

Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы.

Часть 14. Итоговый сравнительный анализ.

Выводы и обновление

Светлана СЫСОВЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

В данной, заключительной части статьи подводятся итоги цикла, первая публикация которого состоялась еще в № 2'2005. Статья включает сравнительный анализ технологий, рассмотренных в цикле, выводы по результатам аналитического исследования и изменениям на рынке автомобильных датчиков, а также сведения об обновлении линеек элементной базы интегральных магнитоуправляемых датчиков положения.

В рамках настоящего цикла были рассмотрены многие актуальные технологии датчиков положения из числа продаваемых на современном автомобильном рынке, начиная от популярных и широко распространенных потенциометров и заканчивая эффективными нововведениями последних лет, к которым относятся, например, магнитные угловые энкодеры Холла, АМР- и ГМР-датчики, или модульные магнитостриктивные измерители.

Итоговая сравнительная характеристика различных типов и технологий датчиков положения, рассмотренных в цикле публикаций

Резистивная

Общие признаки

Преимущества:

- Подходят для высокотемпературной работы.
- Обеспечивают стабильный линейный выход.
- Простота реализации линейных измерений.
- Возможность угловых измерений.
- Возможность абсолютных измерений.

Недостатки:

- Контактный принцип, теоретически невысокая надежность.
- Работа контактов связана с ухудшением шумовых характеристик и повышенной чувствительностью к вибрации, ударам.
- Отсутствие возможности создавать полностью интегральные датчики.
- Необходимость в схеме обработки и интерфейсных ASIC.

Проволочные потенциометры wirewound

Преимущества:

- В теории у проволочных датчиков более высокая надежность, чем у потенциометров.

- Большой диапазон угловых измерений (более 360°).

Недостатки:

- Недостаток проволочных датчиков — значительная высота и (или) другие связанные геометрические размеры.

Потенциометры

Преимущества:

- Малый профиль и связанные размеры корпуса.
- Технологичность: толстопленочный чувствительный элемент, схема обработки и интерфейсная ASIC располагаются на одной печатной плате датчика.
- Возможность реализации модульного принципа.
- Низкая цена.
- Возможность детектирования угловых диапазонов до 360° с одной или двумя дорожками (с редукторным механизмом и в комбинации с другими типами датчиков возможны угловые измерения более 360°).
- Улучшенные шумовые свойства.
- Повышенная надежность.

Недостатки:

- Чувствительны к загрязнениям (пыли).

Датчики Холла

Общие признаки

Преимущества:

- Бесконтактность, высокая надежность.
- Технологичность.
- Повышенная точность.
- Полностью интегральные решения, готовый интерфейс (аналоговый, ШИМ, энкодеры) и минимум внешней обрабатывающей электроники: чувствительный элемент, схема обработки и интерфейсная часть интегрированы в ИС датчика.
- Наличие элементной базы с интегрированной цифровой коррекцией аналогового

сигнала, в том числе и на основе ЦОС с микроконтроллером и EEPROM.

- Малый размер и вес.
- Низкая цена компонентов.
- Возможность абсолютных измерений.
- Существование различных измерительных схем, включающих ИС и магнит, для линейных и угловых измерений в различных диапазонах, возможность построения любого типа (абсолютного или инкрементального) энкодеров.
- Возможность одновременного детектирования скорости и положения (с дуальными ИС Холла и энкодерами).
- Возможность детектирования крутящего момента.
- Возможность работы при температурах от -40 до 150 °C и выше.
- Устойчивость к загрязнениям.
- Отсутствие старения датчика.
- Высокая базовая линейность эффекта Холла.
- Высокая чувствительность датчика после усиления.
- Независимость амплитуды сигнала от рабочей частоты.
- Высокое разрешение (зависит от обрабатывающей электроники).
- Малый гистерезис.
- Малое энергопотребление.
- Практически все типы датчиков абсолютно совместимы с КМОП.
- Возможность использования средств пассивного усиления — ферромагнитных концентраторов для регулирования чувствительности и формирования измерительных схем.

Недостатки:

- Низкая первичная чувствительность эффекта Холла, подверженность первичного сигнала помехам и шумам.

- Ограничения многих рабочих режимов в детектировании углового и (или) линейного положения.
- Повышенная сложность линейных измерений.
- Многополюсные магниты и зубчатые роторы допускают либо инкрементальные измерения, либо детектирование одного уникального положения.
- Для эффекта Холла необходимы сильные магниты и (или) малые зазоры.
- Измерения только вблизи (при незначительном удалении магнита от датчика).
- Повышенная температурная чувствительность элементов Холла, температурное изменение свойств и старение магнита.
- Повышенная пьезочувствительность элементов Холла.
- Чувствительны к шумам от внешних сильных полей.
- Интегрирование в ИС различных схемотехнических алгоритмов обработки сигнала и средств калибровки и программирования несколько повышает стоимость датчика.
- Технологичность сборки программируемых ИС снижается за счет необходимости использования программатора, индивидуального программирования точек калибровки каждого датчика или других значений; конструкция должна допускать совмещение этапов сборки с этапами программирования, что может противоречить технологичности.

Классические датчики Холла

(с одним чувствительным элементом)

Преимущества:

- Возможность линейных и угловых измерений с различными типами магнитов, множество рабочих режимов на основе различных комбинаций датчиков и магнитов.
- Наличие элементной базы с возможностью эффективной динамической компенсации (chopper-stabilization), модуляции и демодуляции, фильтрации и диагностики.
- Наличие элементной базы программируемых ИС с возможностью программирования (запасания) в OTPROM или EEPROM выбранных и (или) рассчитанных посредством интегрированных средств ЦОС статических и динамических коэффициентов температурной компенсации, формата и параметров характеристики — ограничивающих уровней, точек калибровки, значений и коэффициентов коррекции дрейфов чувствительности и смещения, других настроек.
- Возможность одно- (смещение без ограничивающих уровней), двух- или многоточечной калибровки выходного сигнала для адаптации к механическим, магнитным рабочим условиям и требуемым уровням выходного сигнала.
- Возможность программирования одного или нескольких датчиков одновременно.
- Для программируемых ИС зазоры между ИС и магнитом и допуски сборки могут быть расширены.

- Наличие элементной базы с использованием для программирования функциональных выводов ИС.

- Повышенная точность программируемых ИС.

Недостатки:

- Ограниченный угловой диапазон в пределах 180°.
- В полном угловом диапазоне 180° выделяются механический (120–180°), эффективный электрический (90–120°) и функциональный диапазон (80°) — с одним датчиком; функциональный диапазон более 120–180° возможен, но с двумя или более датчиками.
- Ограниченная линейность передаточных характеристик.
- Большое начальное смещение элементов Холла.
- Значительные дрейфы чувствительности, смещения под влиянием температуры и старения магнита.
- Повышенная чувствительность к пространственным допускам, неоднородности рабочего поля, вибрации и электромагнитным помехам.

Датчики Холла параллельного магнитного поля

и магнитные угловые энкодеры Холла (с четырьмя элементами Холла)

Преимущества:

- Возможность угловых измерений в диапазоне 360° в рабочем режиме с малым дипольным магнитом на торце вала, механический и электрический угловой диапазон с кольцевым дипольным магнитом 360°.
- Возможность линейных измерений или угловых измерений с многополюсным магнитом.
- Возможность одновременного детектирования положения и скорости.
- Наиболее высокая надежность и точность.
- Позволяют получить наиболее высокую первичную чувствительность (например, с применением пассивного усиления с ИМК).
- Чувствительны и к величине и знаку, и к направлению магнитного поля (уникальность абсолютных угловых значений в диапазоне 360°).
- Высокоточные измерения линейного диапазона угла менее 360° (полностью совпадают механический, эффективный электрический и функциональный диапазоны).
- Позволяют получать после мультиплексирования дифференциальные синусные и косинусные сигналы для вычисления арктангенса угла интегрированными средствами ЦОС с микроконтроллером в диапазоне 360° и отмены температурных эффектов, магнитных и механических допусков.
- Широкий разброс допусков монтажа, вариаций чувствительности датчика и напряженности поля постоянного магнита.
- Нечувствительность к старению магнита.
- Низкая цена.
- Малый гистерезис.

- Наличие элементной базы ИС с возможностью динамической компенсации сенсорного элемента и усилительной части, как chopper-stabilization, так и spinning current или автообнуления.
- Готовый абсолютный или инкрементальный выходной интерфейс, а также при необходимости преобразованный в готовый аналоговый или ШИМ, минимум внешних компонентов.

- Возможность программирования нулевого (индексного) положения, формата и параметров выходной характеристики, множества других настроек.
- Возможность непрерывного наблюдения оптимального положения магнита в системе.
- Возможность многоточечной калибровки.
- Диагностическая функциональность (детектирование сбоев).
- Наличие элементной базы с использованием для программирования функциональных выводов ИС.

Недостатки:

- Предпочтительны специально рекомендуемые магниты, ограниченное число рабочих режимов.
- Рекомендуемые для специальных магнитов зазоры в ряде конструкций могут быть недостаточны.
- Конструкции с отверстием под вал возможны только при использовании многополюсного кольцевого магнита.
- Для измерения линейного положения должны разрабатываться специальные режимы.
- Развивающаяся проблема — необходимость учета неортогональности измерительных осей, несовпадения чувствительностей X- и Y-элементов.

Вертикальные датчики Холла

Преимущества:

- С применением внешней ASIC может быть получен любой энкодерный интерфейс.
- Обоснована возможность получения полностью интегральных датчиков.

Недостатки:

- Природа вертикального датчика Холла несовместима с технологией КМОП и методом spinning current.

Датчики с ИМК

Преимущества:

- Высокая первичная чувствительность датчиков после усиления ИМК.
- Датчики чувствительны к компонентам поля в X, Y и Z-оси, повышение чувствительности датчика за счет концентрации компонентов магнитного поля в направлении измерительных осей и значительное увеличение чувствительности датчика к компонентам поля в Z-оси.
- КМОП-совместимы.
- Наличие элементной базы для одноосевых и двухосевых угловых и линейных измерений, энкодеров.
- Наличие элементной базы интегральных абсолютных магнитных угловых энкодеров, программируемых в EEPROM.

Недостатки:

- Диапазон магнитного поля ограничен насыщением ИМК до 1 Тл.
- Чувствительность к магнитным неоднородностям и допускам на уровне первичных сигналов сохраняется.
Датчики с планарными элементами Холла без ИМК
- Преимущества:**
 - Абсолютно КМОП-совместимы.
 - Отсутствует ИМК допускает использование больших полей.
 - Наличие элементной базы интегральных программируемых абсолютных и инкрементальных магнитных угловых энкодеров.
 - Возможность программирования и (или) включения одного или нескольких датчиков одновременно.
- Недостатки:**
 - Маленькая первичная чувствительность датчика без ИМК.
 - Датчики чувствительны только к компонентам поля в Z-оси, уровни первичных сигналов зависимы от расстояния между магнитом и ИС и подвержены влиянию магнитных неоднородностей и допусков.
Полупроводниковые магниторезисторы (технология эффекта Гаусса)
- Преимущества:**
 - Бесконтактность.
 - Высокая чувствительность в сильных полях.
 - Высокое разрешение (зависит от обрабатываемой электроники).
 - Низкая цена.
 - Малый размер.
 - Малый гистерезис.
 - Возможность линейных или угловых измерений с малым постоянным магнитом.
 - Возможность абсолютных измерений.
 - Отсутствие старения.
 - Нечувствительность к загрязнениям.
 - Независимость амплитуды сигнала от рабочей частоты.
 - Возможность эффективного детектирования линейных перемещений порядка 1,5 мм.
 - Возможность градиентных измерений в схеме с зубчатым ротором, доступна информация о направлении вращения, возможность реализации на данной основе цифровых датчиков или инкрементальных энкодеров.
 - Чувствительны только к величине перпендикулярного магнитного поля, нечувствительны к направлению, что позволяет строить энкодеры с удвоенным разрешением.
 - Возможность включения МР-элементов в мостовые или дифференциальные схемы — в составе датчика — или внешние схемы, которые позволяют получать дифференциальные (например, синусные или косинусные и косинусные в возможных комбинациях датчиков) сигналы.
 - Возможность регулирования чувствительности за счет изменения свойств материала.
 - Возможность использования средств пассивного усиления — ферромагнитных концентраторов.

- Возможность эффективной обработки (линеаризации) сигнала посредством программируемых интерфейсных ASIC и микроконтроллеров, наличие специальной элементной базы.
- Известны интегральные модули МР-датчиков с готовым аналоговым выходом.
- Недостатки:**
 - Нелинейность зависимости сопротивления от поля и свойств материала, не существует эффективных способов линеаризации функциональной характеристики на физическом уровне.
 - Чувствительны только к величине перпендикулярного магнитного поля, нечувствительны к направлению, что вытекает в не уникальность характеристики и не позволяет эффективно использовать рабочие режимы на основе дипольного магнита.
 - Многополюсные магниты и зубчатые роторы допускают либо инкрементальные измерения, либо детектирование одного уникального положения.
 - Низкая чувствительность к слабым полям, сужающая диапазон измерений, величину зазора между датчиком и магнитом и (или) требующая смещающего магнита.
 - Угловой диапазон с одним чувствительным элементом — в пределах 90° (реально значительно меньше), реальные угловые диапазоны с применением синусно-косинусных функций — только порядка 70–100°.
 - Температурно чувствительны, рабочий температурный диапазон только до +60...70 °С.
 - Зависимость характеристики от свойств материала, вытекающая в компромисс между чувствительностью и температурной зависимостью.
 - Необходимо высокое базовое сопротивление, для реализации которого применяются специальные технологические приемы.
 - Сложная структура и значительная площадь меандрового чувствительного элемента.
 - Отсутствие на данный момент элементной базы интегральных датчиков.
 - Отсутствие адаптированных для детектирования абсолютного положения базовых схем и рабочих режимов.
 - Мостовые и дифференциальные резисторы обычно нуждаются в подстройке (лазерной подгонке) на стадии производства или внешней схеме для устранения смещения.
- Анизотропные магниторезистивные (АМР) датчики*
- Преимущества:**
 - Бесконтактность.
 - Высокая чувствительность.
 - Высокое разрешение (зависит от обрабатываемой электроники), помехоустойчивость.
 - Достаточно высокий уровень первичного сигнала.
 - Возможность включения АМР-элементов в мостовые или дифференциальные схемы для получения синусно-косинусных выходных сигналов (вычисления арктан-

- генса и линеаризации) и уменьшения температурных дрейфов.
- Независимость амплитуды сигнала от рабочей частоты, за исключением возможного влияния высокочастотных вихревых токов.
- Низкая или средняя цена.
- Возможность работы при температурах –40...+160 °С.
- Устойчивость к влажности и загрязнениям.
- Доступны датчики в интегральном исполнении (ИС и модули).
- Малый размер или средний (вследствие особенностей корпусирования некоторых датчиков — применения смещающих магнитов, разделения сенсорного элемента и ASIC).
- Существует метод линеаризации на физическом уровне со смещением зубчатыми участками.
- Малое смещение.
- Разработаны схемотехнические методы устранения начального смещения и регулировки, имеется в наличии элементная база специальных программируемых интерфейсных ASIC.
- Доступность элементной базы полностью интегральных (один интегральный модуль) программируемых в EEPROM датчиков со встроенным микроконтроллером.
- Возможность программирования датчика в процессе или после сборки (обычно в пределах диапазона 180°).
- Возможность программирования через функциональные выводы датчика.
- Диагностическая функциональность.
- Возможность угловых, линейных, дифференциальных измерений в схеме с зубчатым ротором или многополюсным кольцевым магнитом — со специальной элементной базой.
- Возможность абсолютных измерений.
- Большие рабочие зазоры между магнитом и ИС.
- Механический угловой диапазон с кольцевым дипольным магнитом 360°.
- Точность измерений не будет зависеть от напряженности (индукции) магнитного поля, временных и температурных магнитных дрейфов, допусков, механических и магнитных допусков.
- Разрабатываются датчики с меньшей напряженностью насыщающего поля.
- Чувствительны только к направлению параллельного поля и нечувствительны к его величине в диапазоне 180°, что допускает угловые измерения посредством синусно-косинусных функций и функции арктангенса в диапазоне 180° (или с большим числом АМР-элементов — 360°), в синусно-косинусных схемах с функцией арктангенса температурная компенсация не требуется.
- Возможность построения различных энкодеров со специальными типами многополюсных магнитов.
- Удвоение разрешения для энкодеров за счет чувствительности только к направлению поля.

Недостатки:

- Нелинейность базовой характеристики эффекта.
- Неуникальность базовой рабочей характеристики эффекта — сопротивление не зависит от направления поля.
- Эффективный угловой диапазон только в пределах 90° с одним АМР-мостом (для угла 180° необходимо два мостовых элемента, для угла 360° — три или четыре).
- Необходимость в сильном поле для намагничивания, уменьшающая воздушный зазор между датчиком и магнитом.
- Многие датчики состоят не из одной, а из двух ИС.
- Для некоторых рабочих режимов требуется вспомогательное стабилизирующее (не смещающее) магнитное поле.
- Многополосные магниты и зубчатые роторы допускают либо инкрементальные измерения, либо детектирование одного уникального положения.
- Заметный гистерезис.
- Чувствительны к сильным разрушающим полям.
- Возможен флиппинг — обращение характеристики в сильных полях.
- В ИС для сенсорного элемента должна быть зарезервирована значительная площадь.
- В средней степени температурно чувствительны.
- Заметное потребление мощности.
- Мостовые и дифференциальные резисторы обычно нуждаются в подстройке (лазерной подгонке) на стадии производства.

Гигантские магниторезистивные (ГМР) датчики

Преимущества:

- Бесконтактность.
- Высокая чувствительность.
- Высокий уровень первичного сигнала, помехоустойчивость.
- Возможность включения ГМР-элементов в мостовые или дифференциальные схемы для получения синусно-косинусных выходных сигналов (вычисления арктангенса и линеаризации) и уменьшения температурных дрейфов.
- Высокое разрешение (зависит от обрабатываемой электроники).
- Малое энергопотребление.
- Возможность высокотемпературной работы (–40...170 °С и выше — до 225 °С).
- Высокая температурная стабильность.
- Устойчивость к влажности и загрязнениям.
- Низкая цена.
- Технологичность.
- Доступны датчики в интегральном исполнении.
- Возможность создания полностью интегральных программируемых датчиков.
- Малый размер, самые высокие показатели миниатюрности.
- Малые и слабые магниты, высокоплотные многополосные кольцевые магниты.

- Большие воздушные зазоры между ИС и магнитом.
- Возможность регулировки чувствительности методами пассивного усиления с различными ферромагнитными концентраторами и экранами.
- Широкий разброс допусков монтажа, отрицательные эффекты вариаций воздушных зазоров между датчиком и магнитом незначительны.
- Во многих случаях схемотехнические приемы обработки сигнала не требуются (например, для усиления).
- Имеется элементная база специальных программируемых интерфейсных ASIC, возможность программирования датчика в процессе или после сборки.
- Чувствительны только к параллельному полю (направлению) и нечувствительны к его величине в диапазоне 360°, что допускает эффективные угловые измерения с приколотой спин-клапанной структурой и синусно-косинусными функциями и функцией арктангенса в диапазоне 360° и удвоение разрешения для энкодеров.
- Механический угловой диапазон с кольцевым дипольным магнитом 360°.
- Возможность линейных измерений.
- Возможность абсолютных измерений.
- Возможность градиентных измерений в схеме с зубчатым ротором или многополосным кольцевым магнитом со специальной элементной базой, возможность построения энкодеров со специальными типами многополосных магнитов.
- Сандвичные и мультислойные ГМР, а также в ряде случаев спин-клапаны не подвержены влиянию сильных полей и обратному разрушению.
- Отсутствие флиппинга.

Недостатки:

- Нелинейность базовых рабочих характеристик сопротивления.
- Неуникальность зависимости сопротивления от поля (чувствительны только к направлению, но не величине).
- Современные датчики не на основе одной ИС — во многих случаях требуется внешняя интерфейсная ASIC (обработчик сигнала моста).
- Заметный гистерезис в материале.
- Приколотые спин-клапанные структуры некоторых производителей могут быть подвержены влиянию сильных полей и необратимому разрушению.
- Чувствительны к шумам от сильных внешних магнитных полей.
- Заметный высокочастотный и термический шум, рабочая частота до 10 кГц.
- Высокая цена высокоплотных многополосных кольцевых магнитов.
- Многополосные магниты и зубчатые роторы допускают либо инкрементальные измерения, либо детектирование одного уникального положения.

- При измерении слабых полей должны применяться специальные схемотехнические приемы.
- Для интегрирования чувствительного элемента в ИС должны быть зарезервированы большие области.
- Мостовые и дифференциальные резисторы обычно нуждаются в подстройке (лазерной подгонке) на стадии производства.

Индуктивные датчики

Общие признаки

Преимущества:

- Бесконтактность.
- Значительные физические зазоры между подвижной и неподвижной частями.
- Высокая надежность.
- Прочность.
- Долгий срок службы.
- Высокая долговременная стабильность.
- Отсутствие старения датчика.
- Высокий динамический диапазон, помехоустойчивость.
- Большое число возможных рабочих конфигураций и технологий для детектирования различных диапазонов линейного и углового положения.
- Одни из лучших решений для детектирования линейного положения.
- Угловые диапазоны до 360°.
- Возможность монтажа на торце вала.
- Возможность криволинейных измерений.
- Абсолютные измерения.
- Высокая точность.
- Высокая линейность выходной характеристики датчика (зависит от конфигурации).
- Неограниченная разрешающая способность (зависит от обрабатываемой электроники).
- Высокая повторяемость.
- Широкий рабочий температурный диапазон, до 200...500 °С.
- Нечувствительны к загрязнениям.
- Возможность работы от постоянного тока и получения аналогового (или цифрового) выходного сигнала постоянного напряжения (за счет выпрямления и демодуляции выходной характеристики).
- Возможность использования дифференциальных и мостовых (и более сложных многоканальных) схем, позволяющих повысить чувствительность, минимизировать температурные эффекты и разброс допусков.
- Широкий частотный диапазон, лучшие результаты во многих конфигурациях при высокочастотной работе.
- Сниженное потребление мощности (зависит от числа каналов).
- Достаточная электромагнитная совместимость.
- Малый или сниженный гистерезис.
- Низкая или средняя цена.
- Возможность реализации модульных исполнений.

- Возможность встраивания интеллектуальных функций, программирования диапазона, ограничивающих уровней, чувствительности.
- Возможность интегрирования датчика в систему.
- Недостатки:**
 - Неинтегральные технологии.
 - Достаточно сложная структура сенсорного элемента в виде одной или нескольких обмоток.
 - Требуют электронных схем питания и формирования сигнала, работающих на переменном токе.
 - Сложность многих (особенно угловых) конструкций, высокий профиль и высокая цена.
 - Подверженность электромагнитным полям.
 - Чувствительность к проникновению воды проводящих сред и корродирующих металлов веществ.
 - Для достижения лучших результатов требуется большее число сенсорных обмоток (каналов).
 - Многие эффективные технологии — интеллектуальная собственность их разработчиков.
- Линейные и угловые дифференциальные трансформаторы LVDT и RVDT*
- Преимущества:**
 - Высокая степень герметичности, полное отсутствие трения.
 - Высокая надежность.
 - Нечувствительность к загрязнениям, ударам, вибрации, влажности и соляному туману.
 - Независимость выходной характеристики от скорости перемещения сердечника.
 - Ферромагнитные материалы целей.
 - Широкий частотный диапазон напряжения питания.
 - Абсолютные измерения.
 - Возможность получения уникального дифференциального выхода при изменении положения в пределах рабочего хода с функцией направления (после выпрямления и демодуляции).
 - Независимость параметров датчика в дифференциальной схеме от окружающей среды, осевых и радиальных биений подвижного элемента — сердечника, механической вибрации, возбуждающей частоты.
 - Возможность использования в дифференциальной схеме более высокоточного пропорционального метода.
 - Высокая базовая линейность LVDT (0,25%) и RVDT (0,5–1%) в малых угловых диапазонах.
 - С цифровой компенсацией достигаются значения нелинейности порядка 0,05%.
 - Высокая повторяемость.
 - Высокая точность.
 - Установка нуля и удаление смещения выполняются в процессе производства, дополнительная повторная и периодическая калибровка не требуется.
 - Простота конструкции и крепления LVDT.
- Малый выходной импеданс (полное сопротивление).
- Малый гистерезис.
- Малое время срабатывания, ограниченное только инерцией сердечника и схемой обработки сигнала.
- Очень высокие рабочие температуры (от криогенных до порядка 500 °C) LVDT и RVDT, работающих на переменном токе (без встраиваемой электроники обработки сигнала).
- LVDT и RVDT без встроенной электроники не подвержены необратимому разрушению при выходе за рабочие пределы.
- LVDT и RVDT со встроенными электронными схемами для питания, формирования и обработки сигнала с усилением обеспечивают высокий уровень выходного сигнала, лучшую помехоустойчивость, удобное сопряжение с системными интерфейсами.
- Возможность встраивания интеллектуальных функций, создания программируемых датчиков на основе встраиваемых недорогих микроконтроллеров и EEPROM.
- Возможность реализации модульного принципа для снижения цены, сборки в условиях автоматизированного производства и быстрой адаптации к клиентским требованиям.
- Недостатки:**
 - Питание первичной обмотки от переменного напряжения (тока) требует специальной схемы.
 - Выходные сигналы вторичных обмоток — переменное напряжение, требующее выпрямления и демодуляции.
 - В некоторых схемах для подключения дистанционной электроники используется большое число (до 6) интерфейсных проводов.
 - Неуникальность первичных выходов напряжения обмоток.
 - Имеется некоторый температурный коэффициент, различный для металлических частей и электроники.
 - Механически избыточные конструкции.
 - Сложность конструкции, высокий профиль и высокая цена RVDT.
 - Малые измерительные диапазоны RVDT, максимум до 120° (±60°).
 - Более высокая нелинейность RVDT.
 - Лучшие результаты — при детектировании линейного положения, может потребоваться преобразование углового перемещения в линейное.
 - Значительная длина LVDT, фактически используется только половина или 2/3 длины, и также заметно ухудшается точность при несогласовании длины рабочего хода.
 - Высокая материалоемкость, невысокая технологичность на ранних этапах разработки, расчета, настройки, необходимость индивидуальной калибровки ряда прецизионных изделий.
 - Прецизионные дифференциальные трансформаторы дорогие.
- При увеличении детектируемого рабочего хода (обычные диапазоны 0,01–250 мм) стоимость LVDT повышается.
- Линейные и угловые датчики переменного магнитосопротивления LVRT (полумостовые LVDT) и RVRT*
- Преимущества:**
 - Конструктивно проще и дешевле LVDT и RVDT.
 - Механическая избыточность конструкций снижена.
 - В дифференциальных схемах повышается чувствительность и минимизируются отрицательные эффекты влияния допусков и окружающих факторов.
 - Ферромагнитные материалы целей.
- Недостатки:**
 - Меньший уровень первичного выходного сигнала.
 - Обычно требуют встроенной обрабатывающей электроники.
 - Амплитуда первичного выходного сигнала зависит от возбуждающей силы тока, частоты и скорости перемещения сердечника.
 - Механически несколько избыточные конструкции.
 - Повышенная материалоемкость, невысокая технологичность на ранних этапах разработки, расчета, настройки, необходимость индивидуальной калибровки прецизионных датчиков.
 - LVRT предназначены в основном для детектирования диапазонов 0,01–10 мм.
 - RVRT позволяют детектировать наименьший угловой диапазон (20–40°).
- Высокочастотные преобразователи переменного импеданса на основе вихревых токов LVIT и RVIT, LCIT (общие признаки устройств, включая датчики с кольцом закорачивания, планарные ВЧ-датчики)*
- Преимущества:**
 - Конструктивно проще, технологичнее, дешевле LVDT и RVDT, LVRT и RVRT.
 - Высокое разрешение (зависит от схемы обработки).
 - Возможность линейных и угловых измерений (до 360° с планарными датчиками).
 - Самые различные диапазоны детектирования линейных датчиков, возможные линейные диапазоны LVIT — до 1м.
 - Оптимально используемая длина и компактная геометрия датчиков, уменьшенные геометрические размеры.
 - Наименьший профиль планарных датчиков по сравнению с другими технологиями.
 - Небольшая достаточная толщина цели (1 мм).
 - Широкий диапазон рабочих частот.
 - Отсутствие гистерезиса и нелинейности в неферромагнитных материалах целей.
 - В качестве целей допускается использование и ферромагнитных материалов.
- Недостатки:**
 - Малое число рабочих режимов и узкий измерительный диапазон с одной объемной сенсорной обмоткой.

- Сложная и нелинейная зависимость амплитуды выходного сигнала от перемещения цели, свойств обмотки и объединения обмотка-цель, рабочей частоты.
 - Детектируемая амплитуда зависит от уровня мощности первичного сигнала.
 - Сильная зависимость амплитуды от расстояния (зазора) между обмоткой и целью.
 - Рекомендуются цели большого диаметра.
 - Специальные неферромагнитные материалы целей.
 - Высокая материалоемкость, невысокая технологичность на ранних этапах разработки, расчета, настройки, необходимость индивидуальной калибровки прецизионных изделий на основе объемной обмотки.
 - Повышенная чувствительность к влиянию вибрации и температуры на механические свойства системы.
 - Компромисс между работой в большом измерительном диапазоне или с высокой разрешающей способностью (зависит от схемы обработки).
 - Наилучшие результаты — при высокочастотной работе (порядка нескольких МГц).
 - Подвержены электромагнитным помехам.
- Планарные ВЧ-датчики**
- Преимущества:**
- Высокий технологический уровень.
 - Компактная сенсорная структура планарного элемента, наиболее дешевые и технологичные обмотки на основе нескольких витков.
 - Разработаны специальные методы снятия сигнала с использованием множественных сенсорных обмоток для минимизации допусков и температурных эффектов.
 - Возможность реализации модульного принципа для разработки и сборки датчика.
 - Широкий разброс допусков рабочего воздушного зазора.
 - Возможность интегрирования на печатной плате датчика множественных толсто пленочных обмоток, ВЧ схем питания и формирования сигнала, интерфейсных ASIC.
 - Готовый выход датчика (аналоговый, ШИМ, энкодерный).
 - Возможность встраивания схем защиты и интеллектуальных функций, программирования формата и параметров выходных характеристик — чувствительности и других.
 - Разработаны специальные типы недорогих роторов для планарных датчиков.
 - Низкая цена компонентов и материалов.
 - Индуктивные датчики с планарными обмотками поддерживают механический угловой диапазон 360° и более; возможен функциональный диапазон в пределах полного механического угла.
 - Возможность монтажа на торце вала.
 - Планарные линейные датчики позволяют детектировать большие линейные диапазоны (до 1 м).
 - Возможность криволинейных измерений со специальной геометрией обмоток.
 - Повышенная помехоустойчивость и высокая степень нечувствительности к допускам сборки и монтажа многоканальных планарных многообмоточных датчиков.
 - Планарные технологии позволяют разделять дифференциальный угол закручивания двух валов.
 - Широкий диапазон рабочих температур (–40...150 °С).
 - Малое энергопотребление.
 - Минимальные излучаемые сигналы.
 - Низкий акустический шум.
- Недостатки:**
- Работа в непосредственной близости к объекту.
 - Малые рабочие зазоры.
 - Сложный дизайн сенсорных обмоток.
 - Все наиболее эффективные решения — интеллектуальная собственность их разработчиков.
- Магнитоиндуктивные датчики**
- Преимущества:**
- В случае использования магнита для смещения обмотки — пассивные измерения (в отсутствие питания) — исключается зависимость амплитуды сигнала от возбуждающей частоты и мощности.
 - Большой воздушный зазор и высокий уровень сигнала с подвижным магнитом, активирующим стационарные обмотки.
 - Значительные диапазоны линейного детектирования.
 - Вся длина линейного датчика используется.
 - Возможно детектирование углового диапазона — в пределах 360°.
 - Разнообразные конфигурации, от датчиков скорости и положения зубчатого ротора до датчиков с планарными обмотками и магнитным ротором.
 - Цифровой или аналоговый выход.
- Недостатки:**
- В некоторых конфигурациях — зависимость от скорости перемещения подвижного объекта.
 - Необходимость в интерфейсной ASIC.
 - Многие эффективные решения — интеллектуальная собственность их разработчиков.
- Емкостные датчики**
- Преимущества:**
- Бесконтактность.
 - Значительные физические зазоры между подвижной и неподвижной частями.
 - Простота и компактность конструкций, небольшого размер и вес.
 - Прочность.
 - Долгий срок службы.
 - Высокая долговременная стабильность.
 - Низкая цена.
 - Большое число разнообразных режимов.
 - Простота реализации и различные диапазоны линейных измерений.
 - Угловой диапазон до 360°.
 - Возможность абсолютных измерений.
 - Возможность детектирования крутящего момента (дифференциальных углов закручивания валов).
 - Высокая точность.
 - В некоторых режимах — очень высокая чувствительность к перемещениям (способность детектировать перемещения до 10⁻¹⁴ м).
 - Высокое разрешение на уровне первичных преобразователей (до 5×10⁻¹⁸ Ф).
 - Малая инерционность измерений.
 - Малое время срабатывания.
 - Отсутствие гистерезиса.
 - Практически полное отсутствие сигнальных шумов.
 - Низкий акустический шум.
 - Малое энергопотребление и отсутствие потерь мощности вследствие самонагрева.
 - Температурная стабильность, широкий температурный диапазон.
 - С дистанционной электроникой подходят для высокотемпературной работы (до 250 или 500 °С).
 - Широкий рабочий частотный диапазон, высокочастотная работа.
 - Значительная устойчивость к изменению давления.
 - Возможность функционирования некоторых типов датчиков с дистанционной электроникой в масле, любой другой смазочной или тормозной жидкости.
 - Нечувствительность к статическим магнитным полям.
 - Способность детектировать цели из практически любых, в том числе и диэлектрических, материалов: металла, резины, пластмассы, составных материалов, а также жидкости и газы.
 - Отсутствие требований калибровки для различных металлов.
 - Для большинства типов датчиков регулировка смещения и усиления не требуется.
 - Простота линеаризации за счет выбора линейного параметра (емкости или импеданса) или в дифференциальной или полудифференциальной схеме при измерении соотношения параметров.
 - В дифференциальной (полудифференциальной) схеме увеличивается чувствительность, амплитуда, улучшается линейность сигнала, проще обеспечивается экранирование, уменьшаются эффекты влияния температуры и изменений в диэлектрической проницаемости вследствие влажности и (или) давления.
 - Возможности, достижимые с массивами обкладок: повышение чувствительности, точности, минимизация допусков, построение энкодеров (зависит от задачи и режима).
 - Возможность реализации модульного принципа.
 - Возможность выполнения обкладок на основе планарной толсто пленочной технологии и интегрирования на печатной плате обкладки и ASIC.

- Наличие элементной базы недорогих интерфейсных ASIC для преобразования емкости или импеданса в любой выходной формат (аналоговый или цифровой).
- Готовый выход датчика (аналоговый, ШИМ, энкодерный).
- Возможность встраивания схем питания и интеллектуальных функций, программирования формата и параметров выходных характеристик — чувствительности и ограничивающих уровней.

Недостатки:

- Подверженность интерферирующим электромагнитным помехам.
- Чувствительность к присутствию проводящих сред, изменяющих диэлектрическую проницаемость.
- Некоторая чувствительность к влажности и загрязнениям — жидкостям и пыли.
- Необходимость в специальной схеме питания электродов (на переменном токе).
- Необходимость схемы обработки сигнала с высоким входным импедансом.
- Существует компромисс между чувствительностью и диапазоном полной шкалы.
- Повышенная чувствительность к расстоянию между обкладками, допускам и наклонам.
- Повышенная чувствительность к паразитной емкостной связи тыльных сторон обкладок, необходимость экранирования.

Оптические датчики

Преимущества:

- Бесконтактность.
- Высокий уровень развития оптической технологии.
- Высокая точность, более высокоточные, чем многие электрические измерители.
- Высокая разрешающая способность (достигает 25 бит и долей мкм).
- Высокая надежность и стабильность в рабочем диапазоне при соответствующих условиях.
- Способность предоставлять информацию в цифровой форме.
- Устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам.
- Возможность одновременного измерения скорости и положения.
- Возможность интерполяции аналогового сигнала фотодиода схемой с внешним АЦП для повышения разрешения.
- Необходимость малого числа измерительных компонентов.
- Доступность элементной базы недорогих оптопрерывателей и рефлекторов с лазерными светодиодами и готовым импульсным фототранзисторным или фотодиодным выходом или дискретных компонентов.
- Большой диапазон рабочих расстояний, в большей степени для оптопрерывателей.
- Оптопрерыватели менее чувствительны к вибрации за счет встраиваемого цифрового гистерезиса.

- Возможность дублирования светодиодов и фототранзисторов для повышения надежности.
 - Абсолютные или относительные угловые измерения в диапазоне 360°.
 - Доступность готовых компонентов для энкодеров — оптических дисков, линеек, коллиматоров, недорогих светодиодных и фотодетекторных, опто-ASIC.
 - Некоторые компоненты работают при температурах до 125 °С.
 - Высокий уровень технологий производства оптических кодовых дисков и линеек.
 - Высокий уровень элементной базы фотоэлектрических детекторов — от одномерных черно-белых массивов до цветных датчиков — камер со встроенными линзами.
 - Возможность реализации модульных исполнений энкодеров и эксплуатации в ограниченном пространстве.
 - Инкрементальные энкодеры — наименее дорогие устройства.
 - Удвоение разрешения в двухканальных инкрементальных энкодерах.
 - Возможность нанесения специальной индексной инкрементальной отметки на оптическом диске.
 - Разработаны технологии программного обучения нулевому (индексному) положению.
 - Новые технологии позволяют программировать разрешение инкрементальных энкодеров и ширину нулевого импульса.
 - Абсолютный энкодер не нуждается в переключателе нулевого положения, абсолютные измерения более устойчивы к шумам.
 - Возможность применения различных кодов и различной разрядности для повышения надежности и регулирования разрешения абсолютного энкодера.
 - Ввиду отсутствия необходимости в высокоразрешающих оптических дисках цена абсолютных энкодеров для автоэлектроники сравнительно невысокая.
 - Возможность абсолютных угловых измерений в диапазоне более 360° и преобразования линейного движения в угловое с цепочкой редукторов и несколькими оптическими дисками.
 - Разработаны недорогие интерферометрические инкрементальные и абсолютные энкодеры для линейных и угловых измерений.
 - По мере развития технологий ASIC цена энкодеров снижается.
- #### **Недостатки:**
- Значительная чувствительность к загрязнениям, подходят только уплотненные исполнения устройства.
 - Чувствительность к повышенной температуре, ограниченный рабочий диапазон температур (обычно не более 80 °С).
 - Если необходим аналоговый выход, требуется ASIC с ЦАП.
 - Компромисс между пространственным разрешением и надежностью срабатывания датчика.

- Необходимость учета коэффициента передачи тока, в большей степени для рефлективных датчиков (зависит от свойств поверхности, расстояния — возможное увеличение потребления мощности — и других факторов, влияющих на силу отраженного света).
- Относительно низкая скорость переключения фототранзистора.
- Чувствительность к вибрации, в большей степени для рефлективных датчиков.
- Высокая вероятность отказов в нерезервируемой системе.
- Для рефлективных датчиков важно использовать только рабочий диапазон расстояний — оптимальное фокусное расстояние и допуски.
- Инкрементальные энкодеры чувствительны к подаче питания — при сбое в подаче или отключении питания счет будет потерян.
- Более высокая цена абсолютных энкодеров.
- Более высокая цена прецизионных высокоразрешающих оптических энкодеров в сравнении с многими другими устройствами.
- Проблемы линейных измерений — компромисс между длиной энкодерной линейки линейного абсолютного энкодера с обычным кодированием и разрешением, значительная длина абсолютной линейки в пределах полного рабочего хода устройства и высокая цена.
- Многие передовые технологические решения — интеллектуальная собственность их разработчиков.
- Повышенная чувствительность оптических дисков и линеек к ударам.
- Часто нуждаются в подстройке потенциометром для компенсации производственных допусков.
- Для компенсации старения светодиода в абсолютных энкодерах на основе пикселей может потребоваться периодическая калибровка.
- Оптимальные результаты работы любых оптических устройств — только в системах с менее жестким режимом температур, механических воздействий и загрязнений.

Магнитостриктивные датчики

Преимущества:

- Бесконтактность.
- Высокий уровень развития технологии.
- Возможность детектирования значительных линейных перемещений (1–3 м).
- Возможность детектирования угловых диапазонов в пределах 360° и многооборотных перемещений.
- Возможность комбинирования измерений обоих видов движения — линейного и углового — одним датчиком.
- Наилучшие результаты в сравнении с другими технологиями для детектирования криволинейных перемещений.

- Малые размеры цели.
- Значительный зазор между целью и волноводом.
- Абсолютные измерения.
- Высокие уровни и малые потери рабочего сигнала.
- Достаточная электромагнитная совместимость, помехоустойчивость, устойчивость к интерференции сигнала и рассеянию на соседние объекты.
- Высокая точность.
- Высокое разрешение без компромисса с диапазоном (зависит от обрабатываемой электроники).
- Высокая линейность.
- Малый гистерезис.
- Высокая повторяемость.
- Поддержка различных типов выходных интерфейсов — от аналогового до энкодерного.
- Возможен простой цифровой выход импульсов «старт — стоп».
- Возможность уменьшения числа проводных соединений.
- Высокая скорость работы.
- Возможность интегрирования в сенсорный блок интеллектуальных функций и программирования измерительного диапазона, механического нулевого положения, смещения, чувствительности.
- Возможность дистанционного размещения системного микроконтроллера или встраивания микроконтроллера в измерительный блок датчика.
- Возможность одновременного измерения скорости и положения.
- Возможность детектирования крутящего момента единственного вала из магнитостриктивного (ферромагнитного) материала (не двух дифференциальных валов).
- Высокая надежность.
- Неограниченный срок службы.
- Высокая долговременная стабильность, нечувствительность к старению, магнитострикция — свойство, которое не меняется со временем.
- Нечувствительны к влажности и загрязнениям (кроме электроники).
- Высокая температурная стабильность при условии компенсации.
- Для компенсации температурного расширения может эффективно использоваться встроенный в датчик термистор.
- Повторная и периодическая калибровка для ферромагнитного волновода не требуется.
- Значительная нечувствительность волновода к радиальным допускам, биениям, изгибающим и крутящим моментам на стадии производства и монтажа датчика.
- Снижение цены по мере развития технологии.
- Возможность модульного исполнения датчика.
- Возможность полного интегрирования — встраивания датчика в детектируемую систему.

Недостатки:

- Значительная длина волновода и только магнитостриктивные материалы волновода датчика.
- Менее эффективная работа и более высокая цена датчиков короткого диапазона (до 150 мм).
- Магнитостриктивный эффект зависит от свойств и способов обработки материала, и от напряженности поля, что требует расчета и калибровки.
- Неинтегральная технология.
- Необходимость в схеме обработки и интерфейсных ASIC.
- Необходимость обязательного использования внешнего или встроенного микроконтроллера для формирования сигнала.
- Относительно высокая цена датчика по сравнению с устройствами на основе многих других технологий.
- Многие эффективные решения — интеллектуальная собственность их разработчиков.
- Чувствительность металлического волновода к температурному расширению, рабочий температурный диапазон несколько ограничен.
- В реальных условиях эксплуатации датчик чувствителен к крутящим моментам волновода.

Каждая из рассмотренных технологий характеризуется значительными преимуществами, которые могут быть полезны для систем автоэлектроники. Однако некоторые технологии отличаются по крайней мере одним существенным недостатком, и его надо учитывать и компенсировать при разработке или применении датчика.

Прежде всего это относится к таким неинтегральным технологиям, как потенциометры (контактный принцип), емкостные (чувствительность к влажности и загрязнению, необходимость в ВЧ-схеме питания) и оптические технологии (чувствительность к загрязнениям и температуре, цена дисков). Индуктивные и магнитостриктивные устройства, помимо требований специальных схем для питания или формирования передаваемого рабочего сигнала, не имеют существенных недостатков, характеризуются высокой надежностью, но отличаются или повышенной сложностью, или ценой, при этом для разработчиков немаловажно, что многие наиболее эффективные технологические решения запатентованы.

Технологии наиболее высокого, интегрального уровня, представленные интегральными магнитоуправляемыми датчиками Холла, АМР и ГМР, также не имеют существенных недостатков и предоставляют инженерам возможность разрабатывать новые автомобильные датчики с минимальным числом механических и схемных компонентов, используемых для измерений. В последние 10–15 лет интенсивно разрабатывались магнитоуправ-

ляемые датчики, и сегодня, ввиду новизны многих актуальных предложений элементной базы, именно в этой сфере существует самое обширное поле деятельности для инженеров.

Магнитоуправляемые датчики используют для измерений постоянные магниты, жестко связанные с детектируемым объектом, абсолютное положение которого определяется по изменению в амплитуде магнитного поля при движении магнита относительно датчика. Магнитоуправляемые датчики показывают наилучшие результаты в угловых измерениях, но многие из разработанных ранее решений характеризовались ограничениями точности, углового диапазона и повышенной температурной чувствительностью.

Так, типичными признаками классических датчиков Холла являются:

- механический и электрический угловой диапазон в пределах 180°;
- эффективный электрический угол 90–120°;
- функциональный диапазон 80–90°;
- повышенная чувствительность к температуре датчика и магнита;
- нелинейность 2% (вследствие угловых ограничений) и 3% в полном диапазоне (вследствие повышенной температурной чувствительности);
- повышенная чувствительность к магнитным и механическим допускам.

Все эти недостатки ограничивают дальнейшее обновление элементной базы классических датчиков Холла. Так, в начале 2006 года компания Infineon анонсировала разработку новой 12-битной ИС TLE4997, а затем приостановила ее производство. Тем не менее, обновление элементной базы происходит, поскольку этот тип датчиков Холла широко используется для детектирования ограниченного углового диапазона и в других задачах — например, для бесконтактного измерения тока. Оптимальными решениями (с учетом изложенных выше ограничений) для датчиков положения дроссельной заслонки, педали и других подобных устройств среди коммерчески доступных ИС датчиков классического типа по-прежнему остаются программируемые ИС семейства HAL8xx Micronas Intermetall с АЦП-ЦОС и EEPROM. Рабочий температурный диапазон практически всех автомобильных датчиков Холла, в том числе и датчиков Micronas, составляет –40...150 °С.

Новейший член семейства программируемых датчиков Micronas — ИС HAL 18ху (рис. 92) — недорогой универсальный датчик Холла, созданный на основе КМОП-технологии и поддерживающий различные выходные форматы (трехпроводной выход с открытым стоком или ШИМ). В ИС реализована техника Spinning current chopped offset compensation для компенсации смещения. В EEPROM программируются диапазон, чувствительность, смещение и период ШИМ, уровни тока, температурный коэффициент, клиентский 32-битный идентификационный

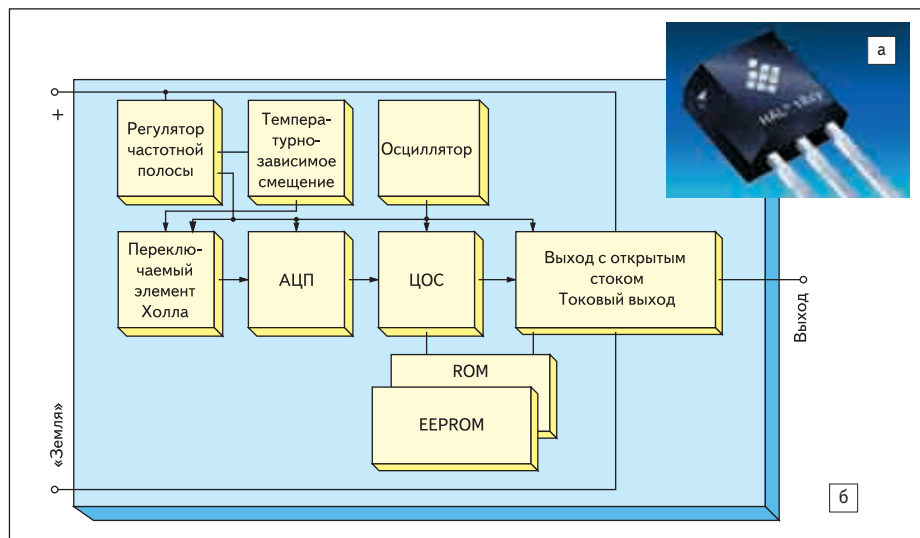


Рис. 92. Программируемый датчик на основе эффекта Холла ИС HAL 18xy Micronas — пример обновления элементной базы датчиков положения классического типа:
а — внешний вид;
б — функциональная диаграмма

номер. Процедура двухточечной калибровки для адаптации к рабочим условиям и компенсации допусков выполняется аналогично другим датчикам Micronas, как пояснялось в части 2 статьи (КиТ № 3'2005).

Типичные признаки стандартных AMP-датчиков:

- механический угловой диапазон 180° или 360°;
- электрический угловой диапазон в пределах 90° (стандартные измерения с одним мостом, функциональный диапазон при этом не превышает и 45°) или 180° (двухмостовая схема псевдоэффекта Холла), вычисление угла с использованием CORDIC-алгоритма и функции арктангенса;
- некоторое начальное смещение и несимметричность моста, температурные дрейфы этих параметров;
- повышенная чувствительность к температуре индивидуальных мостовых резисторов датчика и магнита, устраняемая при вычислении функции арктангенса;
- малая чувствительность к магнитным и механическим допускам вследствие синусно-косинусных измерений;
- высокая точность синусно-косинусных вычислений угла с функцией арктангенса, зависящая от выравнивания датчика и типа обработчика сигнала.

Современные представители элементной базы AMP-датчиков — это HMC1501/HMC1512 Honeywell (углы 90° и 180° соответственно), KMZ41/43T Philips (180°), ZMT31 Zetex, KMT31 HLPlanartechnik (180°). Как видно, стандартные решения почти полностью переместились от одномостовых AMP-датчиков к двухмостовым, позволяющим детектировать функциональный диапазон в пределах механического угла 180° и значительно повысить измерительную точность

датчика и минимизировать влияние температуры и допусков благодаря синусно-косинусным измерениям соотношения сигналов и вычисления арктангенса. Компенсация смещения мостов максимально выполняется на стадии производства датчиков, дальнейшая калибровка и компенсация смещения и температуры в режиме реального времени осуществляется с применением специальных мостовых ASIC.

В последние годы было разработано несколько новых решений для определения угла вращающегося магнита в диапазоне до 360° с более высокой точностью (0,05–2°) и устранением температурного влияния. Новые методы в основном используют синусно-косинусное оценивание магнитного поля, сгенерированного магнитом, вращающимся во фронте ИС, как в конфигурации AMP. HLPlanartechnik разработала одно из таких решений — уникальный AMP-датчик KMR 360, включающий три моста Уитстона с механическим фазовым смещением углового расположения в 120°, предназначенный для детектирования углов в диапазоне до 360°. Типичное для достижения эффекта AMP с интегральными датчиками магнитное поле напряженностью более 25 кА/м, вращающееся в плане датчика, будет образовывать три синусоидальных сигнала с фазовым смещением в 60°, что позволяет производить угловое оценивание методом линейной интерполяции или с применением CORDIC-алгоритма — для большей точности. KMR360 также включает планарную обмотку для генерирования дополнительного магнитного поля с целью его применения при детектировании диапазона до 360°.

В отличие от датчиков Холла классического типа, среди стандартных AMP-датчиков не существует полностью интегральных програм-

мируемых ИС ввиду большой площади, занимаемой чувствительными элементами. Для цифровой обработки синусно-косинусных сигналов и получения аналогового или альтернативного цифрового интерфейса необходим внешний мостовой сигналообработчик с двумя входными каналами и предпочтительно интеллектуальными функциями для программирования диапазона и нулевого положения датчика. Необходимо пояснить, что точность датчика, указываемая в его спецификации (например, для KMZ41 — 0,1–0,25°, согласно спецификации), зависит от его выравнивания в измерительной схеме и от типа обработчика сигнала, включающего средства компенсации смещения и программирования передаточной характеристики. Точность, достижимая, например, у KMZ41 и UZZ9000, в полном диапазоне углов (180°) и температур (до +150 °C) оценивается лучше чем в 1,2° (0,7%).

Новейшим дополнением Philips к линейке датчиков угла является интегральный модуль KMA200 (рис. 93), интегральный корпус которого включает AMP-элемент и ИС со смешиванием сигнала с микроконтроллером и EEPROM.

KMA200 программируется пользователем в EEPROM через SPI-интерфейс. Основные параметры программирования: формат характеристики (аналоговый или SPI), угловой диапазон (до 180°), нулевая точка, ограничивающие уровни и 32-битный идентификатор (полезный для контроля в условиях производства сборки готовых изделий). Рабочий температурный диапазон –40...+160 °C. Угловая ошибка линейности специфицируется в ±1,65°.

KMA200 включает схемы защиты и диагностическую функциональность, основным назначением которой является контроль влияния сбойных условий (потери магнита, окружающей температуры) на выходной сигнал датчика и программный контроль (CRC для EEPROM и RAM, сторожевой таймер).

KMA200 имеет лишь один существенный недостаток — угловой диапазон ограничен 180°, что приемлемо для датчиков положения дросселя и педали, но недостаточно для датчика поворота рулевого колеса.

В настоящее время на пике всеобщего интереса находятся магнитные угловые энкодеры Холла, наиболее популярная измерительная схема для которых представляет собой дипольный магнит, размещенный на торце вала и вращающийся во фронте датчика так, что цилиндрическая ось симметрии магнита совпадает с осью симметрии крестообразного массива интегрированных элементов Холла, а вектор магнитного поля при вращении параллелен поверхности ИС.

Эта схема использует синусно-косинусное оценивание поля и позволяет осуществить вычисление угла в диапазоне 360° с точностью порядка 0,5–1,4° (менее 0,5% полной шкалы) на основе функции арктангенса, устраняя таким образом повышенную чувствитель-

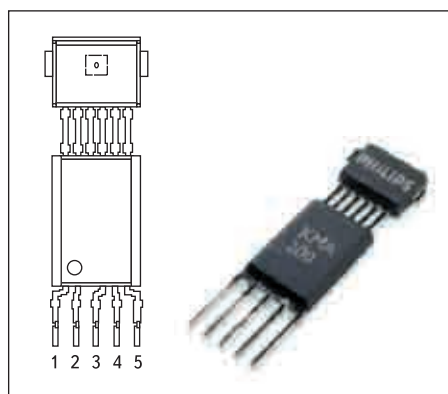


Рис. 93. Программируемый интегральный модуль KMA200 Philips — AMP-датчик угла с микроконтроллером и EEPROM для расчета функции арктангенса, калибровки и компенсации:
а — структура модуля в корпусе SOT637; назначение выводов: 1 — напряжение питания; 2 — вывод ввода/вывода или аналоговый выход 1; 3 — тактирование или аналоговый выход 2; 4 — земля; 5 — вывод для выбора ИС в цепочке

ность датчика Холла к температуре, а также к магнитным и механическим допускам. В данной конфигурации достигаются высокие показатели миниатюрности конструкции (лучшие по сравнению с эффектом AMP), обеспечивается достаточный для изоляции (но меньший, чем с AMP) зазор между магнитом и датчиком. Производителями ИС Холла рекомендованы только специальные магниты, и для того, чтобы достичь оптимальных результатов, эти рекомендации следует соблюдать, а с AMP возможно и варьирование. (Сравнение эффекта Холла и AMP приводится также в [223]).

Новые магнитные угловые энкодеры — полностью интегральные решения. Например, для датчиков положения дросселя и педали такое решение заключено в пространстве одной ИС и включает элементы Холла, средства пассивного (ИМК) и (или) активного усиления, ЦОС с микроконтроллером и EEPROM. Все эти элементы реализованы в новой ИС MLX90316 Melexis и частично или выборочно — в других ИС Холла, подробно рассмотренных в частях 5–7 цикла.

В части 6 цикла показаны примеры бесконтактных конструкций программируемых аналоговых и цифровых датчиков абсолютного углового положения педали и дроссельной заслонки, построенные на основе AS5040 и AS5043 Austriamicrosystems и допускающие альтернативное использование других микросхем, например MLX90316. Датчики способны функционировать в диапазоне механического угла до $\varphi_{\max} = 0 \dots 360^\circ$, который программируется и механически регулируется.

Так, рассматриваемый на протяжении цикла пример конструкции датчика положения дроссельной заслонки функционирует в пределах механического углового значения

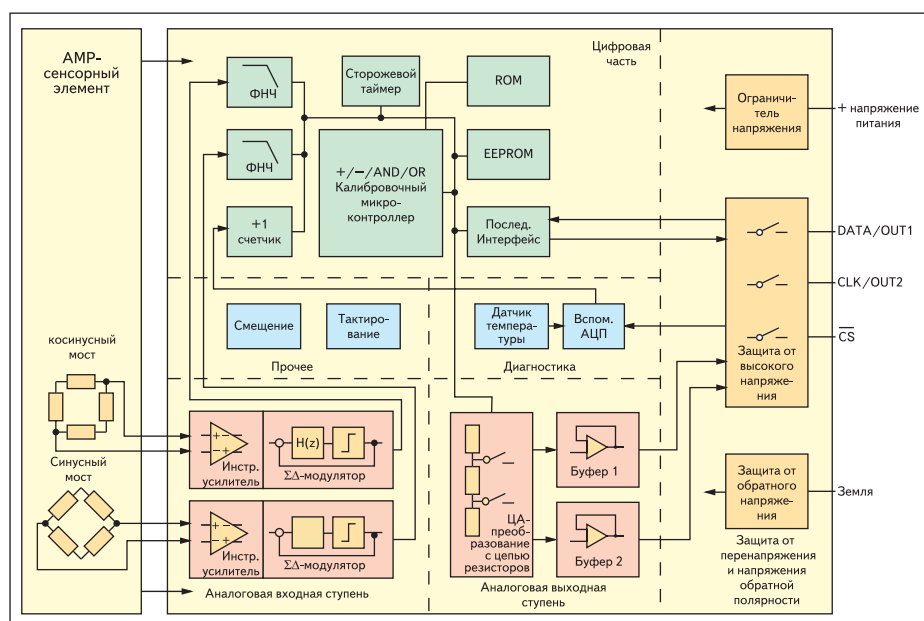


Рис. 93. Программируемый интегральный модуль KMA200 Philips — AMP датчик угла с микроконтроллером и EEPROM для расчета функции арктангенса, калибровки и компенсации:
б — функциональная диаграмма

$\varphi_{\max} = 120^\circ$. Программно заданный эффективный электрический угол φ_{eff} и линейный участок φ_{lin} аналоговой функциональной характеристики датчика с MLX90316 составляют также по 120° , в отличие от классических датчиков Холла, датчиков AMP и энкодеров AS504x Austriamicrosystems, которые, согласно используемым методам их программирования, фактически детектируют угол $\pm 60^\circ$, что несколько осложняет относительное преобразование механических координат измерительной схемы датчика. С MLX90316 возможно детектирование углов как в диапазоне $0 \dots 120^\circ$, так и $\pm 60^\circ$, причем в угловом диапазоне $120^\circ (\pm 60^\circ)$ нелинейность прототипа ИС Холла составляла всего $0,3^\circ$ [224].

Методы программирования, используемые для MLX90316, и высокая рабочая температура ($-40 \dots 150^\circ\text{C}$) позволяют производителям рекомендовать это устройство для встраиваемых систем, например датчиков положения распределительного и коленчатого вала [225].

Преобразуя типичные радиальные и аксиальные конструкции автомобильных датчиков положения и скорости, а также конструкции датчика положения дроссельной заслонки, можно добиться самой высокой степени бесконтактности датчика абсолютного углового положения, при которой не только отсутствует физический контакт между электрической функциональной и неподвижной движущейся частью объекта, но и между ротором и статором датчика.

Бесконтактные программируемые датчики абсолютного углового положения, показанные на рис. 94, состоят из двух основных частей: ротора 1 (сборочной единицы роторного узла, включающей установочную втул-

ку 5 и магнит 3) и статора 2 с измерительной частью датчика, закрепляемого на одном или нескольких винтах. Между ротором и статором существует постоянный воздушный зазор d , являющийся частью функционального зазора D .

Для обеспечения функциональности датчика необходимо создать рабочий зазор D между магнитом 3 и датчиком Холла 7, предписываемый для данной магнитной системы. Такая конструкция также позволяет варьировать магниты с целью повышения рабочих зазоров D и d .

При этом желательно осуществлять программирование датчика через функциональные выводы уже после установки ротора 1 и корпуса датчика 2 поверх вала дросселя 11, но можно минимизировать допуски и за счет совмещения соответствующей маркировки на втулке ротора и корпуса с измерительной частью датчика.

Роторный узел 1 включает жестко установленный диаметрально намагниченный цилиндрический постоянный магнит 3, запрессованный в возможных вариантах исполнения в пластмассовую регулировочную втулку — корпус 4 с пазом 13; сборка магнита 3 с втулкой 4 запрессовывается во вращающуюся установочную втулку 5. Магнит 3 без втулки 4 (который может также снабжаться пазом 13) запрессовывается непосредственно во вращающуюся установочную втулку 5.

Статор 2 датчика включает печатную плату 6, на которой запаяны датчик Холла — двухосевой магнитный угловой энкодер 7 и контакты разъема 8.

Эти же конструкции, которые в исполнении с ИС Холла сейчас находятся на стадии патентования, по мере развития элементной

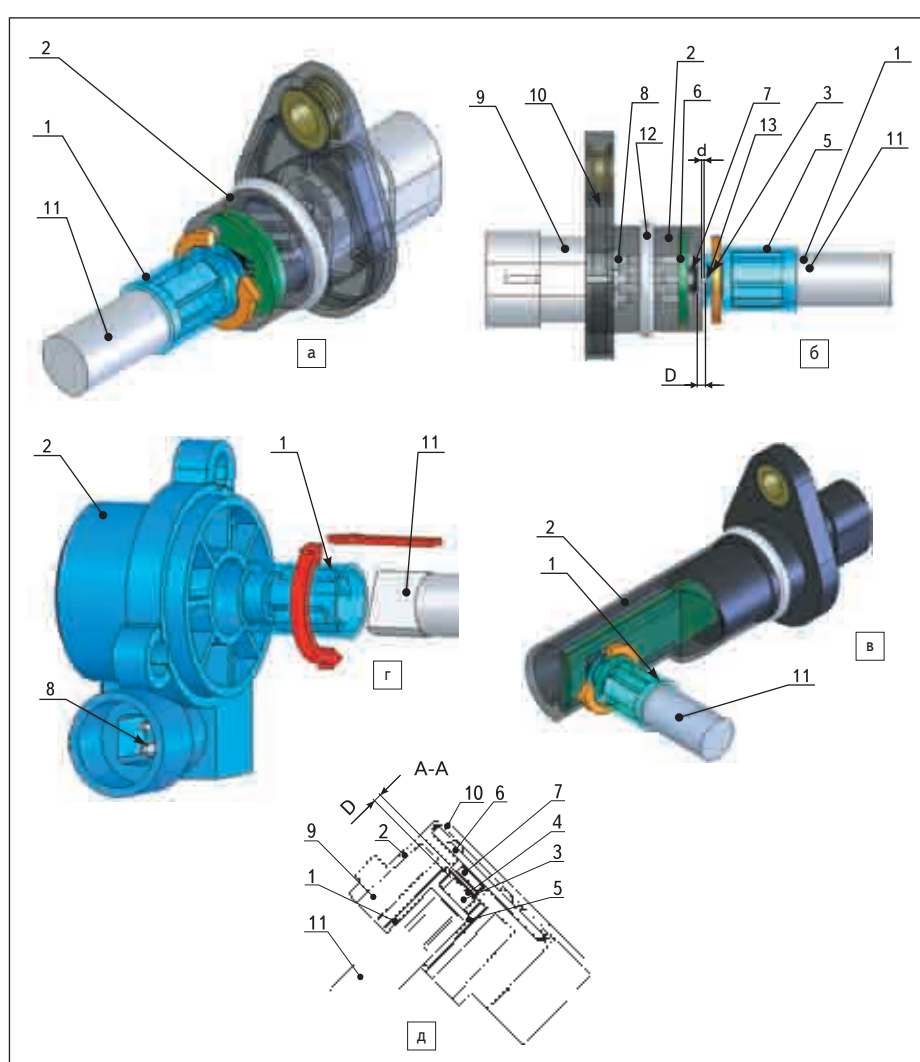


Рис. 94. Бесконтактные программируемые датчики абсолютного углового положения с отсутствием физического контактирования между ротором и статором:
а–в — конструкции встраиваемых исполнений цифровых датчиков положения и скорости;
а, б — аксиальное исполнение;
в — радиальное исполнение;
г, д — конструкция датчика положения дроссельной заслонки: 1 — ротор (сборочная единица роторного узла);
2 — статор; 3 — магнит;
4 — втулка для защиты и поворота магнита 3 при сборке с пазом 13 (использована в конструкции на рис. 94д);
5 — установочная втулка; 6 — плата датчика; 7 — датчик Холла; 8 — контакты;
9, 10 — нижняя и верхняя части корпуса датчика 2 (корпус и крышка для датчика положения дроссельной заслонки);
11 — дроссельный вал; 12 — уплотнительное кольцо

базы программируемых ASIC вполне могут быть адаптированы и под датчики АМР и ГМР. Оба датчика МР-типов предполагают получение больших воздушных зазоров в той же измерительной конфигурации с дипольным магнитом, вращающимся во фронте ИС, при этом эффект ГМР в приколотой спин-клапанной структуре обеспечивает возможность угловых измерений в диапазоне 360° (не 180°, как большинство АМР-датчиков) и может предоставить наибольшие воздушные зазоры и допуски с наименее слабыми и малыми магнитами. Четыре индивидуальных мостовых резистора с механическим фазовым смещением в 90° или два полумоста, в зависимости от типа датчиков серии AAV NVE, позволяют получить два синусно-косинусных сигнала.

Типичная измерительная ошибка специфицируется в 2°. ГМР-датчики характеризуются высокой температурной стабильностью (температурный диапазон –40...150 °С, но технология допускает и более высокие температуры).

Сегодня недостатком элементной базы угловых датчиков ГМР (AAV NVE) является отсутствие полностью интегральных (одна ИС) программируемых датчиков, с высокой точностью вычисляющих функцию арктангенса методами просмотра таблиц или CORDIC-алгоритма, хотя при определенных вариантах подключения для них могут быть использованы программируемые (в диапазоне 180°) ИС Philips UZZ9000 или UZZ9001. Поскольку в AAV реализован только один мост (не два, как в схеме псевдоэффекта Хол-

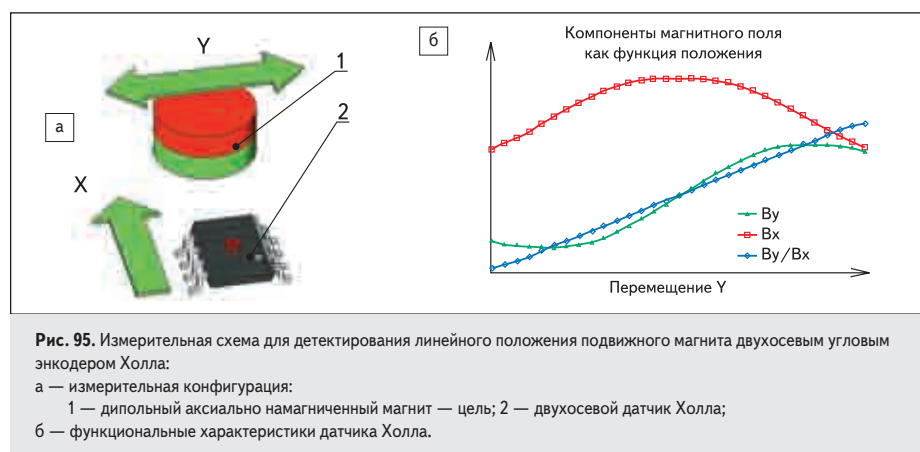
ла АМР-датчиков), могут быть использованы и многие другие неспециализированные сигналообработчики, осуществляющие калибровку, усиление, температурную компенсацию мостовых сигналов, например новая программируемая ASIC MLX90320 Melexis (рабочий диапазон –40...150 °С), и другие, включая упомянутые в 3-й и 4-й части статьи. По мере развития элементной базы на основе эффекта ГМР для ее применения в типичных конструкциях датчика положения и педали появляются большие перспективы.

Магнитные угловые энкодеры Холла подходят не только для измерений абсолютного углового положения дипольного магнита, вращающегося во фронте ИС. Так, в [224] приведен пример применения данного типа датчиков для детектирования линейного положения (рис. 95). Отношение двух выходных синусно-косинусных напряжений прямо пропорционально положению линейно перемещающегося дипольного магнита. Магнит, используемый для этого применения, — цилиндрической формы, но намагниченный не диаметрально, а аксиально. На рис. 95б показаны выходные характеристики датчика при линейном движении магнита вдоль оси Y датчика. Магнит расположен несколько выше датчика, между датчиком и магнитом при этом сохраняется постоянное расстояние по оси X датчика. С магнитом диаметром 6 мм достигается возможность линейных измерений диапазона порядка 14 мм с нелинейностью менее 0,2%.

Большие диапазоны (± 10 мм) также возможны — с большим магнитом ($\varnothing 10$ мм) и при оптимальном подборе расстояния по оси X, что рассчитывается аналитически [224]. (Расчеты основаны на том, что расстояние от центра магнита до нулевого положения соответствует тангенсу угла поля в виде отношения ортогональных компонентов магнитного поля.)

Выше некоторых пределов расстояния поля становятся очень слабыми, что затрудняет измерения. При значительном удалении магнита от датчика поля становятся практически неразличимыми. Небольшие рабочие расстояния — общая проблема всех линейных магнитоуправляемых устройств с дипольными магнитами (начиная от классических датчиков Холла и заканчивая АМР, ГМР, новыми двухосевыми энкодерами), которую удается преодолевать по мере развития технологий. Поскольку в автомобиле востребованы чисто линейные измерения, число разработок бесконтактных линейных датчиков увеличивается. Актуальны любые новые решения и предложения на основе любых эффектов, предоставляющих возможность бесконтактных линейных измерений.

Значительные возможности для решения задач линейного детектирования предлагаются неинтегральными индуктивными и магнитостриктивными технологиями, а также емкостные или даже потенциометрическими и оптическими.



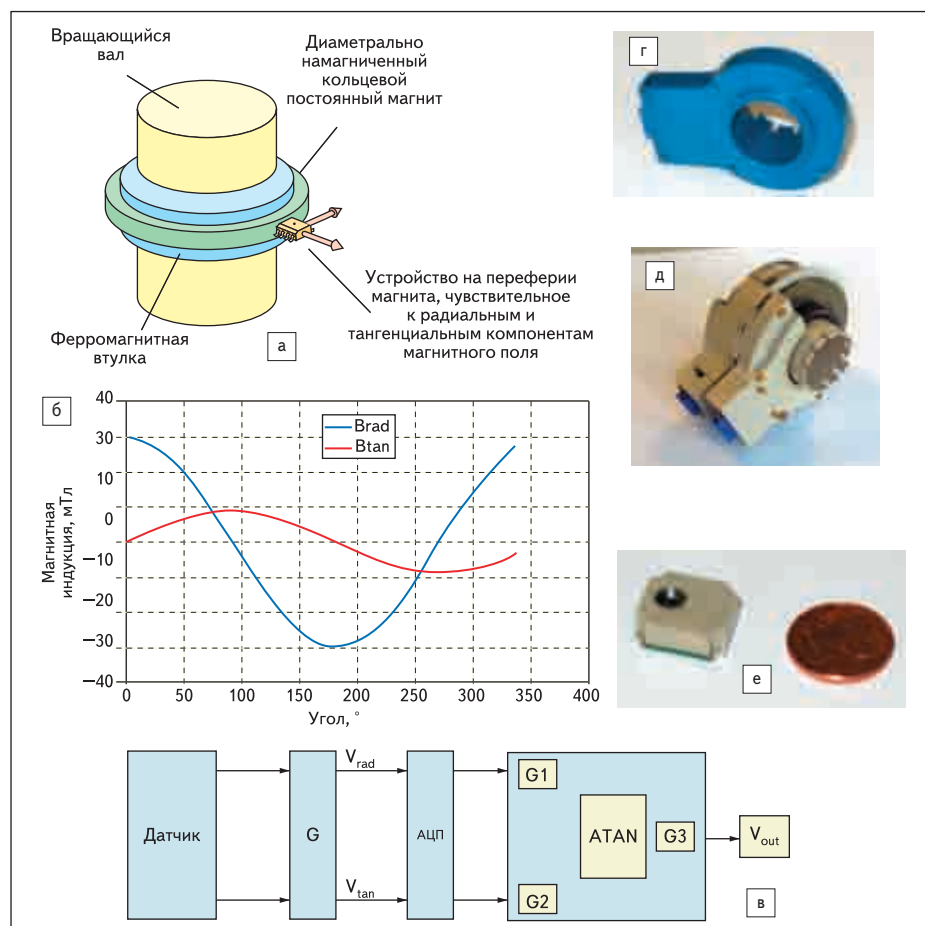
Многие автомобильные применения также требуют использования датчиков с отверстием под вал (through shaft), для которых базовый рабочий режим с вращением дипольного магнита во фронте ИС не подходит. В настоящее время выделяются предложенные и запатентованные компанией «ММТ» инновационные решения на основе вычислений угла вращающегося магнитного поля (рис. 96).

Одно из запатентованных «ММТ» решений для датчиков с отверстием под вал включает кольцевой магнит, намагниченный диаметрально (рис. 96а-в). Магнит жестко связан с валом, либо непосредственно, либо с использованием вспомогательной ферромагнитной втулки. Датчик Холла помещен вблизи от магнита так, что элементы Холла измеряют тангенциальные и либо радиальные, либо аксиальные компоненты магнитного поля, сгенерированного магнитом. Эти компоненты характеризуются синусно-косинусным фазовым смещением в 90° и различными амплитудными значениями. Предварительно откалиброванный блок обработки сигнала позволяет регулировать обе амплитуды и вычислять угол, используя арктангенсные измерения.

«ММТ» разработала датчик углового положения рулевой колонки в диапазоне 360° с ИС MLX90316 Melexis (рис. 96г). Существуют различные возможности для получения практически любых выходных протоколов и клиентской адаптации датчика — например, объединение датчика углового положения с запатентованной «ММТ» технологией определения крутящего момента (рис. 96д) или создания многооборотного датчика с планетарной передачей. Эта технология легко может быть адаптирована для замещения потенциометров, датчиков положения клапанов и других (рис. 96е). Компания «ММТ» разработала решения как для детектирования малых угловых, так и очень больших (до 200 мм) линейных перемещений.

Следующая возможность для детектирования угловых или линейных перемещений — построение инкрементальных магнитных энкодеров, в качестве цели для которых применяется или многополюсный кольцевой, или линейный магнит, или спе-

циальная магнитная пленка (этот вариант значительно дешевле) (рис. 97). Для реализации инкрементальных энкодеров подходят все эффекты — Холла, АМР, ГМР, причем датчики, нечувствительные к знаку поля, допускают удвоенное разрешение по сравнению со знаочувствительными датчиками Холла.



Для энкодеров с магнитным кодовым диском на основе эффекта Холла может быть использована разнообразная элементная база, как это проиллюстрировано рис. 97а, для МР-энкодеров в основном рекомендуется специальная база — например, АМР-модули KMI16/2 Philips и градиометры ABL/AKL NVE (датчики KMZ41/43 и AAV не рекомендованы для этих задач). Элементная база датчиков NVE рассматривалась в части 4 цикла.

На основе АМР-модулей KMI Continental Teves разработала и производит линейку устройств для цифрового детектирования скорости и положения, используемых в различных применениях.

Специально для энкодерных применений (угловых и линейных энкодеров, датчиков движения и положения) Hitachi Metals также разработала новые ГМР-материалы и линейку датчиков, реагирующих на направление по отношению к малым шагам. Компания разработала и линейку датчиков для поверхностного монтажа. Новые материалы Hitachi характеризуются выходом, в три раза большим, чем у АМР-датчиков Hitachi Metals

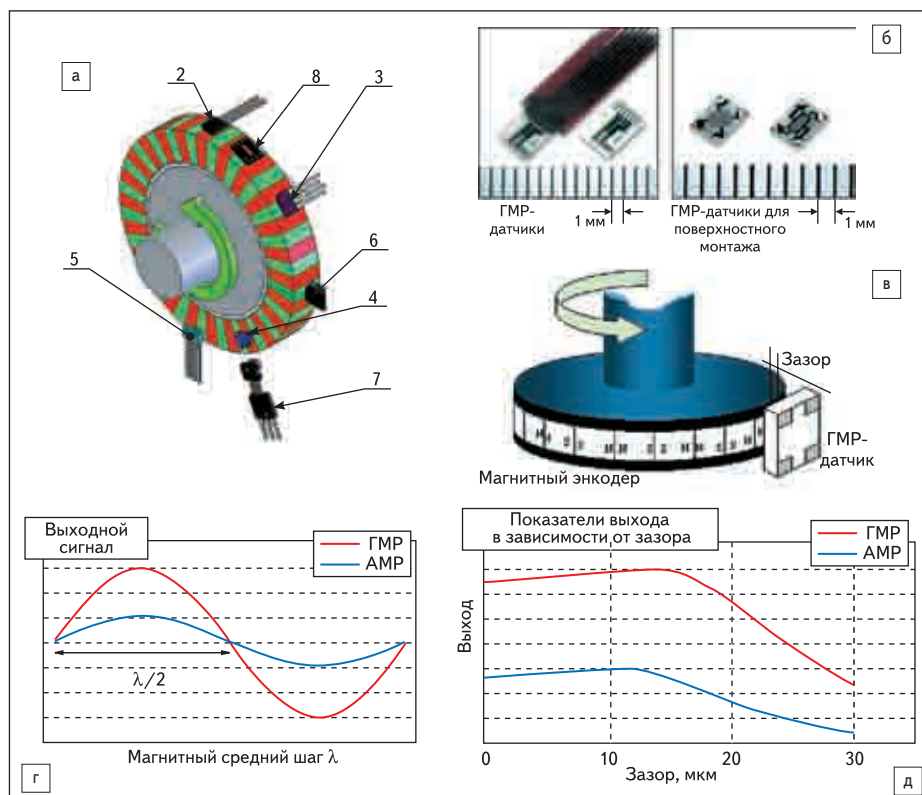


Рис. 97. Датчики для магнитных энкодеров на основе многополюсного кольцевого магнита:

а — магнитоуправляемые датчики для применения в конфигурации углового инкрементального энкодера на основе многополюсного кольцевого магнита;

1 — многополюсный магнитный ротор — цель с валом;

2 — классический датчик Холла с одним элементом (HAL805 Micronas);

3 — динамическая дифференциальная ИС (TLE4921 Infineon);

4 — датчик нулевой скорости HAL300 Micronas, адаптированный к работе в паре с магнитным ротором;

5 — дуальный инкрементальный магнитный энкодер (MLX90224 Melexis);

6 — одноосевой датчик Холла (1SA-IV Sentron) или двухосевой магнитный угловой энкодер (MLX90316);

7 — AMP-датчик KMI16/2 Philips с малым стабилизирующим магнитом, адаптированный для работы в паре с магнитным ротором; 8 — ГМР-датчик — градиометр AKL001-12 NVE;

б — ГМР-датчики Hitachi Metals;

в — внешний вид;

г — конфигурация, рекомендуемая для применения;

д — выходной сигнал ГМР-датчиков Hitachi в сравнении с выходным сигналом датчиков AMP в зависимости от среднего шага многополюсного магнитного ротора;

д — уровень выходного сигнала ГМР-датчиков Hitachi в сравнении с выходным сигналом датчиков AMP в зависимости от зазора между датчиком и магнитом

(рис. 97б–д). Рабочий температурный диапазон этих ГМР-датчиков $-40...120^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, во многих разнообразных конфигурациях с дипольным, многополюсным магнитом или ферромагнитным зубчатым ротором (который применяется в основном для цифрового детектирования скорости и/или уникального положения) датчики Холла, AMP и ГМР могут предоставить наиболее эффективные решения, как в функциональном, так и в стоимостном отношении.

Как упоминалось выше, среди самых эффективных неинтегральных технологий выделяются планарные индуктивные устройства, которые также с большой точностью позволяют детектировать угловой диапазон до 360° , значительные линейные и нелинейные перемещения, и магнитостриктивные датчики, которые тоже характеризуются высокой точностью измерений и обладают еще большими функциональными возможностями детекти-

рования значительных линейных и нелинейных перемещений, углового диапазона до 360° и более. По мере развития индуктивной и магнитостриктивной технологий цена на них заметно снижается. Это связано с их модульным принципом, упрощением и автоматизацией сборки, программированием передаточных характеристик. Обе технологии рассматривались в частях 9, 10 и 13 цикла.

На рис. 98 показаны новые планарные датчики Optek Technology, коммерциализация которых началась в 2005 году. Линейность измерений в полном диапазоне (360°) составляет менее 1%, 10-битное разрешение — 0,1%. В этих датчиках, например, угловое движение диска изменяет фазу магнитного поля, сгенерированного последовательностью передающих обмоток, за счет чего по фазовому различию сигналов принимающих обмоток детектируется абсолютное положение. Многоканальный измерительный блок с че-



Рис. 98. Новые индуктивные датчики Optek Technologies на основе технологии Autopad

редующимися синусно-косинусными передатчиками сигнала устойчив к вибрации, температуре и механическим допускам.

Для применения неинтегральных технологических датчиков с целью реализации модульных и встраиваемых исполнений датчиков в системах автоэлектроники также есть большие перспективы, хотя эта работа, включая адаптацию с ASIC к новым цифровым интерфейсам, потребует больших затрат временных и денежных ресурсов.

Завершая цикл, необходимо отметить, что рассмотренные в статьях технологии — наиболее актуальные на сегодняшний день. Однако на этом список не заканчивается, существуют и другие решения, которые, как следует из содержания предшествующих публикаций, были отклонены либо из-за отсутствия эффективности функциональных принципов технологии, либо не рассматривались ввиду уникальности или нестандартности решений.

Примером для иллюстрации сказанного может послужить конструкция датчика положения SiemensVDO (рис. 99), который нагревает дроссельный вал [226]. Дроссельный клапан контролирует расход воздуха посредством открытия и закрытия заслонки до его попадания во впускной патрубок двигателя

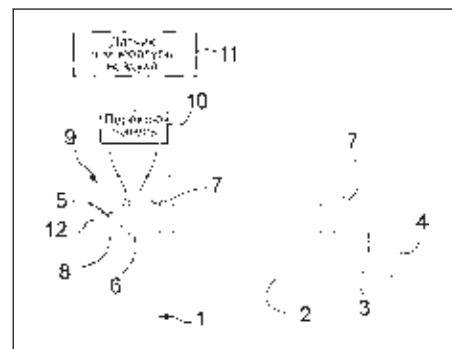


Рис. 99. Датчик положения дроссельной заслонки SiemensVDO, который нагревает дроссельный вал [226]:

1 — канал прохода воздуха;

2 — дроссельная заслонка;

3 — вал; 4 — лопасть; 5 — конечная деталь;

6 — нагревательный элемент; 7 — подшипники;

8 — датчик положения; 9 — корпус устройства;

10 — переключатель; 11 — датчик температуры;

12 — контрольный модуль

и распределения по цилиндрам двигателя. Датчик положения дроссельной заслонки определяет ее угловое положение.

Иногда дроссельный клапан может охлаждаться и замерзать, оставаясь в нежелательном положении, или функционировать неоптимально под влиянием влажности и низкой температуры, что ухудшает работу двигателя. Таким образом, желательно нагревать дроссельный клапан в системе впуска воздуха. Для этого в систему встраивается нагреватель, который активируется при возникновении сбойных условий. В предложенном SiemensVDO устройстве нагреватель встраивается в корпус датчика положения дроссельной заслонки. Наиболее предпочтительный вариант нагревателя — обмотка вокруг дроссельного вала.

Датчик положения 8 вращается вместе с конечной деталью 5 относительно контрольного модуля 12 в корпусе 9 и обеспечивает обратную связь для блока управления двигателем. Нагревательный элемент 6 подключается к переключателю 10, который связывается с датчиком температуры воздуха 11 для активации переключателя 10 на определенной минусовой температуре окружающего воздуха.

Технологии датчиков, рассмотренные в рамках цикла, и данный завершающий пример еще раз подтверждают, что благодаря современной технике и технологиям существует большое число возможных решений для детектирования положения автомобильных систем, в частности встраивание датчика и объединение в одном корпусе многих системных функций.

Многие из технологий, рассмотренных в цикле, широко распространены в настоящее время и могут быть рекомендованы к использованию в составе новых автомобильных систем. На основе классических базовых принципов технологий может быть создано немало новых нестандартных решений, модификаций и вариаций. Работа в данном направлении только начинается. ■

Литература

223. A Case Study: MR vs. Hall Effect for Position Sensing. Quasdorf J., iC-Haus GmbH. Sensors, November 2005.
224. New magnetic angle and position sensor with tangent output. Schott Ch., Sentron AG, a Melexis Company. Материалы конференции Sensor 2005.
225. 360° Rotary Position Sensing with Novel Hall Effect Sensors. HILIGSMANN, V. M., MELEXIS MICROELECTRONIC SYSTEMS. Sensors, March 2006
226. Throttle position sensor that heats the throttle shaft. United States Patent 6 467 468. Опубликовано 22.10.2002.