

# Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы

## Часть 7. MLX90316 MELEXIS — первый магнитный угловой энкодер Холла на базе технологии Tria⊗is

Светлана СЫСОВЕВА  
S.Sysoeva@mail.ru

Современная электроника развивается стремительными темпами, и не удивительно, что технология магнитных угловых энкодеров Холла, еще совсем недавно занимавшая верхнюю строчку в своеобразной топ-шкале магнитоуправляемых интегральных схем, сегодня уже потеснена новым лидером научно-технического прогресса в области автомобильных датчиков положения. Речь идет о технологии магнитных угловых энкодеров Холла Tria⊗is и новой интегральной схеме MLX90316, представленной в сентябре 2005 года компанией Melexis — ведущим разработчиком и производителем широкой номенклатуры автомобильных интегральных датчиков.

### Введение

Значительный интерес, проявленный компанией Melexis — мировым лидером в области высоких технологий производства автомобильных программируемых КМОП ИС Холла — к сотрудничеству с компанией Sentron, вполне закономерен. Ведь именно Sentron является автором технологии производства гибридных ИС Холла с интегрированными магнитоконцентрирующими дисками (ИМК). Итогом совместной работы обеих компаний стал первый коммерческий продукт — новый угловой энкодер Холла MLX90316, который представляет собой гибридную КМОП ИС с ИМК и линейным угловым диапазоном в пределах 0–360°, программируемым в памяти EEPROM.

MLX90316 ориентирован именно на актуальной автомобильной задаче двухосевого детектирования в диапазоне 0–360° угла поворота легкой оси намагниченности дипольного постоянного магнита, размещенного на торце вала во фронте ИС (рис. 43). Этот продукт предлагает в определенной степени новое, трехмерное решение данной задачи, что и отражено в его названии — Tria⊗is (бренд Melexis).

Это означает, что датчик с ИМК, предназначенный для чисто двухосевых измерений — вычисления угла поворота магнитного вектора на плоскости, характеризуется уве-

личенной чувствительностью к изменению компонентов магнитного поля, параллельного поверхности ИС; одновременно, ввиду особенностей функционирования ИМК, достигается увеличение чувствительности ИС и в направлении третьей пространственной оси (рис. 44).

Угловые магнитные энкодеры (Austriamicrosystems, RLS, iC-Haus — см. табл. 12, часть 6 статьи), созданные на базе массива планарных элементов Холла, чувствительны только к компонентам магнитного поля, перпендикулярного поверхности ИС; при этом планарные элементы характеризуются чувствительностью, типичной для классических датчиков Холла<sup>1</sup>, но работают в диапазоне поля порядка 50 мТл.

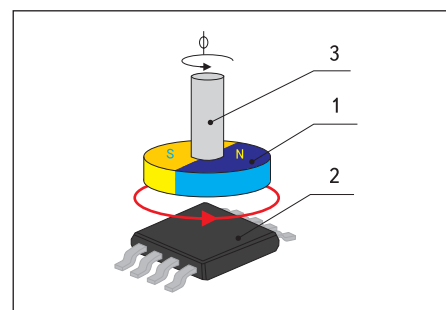


Рис. 43. Типичное применение MLX90316 Melexis в задаче детектирования угла поворота магнитного вектора диаметально намагниченного постоянного дипольного магнита:  
1 — магнит — цель; 2 — ИС MLX90316;  
3 — вращающийся вал;  $\phi$  — угол поворота магнита

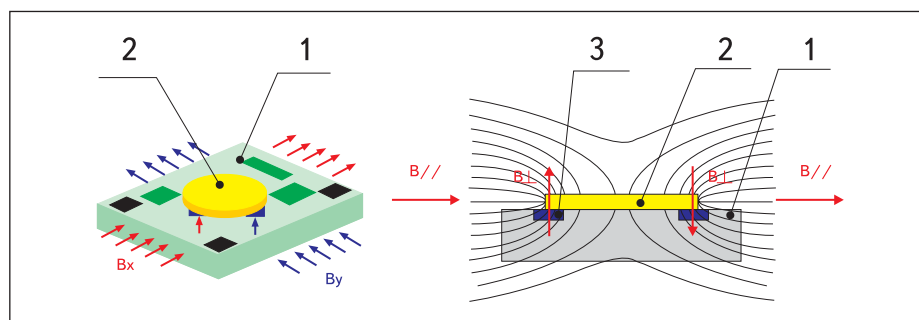


Рис. 44. Технология эффекта Холла Tria⊗is™ в ИС:  
1 — подложка; 2 — ИМК; 3 — элементы Холла;  
 $B_x$  и  $B_y$  — компоненты магнитного поля в направлении измерительных осей X и Y;  
 $B_{\perp}$  — перпендикулярные компоненты магнитного поля;  
 $B_{//}$  — параллельные компоненты магнитного поля

<sup>1</sup> Чувствительность стандартных планарных элементов Холла в среднем составляет порядка 10–50 мВ/мТл при напряжении питания 5 В; достижимы значения до 200 мВ/мТл.

Технический результат высокоточных угловых измерений (погрешность  $<0,5^\circ$ ) с использованием энкодеров с планарными элементами Холла достигается, главным образом, благодаря возможностям схемы цифровой обработки с АЦП синусно-косинусных сигналов, CoRDIC-алгоритма вычисления угла с использованием функции арктангенса и эффективных методов устранения смещения на этапе первичного преобразования Холла (spinning current) и (или) в усилительной части (например, автообнуление).

Специальные возможности ИС обеспечиваются за счет программирования в рабочих условиях данных о нулевом положении, формата и параметров выходной характеристики, а также множества других настроек. Заложенные в ИС теоретические принципы энкодеров при этом предполагают значительные интерфейсные возможности, которые способны как предоставить высокоточный абсолютный выход (SSI, аналоговый, ШИМ), так и обеспечить любой инкрементальный интерфейс (стандартный квадратурный интерфейс, индексный канал, канал направления).

Существенно, что датчики с планарными элементами, предназначенные для вычисления угла поворота магнитного вектора в плоскости XY, параллельной поверхности ИС, на первичном этапе формирования сигнала чувствительны к компонентам поля в Z-оси. Следовательно, уровни первичных сигналов зависят от расстояния между магнитом и ИС и подвержены влиянию магнитных неоднородностей и допусков, хотя данное влияние эффективно устраняется в схеме обработки благодаря функции арктангенса.

Гибридные двухосевые датчики с ИМК (их технология рассматривалась в пятой части статьи) используют тот же крестообразный

массив планарных элементов Холла, чувствительных к перпендикулярным компонентам поля, но снабжаются ИМК, посредством которого выполняется преобразование параллельных компонентов поля в перпендикулярные (рис. 44). За счет данного преобразования достигается физическая чувствительность датчика именно к параллельным компонентам X и Y магнитного поля, в задаче детектирования угла поворота магнитного вектора доминирующим над перпендикулярными, к которым ИС с массивом ИМК также чувствительна.

Таким образом, повышение чувствительности датчика за счет эффектов концентрации компонентов магнитного поля именно в направлении измерительных осей датчика одновременно означает значительное увеличение чувствительности датчика к компонентам поля в Z-оси.

Говоря об основном преимуществе технологии ИМК — повышении чувствительности (см. табл. 11 и 12), следует обратить внимание на их основные недостатки. Этот тип датчиков рассчитан на работу в слабых полях (до 1 Тл), поскольку в сильных полях ИМК наводит достаточно большую нелинейность. Чувствительность к магнитным неоднородностям и допускам на уровне первичных сигналов также сохраняется, в отличие от истинно нечувствительных к ним магниторезисторов, и требует схемы обработки сигнала с функцией арктангенса.

Обе технологии датчиков КМОП-совместимы, но в стандартной линейке датчиков Sentron с ИМК (2SA-10) возможности цифровой микропроцессорной обработки сигнала, техникотмены сдвигов, программирования или формирования выходного сигнала в одном из энкодерных форматов ранее не применялись.

Следовательно, синусно-косинусный выход датчиков с ИМК формирует необходимость интерфейсного АЦП, внешнего микроконтроллера, блока ЦОС — значительного числа интерфейсных компонентов.

## MLX90316 Melexis

MLX90316 — новейшая программируемая гибридная ИС абсолютного магнитного углового энкодера в диапазоне  $0-360^\circ$  на базе технологии TriA@is, сенсорная часть которого состоит из одного ИМК на КМОП-подложке ИС в корпусе SOIC8 или расположенных на двойной подложке двух ИМК в корпусе TSSOP16, и массива (массивов) взаимно ортогональных планарных элементов Холла, размещенных под ИМК, попарно чувствительных к направлениям X и Y соответственно (рис. 45 а, б).

Функциональная схема MLX90316 показана на рисунке 45в.

Кроме собственно сенсорной части этапы обработки сигнала в ИС включают: мультиплексирование (MUX), усиление, АЦП, ЦОС с микроконтроллером, RAM, ROM и EEPROM.

Первая ступень схемы предназначена для кодировки сигналов механического угла в два дифференциальных сигнала с фазовой разницей  $90^\circ$  — синусный и косинусный (рис. 46). Синусно-косинусные сигналы  $U_X$  и  $U_Y$ , пропорциональные величине магнитного потока, обрабатываются в дифференциальной аналоговой цепи с применением классических техник отмены сдвигов (spinning и chopper — стабилизированный усилитель), а затем оцифровываются АЦП с разрешением, конфигурируемым в 14 или 15 бит, и передаются в блок ЦОС.

Основным элементом блока ЦОС является 16-битный RISC-микроконтроллер, использующий цифровое представление сигналов для вычисления угла посредством табличной функции арктангенса<sup>2</sup>, применяемой к соотношению сигналов  $U_Y/U_X$ :

$$\phi = \arctg\left(\frac{U_Y}{U_X}\right) \quad (22)$$

Функциональность ЦОС управляется специальным микрокодом микроконтроллера (firmware — F/W), хранимым в памяти ROM.

В дополнение к функции арктангенса ATAN микрокод F/W контролирует всю аналоговую цепь, выходную передаточную характеристику, выходной протокол, этапы калибровки, программирования и режимы самодиагностики.

Поскольку функция ATAN вычисляется из соотношения  $U_Y/U_X$  (как при использовании магниторезистивных датчиков), угловая информация является независимой от вариаций плотности потока при изменении воз-

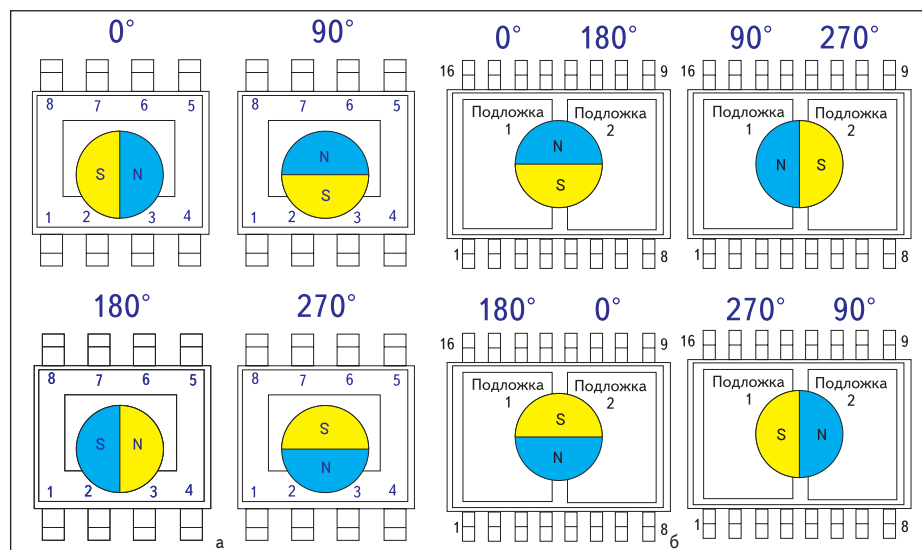


Рис. 45. Практическая реализация технологии TriA@is™ в MLX90316 Melexis:

а — размещение магнита относительно сенсорной части и схема измерения угла с MLX90316 в корпусе SOIC-8;  
б — взаиморасположение магнита относительно сенсорных частей и схема измерения угла с MLX90316 в корпусе TSSOP-16

<sup>2</sup> В MLX90316 вычисление функции арктангенса осуществляется именно посредством просмотра таблиц, без применения CoRDIC-алгоритма.

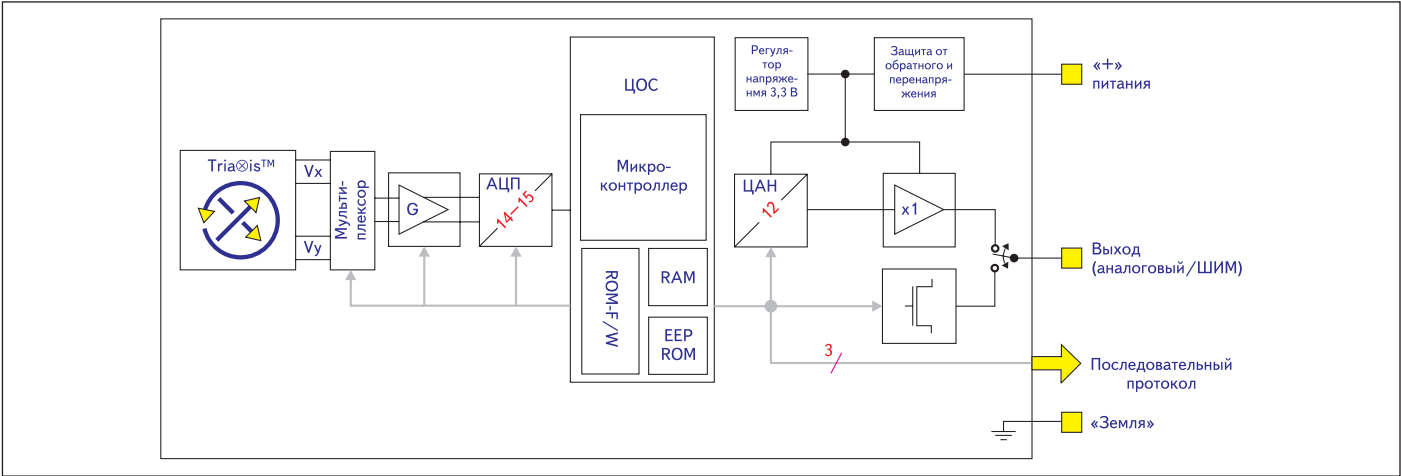


Рис. 45в. Практическая реализация технологии Tria@is™ в MLX90316 Melexis: функциональная схема ИС MLX90316

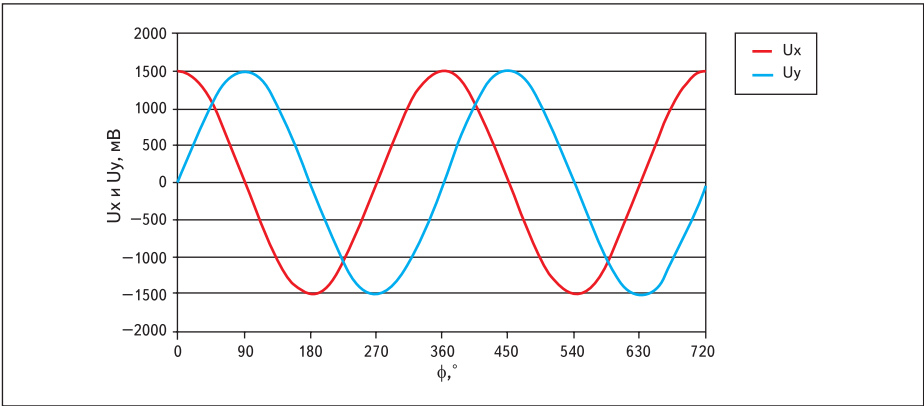


Рис. 46. Формирование первичных синусно-косинусных сигналов в MLX90316

душного зазора, магнитных неоднородностей, влияния температуры, несогласований двух квадратурных сигналов.

В отличие от классических датчиков Холла рассматриваемый измерительный принцип обеспечивает улучшенную температурную точность, способность измерять углы в диапазоне 360° с высокой линейностью, независимой от взаимоположения ИС и магнита.

Текущее цифровое значение угла затем может быть преобразовано 12-битным ЦАП в аналоговую форму. Другие типы выходного формата, поддерживаемые ИС, — 12-битный ШИМ и последовательный выход (см. табл. 13). Выходная передаточная характеристика датчика полностью программируема (смещение,

Таблица 13. Сравнительные характеристики новейших абсолютных интегральных угловых энкодеров Холла

ИС Холла	Технология	Функциональное описание	Напряжение питания, В	Ток потребления, мА	Выходной интерфейс	Программируемые параметры и дополнительные режимы	Частота вращения магнита, 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 выражения магнита, градус	Магнитная нелинейность, %	Интегральная нелинейность при оптимальном выражении магнита, градус	Интегральная нелинейность, градус	Дифференциальная нелинейность, градус	Переходные шумы, градус	Рабочий температурный диапазон, °C	Тип корпуса	Производитель
AS5045	MLX90316	Массив планарных элементов Холла 12-битный программируемый магнитный угловой энкодер	5 (4,5...5,5); 3,3 (3...3,6); (-0,3...-7)	16...20	Для абсолютных 12-битных цифровых выходов — последовательный SPI-интерфейс и ШИМ-выход, сигнал ошибки, предупреждающий сигнал снижения питания	Нулевое положение, детектирование горизонтальных смещений магнита и его перемещений в вертикальной оси, направление вращения, отключение формата ШИМ, две частоты ШИМ	0,61 Гц в медленном режиме (Slow mode); 2,44 Гц в быстром режиме (Fast mode)	±45...±75	0,5—1,5 с магнитом Ø 6×3 мм	2,61 кГц (384 мкс) в медленном режиме (Slow mode); 10,42 кГц (96 мкс) в быстром режиме (Fast mode)	80 (Slow mode); 20 (Fast Mode)	±0,5	5 %	±0,5° при 25 °C, ±0,9° в полном температурном диапазоне	±1,4	±0,044	≤0,03° в медленном режиме Slow mode; ≤0,06° в быстром режиме Fast mode	-40...125	SSOP 16 (5,3×6,2 мм)	Austriamicrosystems
		Триа@is™ Программируемый магнитный угловой энкодер с разрешением 12/14 бит	5 (4,5...5,5); абсолютный диапазон -10...+20	10 (медленный режим — Slow mode); 16 (быстрый режим — Fast mode)	12-битный аналоговый, 12-битный ШИМ-выход с программируемой частотой 100 Гц—1кГц или последовательный протокол передачи угловой информации с разрешением до 14 бит	Ограничивающие уровни, усиление (чувствительность), смещение; выходной формат (аналоговый, ШИМ или последовательный выход), множество других настроек: направление вращения, скорости работы ЦОС, частота ШИМ, параметры ФНЧ, диагностических режимов, блокировки, 40-битный идентификационный номер и т. д.	—*	50 (20—70); ±700мТл максимум	—*	600 мкс (Slow mode); 200 мкс (Fast Mode)	15, в медленном и быстром режимах	—*	—*	±2	±4LSB**	0,05-2LSB**	0,03—0,06 в медленном режиме (Slow mode); 0,1—0,2 в быстром режиме (Fast mode)	S (-20...85); E (-40...85); K (-40...125)  DC (SOIC-8) GO (TSSOP-16)	Melexis	

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

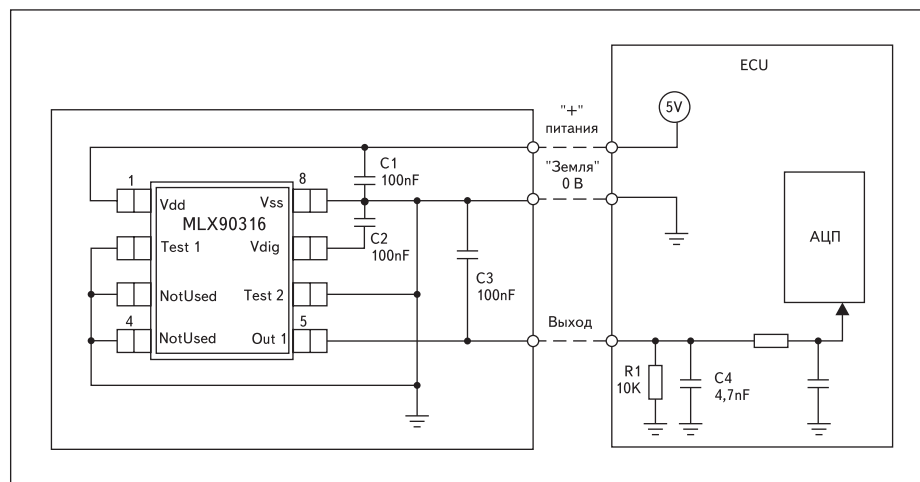


Рис. 47. Схема применения MLX90316 в корпусе SOIC-8, рекомендуемая Melexis для задач с аналоговым выходом

усиление, ограничивающие уровни), причем в отличие от однократно программируемых энкодеров Austriamicrosystems программирование рабочих настроек и коэффициентов MLX90316 выполняется в перепрограммируемой энергонезависимой памяти EEPROM [103–108,116].

Поскольку MLX90316 работает в диапазоне полей 50 мТл, так же, как и все энкодеры, представленные в таблице 12, данная ИС может быть использована в качестве альтернативной замены AS5040 в конструкции цифрового датчика положения педали, изображенной на рис. 38 в части 6 настоящей публикации. Одновременно MLX90316 является новым, практически однокомпонентным решением для аналоговых датчиков, показанных на рис. 41 (при цене ИС от \$1.20).

Схему подключения MLX90316, приведенную на рис. 47, Melexis рекомендует специально для аналоговых датчиков. Например, на основе этой схемы и конструкции, показанной на рис. 41в-е, может быть получен еще один виртуальный макет датчика положения дроссельной заслонки для будущих автомобилей ВАЗ.

При программировании датчика, например с помощью комплекта PTC-04 Melexis, могут быть установлены следующие параметры:

- выход — аналоговый;
- нижний ограничивающий уровень  $\text{ClampLo} = 0,25 \text{ В}$  для  $\varphi \leq 0^\circ$ ;
- верхний ограничивающий уровень  $\text{ClampHi} = 4,75 \text{ В}$  для  $\varphi \geq 120^\circ$ ;
- смещение  $V_{\text{offset}} = 2,25 \text{ В}$ ;
- направление вращения, зависящее от расположения микросхемы в конструкции, например, по часовой стрелке:  $\text{CLOCKWISE} = \text{CCW} = 0$ ;
- медленный (точный) скоростной режим ЦОС  $\text{HIGHSPEED} = 0$  (Slow Mode).

Обсуждая MLX90316 в сравнении, скажем, с AS5043 или новейшей<sup>3</sup> 12-битной AS5045

с ШИМ-выходом (см. табл. 12 и 13), необходимо отметить, что MLX90316 позволяет получить именно аналоговую характеристику датчика положения дроссельной заслонки, которая может быть запрограммирована в ограничительных пределах углового диапазона  $0^\circ \leq \varphi \leq 120^\circ$ , оптимальных с точки зрения унификации и совместимости устройства (рис. 48) с существующими автомобильными системами. Этапы программирования аналогового выхода MLX90316 будут выполняться в полном соответствии с последовательностью программирования производных

от классического типа аналоговых датчиков Холла, подробно описанной в части 2 данной статьи.

В зависимости от фактического угла запрограммированного в пределах  $0-360^\circ$  нулевого положения и нулевого смещения, передаточная характеристика AS5043 может электрически «вращаться» (рис. 48а). В дальнейшем наклон характеристики может регулироваться изменением усиления выходной усилительной ступени ОРAMP и выбором допустимых угловых диапазонов  $360^\circ/180^\circ/90^\circ/45^\circ$ , программируемых при сборке [107, 108].

В отличие от AS5043, MLX90316 поддерживает не только двух-, но и многоточечную калибровку передаточной характеристики (рис. 48 б).

Дальнейшие технические данные и детали по программированию других режимов MLX90316 могут быть найдены в Интернете [116].

## Заключение

Двухосевые магнитные угловые энкодеры с массивом планарных элементов, рассматриваемые в частях 5 и 6 настоящего цикла, месяц-два тому назад, безусловно, находились на вершине технологических достижений эффекта Холла. Несомненно, данную ситуацию изменило появление MLX90316, которая также относится к верхнему сегменту рынка автомобильных датчиков Холла.

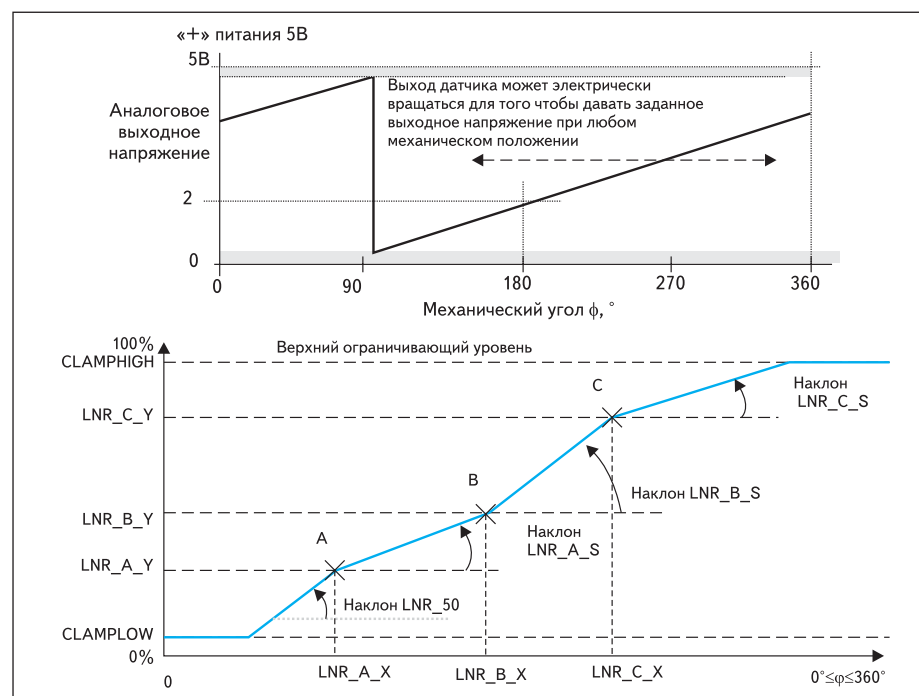


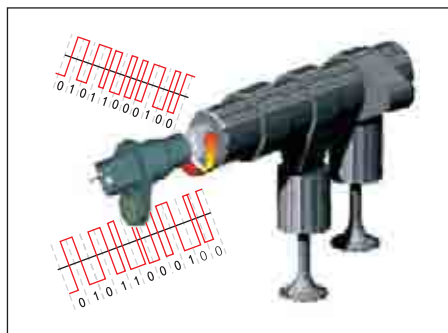
Рис. 48. Сравнение способов программирования аналоговых характеристик MLX90316 и AS5043 в ограниченном диапазоне угла  $\varphi$ :

а — программирование нулевого положения (смещения) выходной характеристики AS5043;

б — многоточечная калибровка выходной характеристики MLX90316;

A, B, C — точки калибровки;  $\text{LNR\_A\_X}$ ,  $\text{LNR\_B\_X}$ ,  $\text{LNR\_C\_X}$ ,  $\text{LNR\_S0}$ ,  $\text{LNR\_A\_S}$ ,  $\text{LNR\_B\_S}$ ,  $\text{LNR\_C\_S}$ ,  $\text{LNR\_A\_Y}$ ,  $\text{LNR\_B\_Y}$  и  $\text{LNR\_C\_Y}$  — параметры передаточной характеристики, устанавливаемые при программировании датчика;  $\text{CLAMPLOW}$  и  $\text{CLAMPHIGH}$  — программируемые нижний и верхний ограничивающие уровни напряжения, соответственно

<sup>3</sup> Образцы AS5045 доступны с конца сентября 2005 года.



**Рис. 49.** Новинка 2005 года от SiemensVDO — датчик абсолютного положения распределительного вала

Получен фактически новый технический результат решения известной задачи о вычислении угла в диапазоне 0–360° поворота магнитного вектора, параллельного поверхности ИС, достигнутый за счет объединения при создании датчика и одновременного использования теоретических преимуществ нескольких известных технологий: массива планарных элемен-

тов, интегрированных магнитоконцентрирующих дисков (ИМК), магнитных угловых энкодеров и высоких технологий методов отмены смещений КМОП ИС Холла с EEPROM.

По всей видимости, ожидается новая волна разработок автомобильных ИС Холла и конструкций автомобильных датчиков верхнего уровня — угловых энкодеров, что обусловлено их высокой точностью и способностью детектирования углового положения и скорости любых автомобильных объектов, на торце которых может быть установлен дипольный постоянный магнит.

На рис. 49 показан датчик положения распределительного вала с диаметрально намагниченным магнитом — одна из новинок 2005 года от SiemensVDO.

Вероятно, тема применения эффекта Холла для создания автомобильных датчиков так и останется незавершенной в пределах данного цикла публикаций, поскольку перспективы развития этого технологического направления постоянно расширяются. Так, например, мировая научно-техническая общественность ожидает появления коммерчески доступных

трехосевых (трехмерных) интегральных датчиков Холла. Причем особые надежды возлагают на двух глобальных мировых лидеров — компании Melexis и Micronas Intermetall, которые еще в 2004 году анонсировали запуск научно-исследовательских проектов по разработке трехмерных датчиков Холла.

Существующие и потенциальные области задач, отведенные для трехмерных датчиков Холла, — это трехмерное сканирование магнитных полей, компасы, трехмерные детекторы перемещений и положения и другие аналогичные задачи. ■

## Литература

115. AS5045. 12 BIT PROGRAMMABLE MAGNETIC ROTARY ENCODER. DATA SHEET Rev 1.0, 26-Sep-05. [http://www.austriamicrosystems.com/03products/products\\_detail/AS5045/download/AS5045\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.austriamicrosystems.com/03products/products_detail/AS5045/download/AS5045_Data_Sheet.pdf)
116. MLX90316 Rotary Position Sensor IC. Data Sheet 3901090316 Rev. 001 от 20Sep05. [http://www.melexis.com/prodfiles/DatasheetMLX90316\\_Rev001\\_1.pdf](http://www.melexis.com/prodfiles/DatasheetMLX90316_Rev001_1.pdf)