

Сравнительный анализ возможностей применения датчиков Холла в автомобильных системах электрического рулевого управления

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Введение

В настоящее время достаточно хорошо проработаны вопросы эффективного применения двух- и трехосевых магнитных угловых энкодеров Холла для детектирования абсолютного углового положения дипольного магнита в диапазоне до 360°. Простота и функциональность, высокая надежность и точность этой измерительной схемы с одним сенсорным компонентом, объединяющим все измерительные функции в одном корпусе system-in-package (SiP), приводят к разработке новых предложений, использующих и наследующих преимущества данной технологии [1–11].

Для детектирования линейных перемещений/линейного абсолютного положения, расширения функциональности систем с возможностью одновременного детектирования положения/скорости/направления, измерения угла поворота (свыше 360°) и крутящего момента руля в системах EPS или EPAS необходимо разрабатывать специальные измерительные конфигурации и новые концепции ASIC, как с расширением, так и с сокращением интегральных функций.

О системах EPS/EPAS

Новые автомобили все чаще оборудуются электрическим рулевым управлением Electrical Powered Steering (EPS), которое предназначено заменить распространенные системы гидравлического управления Hydraulic Power Steering (HPS) [11]. Специалисты различных исследовательских групп сходятся во мнении, что к 2010 году более половины новых автомобилей, производимых в мире, будет оборудовано EPS, причем для европейских машин данное процентное соотношение соблюдается с 2006–2007 годов.

Электромеханический усилитель (ЭМУ) с установкой на рулевую колонку C-EPS (Column Electric Power Steering), например, уже применяется и на автомобилях Lada Kalina. Подобный вариант электроусилите-

лей сегодня получил наибольшее распространение в мировом автомобилестроении, благодаря простоте и легкости компоновки.

ЭМУ Lada Kalina состоит из электромеханического блока и контроллера на базе микропроцессора. В состав электромеханического блока входят датчик крутящего момента, при помощи которого измеряется усилие на рулевом колесе, и двигатель с механическим редуктором, вырабатывающим компенсирующий момент на выходном валу ЭМУ.

Конструкция ЭМУ содержит элементы регулировки рулевой колонки по высоте.

Микропроцессорный контроллер обеспечивает алгоритм управления ЭМУ, а также расширенные функции калибровки и диагностики системы. В качестве электрического привода в ЭМУ применен трехфазный бесколлекторный индукторный электрический двигатель.

Система EPS осуществляет динамическое рулевое управление без дополнительной мощности, требующей повышенного потребления топлива.

В дальнейшем система EPS электронно связывается с системами курсовой устойчивости VSC (Vehicle Stability Control) или ESP (Electronic Stability Program), которые корректируют управление, принимая во внимание не только пожелания водителя, но и скорость автомобиля и условия вождения.

Концептуально основные компоненты EPS включают электрический двигатель, ECU на основе микроконтроллера, который обрабатывает сигналы от трех основных датчиков (положения рулевого колеса, крутящего момента руля, датчика положения двигателя), а также датчиков скорости автомобиля или скорости колес ABS и датчиков скорости двигателя/коленчатого вала [11]. ECU включает и схему-драйвер электрического двигателя, обычно с бесконтактным переключением (трехфазный бесколлекторный двигатель).

В современных EPS все еще присутствует механическая связь между рулевым колесом и стойкой rack. В случае неисправностей си-

стемы механизм сцепления отключает электрический двигатель, разрешая ручное управление. Технология steer-by-wire предлагает дальнейшее развитие системы EPS, в которой механические связи системы будут полностью устранены, что создает предпосылки для разработки нового поколения датчиков.

Новое поколение систем EPS требует разработки как надежных и точных датчиков положения/крутящего момента руля, положения/скорости/направления, так и датчиков положения/переключения обмоток электрического двигателя. Для разработки всех этих устройств могут быть использованы магнитоуправляемые компоненты, в первую очередь датчики Холла.

Датчик положения рулевого колеса

Датчик положения рулевого колеса формирует сигнал абсолютного положения рулевого колеса в диапазоне порядка $\pm 1080^\circ$ с разрешением в $0,1^\circ$ и точностью порядка $\pm 1^\circ$. Датчик рулевого колеса размещается в верхней части рулевой колонки и представляет собой либо компонент, интегрированный в систему, либо автономное устройство. В обоих случаях датчик положения руля включает редукторный механизм для грубого оценивания числа поворотов и точного сканирования углового положения в пределах 360°. Практически датчик обычно строится на основе комбинации двух датчиков положения, привязанных к двум отдельным шестерням с различным числом зубцов или к двум считывающим оптическим головкам, сканирующим двоично кодированные цели. Угловая скорость руля в ECU EPS также определяется по данным датчиков положения.

Выход датчика положения с интерфейсом CAN предполагает избыточную архитектуру. Помимо прочего, к датчику положения руля предъявляется требование True Power on (TPO) — способности датчика обеспечивать

информацию о положении руля сразу после включения питания, не используя при переключениях двигателя резервное питание.

Для измерения положения руля подходят датчики Холла, МР/АМР/ГМР, индуктивные, емкостные и оптические технологии.

ИС MLX90316 рекомендована производителем данной ИС — компанией Melexis — для применения в датчиках положения рулевого колеса и встраивания в рулевые модули. Конструкция ИС с архитектурой проверки избыточности включает две подложки. Подробнее о применении MLX90316 в системах контроля положения руля можно прочитать, например, в [1, 7, 11].

Датчик крутящего момента руля

Основное назначение датчика крутящего момента — переводить информацию о крутящем моменте, приложенном к рулю водителем, в электрический сигнал, обрабатываемый ECU. Для измерений крутящего момента подходят датчики Холла, МР/АМР/ГМР, индуктивные, емкостные и оптические технологии, которые основываются на регистрации небольших относительных перемещений двух валов — в пределах $\pm 8^\circ$, с пружинной осью кручения рулевого вала, которая уменьшает жесткость системы рулевого управления [1, 11].

Технологии считывания крутящего момента в системах Powertrain без применения оси кручения представляют собой методы на ПАВ (SAW) и магнитоэлектрический метод. Для перенесения их в EPS нет препятствий, но реальные коммерческие предложения требуют комбинирования датчика крутящего момента и положения руля в одном корпусе, что проще выполнить, применив технологии, перечисленные в предыдущем абзаце.

Выход датчика крутящего момента может быть аналоговым, ШИМ, цифровым, характеристики современных датчиков предполагают программирование под клиентское применение, желательна также проверка избыточности в системе с дублированием измерений. Рекомендуемая точность — менее $0,15^\circ$.

Ключевой признак, который должен характеризовать датчик крутящего момента, — стабильность смещения (выхода в отсутствие крутящего момента) в полном диапазоне рабочих температур в течение срока службы. Для достижения этого в управляющий алгоритм вводится так называемая мертвая зона, в пределах которой крутящий момент не воспринимается и никаких действий системой не производится.

Датчик положения/переключения двигателя

Датчик положения двигателя в системах EPS с трехфазными бесколлекторными двигателями Brushless DC Motor (BLDC) или Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) контролирует переключение фаз для

достижения сглаженных переключений без пульсаций крутящего момента. Бесколлекторные двигатели постоянного тока отличаются от обычных DC двигателей тем, что они применяют электронное, а не механическое переключение статорных обмоток фаз. Для осуществления этого типа переключений в EPS требуется высокоскоростной датчик углового положения, способный работать при скоростях вращения ротора двигателя выше 400 об/мин с точностью $0,5\text{--}1^\circ$ и разрешением до $0,1^\circ$. Для этих применений также подходят практически все известные технологии — от оптических энкодеров и индуктивных резольверов до технологий эффекта Холла и МР/АМР/ГМР.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока состоят из статора с многофазной обмоткой и активного ротора в виде постоянного магнита и датчика/датчиков положения ротора, размещенных в одном корпусе с двигателем и предназначенных для выработки сигналов управления моментами времени и последовательностью коммутации токов в обмотках статора.

Для управления переключением бесколлекторных двигателей постоянного тока широко применяются бесконтактные датчики Холла [12–13].

Наиболее обычный принцип действия бесколлекторного двигателя с тремя обмотками статора, сдвинутыми в пространстве на 120° и соединенными в «звезду», представленный на рис. 1, состоит в выполнении переключения при вращении постоянного магнита, закрепленного на роторе датчика, посредством трех биполярных датчиков Холла — защелок, размещаемых на статоре. Число чувствительных элементов выбрано по числу обмоток статора, кроме того, неединичное число датчиков Холла позволяет повысить электрическое разрешение устройства и обеспечить возможность двоичного кодирования положения. Датчики Холла определяют угловое положение вала и поставляют эту информацию к логической схеме, которая анализирует ее и контролирует переключатели схемы драйвера. Токи, протекающие через обмотки, зависят от положения ротора, и магнитное поле, генерируемое посредством смещения обмоток в соответствии с положением ротора, взаимодействует с полем постоянного роторного магнита, что и обеспечивает требуемый крутящий момент.

К преимуществам бесколлекторных двигателей такого типа относятся исключение потерь мощности на переключение, электрических шумов вследствие вибрации, трения, износа, поскольку для переключения никаких щеток или других элементов контактирования не используется. Помимо того, электронное переключение позволяет гибко адаптировать интерфейс сенсорной схемы для выполнения цифровых команд.

Многие применения сенсорного управления допускают использование датчиков с низ-

ким разрешением без влияния на характеристики системного управления, что обеспечивает снижение цены. Обычные линейные аналоговые датчики Холла с низким разрешением, как и защелки, также подходят для решения этих задач. Датчики положения ротора закрепляются на статоре двигателя и детектируют магнитное поле роторного магнита, генерируя сигнал напряжения, пропорциональный интенсивности первичного поля, который затем оцифровывается пороговой схемой (этот принцип представлен на рис. 1).

Но даже в недорогих применениях существенными являются различные источники ошибок положения ротора электрического двигателя, которые снижают системные характеристики, а в ряде случаев делают использование датчиков Холла недопустимым.

Так, интенсивность магнитного поля уменьшается с увеличением зазора между аксиальными магнитными полюсами и чувствительным элементом Холла. Периодичность сигнала аналогового выходного напряжения каждого из датчиков Холла при механическом вращении зависит от числа пар полюсов, определяющего механическое разрешение, являясь «сырым» пределом точности объекта.

На рис. 1 показано, что абсолютный магнитный сигнал — аналоговый, как и первичный выход датчиков ввиду линейности эффекта Холла, но посредством триггера Шмитта в схеме драйвера двигателя сигнал легко может быть преобразован в цифровую форму. Вместо аналоговых датчиков чаще используются защелки — готовые интегральные цифровые ключи. После оцифровки информация о положении ротора может даваться нарастающим или падающим краем цифрового сигнала соответствующего датчика.

Уникальные угловые измерения в диапазоне 360° действительно возможны с тремя такими цифровыми датчиками Холла, которыми обычно оборудуется электрический двигатель, что предполагает разнесение датчиков на 120° друг относительно друга. С постоянным магнитом ротора такое разнесение датчиков позволяет закодировать шесть уникальных положений ротора, причем непитаемые или отсоединенные датчики сформируют коды 111 или 000, которые система воспринимает как ошибочные. На временной диаграмме импульсных выходов датчиков Холла относительно электрического угла θ видно, что один нарастающий или падающий край датчиков Холла приходится на каждые 60° электрических (не механических) градусов; сопоставление электрического выхода относительно механического угла вращения ϕ дополнительно поясняется рис. 1в. С дипольным диаметрально намагниченным магнитом разрешение в 60° электрических градусов совпадало бы с механическим разрешением, тоже равным 60° , то есть общее разрешение устройства составило бы также 60° .

Число пар полюсов магнита n свыше двух является еще одним способом повышения

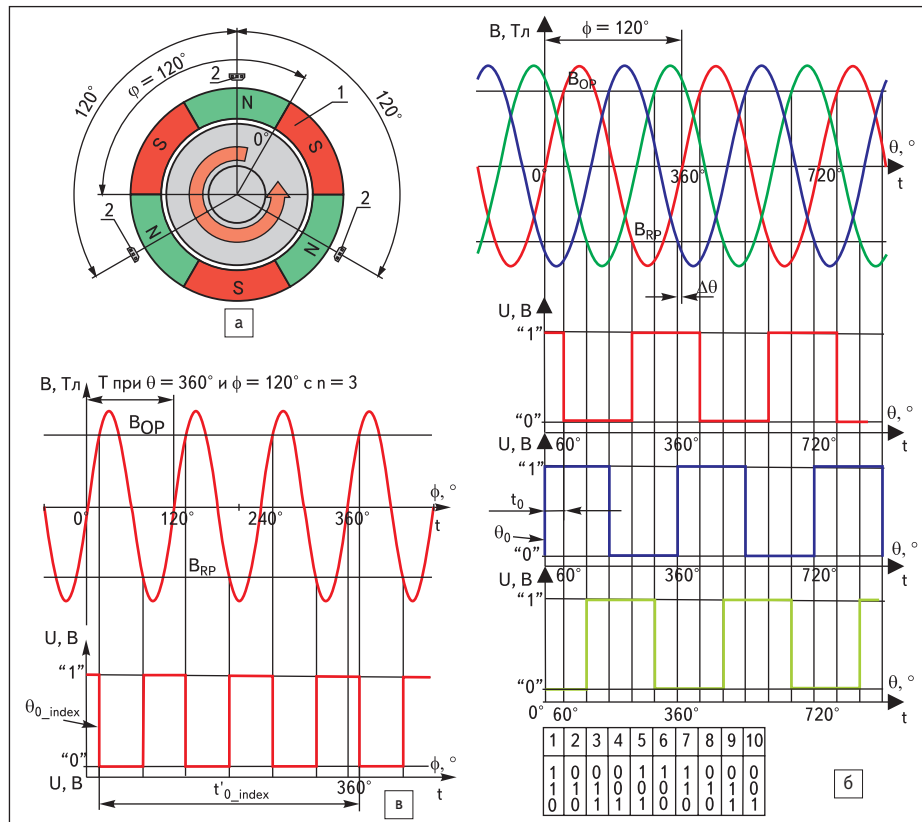


Рис. 1. Принцип действия бесколлекторного двигателя с тремя обмотками статора, сдвинутыми в пространстве на 120° , роторным постоянным магнитом с n парами полюсов и тремя биполярными датчиками Холла — защелками:

а) пространственная конфигурация устройства:

1 — постоянный магнит ротора; 2 — защелки Холла; φ — угол механического вращения магнита ротора;

б) временные диаграммы выходных характеристик датчиков Холла: B — первичная магнитная индукция поля магнита;

V_{OP} , V_{RP} — пороги переключения компаратора/триггера Шмитта; U — импульсное выходное напряжение;

θ — угол электрического/магнитного периода сигнала; $\Delta\theta$ — постоянная ошибка оцифровки;

t_0 — временной фрейм, вычисленный схемой между двумя последними краями;

θ_0 — угол отсчета временного фрейма t_0 ;

в) сопоставление углов θ и φ — электрического вращения сигнала и механического вращения ротора:

T — период электрического сигнала;

t'_{0_index} — временной фрейм между двумя последовательными обнаружениями того же самого края, нарастающего или падающего, тем же самым датчиком в 360° механических или $n \times 360^\circ$ электрических градусах;

θ'_{0_index} — угол отсчета временного фрейма t'_{0_index} , вычисленный при возникновении того же самого края напротив того же датчика

механического разрешения. На рис. 1в показан синусоидальный оцифрованный сигнал датчика Холла в диапазоне угла поворота φ , где видно, что на 360° (полный оборот) магнита из трех пар полюсов ($n = 3$) приходятся три импульса датчика. С $n = 3$ и тремя датчиками Холла общее разрешение устройства составляет уже 20° , но уникальное кодирование возможно только в пределах полного магнитного периода (угла θ , равного 360° в пределах угла $\varphi = 360^\circ/n$), что потребует дополнительного схемного канала для счета n и одновременного анализа сигнальных краев всех трех датчиков. Опять же, полученного разрешения в 20° с $n = 3$ недостаточно даже для многих недорогих применений контроля положения двигателя (за исключением контроля его скорости). Этого разрешения недостаточно и в системах EPS для получения удовлетворительных спецификаций и снижения общего гармонического искажения Total Harmonic Distortion (THD) токов на фазах

двигателя или пульсаций крутящего момента двигателя. Увеличение числа полюсов — относительно дорогостоящий метод, причем с большим значением n снижается достижимая намагнитченность и усиливается влияние неоднородностей полюсов. Прямое следствие — снижение чувствительности устройства и понижение SNR. Следовательно, производители двигателей BLDC вынуждены реконструировать положение между двумя обнаруженными краями датчиков Холла, используя методы интерполяции.

Классический подход состоит в вычислении положения ротора методом интерполяции с использованием временного фрейма t от последнего края, взятого с любого датчика, и временного фрейма t_0 , вычисленного схемой между двумя последними краями. Эти временные фреймы также показаны на рис. 1б–в. С $n = 3$ t_0 — это время пробега в 60° электрических градусах. Согласно это-

му, угол θ как функция времени t будет вычисляться в соответствии с выражением (1):

$$\theta(t) = t/t_0 \times 60^\circ + \theta_0, \quad (1)$$

где θ_0 — угол, соответствующий последнему краю; t и t_0 могут быть использованы для вычисления углового положения, но точность вычисления положения ротора зависит и от постоянства скорости двигателя в данном временном фрейме, и от точности датчиков Холла.

В автомобильных условиях при эксплуатации EPS постоянство скорости работы двигателя (частоты вращения) недостижимо, так как система должна реагировать на изменяющиеся дорожные условия, адаптируясь к внешней среде. Неточность датчиков Холла, присущая им ввиду таких факторов, как систематическая ошибка оцифровки (абсолютная погрешность таймирования $\Delta\theta$, ошибки порогов V_{OP} , V_{RP} и разницы между ними — гистерезиса (амплитуды диапазона гистерезиса триггера Шмитта)), неодинаковый воздушный зазор d для разных датчиков, конструктивные допуски устройства и неточности в креплении датчиков Холла по всем трем осям, неоднородность постоянных магнитов, механические вибрации, джиттер сигнала и паразитная амплитудная модуляция сигнала — все это означает в итоге искажение магнитного поля и электрического сигнала, а также то, что два последовательных края фактически разнесены в пространстве и во времени не на 60° , а это означает, в свою очередь, значительную неточность вычислений положения ротора с увеличением THD токов в фазах двигателя. Вероятность ошибок подтверждают экспериментальные исследования двигателей с использованием вышеупомянутых методов [12–13].

Датчики Холла образуют сигнал, пропорциональный ортогональным компонентам магнитного поля, поэтому существенна ошибка вследствие бокового сдвига магнита, неоднородность постоянных магнитов и эксцентриситет — все это наводит ошибки выравнивания краев датчика с теоретическим углом. С эксцентриситетом вычисленный угол может различаться и в зависимости от того, нарастающий ли это или падающий край.

Для повышения точности переключения двигателя специалистами фирмы STMicroelectronics предложен рассматриваемый далее метод, собственно, и послуживший причиной для дальнейшего развития данной темы автором настоящей статьи [12–13].

Концепция STMicroelectronics

В концепции решения задачи переключения принимается двигатель с тремя датчиками Холла, но от числа датчиков метод не зависит. Как было показано ранее, время t_0 при вращении двигателя может быть различным и не всегда соответствует $360^\circ/n$. Но между двумя последовательными обнаружениями

того же самого края, нарастающего или падающего, тот же самый датчик всегда проходит именно 360° механических или $n \times 360$ электрических градусов. В выражении (1) для вычисления текущего значения угла вместо t_0 может быть использовано время t'_{0_index} с $index = 1 \dots 6n$ (переменной, зависящей от числа пар n полюсов двигателя). Угол θ_{0_index} не фиксирован и представляет собой последний $\theta(t)$, вычисленный при возникновении того же самого края напротив того же датчика:

$$\theta(t) = (t/t'_{0_index}) \times n \times 360^\circ + \theta_{0_index}. \quad (2)$$

Согласно выражению (2), текущий угол поворота ротора в течение двух последовательных краев датчиков Холла будет корректно предсказан, потому что время t'_{0_index} соответствует 360 механическим градусам и более, для каждого края сигналов датчиков Холла будет вычислено и использовано при предсказании угла ротора $\theta(t)$ корректное относительное угловое значение ротора θ_{0_index} .

Для $index = 0$ значение $\theta_{0_index} = 0$ является всегда 0° , край этого датчика Холла берется как опорный.

Детали осуществления предложенной концепции с микроконтроллерами семейства ST10 можно найти в [13].

Другие предложения / рекомендации по улучшению измерений положения ротора посредством датчиков Холла и их сравнительный анализ

Дифференциальные датчики и двухканальные энкодеры

Для измерений в качестве датчика Холла могут быть использованы не только защелки или биполярные цифровые ключи и аналоговые датчики, но и ИС специального автомобильного назначения — дифференциальные ИС Холла и двухканальные энкодеры (рис. 2а). Подробнее об этих датчиках можно прочитать в [8–9, 14–15]. Для этих ИС желателен согласованный средний шаг ротора (со средним расстоянием между полюсными центрами порядка $2,56$ мм в большинстве случаев).

Дифференциальные датчики более устойчивы к статическим и динамическим изменениям воздушного зазора d между ИС и магнитом, неоднородностям магнитных полюсов. Хотя при измерении скорости эти ИС легко адаптируются и к роторам с более крупным шагом и модулем, для повышения точности желателен именно рекомендованный шаг ротора $T = 5,12$ мм или несколько выше (рис. 2б).

Сигнал с выхода дифференциальных ИС — цифрового ключа при детектировании скорости/положения магнитного ротора — визуально не отличается от защелкивающегося (рис. 2в), но не является полностью ему эквивалентным ввиду постоянного фазового смещения, которое, тем не менее, в схеме драйвера двигателя может быть скомпен-

сировано. Но ввиду того, что многие дифференциальные ИС не являются датчиками нулевой скорости, не во всех случаях может гарантироваться признак ТРО.

Двухканальные энкодеры представляют собой комбинацию защелкивающих выходов, смещенных относительно друг друга на 90° (рис. 2г), что позволяет в схеме декодирования удвоить тахометрическое разрешение от импульса на пару полюсов до импульса на любой из полюсов, а один из защелкивающих выходов можно использовать для счета полюсных пар n . Вместо защелкивающего выхода для анализа положения может использоваться тахометрический выход энкодера, что, например, с $n = 3$ даст разрешение в 30 электрических градусов или общее разрешение положения в 10° . Число пар полюсов в конструкции двигателя может быть любым, но при использовании одноосевого энкодера важно, чтобы расстояние между полюсными центрами позволяло получать именно синусно-косинусные сигналы. Применение синусно-косинусной схемы оценивания поля с многополюсным магнитом также более устойчиво к магнитным допускам, температурным и временным вариациям поля, по сравнению с защелкивающей схемой, но с $n = 3$, например, ротор должен иметь меньший диаметр (порядка 5 мм с $T/2 = 2,56$ мм), тогда как при использовании защелок диаметр может быть любым. Малый диаметр может исказить синусно-косинусное смещение одноосевого энкодера, идеальным ротором для которого, вообще говоря, является линейка. Таким образом, возможность использования одноосевых энкодеров напрямую зависит от конструкции двигателя, тогда как защелкивающий метод является универсальным.

При $n = 3$ возникает и проблема «неуникальности» кодирования положения в пределах 180° (рис. 2д), но ее можно решить, используя, например, простое инвертирование одной из защелкивающих характеристик (рис. 2е).

Рассмотренный выше метод предполагает использование трех двухканальных энкодеров вместо защелок Холла и последующую интерполяцию выходного импульсного сигнала с использованием тех же методов вычислений временных фреймов между краями и углов, соответствующих последнему вычисленному краю, улучшение которых иллюстрируют выражения (1) и (2).

Известно, что синусно-косинусные сигналы позволяют однозначно детектировать периодическое вращение в угловом диапазоне 360° благодаря возможности вычисления арктангенса угла φ (или θ с одновременным счетом пар полюсов). Еще на этой стадии анализа следует вывод, что для уникального кодирования механического угла в пределах полного оборота ротора с дипольным магнитом достаточно и одного синусно-косинусного датчика — двухканального одноосевого энкодера, но средний шаг ротора может быть взят только такой, чтобы чувствительные эле-

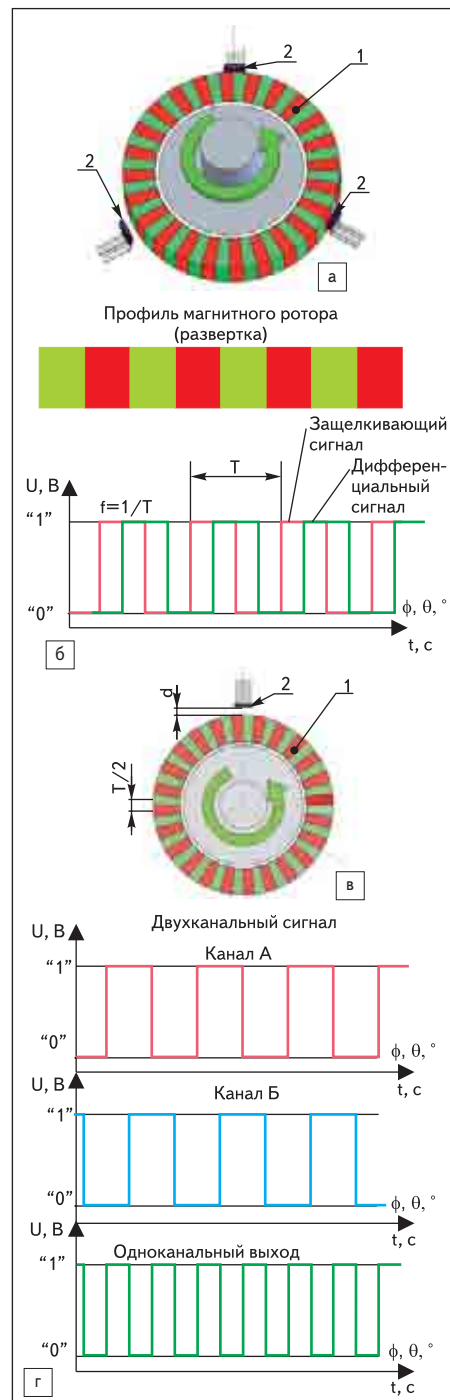


Рис. 2. Альтернативные концепции бесколлекторного двигателя с тремя обмотками статора, сдвинутыми в пространстве на 120° , многополюсным роторным постоянным магнитом с n парами полюсов и одноосевыми датчиками Холла, с двумя чувствительными элементами каждый: а) пространственная конфигурация устройства с тремя датчиками Холла: 1 — постоянный магнит ротора; 2 — дифференциальные или двухканальные датчики Холла; б) основные элементы пространственной конфигурации двигателя и основные механические параметры: d — воздушный зазор; $T/2$ — расстояние между полюсными центрами или средний шаг ротора; в, г) сопоставление временных диаграмм защелкивающего и дифференциального сигналов (в), двухканального и одноканального выхода одноосевого энкодера Холла (г); T — электрический/магнитный период защелкивающего/дифференциального сигнала

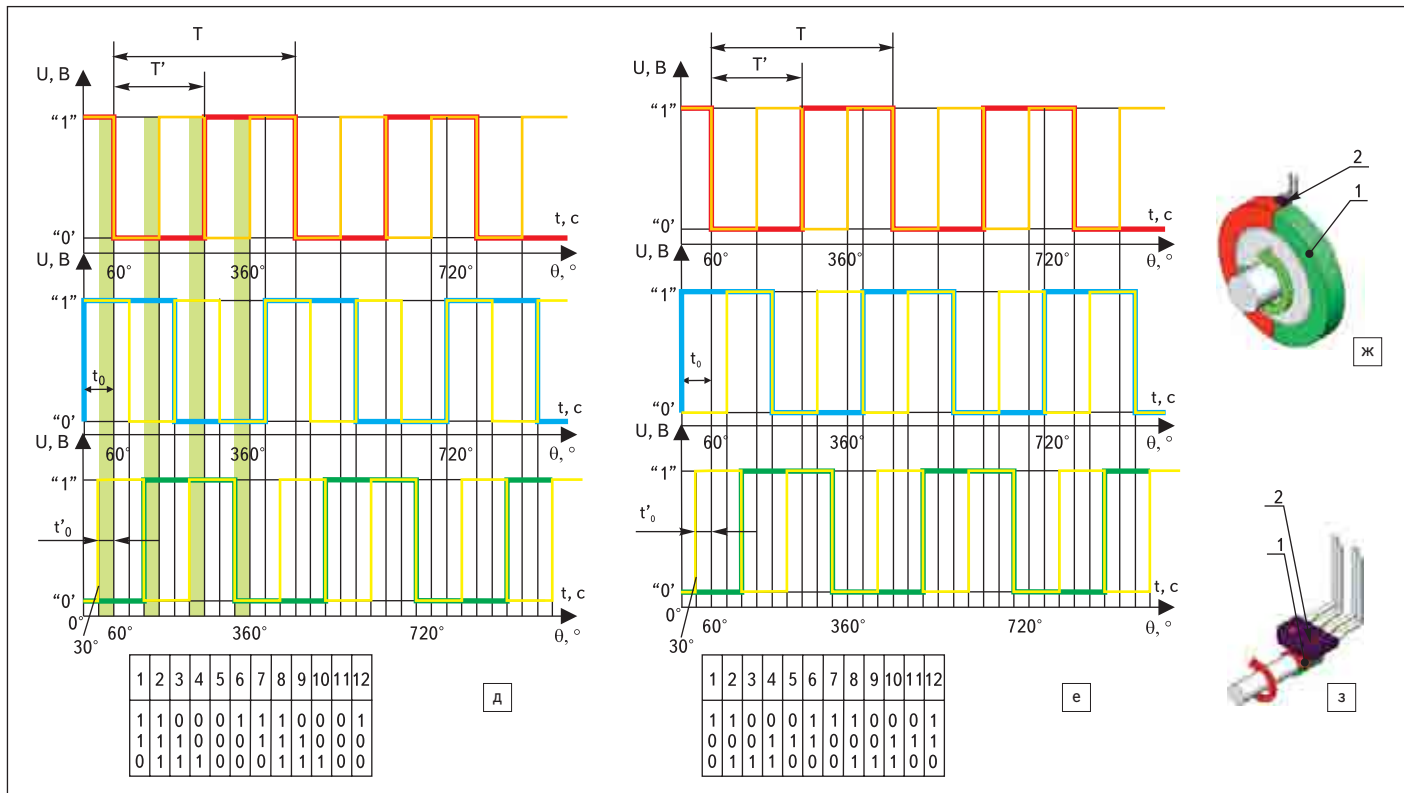


Рис. 2. Альтернативные концепции бесколлекторного двигателя с тремя обмотками статора, сдвинутыми в пространстве на 120°, многополюсным роторным постоянным магнитом с p парами полюсов и одноосевыми датчиками Холла, с двумя чувствительными элементами каждый:
 д, е) временные диаграммы выходных характеристик трех двухканальных датчиков Холла — сравнение разрешения двухканального и тахометрического выходов энкодеров и таблицы кодов положения для тахометрического выхода — неуникальное (д) и уникальное (е) кодирование: T — период электрического сигнала двухканального выхода; T' — период электрического сигнала одноканального выхода; t_0, t'_0 — временные фреймы между двумя ближайшими краями для датчиков Холла двухканального и одноканального выхода соответственно;
 ж, з) нерабочие пространственные конфигурации устройства с дипольным магнитом и одним одноосевым синусно-косинусным датчиком Холла;

менты Холла генерировали синусно-косинусные сигналы, то есть варианты конструкции устройства, показанные на рис. 2ж–з, для определения углового положения/переключения двигателя не рекомендуются, тогда как схема, показанная на рис. 2а, является рабочей.

Временные диаграммы, необходимые для работы устройства с дипольным магнитом и энкодером, контролирующим положение двигателя, в самом общем виде показаны на рис. 2и, но этот энкодер не может быть обычным аналоговым или пороговым цифровым одноосевым устройством. Если бы элементы Холла размещались относительно друг друга ортогонально, получение синусно-косинусных рабочих сигналов стало бы возможным. Таким образом, из анализа рис. 2 ж–з совершенно очевидно, что для синусно-косинусного контроля углового положения необходим двухосевой энкодер — с двумя ортогонально размещаемыми элементами Холла, который дает на выходе аналоговый, ШИМ или цифровой интерфейс, пропорциональный положению в диапазоне 360° и получаемый на выходе схемы ЦОС с высокоразрешающим АЦП и интерполятором, причем ортогональные элементы Холла желательно размещать в одной микросхеме [1, 5–7, 10–11].

Интегральные двухосевые магнитные угловые энкодеры хорошо известны разработ-

чикам, а возможность их применения для контроля двигателя проанализируем чуть позже. Для их работоспособности достаточно даже двух ортогональных элементов Холла, но четыре попарно размещенных чувствительных элемента обеспечивают полностью дифференциальные измерения.

Модернизированный принцип не обязательно предполагает, что магнитный ротор двигателя является активным и создает крутящий момент. Например, малый дипольный ротор или многополюсный кольцевой магнит с согласованным средним шагом можно не встраивать в корпус двигателя для прямого взаимодействия с обмотками, а размещать на торце вала. Повышения электрического разрешения этого устройства теоретически можно добиться, применяя энкодеры с большим числом разрешающих бит — 11- или 12-битных, а по мере увеличения числа полюсов (механический способ повышения разрешения или для унификации исполнений двигателей) требуется более быстродействующая микросхема.

Следовательно, рассуждения о возможности контроля переключения двигателя EPS приводят к обобщению возможности простого контроля положения любых вращательных устройств, управляемых как трехфазными, так и шаговыми двигателями, количест-

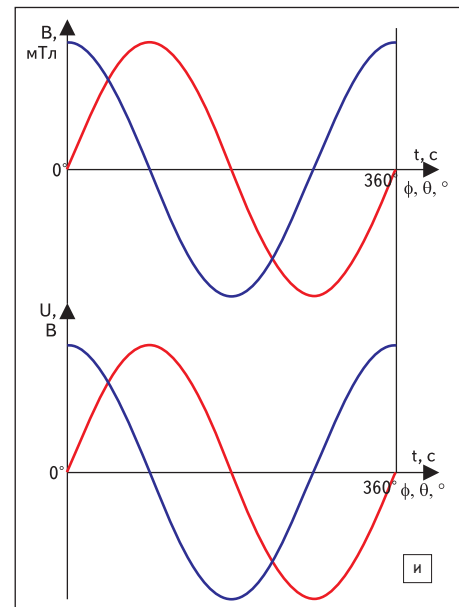


Рис. 2. Альтернативные концепции бесколлекторного двигателя с тремя обмотками статора, сдвинутыми в пространстве на 120°, многополюсным роторным постоянным магнитом с p парами полюсов и одноосевыми датчиками Холла, с двумя чувствительными элементами каждый:
 и) временные диаграммы рабочих сигналов устройства, показанного на рис. 2з (с дипольным магнитом и одним синусно-косинусным датчиком Холла)

во которых в автоэлектронике также весьма велико (от управления дроссельной заслонкой до стрелочной индикации показаний приборов на приборной панели).

Несколько подробнее о шаговых двигателях

Шаговый двигатель (ШД) представляет собой импульсное электромеханическое устройство, которое преобразует электрические импульсы в дискретные механические последовательные перемещения с фиксацией его в заданном положении без устройств обратной связи. Угол поворота ротора определяется числом импульсов, поданных на шаговый двигатель, скорость вращения пропорциональна частоте входных импульсов. Шаговые двигатели — это бесколлекторные двигатели.

Очевидно, что такие методы работы шаговых двигателей дают возможность осуществлять точное позиционирование и регулировку скорости без датчиков обратной связи, что является одним из главных преимуществ шаговых двигателей, но практически эти методы применяют в системах с мало изменяющимися скоростями. Если нагрузка шагового двигателя превысит его момент, то информация о положении ротора теряется и система требует инициализации. Одним из способов решения данной проблемы является применение датчиков обратной связи.

В шаговом двигателе вращающий момент создается магнитными потоками статора и ротора, которые соответствующим образом ориентированы друг относительно друга. Например, с тремя парами полюсов ротора и двумя парами полюсов статора может быть получен шаг двигателя в 30° .

В данной статье рассматривается вопрос применения датчиков Холла с магнитными роторами, хотя в теории существует три основных типа шаговых двигателей:

- двигатели с постоянными магнитами — магнитным ротором;
- двигатели с переменным магнитным сопротивлением — зубчатым ротором;
- гибридные двигатели.

Двигатели с магнитным ротором включают статор, который представляет собой несколько обмоток. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается больший магнитный поток и больший момент по сравнению с двигателями с зубчатым ротором.

Наиболее часто используются гибридные двигатели — на основе комбинаций первых двух типов, обычно представляющие собой двигатели с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов, что достигается в конструкции устройства.

Например, ротор гибридного ШД может иметь зубцы, расположенные в осевом направлении. Этот зубчатый ротор механически разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный

магнит. Таким образом, зубцы верхней половины ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половины — южными. Кроме того, верхняя и нижняя половины ротора смещены друг относительно друга на половину угла шага зубцов. В итоге число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок.

Но датчики Холла обычно не встраиваются в шаговые двигатели для осуществления обратной связи, поэтому тип ротора, используемого ШД, роли не играет. Датчики обратной связи ШД — это обычные датчики углового положения, которые фиксируются на торцах валов управляемых двигателем устройств и используют встроенный магнитный ротор [1–9].

Магнитные угловые двухосевые энкодеры

Практически все известные коммерческие версии ASIC магнитных энкодеров реализованы в двухосевом варианте — с двумя ортогонально размещенными элементами Холла, предназначенными для детектирования магнитного сигнала, создаваемого при вращении магнитного поля, перпендикулярного поверхности ИС.

Для переключения бесщеточных двигателей постоянного тока может быть использована ИС AS5040 Austriamicrosystems — магнитный угловой энкодер, предназначенный для измерения углового положения дипольного диаметрально намагниченного магнита, вращающегося во фронте ИС (рис. 3а–в).

AS5040 поддерживает несколько специальных режимов цифрового отображения магнитного поля и, в дополнение к возможности получения абсолютного или инкрементального интерфейсов (рис. 3б), в специальном режиме может предоставлять готовые UVW сигналы переключения для двигателей с одной или двумя парами полюсов (рис. 3в). В дополнение к трехфазным выходным сигналам доступен одноканальный выход (LSB) на выводе 12, который позволяет производить высокоточные измерения скорости. Программированием Div0 могут быть выбраны два разрешения (9 или 10 бит).

Каждое положение, определенное энкодером, помноженное на $0,35^\circ$ ($360^\circ/1024$, 1024 — число дискретных положений 10-битного энкодера), равняется абсолютному угловому значению положения. Сигнал U в режиме 3.0 индицируется падающим краем положения 512, представляющего абсолютное угловое положение, соответствующее 180° . То же самое применимо к сигналам V и W. Ширина импульсов в режиме 3.0 для всех 512 положений для каждого (U, V или W) сигнала является постоянной.

Режим 3.2 используется для двигателей с двумя парами полюсов, требующих большего числа импульсов для счета и переключения токов. Ширина импульса тогда сужается до 256 положений, равных 90° .

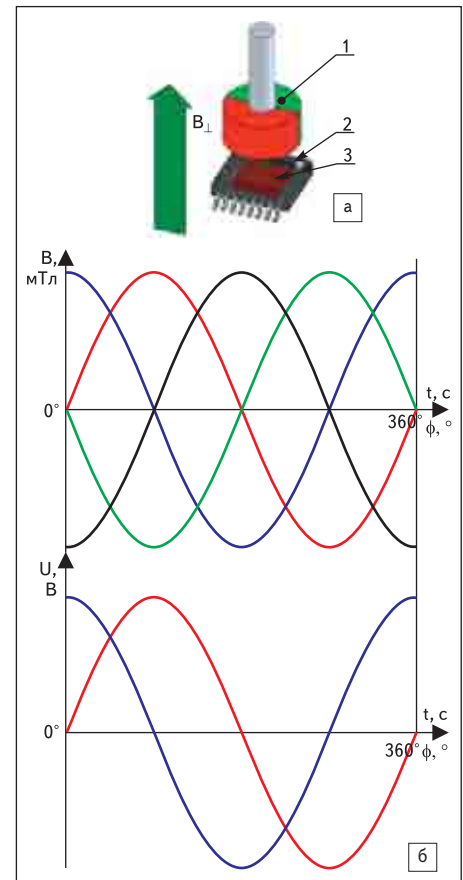


Рис. 3. Концепция использования для переключения трехфазного двигателя двухосевого магнитного углового энкодера типа AS5040/5140:
а) классический рабочий режим, рекомендованный для AS5040:
1 — дипольный магнит на торце ротора;
2 — ИС AS5040;
3 — крестообразный массив элементов Холла;
 B_x — перпендикулярное магнитное поле;
б) временные диаграммы рабочих сигналов устройства, показанного на рис. 3а

Важными характеристиками являются разрешение и максимальная рабочая скорость вращения магнитного источника.

Абсолютное угловое положение в AS5040 оценивается со скоростью 10 кГц ($0,1$ мс). Это позволяет осуществить прочтение всех 1024 положений в диапазоне 360° в пределах $0,1$ с ($9,76$ Гц) без пропусков положения. Умножая 10 Гц на 60 с получается соответствие максимальной скорости в 600 об/мин. Если же допустить пропуск положения каждую секунду, можно увеличить максимальную скорость вращения магнитного источника до 1200 об/мин. Увеличение скорости вращения, таким образом, снижает число абсолютных угловых положений, которые могут быть прочитаны. Независимо от скорости вращения или числа положений абсолютное угловое положение дается с максимальным разрешением в 10 бит. Инкрементальные выходы не подвержены скоростным ограничениям благодаря интегрированному в ЦОС интерполятору. Инкрементальные выходные сигналы могут использоваться в применениях со скоростями

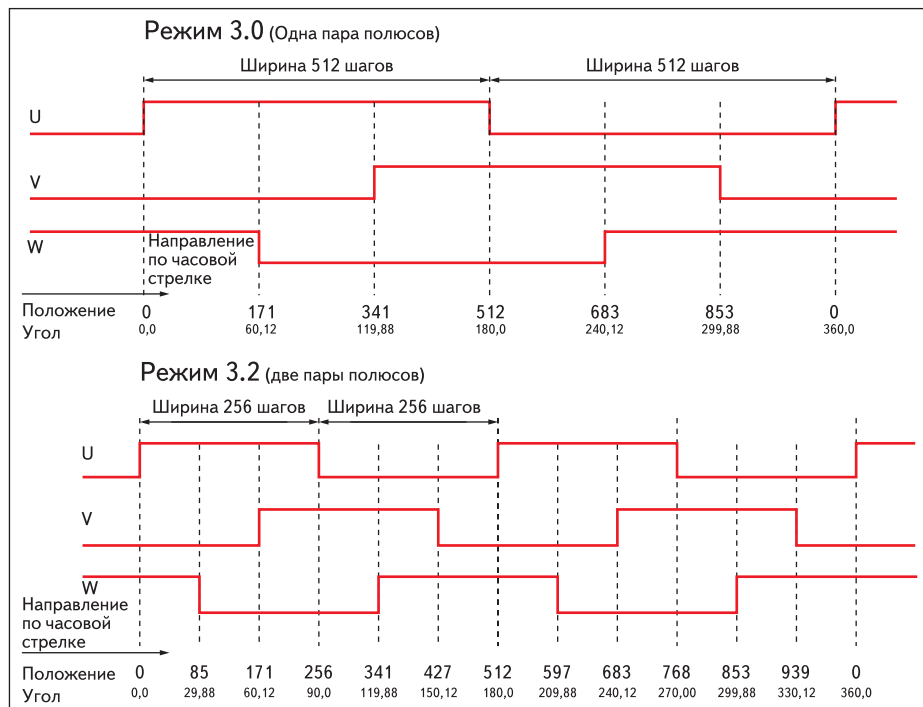


Рис. 3. Концепция использования для переключения трехфазного двигателя двухосевого магнитного углового энкодера типа AS5040/5140:

в) UVW сигналы переключения для двигателей с одной или двумя парами полюсов

вращения до 10 000 об/мин. Скорость вращения магнитного поля — до 10 000 об/мин, температурный диапазон до 125 °С, что позволяет устанавливать энкодер прямо на двигатели, в качестве датчика положения ротора или бесколлекторного двигателя, для того чтобы осуществлять его переключение.

Новая в данном семействе Austriamicrosystems микросхема AS5140H представляет собой 10-битный магнитный угловой энкодер, обладающий возможностью получения готовых сигналов для коммутации трехфазных двигателей и полностью удовлетворяющий требованиям стандарта АЕС-Q100, но предназначенный для работы в расширенном автомобильном диапазоне рабочих температур от -40 до +150 °С.

На скорости дискретизации 10 кГц между временем начала сэмпла и преобразования в этих ИС возникнет задержка в 100 мкс, представляющая собой угловую ошибку. Ошибка линейно увеличивается со скоростью

$$e = N \times 0,0006, \quad (3)$$

где N — скорость вращения в об/мин и становится заметной на скоростях выше 586 об/мин, в зависимости от режима. В абсолютном режиме скорость в 586 об/мин является минимальной, а в инкрементальном на этой скорости e достигает пика в 1 LSB (0,35°).

Austriamicrosystems выпускает широкую линейку других магнитных угловых энкодеров, абсолютных и инкрементальных, которые специально не рекомендованы, но, в принципе, как пояснялось ранее, после соответст-

вующей обработки сигнала в логической схеме также могут использоваться для контроля положения/переключения двигателя. Например, AS5035 — инкрементальный энкодер Austriamicrosystems с 64 квадратурными импульсами за вращение pulses per revolution (ppr) (8-битное разрешение) и индексным выходом, которые позволяют дать 256 краев, ограничивающих $1,4^\circ$ или $\varphi = 90^\circ/64$, в пределах $\theta = 360^\circ$. Дополнительный, третий индексный канал шириной в $1,4^\circ$ однократно программируется пользователем. AS5035 оценивает угловое значение со скоростью 10 килоэмплов в секунду (10 кГц).

Для применений контроля двигателя EPS могут быть использованы и другие двух/трехосевые магнитные угловые энкодеры Холла. Оба типа этих датчиков регистрируют изменение перпендикулярных компонентов поля при вращении магнита посредством крестообразного массива элементов Холла и работают как в классическом режиме, показанном на рис. 3а, так и, в зависимости от присутствия/отсутствия интегрального магнитоцентрирующего (ИМК) диска, в некоторых производных режимах (рис. 3г–д, рис. 4).

Концепция на основе производного режима с многополюсным магнитным ротором, который представлен на рис. 3г, предполагает, что используется обычный двухосевой магнитный угловой энкодер без ИМК, который в данном режиме при соответствующем программировании выходного интерфейса функционирует как одноосевой энкодер. Два парных элемента обеспечивают синусно-косинусное оценивание переменного поля при

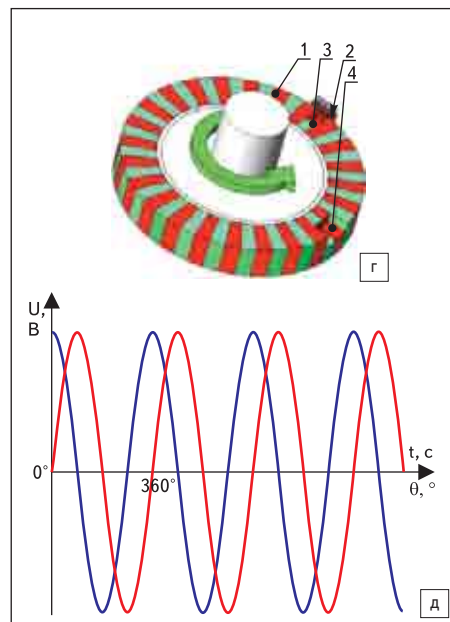


Рис. 3. Концепция использования для переключения трехфазного двигателя двухосевого магнитного углового энкодера типа AS5040/5140:

г) производный рабочий режим устройства с многополюсным кольцевым магнитом [9]:

1 — многополюсный кольцевой магнит;

2 — датчик ИС AS5040;

3, 4 — возможные пропуски в магнитном роторе для счета инкрементов n числа пар полюсов;

д) временные диаграммы рабочих сигналов устройства, показанного на рис. 3г

чередовании полюсов ротора (рис. 3д), средний шаг ротора при этом соответствует расстоянию между элементами Холла, а третий или оба ортогональных элемента Холла в энкодере могут давать защелкивающий выход для счета инкрементов числа пар полюсов n [9]. Число ИС, в зависимости от программирования выхода, может быть даже увеличено до трех, как показано на рис. 2а.

Альтернативную концепцию использования магнитных угловых энкодеров с ИМК, примером которых является ИС MLX90316 Melexis на основе технологии Triaxis, иллюстрируют производные режимы (рис. 4).

Режим, показанный на рис. 4а–б, соответствует концепции компании ММТ, режимы (рис. 4в–г), являются возможным развитием данной концепции применительно к задаче контроля положения/переключения двигателя EPS по мере удешевления технологии. MLX90316 выпускается не только в корпусах SOIC-8 с одним ИМК, как показано на рисунках, но и в корпусах с двойной подложкой и двумя ИМК TSSOP-16, применение которых в EPS гарантирует полную избыточность.

Согласно мнению специалистов компании Melexis, для применений контроля двигателя время срабатывания 12-битного энкодера MLX90316 (4 мс в режиме Slow со скоростью дискретизации 600 мкс и 400–600 мкс в режиме Fast со скоростью дискретизации 200 мкс, со временем цикла Start-Up в 15 мс) является недостаточным, но технологию Triaxis

можно комбинировать с высокоскоростной ЦОС, тогда будет обеспечено получение информации об угловом положении [11]. Характеристики ИС не согласованы с индуктивными резольверами, но следует отметить преимущества Triaxis по сравнению с другими датчиками — повышенную чувствительность за счет усиления рабочего магнитного поля ИМК и повышенную устойчивость к шумам.

Комбинирование датчика положения двигателя и датчика положения руля — также популярное сегодня направление разработок EPS, но оно ограничивается технической проблемой — необходимо реализовать признак ТРО нулевым резервным током, при этом пропорция передаточных чисел шестерен рулевого вала и вала двигателя составляет 20:1. Предлагаются пограничные решения со sleep-режимом датчика, а также датчики Виганда или с памятью типа FRAM [11].

MLX90316 рекомендована компанией Melexis для других применений EPS, и в первую очередь для контроля углового положения руля, но специальный режим, представленный на рис. 4д-е, позволяет использовать эту ИС и для детектирования крутящего момента [1, 11].

Датчик Triaxis отличается высокой чувствительностью и может быть адаптирован для детектирования малых перемещений до ± 10 мм. Линейное положение определяется делением компонентом сигнала V_x на V_y , что и формирует основу для применения MLX90316 в датчиках крутящего момента.

Заключение

Анализ применимости одно-, двух- и трехосевых датчиков Холла в системах автомобильного электрического рулевого управления, при котором был сделан акцент на решение задач контроля положения/переключения электрического двигателя, показывает, что для автомобильной отрасли разработано несколько новых концепций, альтернативных широко известному способу контроля переключения фаз с защелками. Причем непрерывно разрабатываются и предлагаются и новые рабочие режимы, и базовые принципы измерений, предназначенные помочь разработчикам повысить надежность и точность систем EPS нового поколения. ■

Литература

1. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы Часть 14. Итоговый сравнительный анализ. Выводы и обновление // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
2. Бесконтактный датчик положения педали. Решение от 29.11.2006 о выдаче патента на изобретение по заявке на изобретение № 2005113860/28 от 05.05.2005.
3. Бесконтактный датчик углового положения с линейным угловым диапазоном в пределах 360°.

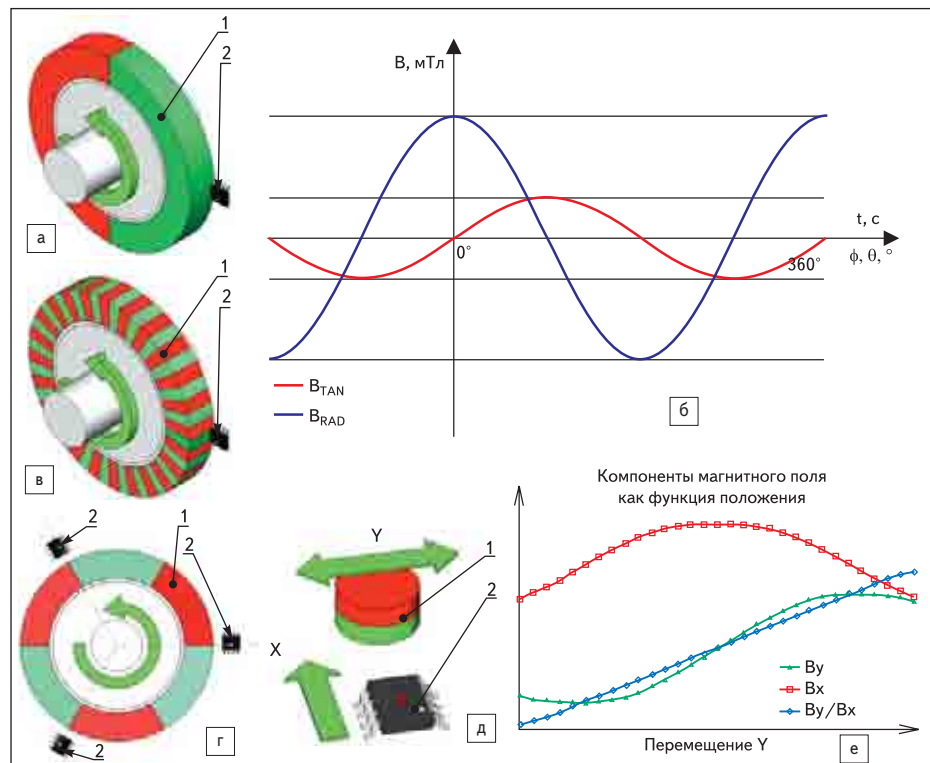


Рис. 4. Альтернативные концепции применения двухосевого магнитного углового энкодера с ИМК типа MLX90316 для детектирования положения/крутящего момента/переключения трехфазного двигателя:
а) сборка с дипольным магнитом [1]: 1 — дипольный магнит; 2 — датчик — ИС MLX90316;
б) выходные характеристики устройства, показанного на рис. 4а:
 V_{TAN} — тангенциальные компоненты поля; V_{RAD} — радиальные компоненты поля;
в, г) сборки с многополюсным магнитным ротором: 1 — многополюсный кольцевой магнит; 2 — датчики;
д, е) рабочий режим для детектирования крутящего момента руля [1]:
1 — аксиальный дипольный магнит; 2 — датчик; Y — направление линейного движения магнита;
 V_x, V_y — синусно-косинусные компоненты поля при изменении координаты Y;
д) пространственная конфигурация;
е) рабочие сигналы

4. Сысоева С. С., Яцун С. Ф., Захаров И. С. Решение № 2231 от 05. 03. 2007 о выдаче патента на изобретение по заявке на изобретение № 2005130846 от 04.10.2005.
4. Бесконтактный программируемый датчик абсолютного углового положения в диапазоне 360°. Сысоева С. С., Яцун С. Ф., Захаров И. С. Решение № 2278 от 18.04.2007 о выдаче патента на изобретение по заявке на изобретение № 2006102833 от 24.01.2006.
5. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 5. Новые перспективы бесконтактных угловых измерений в диапазоне угла 360°: снова датчики Холла — угловые магнитные энкодеры // Компоненты и технологии. 2005. № 6.
6. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 6. Концепции создания магнитных угловых энкодеров на основе эффекта Холла // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
7. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 7. MLX90316 Melexis — первый магнитный угловой энкодер Холла на базе технологии Triaxis // Компоненты и технологии. 2005. № 8.
8. Сысоева С. Рекомендации производителям автомобильных цифровых датчиков скорости

- и положения. Часть 1. Постановка задач и общие конструкторские рекомендации // Компоненты и технологии. 2006. № 9.
9. Сысоева С. Рекомендации производителям автомобильных цифровых датчиков скорости и положения. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2007. № 2.
10. Hiligsmann V. Melexis Microelectronics Systems. 360° Rotary Position Sensing with Novel Hall Effect Sensors // Sensors Magazine, March 2006. www.sensorsmag.com
11. Hiligsmann V. Triaxis Hall Solutions for Electrical Power Steering Applications // Auto Electronics. January/February 2006. www.autoelectronics.com
12. D'Angelo G., Moselli G. STMicroelectronics. Improve Hall sensor rotor-position measurements: Part 1. Automotive DesignLine 01/30/2007. <http://www.automotivedesignline.com/howto/197001808>
13. D'Angelo G., Moselli G. STMicroelectronics. Improve Hall sensor rotor-position measurements: Part 2. Automotive Design Line 02/2007.
14. Сысоева С. Новые интегральные датчики Холла специального назначения // Компоненты и технологии. 2004. № 9.
15. Сысоева С. Датчики скорости автомобиля. Анализ конструкций и перспективы развития // Компоненты и технологии. 2004. № 8.