

Разработка нового поколения автомобильных датчиков скорости и положения

С 2013 года впервые стала доступной для разработчиков компонентная база датчиков скорости и углового положения на основе эффекта туннельного магниторезистивного (ТМР) эффекта, предложенная компанией MDT. В публикуемой ниже статье представлены новые разработки автомобильных датчиков скорости и положения с использованием данной базы, которые также частично или полностью могут применяться совместно с компонентной базой датчиков на основе ГМР- (гигантского магниторезистивного) или АМР- (анизотропного магнитного резистивного) эффекта, вертикальных и даже планарных датчиков Холла или вообще неинтегральных типов датчиков. Технические области применения новинок включают в себя автоэлектронику (датчики частоты вращения, углового положения дроссельной заслонки, педали, угла рулевого колеса), переключение бесколлекторных двигателей, джойстики, измерение тока.

Светлана СЫСОВЕВА
Dr._Gold@sysoeva.com

Введение

Туннельный магниторезистивный эффект характеризуется изменением магнитосопротивления под действием магнитного поля в так называемом магнитном туннельном переходе, сформированном посредством многослойных материалов. ТМР-эффект показывает высокие изменения удельного сопротивления под действием магнитного поля, вследствие чего датчики и преобразователи магнитного поля на его основе считаются сегодня одними из наиболее перспективных [1] для применения в потребительской и автоэлектронике, мобильных устройствах и других сегментах рынка.

Так, автопром, будучи ключевым заказчиком этого вида датчиков как по объемам потребления, так и в технологическом плане, использует их для определения скорости автомобиля (датчик ферромагнитного зубчатого ротора выходного вала коробки передач, рис. 1), контроля положения дроссельной заслонки (датчик абсолютного углового положения дипольного диаметрально намагниченного магнита, рис. 2) [3, 4], педали акселератора, в магнитоуправляемых ключах для контроля ремней безопасности или положения сиденья, бесконтактного переключения двигателей и пр. В автоэлектронике на сегодня доминируют датчики Холла с планарными элементами, чувствительные к перпендикулярному магнитному полю [2].

За пределами стандартных компонентов особый интерес представляют технологические разновидности гибридных датчиков Холла с интегрированными магнитоконцентраторами (ИМК), которые отличаются повышенной чувствительностью к параллельным компонентам поля, магнитной, механической и температурной стабильностью. Разработаны технологии вертикальных датчиков Холла, чувствительных к параллельным компонентам магнитного поля и полностью эмулирующих в этом плане датчики на основе эффекта анизотропного магнитосопротивления (АМР), гигантские магниторезисторы (ГМР), представляющие собой другие широко известные коммерческие технологии с высокой чувствительностью и стабильностью. ТМР-эффект чувствителен также к параллельным магнитным полям и превосходит по чувствительности, уровню первичного

сигнала и уникальному набору других преимуществ все вышеперечисленные коммерческие технологии.

Итак, ТМР-эффект отличается высокой чувствительностью, высоким уровнем первичного сигнала без необходимости его усиления,

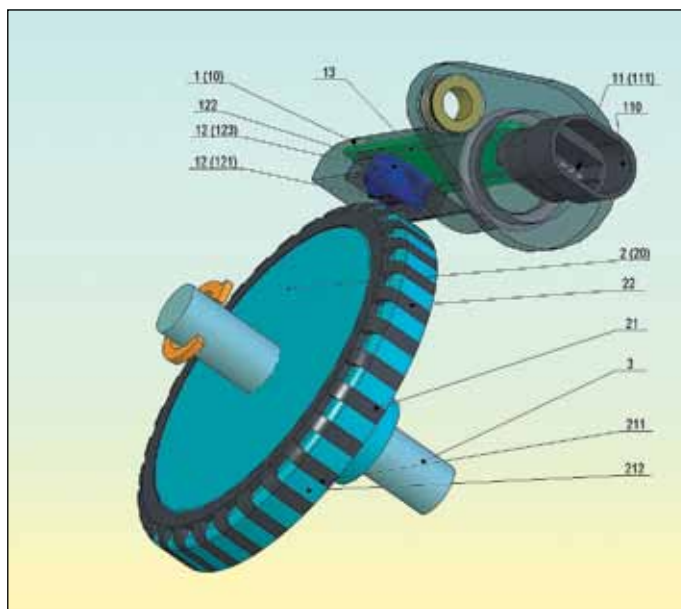


Рис. 1. Ключевой пример автомобильных датчиков магнитного поля на основе эффекта Холла: датчик скорости автомобиля (датчик ферромагнитного зубчатого ротора выходного вала коробки передач) [3]:

- 1, 10, 100 — бесконтактный статор датчика ферромагнитного зубчатого ротора;
- 2 — ферромагнитный зубчатый ротор; 3 — вращающийся вал;
- 11 — корпус датчика (110) с контактами (111); 12 — модуль датчика Холла;
- 13 — печатная плата; 21 — кодовые элементы — зубья;
- 22 — кодовые элементы — пропуски зубьев;
- 121 — микросхема дифференциального датчика (TLE4921-5U Infineon);
- 122 — корпус интегрального модуля, включающий в себя обратносмещающий магнит (123)

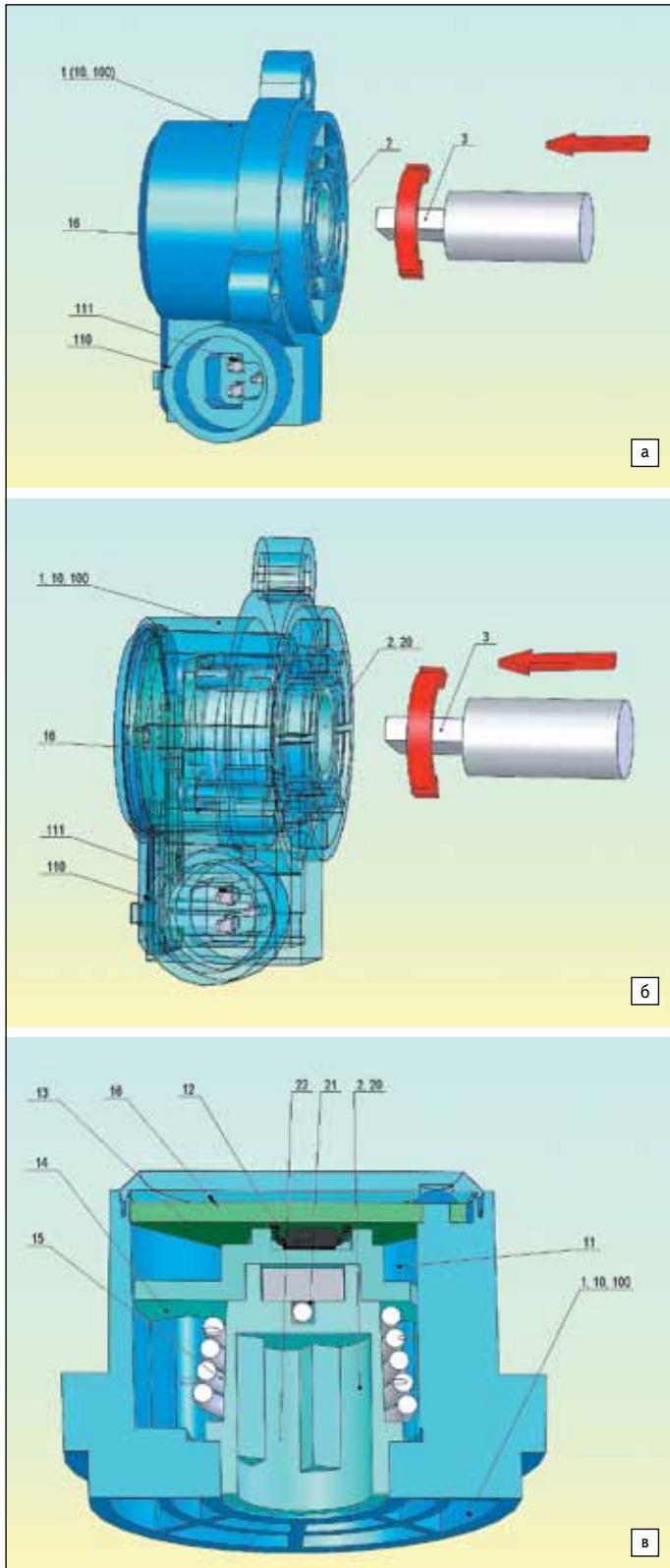


Рис. 2. Ключевой пример автомобильных датчиков магнитного поля на основе эффекта Холла: датчик положения дроссельной заслонки (датчик абсолютного углового положения дипольного диаметрально намагниченного магнита) [4]:
 1, 10, 100 — бесконтактный датчик-статор; 2 — магнитный ротор;
 3 — вращающийся вал; 11 — корпус датчика (110) с контактами (111);
 12 — интегральный датчик Холла (микросхема MLX90316 Melexis); 13 — печатная плата;
 14 — конструктивная деталь для 3D-ограничения нежелательных степеней свободы перемещения ротора;
 15 — пружина; 16 — крышка датчика;
 21 — дипольный диаметрально намагниченный магнит; 22 — установочная втулка ротора

высокой температурной стабильностью, широким диапазоном доступных рабочих расстояний, способностью детектирования слабых магнитных полей, устойчивостью к механическим и магнитным смещениям и рядом других характеристик, что делает его интересным для использования в автоэлектронике.

Первые специализированные ТМР-датчики скорости ферромагнитного зубчатого ротора и углового положения дипольного диаметрально намагниченного магнита выпущены MultiDimension Technology Co., Ltd. в виде магниточувствительных ТМР-элементов в корпусах интегральных микросхем [1].

ТМР-датчики зубчатого ротора MMGX45 способны детектировать роторы с малым шагом (меньшим, чем для других эффектов). Поскольку компоненты от MDT дают на выходе только первичные сигналы, они на данном этапе подходят и в качестве датчиков скорости автомобиля, и для обнаружения линейного и углового положения.

В свою очередь, ТМР-датчики MMA253F, разработанные специально для бесконтактных измерений угла в 360-градусном диапазоне, снабжены высокоамплитудными синусно-косинусными выходами напряжения и подходят для применения в качестве угловых датчиков положения (типа датчика положения дроссельной заслонки) и энкодеров.

Первые шаги в разработке следующего поколения датчиков скорости автомобиля

Доступная компонентная база ТМР-датчиков скорости

MMGX45 (рис. 3) — первый мостовой ТМР-датчик зубчатого ротора MDT, доступный в шести стандартных вариантах (для шагов роторов в 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2 и 3 мм) и одном из двух типов корпуса с малым форм-фактором (LGA, $3 \times 3 \times 0,9$ мм и $3 \times 6 \times 0,9$ мм). В зависимости от исполнения датчик скорости включает в себя один или два полных моста Уитстона с четырьмя или восемью неэкранированными высокочувствительными сенсорными ТМР-элементами.

Мост Уитстона создает дифференциальный выход напряжения, соответствующий градиенту магнитного поля вдоль чувствительного направления, параллельного лицевой поверхности микросхемы. В двухмостовой конфигурации два ортогональных моста Уитстона обеспечивают синусный и косинусный сигналы напряжения, которые могут использоваться для измерения положения зубчатого ротора и направления движения. Датчики магнитного зубчатого ротора MMGX45, отличаясь высокой чувствительностью по отношению к градиенту магнитного поля, могут определять в нем малые изменения, а кроме того, демонстрируют хорошую температурную стабильность выходного сигнала. Исполнения датчиков проиллюстрированы в таблице.

Таблица. Исполнения ТМР-датчиков скорости MMGX45 компании MDT

Серийный номер	Исполнение одномостовое/двухмостовое	Разделение между ТМР-элементами, мм	Диапазон среднего шага роторов	Формат корпуса
MMG145F	Одномостовое	0,25	0,3–1 мм; оптимальный шаг — 0,5 мм	LGA6L (3×3)
MMG245F		0,5	0,7–2 мм; оптимальный шаг — 1 мм	
MMG345F		0,75	1–3 мм; оптимальный шаг — 1,5 мм	
MMG245D	Двухмостовое	0,5	0,7–2 мм; оптимальный шаг — 1 мм	LGA6L (3×3)
MMG445D		1	1,3–4 мм; оптимальный шаг — 2 мм	
MMG845D		2	2,7–8 мм; оптимальный шаг — 4 мм	LGA6L (3×6)
MMGC45D		3	4–12 мм; оптимальный шаг — 6 мм	

Применение компонентной базы ТМР в измерительных системах датчиков скорости

Применение в конструкциях и измерительных системах датчиков скорости ферромагнитного зубчатого ротора проиллюстрировано на рис. 4 [5]. Как видно из рис. 4а, второй тип корпусов ($3 \times 6 \times 0,9$ мм) и двухмостовое исполнение соответствующего типа MMGC45D могут быть использованы для простого замещения¹ интегральных дат-

¹ Обратим внимание, что питание ТМР-датчиков MDT осуществляется от 1-вольтового источника. Рабочая температура — только до +125 °С, поэтому о прямом замещении данной компонентной базой коммерческих датчиков Холла в коробке передач речь пойдет после повышения рабочей температуры ТМР-компонентов до +150 °С.

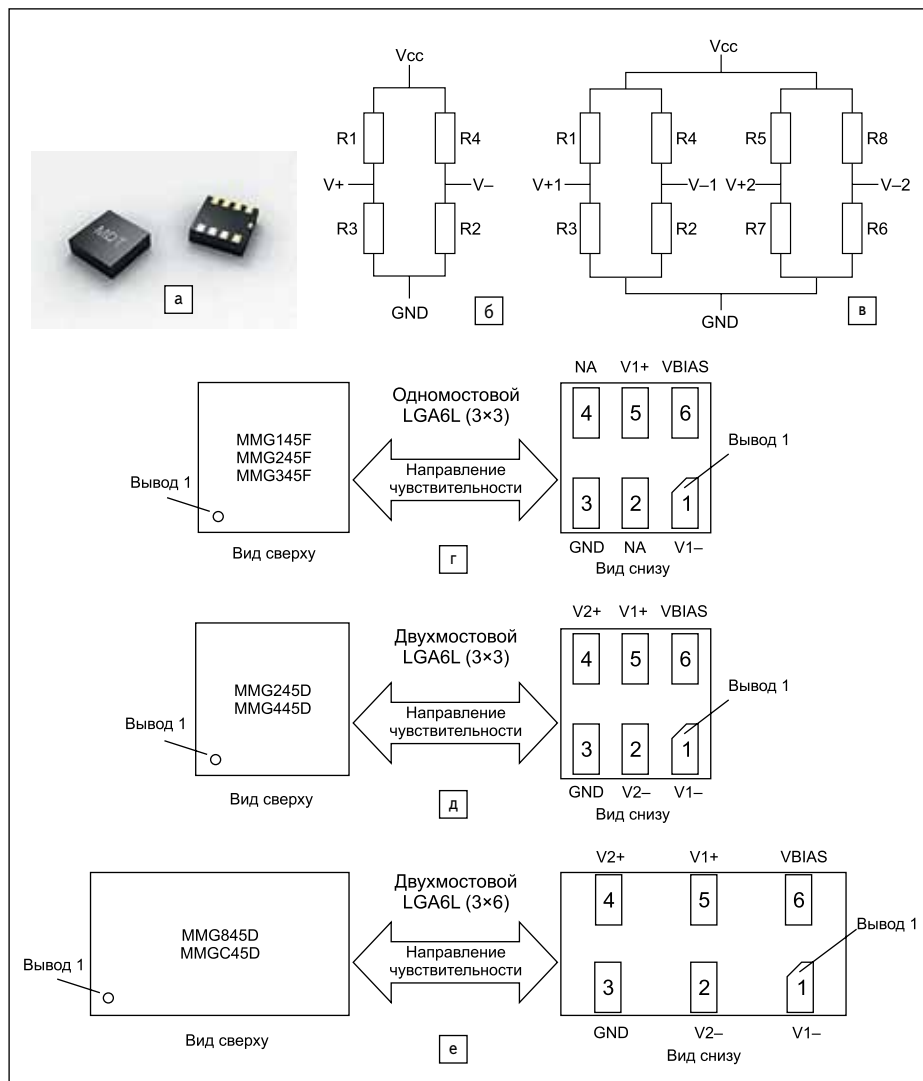


Рис. 3. MMGX45 — первый магнитный ТМР-датчик зубчатого ротора от MDT: а) внешний вид; б, в) блок-диаграммы: б) одномостовая конфигурация; в) двухмостовая конфигурация; г—е) конфигурация выводов для различных исполнений и типов корпусов

чиков и модулей Холла вместе с сохранением существующего типа штампованного ротора диаметром 72 мм с 32 ферромагнитными зубьями (средний шаг порядка 7 мм).

Двухмостовое исполнение MMG445D в корпусе первого типа (3×3×0,9 мм) позволит применять 256 кодовых элементов (по 128 зубьев и впадин) с шагом ротора порядка 1,75 мм (рис. 4б). А двухмостовое исполнение MMG845D в корпусе второго типа (3×6×0,9 мм) позволит вдвое увеличить число кодовых элементов (зубьев и впадин) — с 64 до 128, шаг ротора при этом также уменьшится вдвое — с 7 до 3,5 мм.

Компьютерное моделирование позволило разместить до 512 ферромагнитных элементов (всего 1024 кодовых элемента) для ротора данного диаметра (72 мм), средний шаг при этом составил менее 0,5 мм. Это даже не предельное значение, допустимое для одномостового исполнения датчика MMG145F в корпусе размером 3×3×0,9 мм.

При достижении столь высокого разрешения отдельным пунктом встает вопрос размещения технологии изготовления: вместо штампованных ферромагнитных роторов могут начать применяться, например, пленочные — такие же, как ранее известные магнитные роторы с магнитными пленками (рис. 4в).

Те же самые датчики скорости могут применяться не только для ферромагнитных зубчатых роторов, но и для магнитных роторов — без обратносмещающих магнитов, которые для них не требуются (рис. 4г).

Перспективы применения ТМР-компонентов в качестве датчиков скорости очевидны: их явные преимущества — в дальнейшей миниатюризации и упрощении конструкции датчиков скорости, а также в повышении разрешения и удешевлении технологии изготовления роторов. ТМР-компоненты допускают работу с малыми обратносмещающими магнитами, меньшими

по размерам ферромагнитными и магнитными кодовыми элементами с большими рабочими расстояниями (воздушным зазором). ТМР-датчики скорости устойчивы к магнитным, механическим и температурным смещениям и дрейфам, поэтому способны и далее повышать точность и улучшать другие функциональные характеристики датчиков скорости.

Исследования магнитной системы ТМР-датчиков скорости и разработка схемотехнического решения для датчика скорости, в том числе полностью высокоинтегрированного ASIC-решения для обработки выходного дифференциального сигнала, — ожидаются в ближайшей перспективе.

Формулы преобразования датчика положения дроссельной заслонки

Доступная компонентная база ТМР-датчиков угла поворота

Первый двухосевой ТМР-датчик MMA253F (рис. 5) угла поворота малого магнита вырабатывает на выходе сигналы напряжения, пропорциональные синусу и косинусу приложенного магнитного поля, параллельного поверхности датчика. MMA253F включает в себя два моста Уитстона, каждый из которых содержит по четыре ТМР-резистора в конфигурации push-pull. Датчик поставляется в компактном корпусе LGA8 размером 3×3×0,9 мм.

MMA253F может использоваться для измерения ориентации магнитного поля магнита, вращающегося параллельно поверхности корпуса датчика. Магнитное поле детектируется в нем ТМР-элементами, состоящими из двух магнитных слоев. Один слой каждого является «приколотым» (pinned layer) и не подвержен действию магнитных полей, а другой слой — свободный и имеет намагниченность, которая выравнивается параллельно приложенному магнитному полю. Эффект ТМР производит сопротивление, пропорциональное синусу и косинусу относительной угловой разницы между направлениями намагничивания свободного и «приколотого» слоя. Выходные сигналы ТМР-датчиков представляют собой синусные и косинусные сигналы напряжения в зависимости от угла приложенного магнитного поля, посредством чего обеспечивается измерение ориентации магнита.

На рис. 5в показаны синусно-косинусные напряжения, типичные для магнита диаметром 6 мм и высотой 2,5 мм, при уровне напряжения питания в 1 В.

ТМР-мосты Уитстона вырабатывают пиковый сигнал практически на уровне 100% напряжения питания, что исключает необходимость его усиления. ТМР-мост способен самостоятельно компенсировать температурный дрейф напряжения.

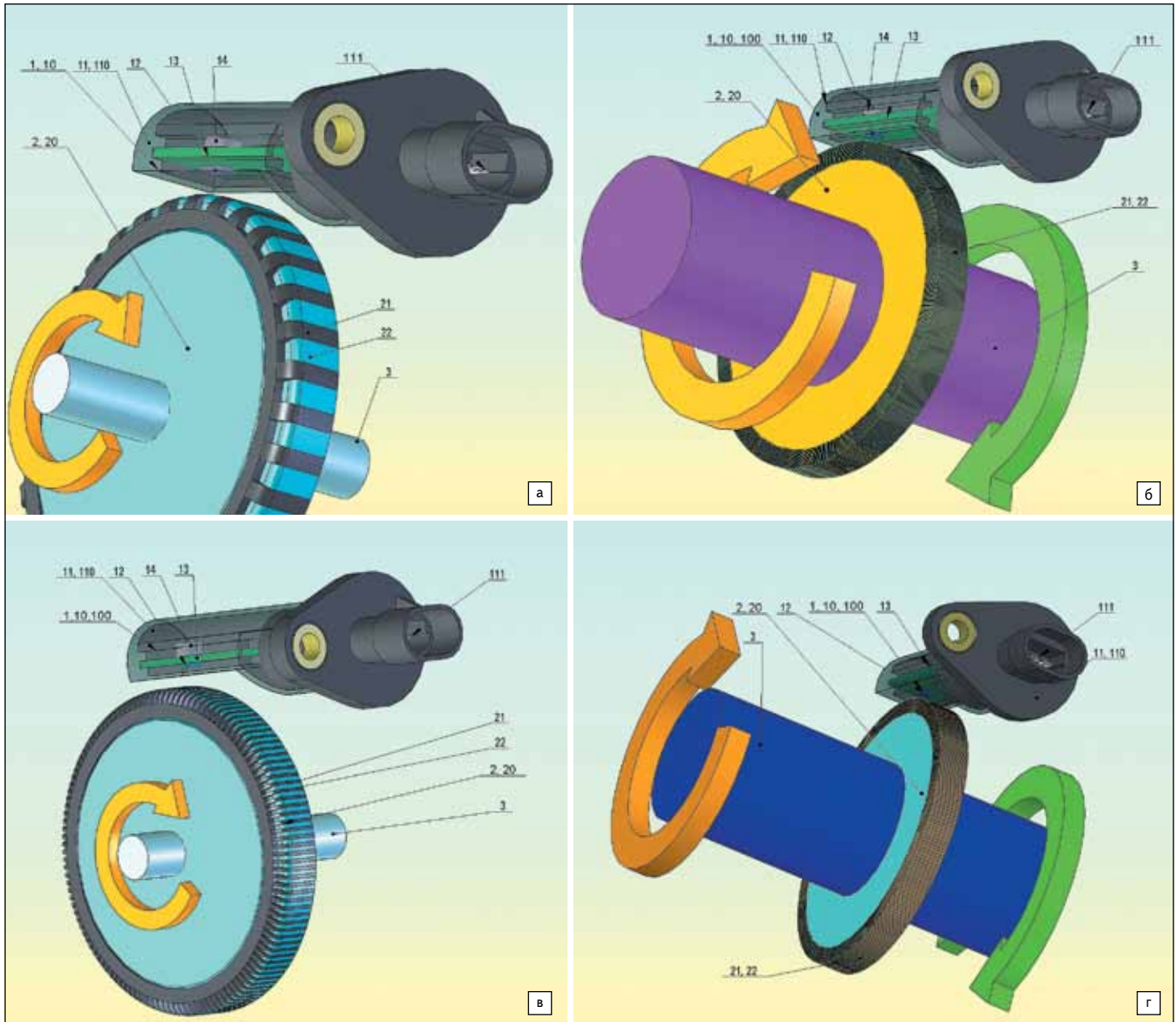


Рис. 4. Измерительная система датчика скорости автомобиля с использованием компонентной базы на основе ТМР-эффекта:

а) простое замещение ТМР-компонентами для дифференциальных датчиков Холла в существующих измерительных системах;

б) демонстрация возможности повышения разрешения ротора в четыре раза и более;

в) демонстрация применения высокоразрешающих ферромагнитных зубчатых роторов следующего поколения, изготовленных по специальной технологии;

г) демонстрация применения магнитных роторов следующего поколения на основе высокоразрешающих магнитных пленок, изготовленных по специальной технологии;

1, 10, 100 — бесконтактный статор датчика ферромагнитного зубчатого ротора; 3 — вращающийся вал; 11 — корпус датчика (110) с контактами (111); 12 — микросхема ТМР-датчика MMGX45; 13 — печатная плата; 14 — обратносмещающий магнит; 2 — ферромагнитный зубчатый ротор; 21 — кодовые элементы — зубья; 22 — кодовые элементы — пропуски зубьев

Применение ТМР-датчиков в конструкциях датчиков абсолютного углового положения

Применение ТМР-датчиков в конструкциях и измерительных системах датчиков положения дроссельной заслонки проиллюстрировано на рис. 6 [6].

Как видно из рис. 6, ТМР-компоненты не только допускают замещение датчиков Холла, но и обеспечивают (за счет собственной высокой чувствительности к параллельным компонентам магнитного поля) большие рабочие расстояния (порядка 2–5 мм и выше) и более гибкое механическое размещение в 3D-пространстве датчика отно-

сительно магнита с любой стороны платы. Применение ТМР-компонентов демонстрирует, во-первых, дальнейшую миниатюризацию, во-вторых — возможность гибкого подбора магнитов любой формы и намагниченности вместе с варьированием рабочих расстояний, в третьих — дальнейшее упрощение конструкции и монтажа. Рис. 6а иллюстрирует макетный образец датчика положения дроссельной заслонки на основе прототипа [4] с расположением ТМР-датчика, запаянного с обратной стороны платы, а минималистический пример технологичного исполнения того же датчика для серийного производства показан на рис. 6б.

Поскольку ТМР-компоненты представляют собой истинно двухосевые компоненты, снижение нежелательной чувствительности к вертикальным смещениям и наклонам ротора относительно датчика достигается на физическом уровне. Кроме того, применение ТМР-компонентов в конструкциях датчиков положения дроссельной заслонки обеспечивает снижение энергопотребления, повышение надежности и функциональной безопасности. Выход обычной микросхемы из строя приводит к полной неработоспособности любого датчика, что угрожает автомобильной функциональной безопасности, обеспечение которой актуализировано стан-

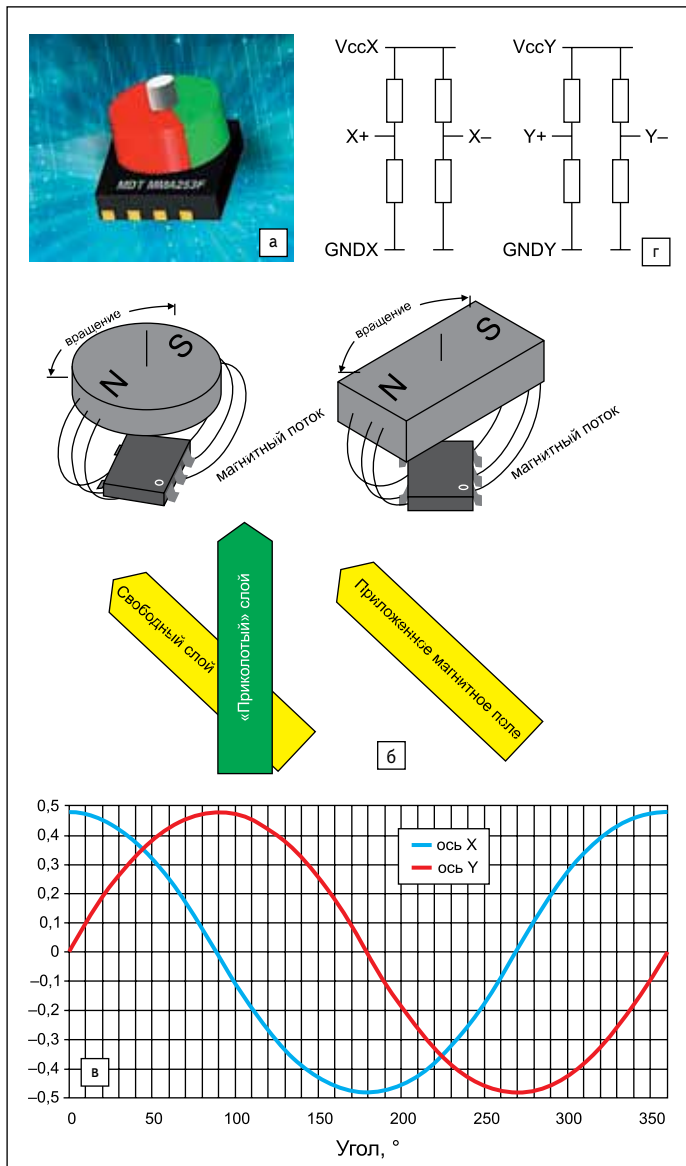


Рис. 5. ТМР-датчики угла:
 а) измерительная конфигурация и внешний вид двухосевого первого ТМР-датчика угла MMA253F;
 б) иллюстрация измерительного принципа; в) типичные выходные сигналы;
 г) мостовая схема

дартом ISO26262 [7]. Рассмотренные конструкции легко допускают размещение двух ТМР-датчиков одновременно с обеих сторон платы и создание так называемой избыточной измерительной системы.

Поскольку ТМР-компоненты, как уже говорилось, это истинно двухосевые датчики, имеющие в плоскости XY не только высокую рабочую, но и паразитную чувствительность, в конструкциях могут быть приняты специальные меры по уменьшению нежелательных горизонтальных смещений магнитной системы, эксцентриситета вращения и наклонов ротора относительно центра датчика. Малый эксцентриситет позволяет использовать меньшие по размерам в плоскости XY магниты, а больший эксцентриситет может быть скомпенсирован применением магнитов, более солидных по размерам и намагниченности.

В данном устройстве применяются дипольные магниты (21) различной геометрии с одним обязательным условием: намагниченности в той плоскости, в которой ротор совершает рабочее угловое движение с двумя степенями свободы. Магнит (21) может иметь любую из следующих форм: сплошного цилиндра; цилиндра с централь-

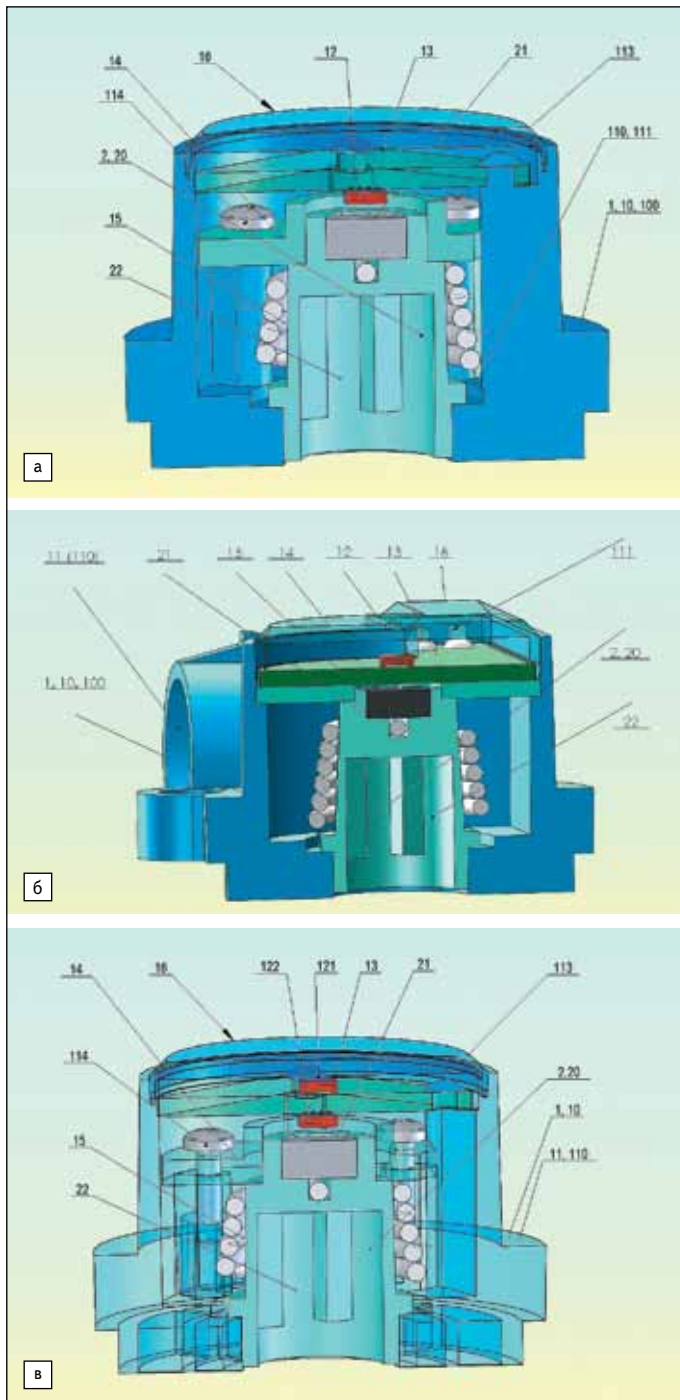


Рис. 6. Датчик положения дроссельной заслонки (датчик абсолютного углового положения дипольного диаметрально намагниченного магнита на основе компонентной базы магниточувствительных ТМР-датчиков угла:
 а) базовая конструкция с ТМР-датчиком, запаянным с обратной стороны платы, и центральным отверстием;
 б) базовая конструкция с ТМР-датчиком, запаянным с верхней стороны платы;
 в) избыточная измерительная конфигурация с двумя датчиками, запаянными с обеих сторон платы:
 1, 10, 100 — бесконтактный датчик — статор; 11 — корпус датчика (110) с контактами (111); 12 — ТМР-датчик угла поворота в интегральном корпусе (МДТ); 13 — печатная плата;
 14 — центральная конструктивная деталь — вставка для точного позиционирования датчика (12) относительно ротора в 2D; 15 — пружина;
 16 — крышка датчика; 2, 20 — магнитный ротор;
 21 — дипольный диаметрально намагниченный магнит;
 22 — установочная втулка ротора; 114 — крепежные элементы для вставки (14); 113 — крепежные элементы для платы (13); 12 — магниточувствительный измерительный элемент, состоящий из двух датчиков (121 и 122), размещенных по разные стороны платы

ным сквозным или несквозным отверстием (пазом) со стороны, примыкающей к магниточувствительному датчику при его установке в магнитодержатель; кольцеобразную (с широким сквозным отверстием); прямоугольного параллелепипеда или куба.

Различные типы магнитов, подходящие для данного устройства, показаны на рис. 7.

Для передовых ТМР-датчиков и многих других перечисленных выше типов могут использоваться малый дипольный диаметрально намагниченный магнит диаметром 6 мм и высотой 2,5 мм или сплошные цилиндрические магниты других размеров, подбор которых определяется требуемым рабочим полем и расстоянием между магнитом и датчиком.

Кроме того, применение магнитов специальных размеров и форм может быть рекомендовано для компенсации большого рабочего зазора, эксцентриситета и невыравнивания центра магнитной системы от оптимального.

На данный момент автором разработано порядка 50 исполнений датчика положения дроссельной заслонки и концептуальных устройств, иллюстрирующих специальные конструктивные меры и модификации магнитной системы для снижения погрешностей центрирования магнитной системы и эксцентриситета или их компенсации. Все эти меры сопутствуют достижению более высокой измерительной точности и представляют собой в основном дальнейшие шаги по совершенствованию устройства в плане минимизации нежелательной чувствительности к горизонтальным смещениям. Но они также оказались полезными и для устранения взаимных наклонов ротора и статора в корпусе датчика, а кроме того, позволили добиться одновременного снижения вертикальной чувствительности к погрешностям магнитной системы.

В процессе разработки стало очевидно, что фундаментальные улучшения магнитной системы на основе дипольного магнитного ротора, достигнутые во вновь разработанных исполнениях, обеспечили значительное повышение точности, надежности и других характеристик устройств на основе не только ТМР-датчиков угла, а также ГМР- и АМР-компонентов и вертикальных датчиков Холла, но даже на основе планарных элементов Холла с ИМК и без них.

ТМР-датчики МДГ работают также при 5-В напряжении питания (максимальное значение составляет 7 В), а следовательно, они полностью пригодны для использования в датчиках положения дроссельной заслонки с соответствующей интерфейсной микро-схемой.

Исследования магнитной системы ТМР-датчиков скорости и разработка схемотехнического решения для датчика углового положения, в том числе полностью высокоинтегрированного ASIC-решения для обработки выходного дифференциального

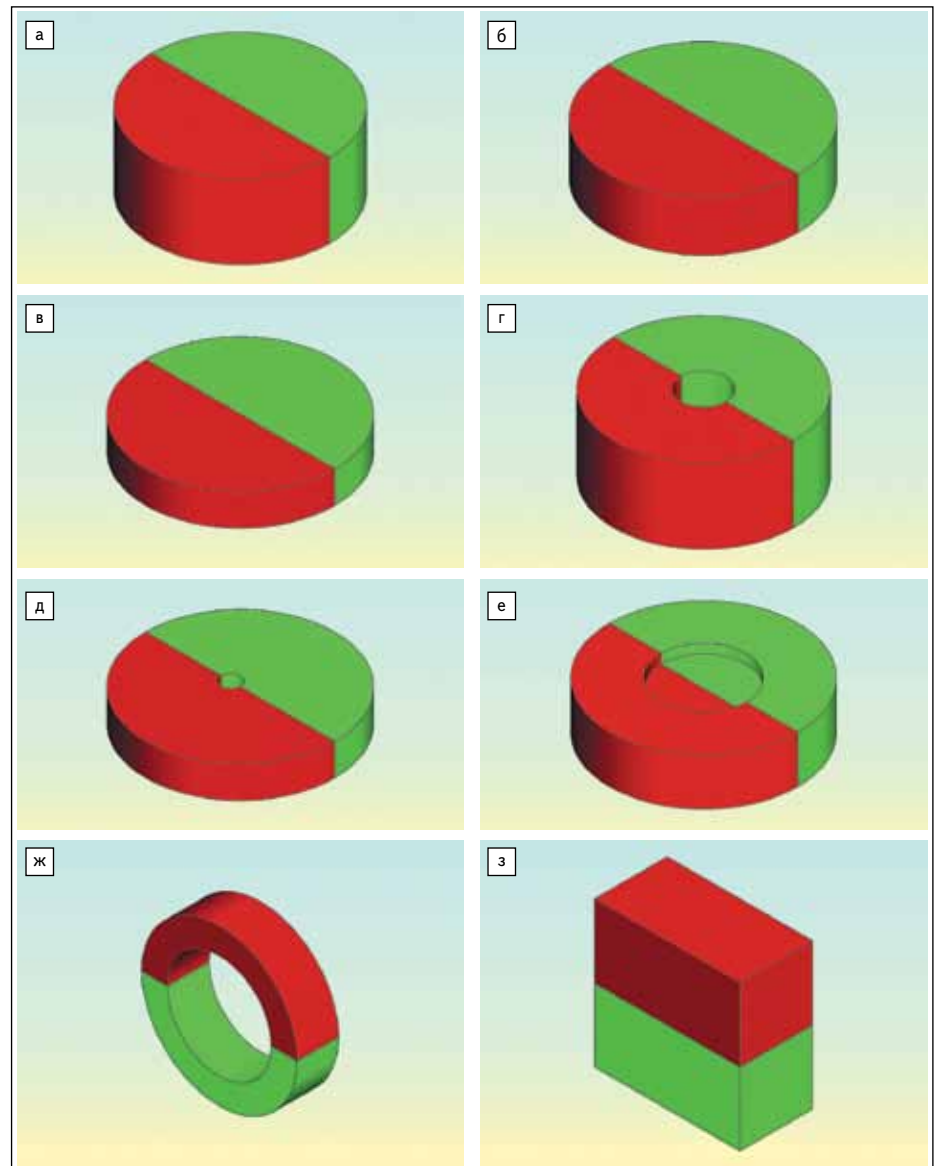


Рис. 7. Датчик положения дроссельной заслонки (датчик абсолютного углового положения дипольного диаметрально намагниченного магнита) с магнитами специальной формы:

а, б) сплошной цилиндр; в) диск; г) цилиндр с центральным сквозным отверстием;

д) диск с центральным сквозным отверстием;

е) цилиндр или диск с центральным несквозным пазом со стороны, примыкающей к магниточувствительному датчику при его установке в магнитодержатель;

ж) кольцеобразный магнит (с широким сквозным отверстием);

з) магнит в форме прямоугольного параллелепипеда или куба

сигнала, обещают в недалекой перспективе коснуться и датчика скорости. В отличие от датчиков скорости, представляющих собой полностью бесконтактные устройства, для ТМР- и других истинно двухосевых датчиков абсолютного углового положения возникает немало вопросов в отношении того, какие конструкции совершеннее. Варианты для выбора включают в себя группу истинно двухосевых исполнений только с минимальным эксцентриситетом и осевым смещением либо истинно 3D-исполнения также и с минимальной вертикальной чувствительностью, которые очевидно предпочтительны для датчиков Холла. Но ТМР-компоненты — это устройства уже следующего за датчиками

Холла поколения, для которых ряд усовершенствований может стать избыточным.

Заключение

Новые разработки датчиков демонстрируют повышение чувствительности и рабочих расстояний, разрешения, точности и надежности, миниатюризацию и упрощение конструкции, допускают гибкое размещение, варьирование рабочих расстояний, гибкий подбор магнитов, в том числе специальной формы, и, что важно, дальнейшее снижение потребления энергии и уменьшение цены.

В настоящее время все исполнения новых датчиков положения и скорости на-

ходятся в стадии подготовки к патентованию, параллельно с которым автор готов предоставить их для использования на договорных условиях с последующим лицензированием. ■

Литература

1. Сысоева С. С. ТМР-датчики MDT. Технология туннельного магниторезистивного (ТМР) эффекта и продукты на данной основе // Innovations Insight Magazine. 2013. № 1. www.innovationsinsightmag.com
2. Сысоева С. С. Датчики магнитного поля: ключевые технологии и новые перспективы. Часть 1. Датчики Холла // Компоненты и технологии. 2014. № 1.
3. Патент № 35441. Бесконтактный датчик скорости автомобиля. Сысоева С. С. и др. Заявка от 08.09.2003 г., дата публикации 10.01.2004 г.
4. Патент № 2317522. Программируемый бесконтактный датчик углового положения с линейным угловым диапазоном в пределах 360°. Сысоева С. С. и др. Заявка от 30.01.2006 г., дата публикации 20.02.2008 г.
5. Сысоева С. С. Первые шаги в разработке следующего поколения датчиков скорости автомобиля. Innovations Insight Magazine. № 1. 2013. www.innovationsinsightmag.com
6. Сысоева С. С. Формулы преобразования датчика положения дроссельной заслонки. Innovations Insight Magazine. 2013. № 1. www.innovationsinsightmag.com
7. Сысоева С. С. Новые перспективы автомобильной функциональной безопасности. Innovations Insight Magazine. 2013. № 1. <http://www.innovationsinsightmag.com/articles/novye-perspektivy-avtomobilnoy-funkcionalnoy-bezopasnosti-standart-iso-26262-urovni-asil-i>