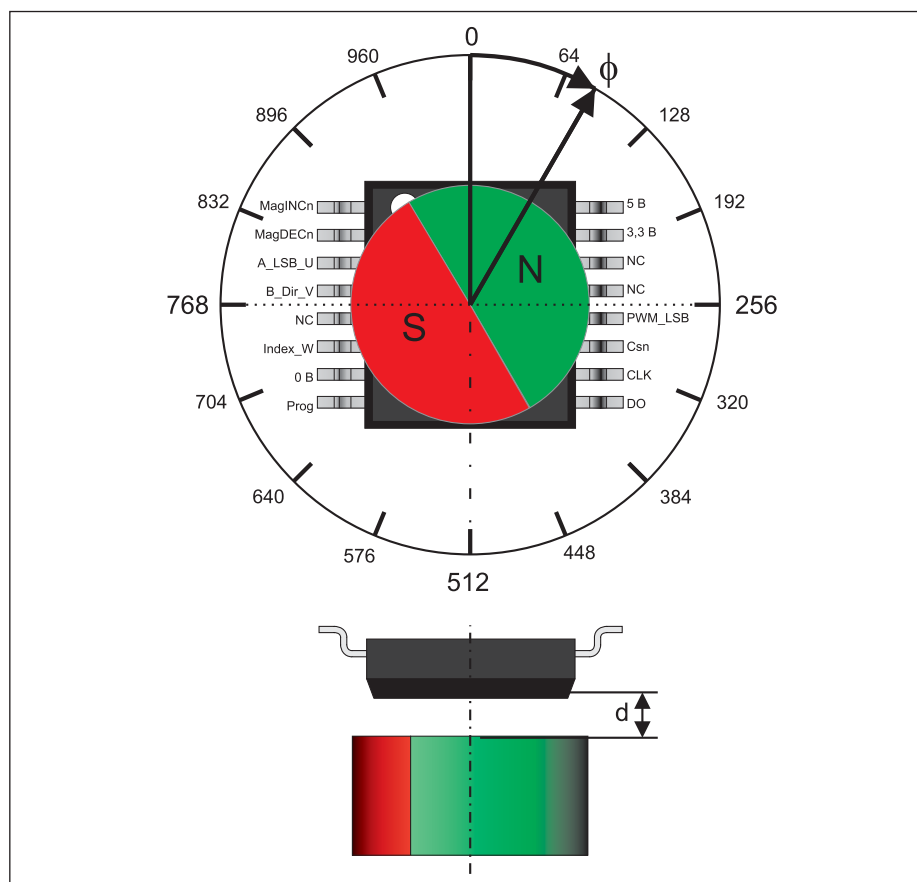


Рис. 35. Рабочий принцип двухосевого абсолютного углового энкодера на примере AS5040 (SSOP16)

ных интегралов будут получены синусная и косинусная информация (выходы напряжения) об угловом положении магнита

(рис. 32г, 35). Абсолютное угловое положение рассчитывается с использованием функции арктангенса:

Таблица 12. Интегральные датчики Холла — двухосевые угловые энкодеры

ИС Холла	Функциональное описание	Напряжение питания, В	Ток потребления, мА	Выходной интерфейс	Программируемые параметры и дополнительные режимы	Частота вращения, об./мин	Рабочее магнитное поле, мТл	«Рабочий зазор между ИС и магнитом, мм»	Скорость обновления информации (частота дискретизации) кГц / Время обновления, мкс	Время «Power-on», мс	Максимальная угловая ошибка, °	Магнитная нелинейность, %	Гистерезис, /LSB**	Интегральная нелинейность при оптимальном выравнивании магнита, °	Интегральная нелинейность, °	Дифференциальная нелинейность, °	Переходные шум, °	Рабочий температурный диапазон, °С	Типы корпусов	Производитель
AS5040	10-битный программируемый магнитный угловой энкодер	5 (4,5–5,5); 3,3 (3–3,6); (–0,3–7)	16–25	Инкрементальный интерфейс с 10-, 9-, 8- или 7-битовым пользовательски программируемым разрешением. Двухканальный квадратурный А/В сигнал с дополнительным индексным каналом. Одноканальный выход с функцией направления, U-V-W коммутационные сигналы двигателей постоянного тока. Абсолютный интерфейс с 10-битовым разрешением, последовательный SSI — интерфейс, ШИМ — интерфейс	Нулевое и индексное положение, программируемый выходной формат, детектирование горизонтальных смещений магнита и его перемещений в вертикальной оси	10000	45–75	0,5–1,5	10 мГц/100	50	0,5	±5%	0,704	±0,5 (±0,9 в рабочем температурном диапазоне)	±1,4	±0,176	0,12	–40–125	SSOP16 (5,3×6,2 мм)	Austriamicrosystems
AM256B, AM256L	ИС 8-битного углового магнитного энкодера в диапазоне 360°	4,75–5,25; (–0,3–7); 3,3 (3,13–3,47); (AM256L)	13 (10–20); 7(5–8) (AM256L)	Инкрементальный, параллельный, последовательный SSI, аналоговые синусоидальный и косинусоидальный, и сигнал ошибки	Программируемый в заводских условиях	60000	±50	1,8 (1,6–2 до чувствительного массива)	0,36–3,6*	10	0,2	±0,3...0,6°	0,3...0,6	±0,6	±0,6	±0,4	±0,2	–40–125	SMD SSOP28; QFN28 (6×6 мм)(AM2560)	RLS
AM512	ИС 9-битного углового магнитного энкодера в диапазоне 360°	4,75–5,25; (–0,3–7); 4,75–5,25; (–0,3–7);	20 (18–35)	Инкрементальный, параллельный, последовательный SSI, аналоговые синусоидальный — косинусоидальный и аналоговый линейный сигналы, и сигнал ошибки		30000	±35	2 (2,25–2,65 до чувствительного массива)		0,2; ±0,6 (±1max)LSB**	±0,4°	0,3...0,6	0,4	±0,4	±0,4	±0,2	–40–125	SMD TOFP44	RLS	
AS5035	ИС — программируемый недорогой 8-битный инкрементальный магнитный угловой энкодер (64 импульса за оборот)	5 (4,5–5,5); 3,3 (3–3,6); (–0,3–7)	16–25	Инкрементальный квадратурный А/В сигнал, индексный сигнал, два диагностических сигнала состояния магнитного поля в Z — оси, дополнительный сигнал убывания мощности при определенном состоянии выходов	Нулевое (индексное) положение	10000	±45–75	0,5–1,8 (1,576–2,376 до чувствительного массива)	10 мГц (100 мкс)	50	0,704	±1,4 (±5 max)	0,704	±0,5 (±0,9 в рабочем температурном диапазоне)	±1,4	±0,176	0,12	–40–125		
AS5043	ИС — 10-битный программируемый в диапазоне 360° магнитный угловой энкодер с абсолютными цифровым и аналоговым выходами	5 (4,5–5,5); 3,3 (3–3,6); (–0,3–7)	16–20	Два 10-битных абсолютных выхода — аналоговый и цифровой, сигнал ошибки, предупреждающий сигнал снижения питания	Регулируемый угловой диапазон и диапазон аналогового выходного напряжения, программируемое нулевое положение	600 (абсолютный режим); 10000	±45–75	0,5–1,8 (1,576–2,376 до чувствительного массива)	10,4 кГц (100 мкс) в «быстром» режиме и 2,6 кГц (380 мкс) в «медленном» режиме	50 (12,5 «быстрый» режим); 50 («медленный» режим)	0,5	±1,4 (±5 max)	–	±0,5 (±0,9 в рабочем температурном диапазоне)	±1,4	±0,176	0,06 («быстрый» режим); 0,03 («медленный» режим)	–40–125	SSOP 16 (5,3×6,2 мм)	Austriamicrosystems
AS5045	12-битный программируемый магнитный угловой энкодер	5 (4,5–5,5); 3,3 (3–3,6); (–0,3–7)		Два абсолютных 12-битных цифровых выхода — последовательный SSI — интерфейс и ШИМ — выход, сигнал ошибки, предупреждающий сигнал снижения питания	Нулевое положение, детектирование горизонтальных смещений магнита и его перемещений в вертикальной оси				На момент выхода журнала данные не специфицированы											
iC-MA	8-битный угловой датчик Холла — энкодер	5 (4,5–5,5); –0,3–7	14–20	Дифференциальный синусо — косинусный выходной сигнал и функцией направления, инкрементальный А/В — интерфейс с выбором разрешения и Z — индексным сигналом, а также счетным импульсом, абсолютный аналоговый выход — пилообразный или триангуляционный; возможность выбора режима (28 различных режимов), в том числе со сниженным энергопотреблением; выход состояния магнитного поля с регулируемой амплитудой, сигнал ошибки	Программируется конфигурация; 4 буферизованных входных-выходных ступени для выходных сигналов, три конфигурационных входа для выбора режимов	60000	±20; ±5; ±100	0,1...5	–*	80...150	±10%	–*	1,4 (1 LSB)	–*	–*	–*	–40...125	DFN10 (4×4 мм); Chip (2,74×1,94 мм)	iC-HAUS	

* — Не специфицируется
LSB** — Least significant bit; наименее значащий, младший бит

$$\varphi = \arctg \left[\frac{-4 \times B_{\max} \times \sin(\varphi)}{-4 \times B_{\max} \times \cos(\varphi)} \right] \quad (21)$$

В семействе AS50xx интегрированная обработка сигналов с функцией арктангенса, реализованной с 6-битным дифференциаль-

ным АЦП (AS5020 и AS5022³) или 10-битным АЦП (AS5040/3), образует эквивалентный по разрядности двоичный код, доступный через стандартный синхронный последовательный SSI-интерфейс, и позволяет

считывать соответственно 64 или 1024 угловых положения за период 360° (см. рис. 34–36). Цифровой код включает предупреждающие биты состояния источника магнитного поля и биты четности.

³Производство ИС семейства AS502x в настоящий момент прекращено.

Этап начального интегрирования сбрасывает компоненты ошибок смещения, наведенные магнитным источником или помехами. Специальный алгоритм с пропорциональной арктангенсной функцией позволяет минимизировать вариации магнитного поля, вызванные ошибками выравнивания магнита и влиянием рабочих условий.

Применительно к AS50xx [102] улучшенная техника компенсации элементов Холла совместно со схемой компенсации инструментального усилителя минимизирует типичные ошиб-

ки технологического процесса, корпусирования, влияния температуры и ошибок усиления и допускает образование напряжения смещения всего несколько милливольт. Индивидуальный контроль напряжения смещения элементов Холла и смещающих токов позволяет обеспечивать лучший контроль дрейфа усиления и несогласований отдельных сигналов.

Обработка сигнала в AS5040 (рис. 35–36) осуществляется через сигма-дельта аналого-цифровое преобразование и CORDIC-алгоритм ЦОС, рассчитывающий величину и сме-

щение сигналов элементов Холла, что обеспечивает получение высокоточной информации об абсолютном угловом положении.

Магнитные угловые энкодеры типа AS5040 устойчивы к смещениям магнита и внешним магнитным возмущениям согласно дифференциальной технике измерений, вариациям воздушного зазора и температурным вариациям согласно синусно — косинусной оценке сигнала.

Цифровое слово SSI-интерфейса AS5040 с 10-битным кодом данных включает биты ста-

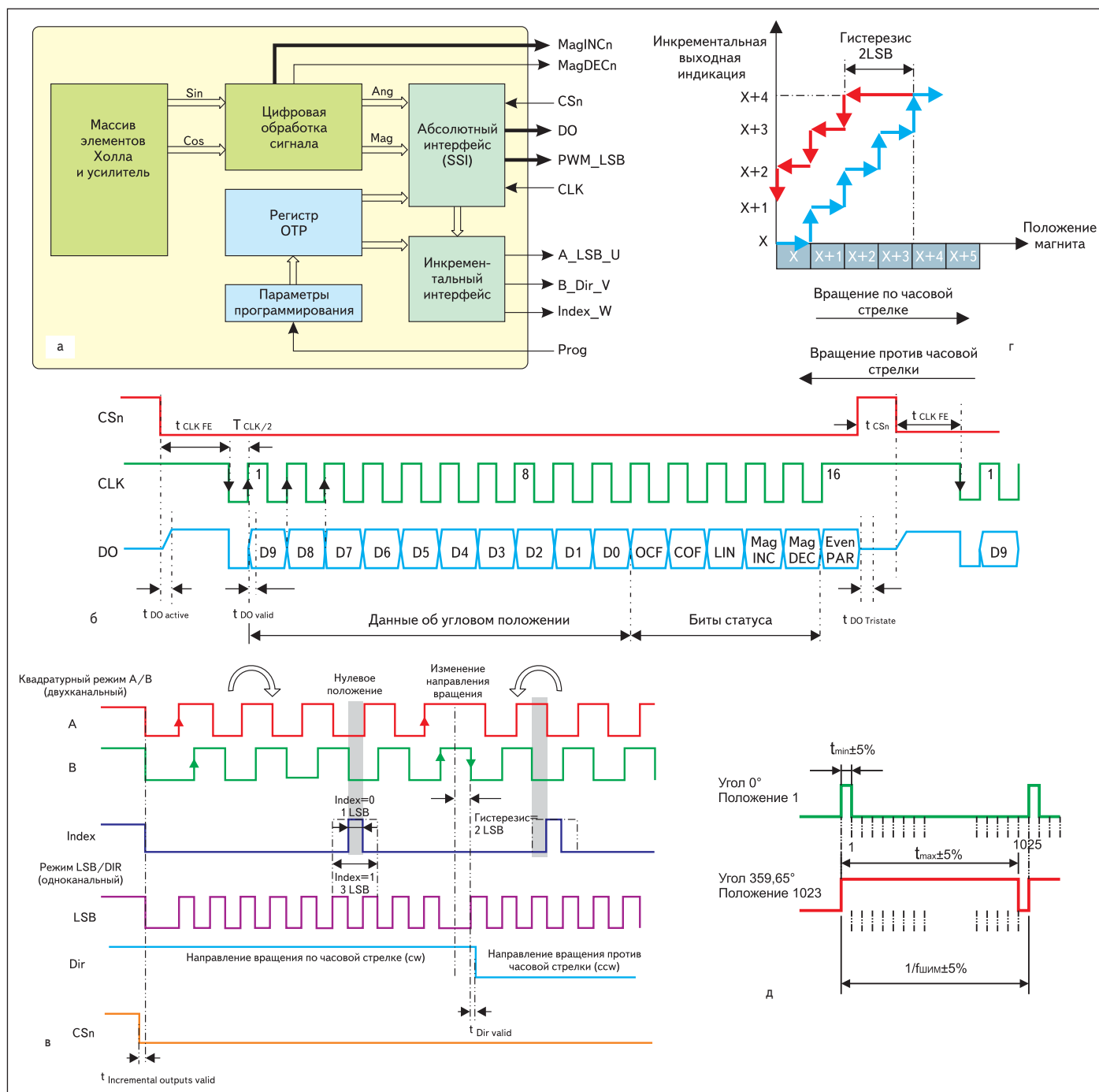


Рис. 36. 10-битный программируемый угловой энкодер AS5040:

а — функциональная схема; б — SSI — интерфейс с данными об абсолютном угловом положении; в — инкрементальные выходные режимы AS5040;

г — гистерезис инкрементальных выводов; д — ШИМ — интерфейс с данными об абсолютном положении (продолжение на следующей странице)

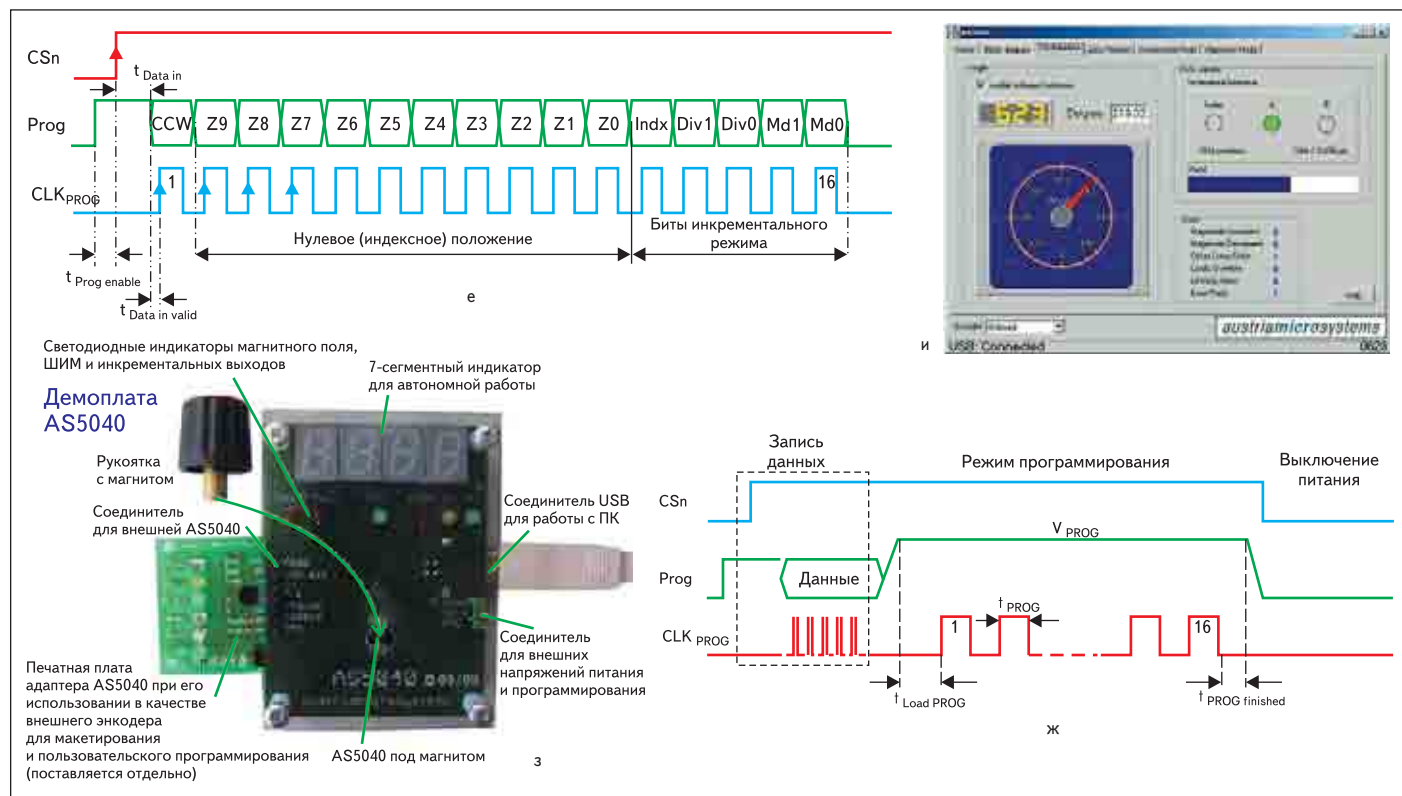


Рис. 36. 10-битный программируемый угловой энкодер AS5040:
 е — программирование AS5040 — этап записи данных; ж — Режим однократной записи данных;
 з — демоплата AS5040; и — считывание SSI — интерфейса программным обеспечением Austriamicrosystems.

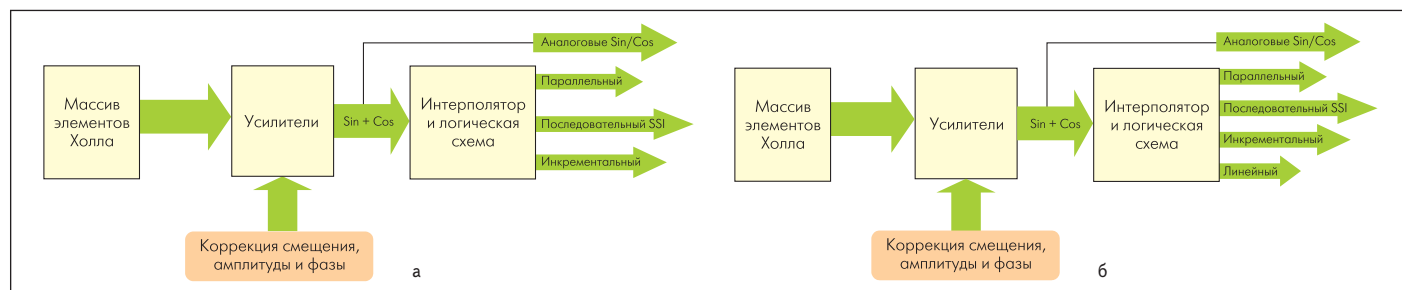


Рис. 37. Угловые энкодеры AM256 и AM512 RLS:
 а — функциональная схема AM256; б — функциональная схема AM512.

туса компенсации сдвигов, ошибки данных (переполнения CORDIC-алгоритма), предупреждающий бит линейности, цифровую информацию MagINCn и MagDECn о перемещениях магнита в вертикальной оси (доступную также на выходах MagINCn и MagDECn), и бит четности (рис. 36). Абсолютное положение оценивается со скоростью 10 кГц (0,1 мс), что соответствует считыванию 1024 положений магнита за период 360° в течение 0,1 с (9,76 Гц или 585,9 об/мин максимум). Без пропусков возможно получение скоростей до 1200 об/мин.

В дополнение, 10-битное абсолютное значение угла в виде одноканального ШИМ-сигнала с рабочим циклом, пропорциональным углу, доступно на выводе 12 PWM_LSB. С использованием внешнего ФНЧ ШИМ-сигнал может быть преобразован в пропорциональное аналоговое напряжение, что

позволяет использовать AS5040 для замещения потенциометров.

В AM256 (рис. 37), например, синусные и косинусные выходы напряжения с ортогональных пар сенсорного массива преобразовываются в абсолютное значение с использованием 8-битного интерполятора, а в AM512 — 9-битного [109–113]. Значение интерполятора формирует последовательный SSI или параллельный двоичный интерфейс.

В AM256 и AM512 имеются также два типа аналоговых выходов: небуферизованные аналоговые синусный и косинусный выходы для высокоомной нагрузки (10 кОм), и буферизованные аналоговые выходы (рекомендуемая нагрузка — 720 Ом). В AM512 также возможно получение непосредственно с интерполятора линейного пропорционального аналогового выхода.

Инкрементальные энкодеры

На основе тех же рабочих и вычислительных принципов абсолютного магнитного энкодера может быть сформирован любой инкрементальный интерфейс (рис. 34–35).

Примерами чисто инкрементальных энкодеров являются AS5021/AS5023 и AS5035. Инкрементальный интерфейс поддерживается в AS5040, AM256/512 и IC-MA. Например, в AS5040 (рис. 36) существует три инкрементальных режима, формируемые на выводах 3 (A_LSB_U), 4 (B_Dir_V) и 6 (Index_W):

- Квадратурный A/B (стандартный двухканальный режим).
- Режим одноканального энкодера на выводе 3 (512 импульсов или 1024 изменения положения за оборот, что эквивалентно изменению младшего бита LSB (least signifi-

cant bit) абсолютного значения). Вывод 4 в этом режиме обеспечивает информацию о направлении вращения.

Оба режима обеспечивают индексный сигнал (1 импульс за вращение) с регулируемой шириной в один или три бита, что также программируется.

- Режим коммутации бесщеточных двигателей постоянного тока с одной или двумя парами полюсов.

Гистерезис и нелинейность

АЦП ИС используют электрический гистерезис, полезным эффектом которого является гистерезис положения при смене направления вращения в инкрементальном режиме, а также исключение дребезга цифрового выхода в стационарном положении магнита. Ширина гистерезиса устанавливается в один или несколько LSB (рис. 36г) [103, 110].

При анализе свойств двухосевого датчика абсолютного положения важными являются понятия о нелинейности, различаемые следующим образом (табл. 12) [110]:

- Нелинейность определяется как различие между фактическим положением магнита и выходом ИС.
- Интегральная нелинейность — это общая ошибка выхода, включающая ошибки выравнивания магнита, дифференциальную нелинейность и переходные шумы.
- Дифференциальная нелинейность — это разница между измеренным шагом положения и идеальным шагом (функция точности интерполятора, повторяемая относительно переходных шумов).

В присутствии переходных шумов аналоговых сигналов различие между двумя дифференциальными измерениями представляет собой переходной шум — последовательность электрических шумов аналоговых сигналов.

Датчик положения педали на основе AS5040

Разработка новых датчиков положения педали акселератора — одна из областей, где могут быть востребованы вычислительные и интерфейсные возможности угловых энкодеров типа AS5040, например, для возможной передачи сигнала в формате последовательного протокола по шине CAN. Датчик положения педали (рис. 38) реализует рассматриваемый в статье рабочий режим с вращением дипольного магнита в ограниченном угловом диапазоне $\varphi = 88^\circ$ (может быть задан любой угол до 360°) и сканирует двумерное распределение магнитного поля с образованием однопроводного ШИМ-сигнала и последовательного SSI-канала на 6-контактном разъеме.

Датчик состоит из неподвижного корпуса 1, вращающейся установочной втулки 2 (роторного узла) с диаметрально намагниченным постоянным магнитом 3, запрессованным в пластмассовую втулку 4, крышки 5 — ог-

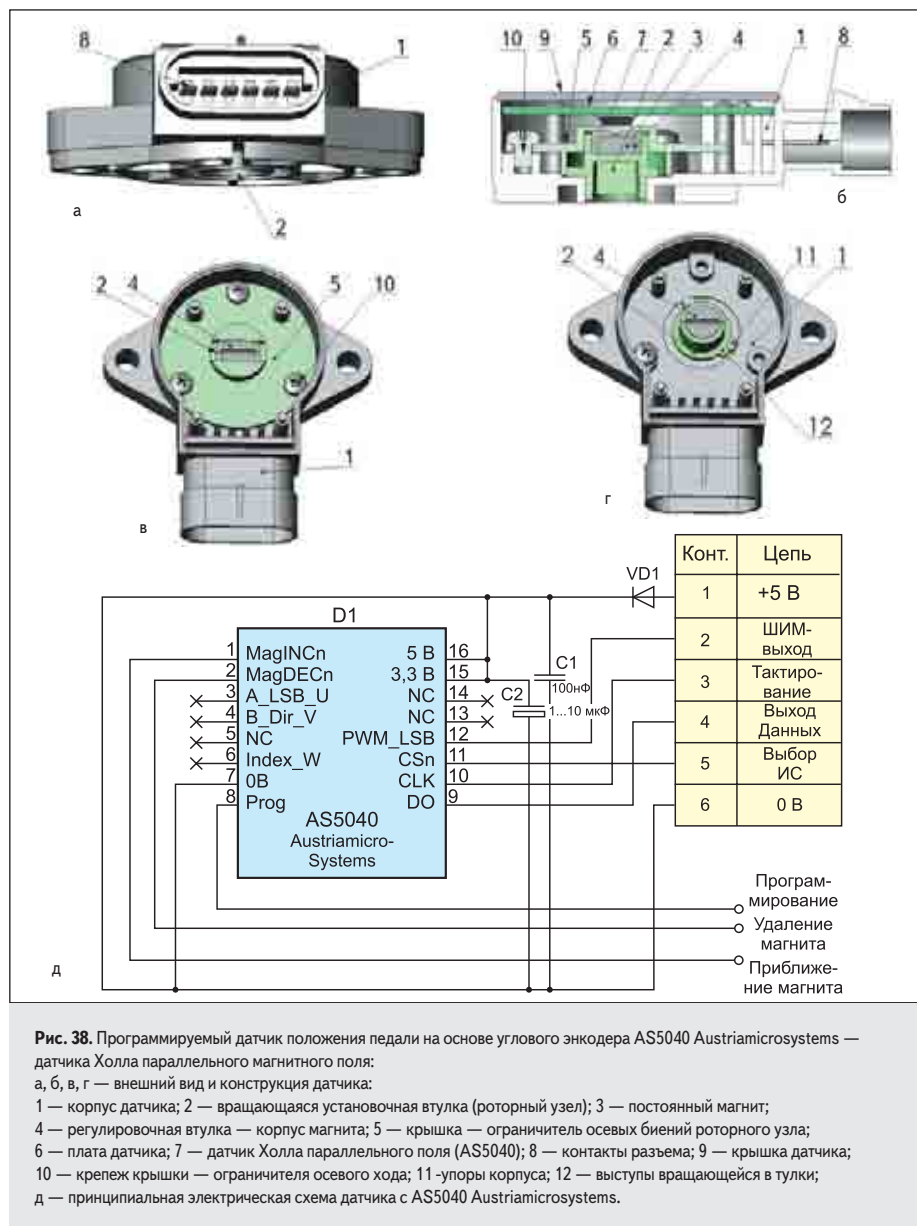


Рис. 38. Программируемый датчик положения педали на основе углового энкодера AS5040 Austriamicrosystems — датчика Холла параллельного магнитного поля: а, б, в, г — внешний вид и конструкция датчика: 1 — корпус датчика; 2 — вращающаяся установочная втулка (роторный узел); 3 — постоянный магнит; 4 — регулировочная втулка — корпус магнита; 5 — крышка — ограничитель осевых биений роторного узла; 6 — плата датчика; 7 — датчик Холла параллельного поля (AS5040); 8 — контакты разъема; 9 — крышка датчика; 10 — крепеж крышки — ограничителя осевого хода; 11 — упоры корпуса; 12 — выступы вращающейся втулки; д — принципиальная электрическая схема датчика с AS5040 Austriamicrosystems.

раничителя осевых биений роторного узла, печатной платы 6, датчика Холла 7, контактов разъема 8 и крышки 9.

Ротор 2 механически связан с вращающимся валом детектируемого объекта (цели) и имеет возможность поворота на ограниченный угол φ в основании корпуса 1. С обратной стороны втулки 2 имеется лыска для установки устройства на вал с заданной начальной ориентацией. Корпус 1 жестко крепится двумя винтами к неподвижной части объекта.

Для механического ограничения осевых перемещений роторного узла 2 в корпусе 1 вводится крышка-ограничитель 5, фиксируемая поверх роторного узла 2 в корпусе 1 винтами 10. Угол φ механически ограничивается упорами 11 в основании корпуса 1 и выступами 12 ротора 2.

Большинство новых модулей педали акселератора снабжается парой внешних пружин на педальном приводе модуля, на встраивание в который рассчитан датчик. Поскольку

предполагается внешнее ограничение крутящего момента, в конструкции не задействована пружина кручения.

Постоянный магнит 3 жестко устанавливается (запрессовывается и клеивается) во втулку 4 с пазом под отвертку, что обеспечивает несколько полезных признаков конструкции:

- Возможность предварительной ориентации нулевой плоскости симметрии магнита по пазу для отвертки непосредственно перед его жесткой установкой (по результатам измерений магнитного поля, например, тесламетром (гауссметром), калиброванной линейной ИС Холла, или с помощью специальных аппаратно-программных средств — см. рис. 36).
- Возможность выравнивания нулевого положения магнита в процессе сборки.
- Увеличение рабочей зоны выравнивания с малым магнитом (позволяет увеличивать паз под отвертку в крышке — ограничителе).

- Допускается использование меньших рабочих зазоров между магнитом и ИС.

Начальное размещение магнита 3 в конструкции не является важным: за нулевое (с нулевым значением магнитной индукции поля) может быть принято любое механическое положение магнита, информация о котором считывается в ОТП-регистр с SSI-канала при программировании (например, в конструкции на рис. 38 нулевой магнитный вектор перпендикулярен вектору отсчета механического угла (в отличие от классических датчиков Холла) [103–104]. Выравнивание магнита 3 относительно ИС 7 обеспечивается в процессе сборки, по результатам выравнивания магнит 3 в корпусе 4 заклеивается в роторном узле 2.

Выводы MagINCn, MagDECn и PROG являются технологическими и используются только в процессе программирования. После записи данных в ОТП-регистр (рис. 36), непосредственно перед установкой крышки 9, выводы и технологические перемычки удаляются с платы 6.

Дальнейшие детали по применению AS5040 показаны на рис. 36; дополнительную информацию можно найти в Интернет [103–106].

Новинки 2005 года

В середине апреля 2005 года Austriamicrosystems анонсировала выпуск AS5035, недорогого 8-битного инкрементального энкодера для промышленных и автомобильных систем, в том числе и при напряжении питания 3,3 В. Устройство рекомендуется для использования в системах человеко-машинного интерфейса (human-machine interface, HMI), таких как переключатели передней панели.

Возможность программирования нулевого (индексного) положения магнитных энкодеров выгодно отличает их от оптических устройств. Безопасность работы гарантируется непрерывным наблюдением оптимального положения магнита в системе. В случае отсутствия или потери магнита устройство немедленно выработывает сигнал тревоги.

В мае 2005 года Austriamicrosystems производит дальнейшее расширение своего семейства магнитных угловых энкодеров введением 10-битного AS5043 — ИС абсолютного аналогового магнитного углового энкодера, который предназначен специально для замещения трехпроводных систем, требующих получения аналоговой информации о положении, с дополнительной диагностической функциональностью (рис. 39) [107–108].

В июне анонсирован новый 12-битный энкодер AS5045 — ИС с абсолютным цифровым и ШИМ-интерфейсом.

Возможности конфигурирования максимального числа режимов (28 различных режимов) реализованы в новом угловом энкодере общего назначения iC-MA iC-Haus (рис. 40 и табл. 12), который, подобно AS5040, представляет собой гибкое системное реше-

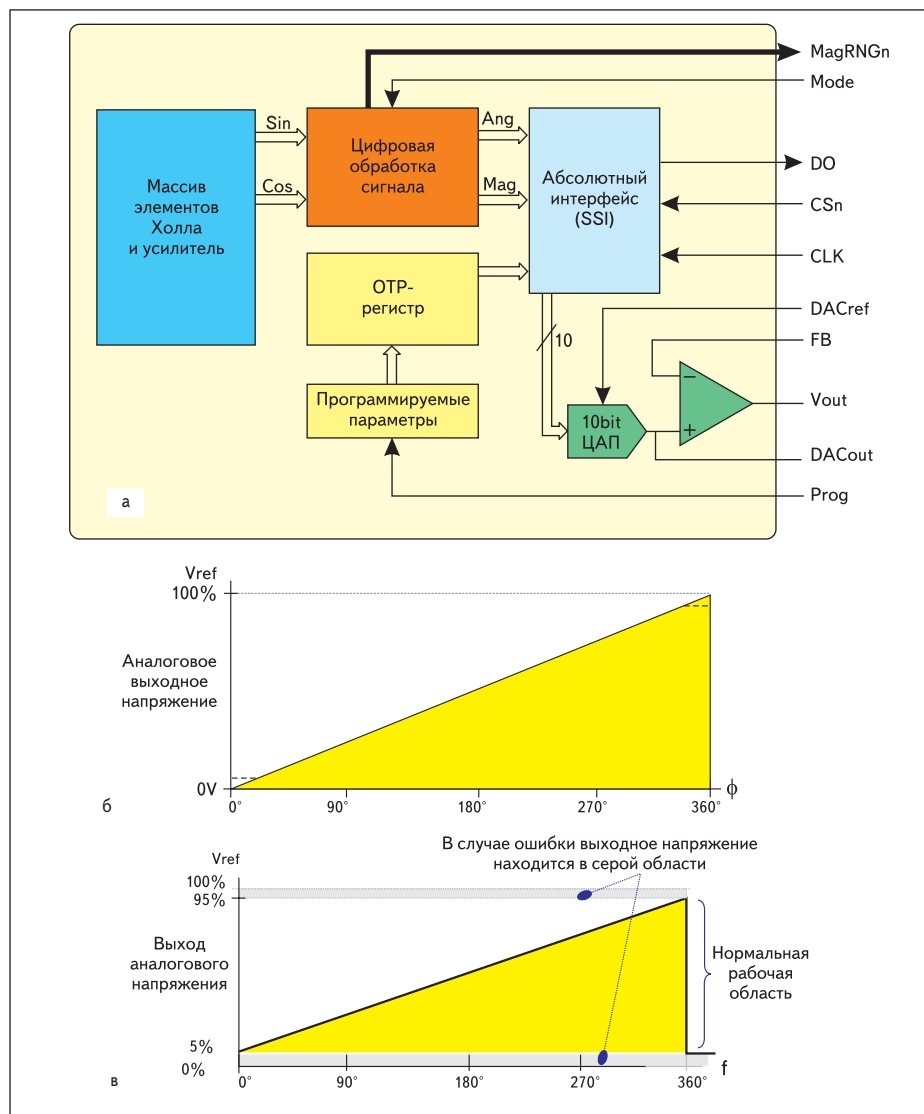


Рис. 39. Программируемый магнитный угловой энкодер с абсолютными аналоговым и SSI — выходом данных AS5043 Austriamicrosystems: а — функциональная схема; б — функциональная характеристика (в полном диапазоне); в — диагностический выходной режим.

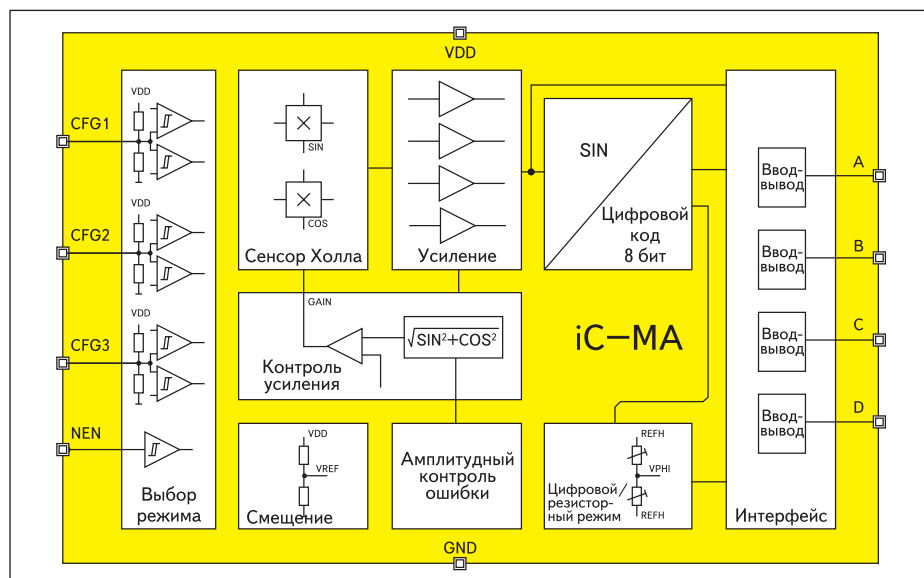


Рис. 40. 8 — битный угловой энкодер IC-MA

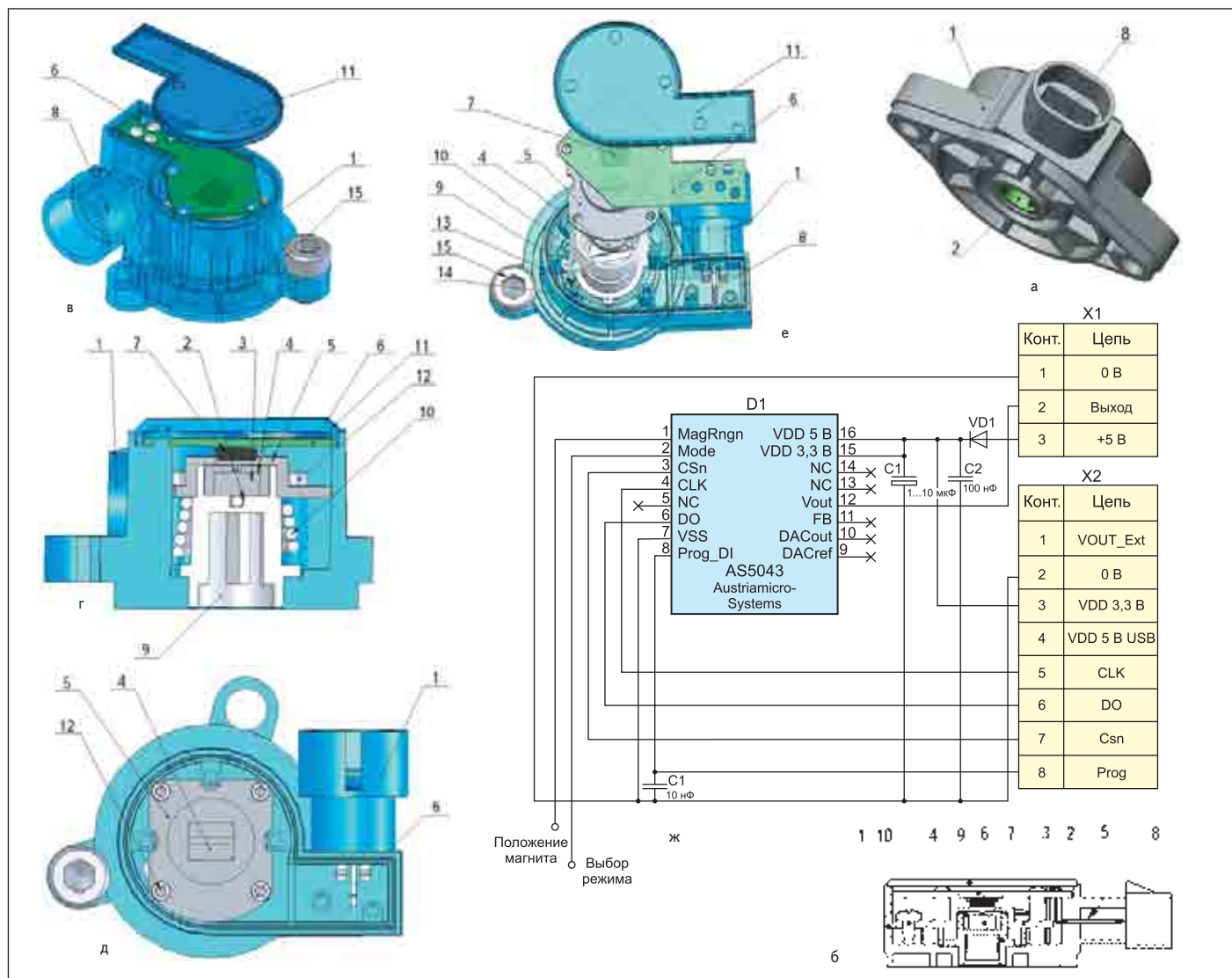


Рис. 41. Аналоговые трехпроводные датчики на основе AS5043:

а, б — датчик положения педали:

а — внешний вид; б — конструкция датчика: 1 — корпус датчика; 2 — вращающаяся установочная втулка (роторный узел); 3 — цилиндрический постоянный магнит; 4 — регулировочная втулка — корпус магнита; 5 — крышка — ограничитель осевых биений роторного узла; 6 — плата датчика; 7 — датчик AS5043; 8 — контакты разъема; 9 — крышка датчика; 10 — крепеж крышки — ограничителя осевого хода.

в-е — датчик положения дроссельной заслонки:

в — конструкция датчика в разрезе в его симметричном угловом положении;

г — конструкция датчика;

д — вид с ограничителем хода;

е — вид с выступами, ограничивающими угол поворота: 1 — корпус датчика;

2 — роторный узел (сборочная единица, включающая также поз. 9 и 10; выполняется на основе деталей, жестко связанных между собой); 3 — цилиндрический постоянный магнит; 4 — регулировочная втулка — корпус магнита; 5 — ограничитель осевых перемещений — вспомогательная крышка, закрепляемая на винтах;

6 — печатная плата; 7 — ИС; 8 — контакты разъема; 9 — установочная втулка роторного узла; 10 — пружина кручения; 11 — крышка датчика; 12 — крепеж ограничителя;

13 — упоры корпуса; 14 — выступы вращающейся втулки; 15 — крепеж датчика.

ж — принципиальная электрическая схема датчика с AS5043 и дискретными компонентами;

ние как для аналогового или цифрового дедетектирования абсолютных углов, так и для инкрементального детектирования относительных перемещений. iC-MA выпускается в ультрамалом DFN10 (4×4 мм) корпусе и рекомендована компанией в качестве однокомпонентного решения для бесконтактных потенциометров, многооборотных угловых энкодеров, бесконтактных переключателей, измерителей расхода или, как AS5040, для коммутации бесщеточных двигателей. Для реализации рабочих режимов применяется специальное конфигурирование выводов [114].

Благодаря появлению аналоговых ИС реализован новый аналоговый датчик положения педали (рис. 41). Только благодаря появлению AS5043 может быть успешно перестроена конструкция датчика положения дроссельной заслонки для автомобилей ВАЗ с соблюдением его трехпроводного исполнения (разъем X2 — технологический) и, как минимум, сохранением возможностей его предшественников. Какие-либо ограничения высокоточного линейного диапазона угла в данном устройстве полностью устраняются.

Несколько слов о линейных энкодерах и угловых энкодерах с отверстием под вал

Различают угловые и линейные энкодеры и датчики. Ключевой проблемой, ассоциируемой с линейными магнитоуправляемыми датчиками положения, обычно является то, что их рабочий ход при образовании знакопеременного выхода должен соответствовать длине магнита (рис. 42в), причем длина магнита должна быть даже большей. (На рис. 42а-в показаны существующие рабочие режимы