

# Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы.

## Часть 12. Актуальные классические принципы оптоэлектроники в автоэлектронике

Светлана СЫСОВЕВА  
S.Sysoeva@mail.ru

В данной публикации рассматриваются научные принципы конструирования актуальных для автоэлектроники устройств — оптических датчиков положения и энкодеров — как с целью непосредственного применения, так и с теоретической точки зрения. Многие принципы действия таких устройств легли в основу объединения технологий, способствовавших созданию перспективных интегральных энкодеров Холла.

### Введение

Последнее время в связи с появлением большого числа недорогих и надежных магнитоуправляемых ИС и, главным образом, новых магнитных энкодеров Холла инженеры, занимающиеся вопросами автоэлектроники, стали отрицательно относиться к использованию оптической технологии в таких применениях, как детектирование положения и скорости посредством оптических датчиков. Веским аргументом против оптических компонентов является их чувствительность к загрязнению и повышенной температуре — условиям, типичным для автомобильной среды, а также более высокая цена, если сравнивать такие компоненты с новыми угловыми энкодерами Холла.

И все-таки за пределами данных ограничений оптические датчики — более высокоточные, чем многие электрические измерители, а кроме того, характеризуются высокой разрешающей способностью и высокой надежностью [165–184]. Базовые принципы технологии разрабатывались и оттачивались многие годы, и именно оптические принципы составляют основу сегодняшних энкодеров, в том числе и магнитных.

В дальнейшем принципы конструирования новых датчиков более высокого уровня предполагают объединение технологий, поиск новых нестандартных решений.

Основная цель данной статьи — анализ положительных сторон и дальнейших перспектив применения оптоэлектронных датчиков в автоэлектронике, где они не просто способны

работать, но и, как показывает зарубежная практика, работают хорошо.

### Оптические датчики

Все известные оптические (и многие неоптические) схемы детектирования движения сводятся к двум базовым схемам, показанным на рис. 73, 74. Схемы работы устройств проиллюстрированы рис. 75 [165–166].

Рис. 73а–в демонстрируют принцип работы типичного щелевого оптического переключателя-оптопрерывателя, или оптрона. В пластмассовом корпусе расположены светодиод и фотодетектор, например фототранзистор, разделенные воздушным зазором в теле корпуса. Свет от светодиода попадает на фототранзистор, который переходит

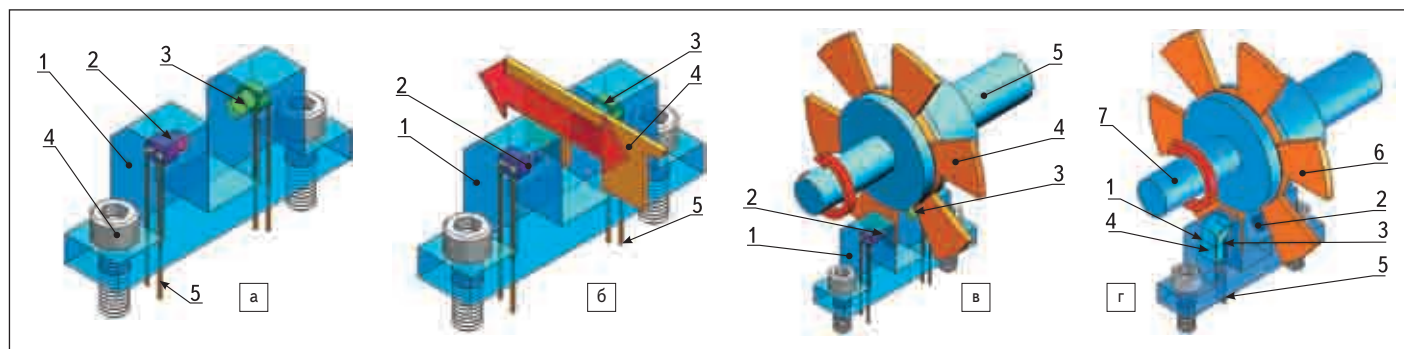


Рис. 73. Базовая схема оптического детектирования движения — прерыватель

а–в — щелевой оптический (фотоэлектрический) датчик — оптопрерыватель (оптрон или оптопара);

1 — корпус датчика; 2 — светодиод; 3 — фоточувствительный элемент (фототранзистор или фотодиод);

а — конструкция датчика; 4 — элементы для монтажа корпуса; 5 — терминалы для монтажа на печатной плате;

б — линейный прерыватель — датчик линейной скорости (цифровой индикации определенного линейного положения); 4 — линейный ротор (линейно перемещающийся элемент) с чередующимися оптически прозрачными и оптически непрозрачными участками; 5 — терминалы для монтажа на печатной плате;

в — датчик угловой скорости (индикации определенного углового положения); 4 — вращающийся ротор — крыльчатка с непрозрачными лопастями; 5 — вращающийся вал;

г — аналог оптопрерывателя — щелевой датчик скорости Холла: 1 — корпус датчика; 2 — магнит; 3 — датчик Холла (униполярный ключ); 4 — магнитопровод;

5 — терминалы для монтажа на печатной плате; 6 — вращающийся ротор — крыльчатка с лопастями из ферромагнитного материала; 7 — вращающийся вал.

в состоянии насыщения. Если в зоре появляется непрозрачный элемент — ротор, путь света между светодиодом и фототранзистором блокируется, что вызывает переключение выхода фототранзистора к высокому уровню.

Излучающие светодиоды могут функционировать как в видимом, так и в инфракрасном спектре. Для работы датчика необходимо, чтобы конструкция корпуса и ширина элементов ротора обеспечивали чередование светопередачи и перекрытия оптического канала. Существенно уменьшить ширину оптических кодовых элементов и повысить разрешение устройства позволяют лазерные диоды. Расстояние от датчика до детектируемого объекта в пределах ширины рабочего зазора не существенно, но если необходим больший рабочий диапазон, также применяются лазерные светодиоды.

Простейшим примером может служить проверка с помощью оптического оптопрерывателя открытия или закрытия двери или капота, которые для блокировки света снабжаются подвижным флагом, падающим в щель, более сложным — в энкодерах (будет рассмотрено далее).

Щелевые оптопрерыватели широко используются для детектирования скорости двигателя, на валу которого размещен ротор, периодически блокирующий оптический канал, но в автоэлектронике их применение ограничено чувствительностью к загрязнениям и температурам (обычно 80 °C). Необходимо отметить, что некоторые современные устройства, например инфракрасные диоды и фототранзисторы Honeywell, работают и при температурах до 125 °C.

В значительной степени проблему также решает интерпретация схемы прерывателя на основе датчика Холла (рис. 73г), но, в отличие от оптопрерывателя, к размерам крыльчатки предъявляются требования минимальной ширины лопасти, что в свою

очередь ограничивает пространственное разрешение датчика.

На рис. 74а–г проиллюстрирована работа рефлективного оптического датчика, который функционирует аналогично, но конструктивно отличается тем, что фототранзистор в рефлективном датчике переключается светом, отраженным от детектируемой поверхности.

Светодиод и фототранзистор рефлективного датчика расположены с одной стороны поверхности детектируемого объекта. Рефлективные датчики обеспечивают большую гибкость монтажа, но характеризуются фокусным расстоянием (оптимальным расстоянием от датчика до детектируемого объекта), на котором он должен быть помещен (обычно в пределах 2,54–12,7 мм) и относительно которого варьируется рабочий диапазон устройства.

При конструировании рефлективного датчика важнейшим требованием к детектируемой поверхности является ее отражательная способность и качество отражения. Например, для задач детектирования скорости цвет вала двигателя и ротора выбирается черный (рис. 74г), тогда полосы отражающего материала на валу обеспечивают периодическое переключение датчика.

Луч, отраженный от стандартной поверхности, не сфокусирован и представляет собой усеченный конус с основанием на рефлективной поверхности, образованным отражаемым коническим световым пучком светодиода, что не позволяет с высокой точностью обнаруживать малые отражающие объекты и ограничивает пространственное разрешение датчика. Для того чтобы уменьшить диаметр отражаемого луча, в качестве источников света применяются лазерные светодиоды, а для фокусировки луча на его пути от светодиода к фотодетектору в датчик встраиваются линзы.

Производным от рефлективного типа датчиков является волоконно-оптический датчик

перемещения, содержащий две группы волоконной оптики: передающие волокна, подключенные к источнику света, и принимающие сигнал волокна, которые подсоединены к фотодетектору (фотодиоду) и объединены в одном корпусе. Свет от источника передается через оптоволокна на поверхность цели и отражается обратно, часть отраженного света улавливается принимающими оптоволоконными и попадает на фотодетектор, регистрирующий интенсивность отражения, которая представляет собой нелинейную функцию свойств поверхности и расстояния до цели. Этот тип датчиков может потребовать периодической калибровки.

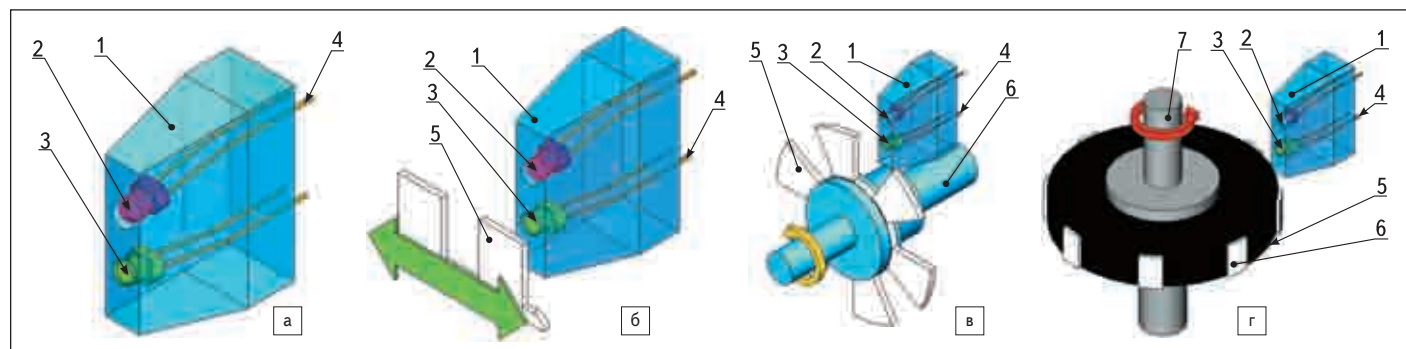
Рефлективные датчики используются во многих сферах — в промышленности или компьютерах (датчики для компьютерных мышей). В автоэлектронике данный тип устройств применяется достаточно широко — например, для контроля положения пассажира, в датчиках дождя и в энкодерах, а кроме того, становится базовой схемой, интересной для преобразования измерительных концепций по отношению к другим типам датчиков.

## Особенности схемотехники оптических устройств

Оптический датчик — это устройство, измеряющее интенсивность электромагнитных волн в диапазоне от ультрафиолетового до близкого к инфракрасному.

Свет представляет собой пучок дискретных фотонов, каждый из них является носителем кванта энергии, зависящей от источника света.

При взаимодействии с атомами кремния фотоны, в зависимости от длины волны (что эквивалентно количеству энергии), увеличивают проводимость фотодиода. В нем при смещении генерируется электрический ток, и его можно измерить.



**Рис. 74.** Оптический (фотоэлектрический) датчик рефлективного типа

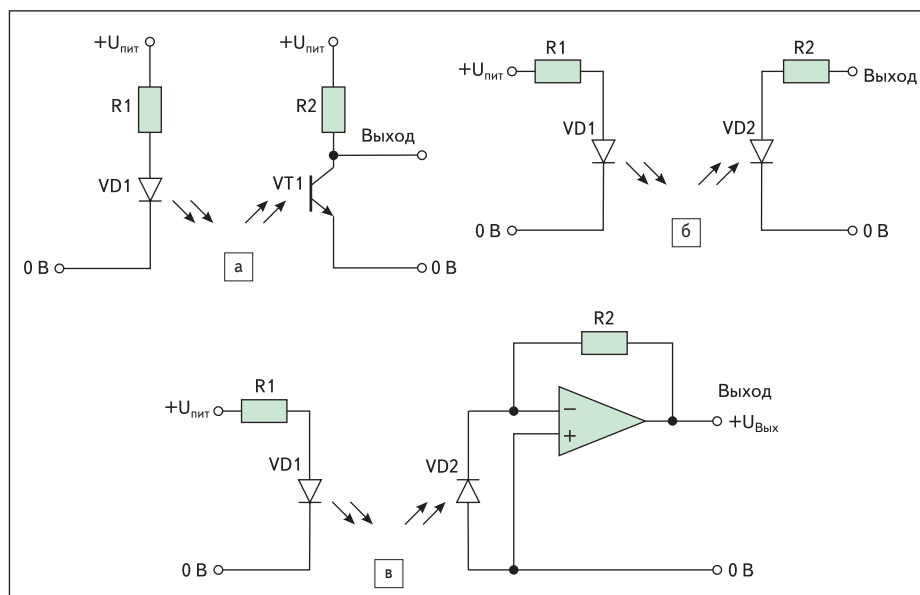
1 — корпус датчика; 2 — светодиод; 3 — фоточувствительный элемент (фототранзистор или фотодиод); 4 — терминалы для монтажа на печатной плате;

а — конструкция датчика;

б — датчик линейной скорости (индикации определенного линейного положения); 5 — линейный ротор с чередующимися участками с высокой отражательной способностью и низкой отражательной способностью (оптически прозрачными);

в — датчик угловой скорости (индикации определенного углового положения); 5 — вращающийся ротор — крыльчатка с чередующимися участками с высокой отражательной способностью и низкой отражательной способностью (оптически прозрачными); 6 — вращающийся вал;

г — датчик угловой скорости со специальной конструкцией ротора: 5 — вращающийся ротор с низкой отражательной способностью фона (черного цвета); 6 — чередующиеся полосы ротора с высокой отражательной способностью; 7 — вращающийся вал.



**Рис. 75.** Типичные принципиальные электрические схемы для включения оптопрерывателя и рефлектора  
а — схема на основе фототранзистора с цифровым выходом;  
б — схема на основе фотодиода с аналоговым импульсным выходом;  
в — схема на основе фотодиода с цифровым импульсным выходом;  
VD1 — светодиод; VD2 — фотодиод; VT1 — фототранзистор, R1, R2 — токоограничивающие резисторы.

С физической точки зрения базовое измерительное устройство — это именно фотодиод, который при объединении с функциональной электроникой будет представлять собой пиксель (pixel — PICTURE ELEMENT).

Другой базовый тип фотодетектора — фототранзистор, под действием света он функционирует аналогично, но обеспечивает переключаемый логический выход.

Фотодиоды и фототранзисторы закладываются в линейные оптические массивы, CMOS-камеры.

Промышленностью (Optek, Vishay и др.) выпускаются также готовые щелевые и рефлективные датчики. Стоимость обоих типов менее \$1, причем щелевые датчики дешевле. Могут использоваться и дискретные оптические эмиттеры/ресиверы — светодиоды и фоточувствительные элементы — фототранзисторы, фотодиоды, а также фототиристоры.

Щелевые и рефлективные датчики (а также оптоизоляторы<sup>1</sup>) функционируют одинаково с идентичными характеристиками, важнейшей из которых является коэффициент передачи тока.

Поскольку фототранзистор, при воздействии светового луча переходящий в состояние насыщения, обеспечивает готовый цифровой выход, в большинстве коммерчески доступных оптопрерывателей и рефлективных датчиков используется именно данный тип фотоэлектрического преобразователя. Для включения датчика во внешнюю цифровую схему

потребуется только токоограничивающий резистор в цепи светодиода и внешний резистор между плюсом питания и выходом транзисторного ключа (рис. 75а).

Пара «светодиод–фототранзистор» характеризуется усилением менее 1. Сумма выходного тока коллектора фототранзистора, отнесенная к величине входного тока светодиода, называется коэффициентом передачи тока (КПТ, или CTR — Current transmission ratio). Типичный ток светодиода 10–20 мА с типичным CTR щелевого переключателя порядка 0,1 соответствует 1–2 мА выходного тока коллектора<sup>2</sup>.

КПТ зависит от характеристик светодиода и фототранзистора и различен для оптических датчиков в широких пределах, поэтому значение резистора R2 должно гарантировать насыщение фототранзистора и стекание тока, достаточного для получения действительных амплитуд логических уровней при подключении оптического датчика к микроконтроллеру. Например, при токе светодиода 10 мА и КПТ=0,1 значение резистора R2 должно быть выбрано приблизительно равным 5 кОм [166]. (Меньшее значение допустимо для оптического переключателя с высоким КПТ или с большим током светодиода и будет обеспечивать лучшую шумовую устойчивость (меньший импеданс) и более высокую скорость переключения.)

Скорость переключения фототранзистора в любом оптическом датчике довольно мед-

ленная, что ограничивает максимальную детектируемую скорость устройства и должно учитываться программой, считывающей выход датчика. Типичные значения времени включения (перехода в состояние насыщения) — 8 мс, времени выключения — 50 мс.

Рефлективные датчики также характеризуются КПТ, который в отличие от оптопрерывателей не постоянен и зависит от силы отраженного света, типа поверхности и расстояния от поверхности до датчика. КПТ рефлективного датчика специфицируется производителем со стандартной белой рефлективной поверхностью, помещенной на фокусном расстоянии от датчика. В реальном проекте вычисляется или измеряется фактический КПТ.

Поскольку КПТ рефлективного оптического датчика варьируется в широком диапазоне, аналоговый выход (рис. 75б) может быть более предпочтительным, поскольку пользователю предоставляется возможность самостоятельно подсоединять выход датчика к АЦП и программно отслеживать изменения в выходном уровне сигнала, что, как показано далее, полезно и для интерполяции сигналов инкрементальных энкодеров, но в этом случае необходимо больше времени для выборки АЦП.

Датчики рефлективного типа в большей степени подвержены воздействию механической нестабильности системы. К примеру, при вибрации, если остановка ротора соответствует краю отражающей полосы в рабочей области датчика, рефлективный датчик непрерывно генерирует прерывания [166]. В аналогичной ситуации с щелевым датчиком получение неоднозначного выхода при частичном затемнении фототранзистора позволяет избежать гистерезиса в схеме компаратора, но рефлективный датчик потребует дополнительных аппаратных и программных средств. Для обнаружения необычных условий программа может иметь таймер, отслеживающий время между прерываниями, при несогласовании которого подпрограмма обслуживания прерываний может их игнорировать.

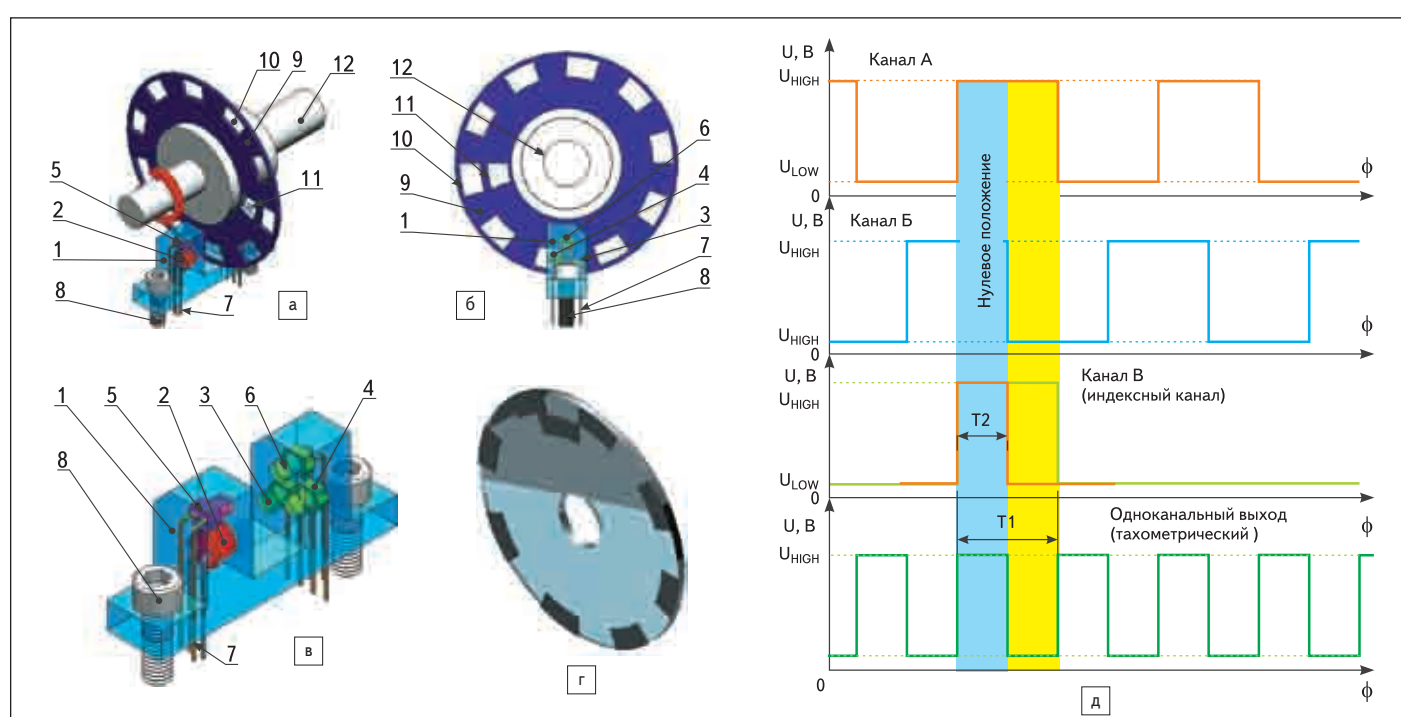
Для правильности и безопасности системы необходима и гарантия того, что сбойные датчики будут локализованы. Так, сбойный или отсоединенный светодиод позволяет фототранзистору предоставлять системе информацию об остановке двигателя, закрытом капоте или двери. Ту же самую информацию может предоставлять засоренный фототранзистор.

Первый способ решения проблемы — применение двух датчиков с инверсными выходами. Один из них блокируется при открытом капоте, второй — при закрытом. Одновременно анализируется состояние двух датчиков, которые для верификации состояния или функциональности системы должны оба находиться в правильном состоянии.

Метод обнаружения отсоединенного светодиода — определение напряжения на аноде

<sup>1</sup> Часто оптические датчики используются как оптоизоляторы (оптопары), которые объединяют светодиод и фототранзистор в интегральном корпусе без возможности прерывать луч света. Оптические изоляторы не определяют механическое движение, вместо этого они используются для изоляции двух электрических схем — например, схемы с высоким напряжением от микроконтроллера, который осуществляет ее управление.

<sup>2</sup> Оптические переключатели выпускаются также с выходами транзисторов Дарлингтона, которые часто имеют КПТ>1, но работают со скоростью порядка 20% от значения скорости одиночного транзисторного выхода и имеют более высокое напряжение насыщения.



**Рис. 76.** Инкрементальный энкодер — датчик относительного положения, скорости и направления  
 а—б — угловой инкрементальный энкодер; в — конструкция измерительной головки: 1 — корпус датчика; 2 — светодиод — источник света для инкрементальных каналов А и Б; 3, 4 — обычные фотодетекторы (фототранзисторы или фотодиоды); 5 — светодиод — источник света для индексного канала; 6 — фотодетектор индексной метки; 7 — терминалы для монтажа на печатной плате; 8 — элементы для монтажа корпуса; 9 — 4-битный ( $2^4 = 16$  положений) перфорированный ротор с прорезями; 10 — прорези для инкрементальных каналов; 11 — прорезь — индексная метка; 12 — вращающийся вал;  
 г — вариант исполнения 4-битного инкрементального ротора из стекла;  
 д—е — варианты сигналов инкрементального энкодера:  
 д — цифровой инкрементальный энкодер (инкрементальные каналы А и Б, индексный выход В фототранзисторов, канал скорости);

светодиода. Когда светодиод включен, падение напряжения, определяемое компаратором, составит около 1,2 В (типично), и выход компаратора будет высоким. Если светодиод открывается, напряжение на аноде возрастет до U<sub>сс</sub> (более 3 В).

Для детектирования сбойных условий сокращения можно добавить второй компаратор. Опорное напряжение в этом случае выбирается порядка 0,6 В, программное обеспечение объявляет ошибку, если напряжение падает ниже опорного.

## Оптические энкодеры

Оптические методы достаточно популярны в автоэлектронике, поскольку принцип их работы прост, а точность выше, чем у электрических методов.

В общих чертах теория энкодеров рассматривалась в части 5 данной публикации, поскольку требовалось пояснить принцип работы перспективных магнитных угловых энкодеров Холла. В сравнении с оптическими энкодерами магнитные энкодеры обладают следующими преимуществами: работают в условиях повышенной загрязненности и высоких температур, а также обеспечивают уменьшенное число компонентов. Как показано выше, оптоэлектронные схемы довольно просты, но магнитные энкодеры концентрируют измерительные, вычислительные

и интерфейсные функции в пространстве одной ИС, в итоге обеспечивая общий малый размер устройства и низкую цену.

Высокую точность, способность предоставлять информацию в цифровой форме, стабильность и помехоустойчивость обеспечивают именно принципы, лежащие в основе энкодерных технологий [165–172, 173–180]. Именно оптическая технология предложила ряд классических способов для построения энкодера — датчика, предоставляющего информацию о движении, положении или направлении либо непосредственно в цифровой форме, либо генерирующего последовательность импульсов, из которой после оцифровки может быть сформирован цифровой код.

## Угловые оптические энкодеры

Принципы работы угловых энкодеров проиллюстрированы рис. 76, 77.

Угловой оптический энкодер состоит из тонкого оптического диска и стационарного блока — измерительной головки, включающей источник света и фотодетектор. Измерительная головка может быть построена как по принципу прерывателя, так и рефлектора, но прерыватель проще реализуется и используется чаще.

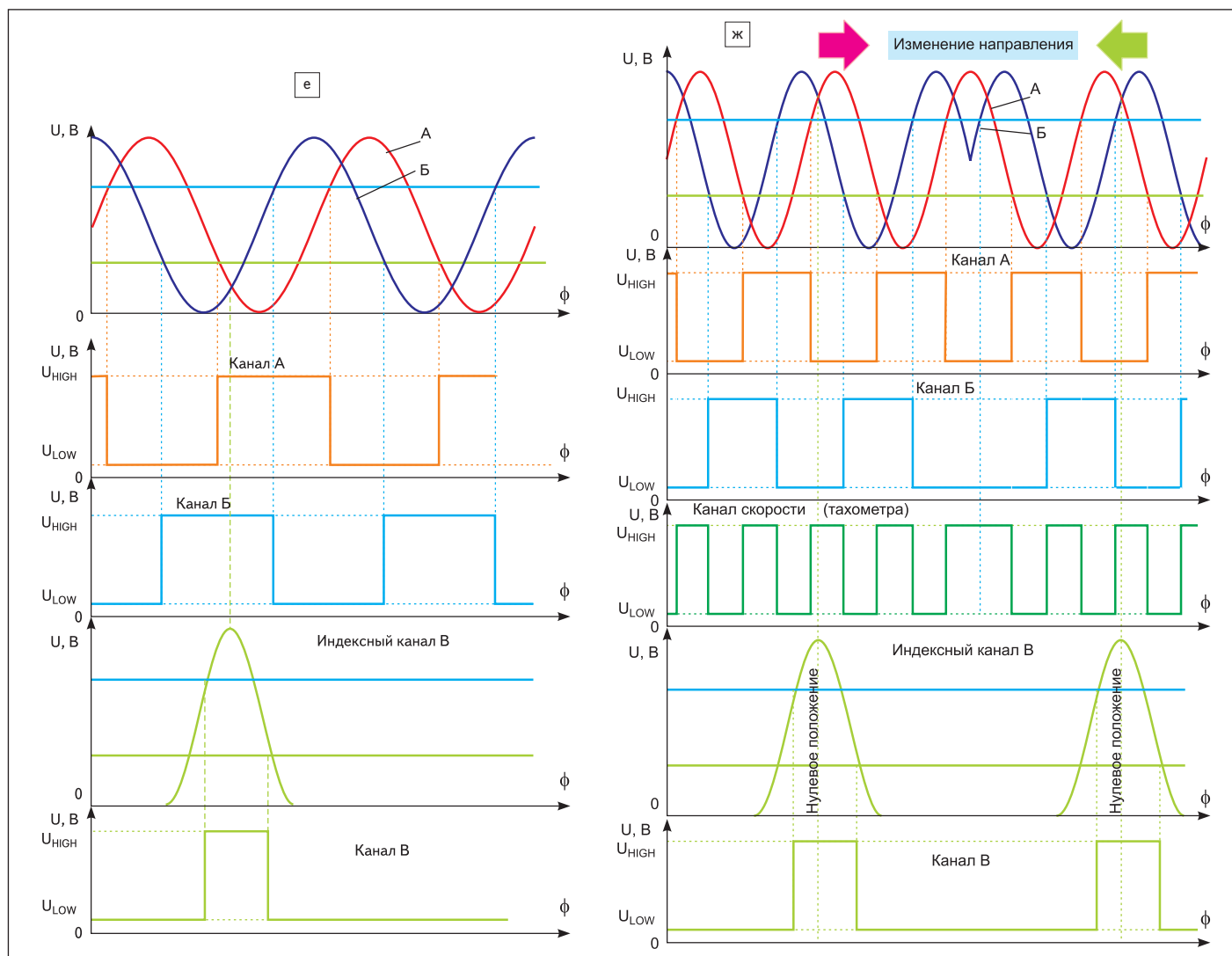
Оптический диск прерываемого энкодера включает кодированную последовательность

прозрачных и непрозрачных участков. Маркеры могут представлять собой, например, отверстия в металлическом листе или метки на стеклянном диске. При вращении диска, в зависимости от его типа, маркеры пропускают или перекрывают луч света, направленный от светового источника к фотоприемнику (фотодиоду или фототранзистору).

Фотодетектор генерирует сигнал частотой, равной частоте следования кодовых элементов, в цифровой форме (фототранзистор) или аналоговый импульсный сигнал, который также может быть усилен и оцифрован. При подключении внешнего счетчика прямоугольных импульсов оптический метод позволяет измерять угловую скорость вращения диска. Посредством нанесения специальной индексной отметки, индицирующей начальное положение диска, уже можно измерять относительное угловое положение вала в диапазоне 360° (рис. 76). Этот тип датчиков представляет собой так называемые инкрементальные энкодеры — самые простые и наименее дорогие оптические устройства.

При добавлении второй пары «светодиод-фототранзистор» с угловым смещением относительно первой, соответствующим четверти периода сигнала, может быть получена вторая последовательность импульсов — канал Б с фазовым смещением относительно канала А на 90° (рис. 76д–ж). Инкрементальный энкодер, который использует три





**Рис. 76.** Инкрементальный энкодер — датчик относительного положения, скорости и направления  
 д-е — варианты сигналов инкрементального энкодера:  
 е — инкрементальный энкодер с аналоговыми выходами (выходы фотодиодов и оцифрованные сигналы);  
 ж — поведение инкрементального энкодера при изменении направления (обобщено для аналоговых и цифровых сигналов).

оптических датчика (один для детектирования положения фазы  $0^\circ$  — канал В, два других — для формирования инкрементальных каналов с фазовым смещением сигналов в  $90^\circ$ ), позволяет одновременно удваивать разрешение при измерении положения и скорости и детектировать направление.

Разрешение инкрементальных энкодеров измеряется в импульсах за оборот (pulses per revolution, ppr). В дальнейшем разрешение может быть увеличено посредством нанесения большего числа линий на оптический диск и добавления пар «светодиод-фотодетектор» в измерительной головке. Максимальное число счетов за вращение представляет собой функцию диаметра энкодерного диска и характеристик светопередачи, определяющих допустимый размер кодовых элементов.

Существуют различные способы нанесения маркеров на оптический диск. В ранних системах чаще использовались металличе-

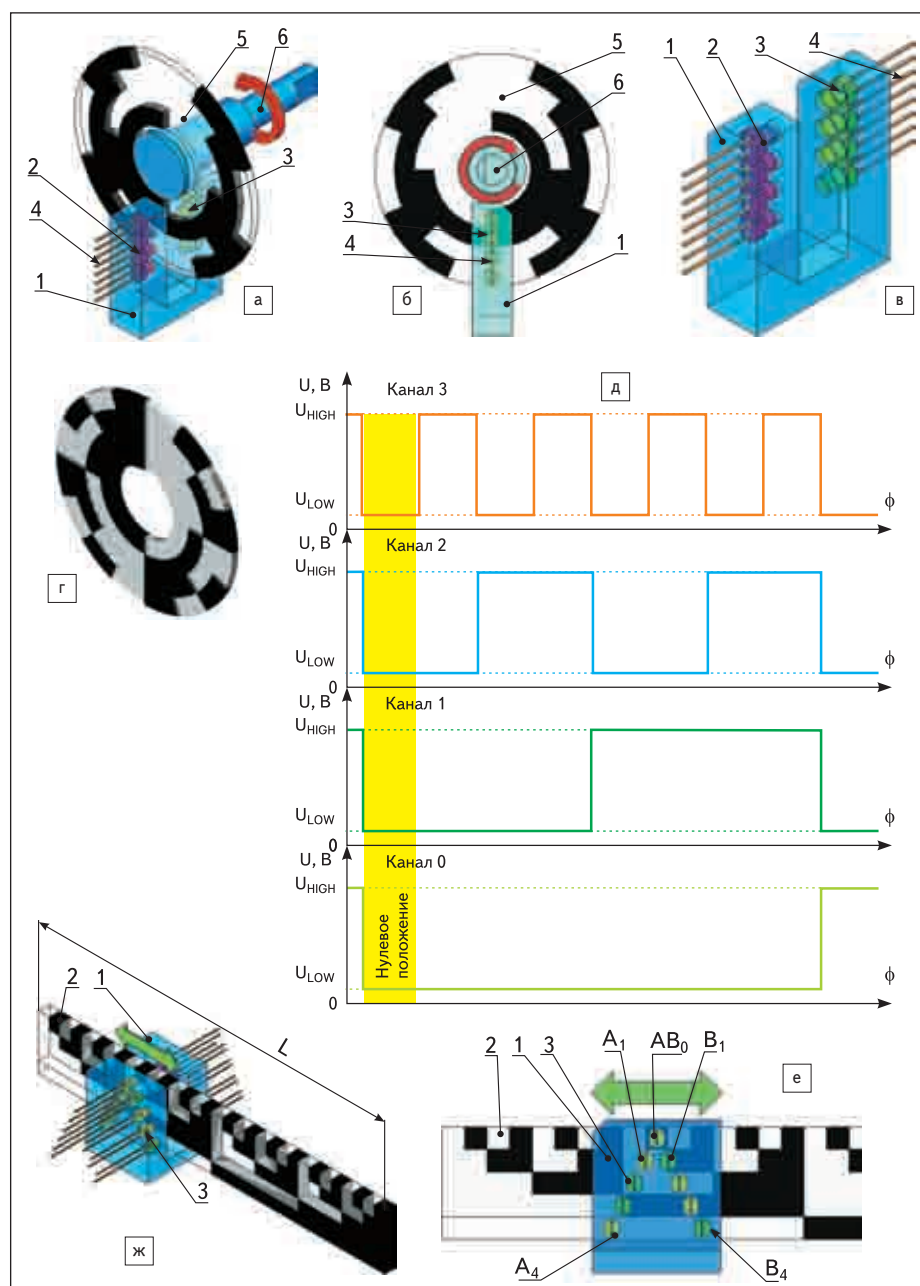
ские диски с перфорацией (рис. 76а-б), но максимальная площадь отверстий для повышения разрешающей способности и точности датчика ограничена — должно оставаться некоторое количество материала, обеспечивающее форму и прочность диска. Современные диски изготавливаются из стекла, маркеры на котором вытравливаются (рис. 76г, рис. 77г). Этот метод позволяет получить типично 100–6000 сегментов, что соответствует разрешению в  $3,6\text{--}0,06^\circ$ .

Одним из главных недостатков инкрементального энкодера является то, что последовательность импульсов запасается во внешнем буфере или счетчике. При сбое в подаче питания счет будет потерян. Кроме того, если машина с инкрементальным энкодером предполагает отключение на ночь, то на следующий день энкодер не сможет предоставить информацию о точном положении вала, пока не будет активирован внешний переключатель (home-detection switch) или программа

подключения, вращающая вал до прохождения индексной отметки, которая затем каждый раз обнуляет буфер счетчика, начиная отсчет относительного положения.

Решение данной проблемы предоставляют абсолютные энкодеры (рис. 77), которые используют более точный метод определения положения, основанный на кодировании абсолютного положения посредством множественных групп сегментов, размещенных на диске по линиям концентрических окружностей.

Концентрические окружности начинаются в центре энкодерного диска, при этом каждая следующая окружность характеризуется количеством сегментов, удвоенным по сравнению с предыдущей. Первое кольцо будет иметь только один прозрачный и один непрозрачный сегмент, второе — два прозрачных и два непрозрачных, третье — по четыре тех и других и т. д. Число окружностей определяет разрядность энкодера: 4 окружности соответствуют 4-разрядному энкодеру ( $2^4 = 16$  положений),



**Рис. 77.** Абсолютный энкодер — датчик абсолютного положения и скорости  
а–б — 4-битный угловой абсолютный энкодер;  
в — конструкция измерительной головки;  
1 — корпус датчика; 2 — массив светодиодов; 3 — массив фотодетекторов (фототранзисторов или фотодиодов);  
4 — терминалы измерительной головки; 5 — 4-битный ротор с кодом Грея; 6 — вращающийся вал;  
г — вариант исполнения 4-битного абсолютного ротора с двоичным кодом из стекла;  
д — выходной цифровой код двоичного абсолютного энкодера;  
е, ж — линейный 4-битный абсолютный энкодер с двоичным кодированием и оценением посредством V-выборки;  
1 — корпус измерительной головки; 2 — измерительная линейка; 3 — массив фотодетекторов V-выборки;  
е — оценивание посредством V-выборки:  $AB_0$ ,  $A_1...A_4$ ,  $B_1...B_4$  — фотодетекторы в составе двух линеек V-выборки (выбираемые для оценивания подсвечены желтым);  
ж — иллюстрация линейного абсолютного энкодера.

16 — 16-разрядному устройству с 32 767 сегментами и угловыми положениями.

Для считывания двоичного кода посредством абсолютного энкодера необходим один источник света и один фотоприемник для каждой линии на энкодерном диске. В измерительной головке светодиоды и, что более важно, фотодетекторы объединяются в линейные массивы (рис. 77в).

Поскольку абсолютный энкодер образует последовательность битов, различную для каждого углового положения, он всегда предоставляет информацию об угловом положении системы, при включении и выключении не нуждается в переключателе нулевого положения и программе подключения и более устойчив к шумам, так как следующее за сбоям положение будет прочитано правильно.

В энкодере на рис. 77а–б четыре оптических датчика детектируют маркеры диска с четырехбитным кодом Грея, который позволяет закодировать 16 положений диска без опорной отметки: для каждого перехода сигнал изменяется только на один бит. Код Грея характеризуется отсутствием ошибок, но его недостаток — применение различных схем кодирования, более сложное оценивание сигналов и неоднозначность сигнала при неожиданном сбросе.

Другой вариант — использование стандартного бинарного (двоичного) кода, но на практике этот тип энкодеров имеет один недостаток: при переходе от 1111 к 0000 все четыре бита изменяются одновременно, и если переход в реальной системе выполнен не одновременно, это может приводить к ошибкам.

Для минимизации ошибок в двоичном коде предназначена так называемая V-выборка, принцип которой для диска, развернутого в прямую линию, проиллюстрирован на рис. 77е. Две линейки светодиодов и фотодетекторов размещаются в V-образной форме, для которой фотодетектор  $AB_0$  является общим. Для оценки V-выборки разработан специальный алгоритм, согласно которому логическое значение «0» или «1» для данного положения детектора, выбранного в линии  $i$ , определяет, какой детектор — «B» или «A» — должен быть активирован в линии  $(i+1)$ . Если  $AB_0$  соответствует логическая «1», во второй линии анализируется  $A_1$ , если  $AB_0$  соответствует логический «0», анализируется  $B_1$ . Поскольку  $A_1$  на рис. 77е — «0», в линии 3 берется детектор  $B_2$ . Последовательность выбранных фотодетекторов на рис. 77е подсвечена желтым цветом.

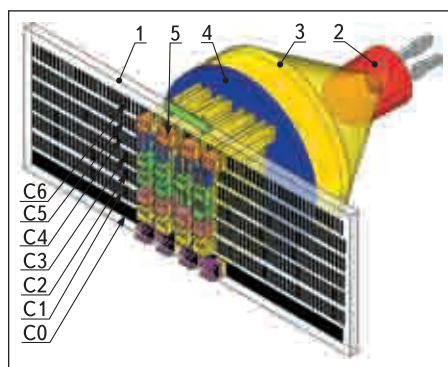
## Линейные оптические энкодеры

Линейные измерения посредством оптических энкодеров реализуются довольно просто, если осуществить разворот оптического диска инкрементального или абсолютного энкодера в прямую линию. Угловое положение вала может быть преобразовано также в линейное положение посредством редуктора на валу энкодера.

На рис. 77ж показан 4-битный линейный абсолютный энкодер с двоичным кодированием и V-выборкой, позволяющий детектировать расстояние  $L$ . Очевидно, что ключевой проблемой данного устройства является неизменный компромисс между длиной  $L$  энкодерной линейки и разрешением устройства, для повышения которого необходимо добавлять дополнительные кодовые линии и пары «светодиод–фотодетектор» в измерительной головке. В отличие от угловых энкодеров измерительная линейка будет отличаться значительной длиной, соответствующей полному рабочему ходу устройства, и гораздо более высокой ценой, поскольку речь идет о создании линейки с уникальными кодами для каждого положения в пределах







**Рис. 80.** Абсолютный линейный энкодер на основе интерферометрии Муара  
1 — подвижная стеклянная пластина со строками линий с различными периодами C0—C6;  
2 — лампа; 3 — линза;  
4 — неподвижная пластина со строковыми прорезами;  
5 — массив строковых фотодетекторов (для формирования четырех смещенных синусоидальных сигналов в строке).

фототока детектора представляет собой синусоидальную функцию:

$$I = I_0 \times \sin(2\pi x/C). \quad (30)$$

Для определения положения в инкрементальной системе используются 5 фотодетекторов (или массивов фотодетекторов), предоставляющих 4 синусоидальных сигнала каждый и один индексный сигнал (рис. 79в). Четыре решетки в пластине измерительной головки с одинаковым периодом C сдвинуты на 1/4 периода так, что синусоидальные сигналы также сдвинуты по фазе на 1/4 периода.

Разрешение данной системы составляет 1/4 периода C (2,5 мкм для C = 10 мкм), увеличение которого до <0,5 мкм возможно посредством интерполяции.

Дифференциальные синусно-косинусные сигналы с фазовым смещением в 90°, полученные при взаимном вычитании сигналов фотодетекторов, позволяют определять направление движения. Поскольку сигналы имеют точку нулевой передачи, они легко оцифровываются.

Инкрементальные интерферометрические измерители позволяют детектировать расстояния до 30 м с шагами до 0,1 мкм.

На основе принципа интерферометрии Муара может быть создан и абсолютный энкодер, позволяющий получить информацию об абсолютном положении (рис. 80).

В конструкции абсолютного энкодера каждая строка подвижной стеклянной пластины характеризуется различным периодом линий, размещенных в соответствии со специальным алгоритмом. Каждой строке соответствует четыре фиксированных набора прорезей неподвижной платы, позволяющих получить в каждой строке 4 смещенных сигнала, отслеживаемых массивом фотодетекторов.

Метод интерферометрии Муара предоставляет возможность реализовать измерение

абсолютного положения с шагами порядка 0,1 мкм в пределах длины до 3 м.

Методы линейной интерферометрии могут быть преобразованы также для детектирования углового положения.

## Особенности производства энкодеров

Фирма, решившая заняться производством энкодеров, должна продумать вопрос производства или приобретения оптических дисков или линеек, коллиматоров — преобразователей пучков света в параллельные лучи, и измерительных компонентов.

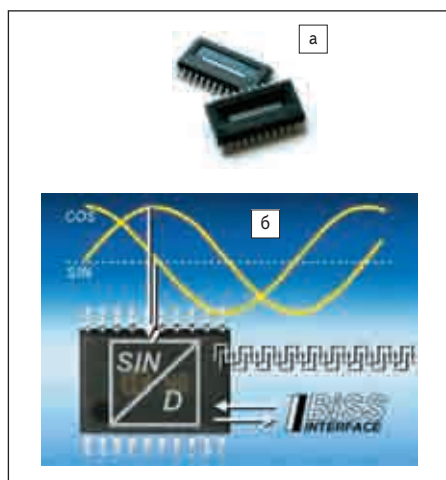
Сегодня промышленность выпускает полный набор готовых компонентов для выполнения измерений, в том числе и специально разработанные для автомобильных оптических энкодеров массивы светодиодов, светодиодные драйверы для оптимизации светопередачи в различных вариантах подключения, линейные оптические массивы фотодетекторов и опто-ASIC для формирования необходимого энкодерного интерфейса.

Например, компания Melexis выпускает MLX90255 (рис. 81а) — линейный оптический массив для широкого спектра автомобильных задач, включая EPAS, ESP, сканирование образов, детектирование положения, оптические линейные и угловые энкодеры. Спектр детектируемого света составляет 500–950 нм.

MLX90255 состоит из массива размерностью 128×1 фотодиодов или пикселей со встроенной электроникой, работающих синхронно благодаря встроенной логической схеме, для которой необходимо внешнее импульсное воздействие и тактирование. Пиксели, размещаемые на расстоянии 8 мкм, регистрируют изменения в положении от 200 до 66 мкм, в зависимости от цвета. Выход — 125 мВ в отсутствие света, номинальное значение в присутствии света — 2,4 В в диапазоне полной шкалы. Для того чтобы гарантировать плоский выход при освещении устройства одиночным светодиодом, применяется косинусная коррекция (усиление пикселя на 15% выше на краях, чем в середине).

MLX90255BA рассчитан именно на автомобильные условия эксплуатации (–40...125 °C).

Дальнейшим развитием линейных массивов стали CMOS-камеры Melexis MLX75006 (CIF) и MLX75007 (PVGA) — интегральные



**Рис. 81.** Компоненты для автомобильных оптических энкодеров  
а — линейный оптический массив MLX90255 Melexis для детектирования положения и спектрометрии;  
б — iC-NQ-преобразователь с высоким разрешением синусно-косинусных сигналов в цифровой выход.

датчики со встроенными линзами, чувствительные к видимому и близкому к инфракрасному свету с разрешениями 352×288 (MLX75006) и 750×400 (MLX75007 PVGA), в черно-белых и цветных версиях. Это первые датчики данного класса, работающие в диапазоне температур –40...105 °C.

Компанией TAOS, Inc. выпускаются линейные оптические массивы для автоэлектроники (например, линейные массивы TSL1401CS, TSL1401R), предлагаемые в широком диапазоне длин и разрешений, специфицируемых в 200, 300 и 400 точек на дюйм (DPI). TSL1401 со 128 пикселями и сканирующей плотностью 400 DPI работает с динамическим диапазоном 4000:1 (72 дБ). Устройство обеспечивает пропорциональный выход, не требуя внешнего резистора, и питается от напряжения 3–5 В.

Линейные массивы рекомендуются компанией TAOS, Inc. для высокоплотного метода Maximal Length Sequence (MLS)<sup>3</sup> [170]. Кодовые диски согласно методу MLS подобны инкрементальным энкодерам с одной дорожкой, но с MLS каждый инкремент кодируется как абсолютное положение. Для кодирования применяется уникальный образец, состоящий из широких и узких полос. Фотодетектор в данной системе устойчив к радиальным биениям.

<sup>3</sup> За пределами настоящей публикации существует еще одно применение массивов фотодиодов и 2-D-камер — оптические аналоговые лазерные датчики расстояния, работающие по принципу оптической триангуляции [173]. Согласно этому принципу лазер посылает через линзу луч, который отражается от объекта и фокусируется на массиве фотодиодов. Изменение расстояния до объекта вызывает изменение угла отраженного луча и, следовательно, активного пикселя в массиве фотодиодов. Микроконтроллер преобразует данную информацию в аналоговый электрический сигнал. Разрешение — от 1 мм (при расстояниях порядка нескольких м) до 1 мкм на коротких дистанциях.

Устройства, представляющие собой одномерные камеры пикселей для лазерной триангуляции, — линейные массивы фотодетекторов — известны как charge-coupled device (CCD), в отличие от одноэлементных датчиков положения position-sensing detector (PSD), которые также могут быть одномерными и двумерными. Одномерные PSD в триангуляционном методе преобразуют свет в непрерывные данные о положении, вырабатывая ток на двух выходах, пропорциональный положению точки объекта, спроецированной на детектор, при ее смещении от центра. CCD являются более медленными устройствами, но формируют более читаемый обрабатываемой электроникой выход.

Кроме того, в большую группу оптических датчиков расстояния входят лазерные интерферометры, датчики с рассеянным отражением света, радары, преимущественно лазерные, которые измеряют большие расстояния, но с ограниченным разрешением в 2–3 мм, используя принцип работы, основанный на измерении времени распространения света от датчика до объекта и обратно.



Некоторые другие оптические устройства, производимые компанией для автоэлектроники [170–172]:

- датчик окружающего света Ambient Light Sensor (ALS);
- преобразователи свет–частота;
- преобразователи свет–напряжение;
- преобразователи свет–цифровой код;
- CMOS-камеры для обнаружения положения пассажиров, задние камеры;
- датчики дождя;
- преобразователи цветового излучения светодиода в частоту (TCS230);
- датчики отраженного света.

Для инкрементальных и абсолютных энкодеров выпускаются также специальные интерфейсные ИС, обеспечивающие необходимый формат. (Оба типа датчиков, если сигнал поставляется ими в цифровой форме, могут быть подключены и непосредственно к микроконтроллеру.)

Инкрементальные энкодеры являются менее дорогими, но если требуется высокое разрешение, их цена увеличивается. Альтернатива — использование лазерных интерферометров, но они также являются дорогими. Следующая альтернатива для повышения разрешения — применение интерполяции, для осуществления которой выпускаются ASIC стоимостью около \$1. Входные синусно-косинусные сигналы позволяют с помощью методов ЦОС вычислить тангенс и арктангенс углового положения, анализируя малые изменения во входных сигналах. Примером подобного интерфейса для автомобильных инкрементальных энкодеров является iC-NQ iC- Naus (рис. 816) — преобразователь с высоким разрешением (до 8192 угловых шагов) синусно-косинусных сигналов в цифровой выход.

Особенность производства энкодеров в том, что очень сложно гибко адаптировать оптическое устройство к эксплуатации в конкретной автомобильной системе — даже при встраивании в систему микроконтроллера, программно активирующего измерительные пиксели, требуется поддерживать производство различных вариантов дисков со стандартным разрешением и набора комплектующих механических интерфейсных частей.

Возможность программирования — одно из последних достижений энкодерной технологии. Компания SICK-Stegmann разработала промышленный программируемый инкрементальный энкодер DRS61 на основе технологии CoreTech, предоставляющий возможность программирования разрешения (числа импульсов на оборот) и ширины нулевого импульса. Это выполняется посредством программатора, подключаемого к ПК [174]. Технология CoreTech также предполагает программную установку инкрементального маркера путем нажатия кнопки на корпусе устройства [174–175].

Для повышения гибкости адаптации к клиентским требованиям диски CoreTech

содержат дорожку именно с неповторяющимися круговыми образцами кодовых полюсов, вторая дорожка содержит образцы для генерации 1024 аналоговых синусно-косинусных циклов, что позволяет добиться повышения разрешения и точности. Доступ к фотодиодам опто-ASIC осуществляется программно, что в итоге обеспечивает высокую гибкость устройства. Диаметр энкодеров достигает 60 мм.

Еще недавно только магнитные энкодеры благодаря возможности программирования их характеристик обеспечивали свойства, которые физически и с точки зрения стоимости нельзя было получить с помощью оптических технологий.

## Оптические технологии датчиков в автоэлектронике

Оптические технологии широко применяются в автоэлектронике для проведения различных измерений [92, 170–172, 176–184].

Основные сферы применения оптических датчиков:

- датчики абсолютного углового положения, крутящего момента и скорости в системах электронного управления автомобилем drive-by-wire EPAS (electrically power assisted steering), EHPAS (electro-hydraulic power assisted steering), ESP;
- датчик окружающего света для автоматической регулировки параметров освещения ЖК-дисплеев (контроля уровня тока подсветки и продления срока службы);
- оптические датчики для обнаружения пассажиров, измерения расстояния между пассажиром и модулем подушки безопасности (оптимизация скорости заполнения подушки в зависимости от веса и положения сиденья и серьезности аварии);
- CMOS-камеры для обнаружения положения пассажиров, задние камеры;
- датчики дождя Rain Sensor для контроля работы стеклоочистителей ветрового стекла (рефлективный датчик распознает дождевые капли на ветровом стекле);
- электрохроматические зеркала (датчик определяет приближающийся свет следующего транспортного средства и автоматически затемняет зеркала заднего вида);
- датчики солнечной нагрузки и датчики автоматического света Sun Load Sensors/Auto Light Sensors (для включения автоматического охлаждения воздуха);
- датчики положения натяжителя ремня Belt Pretensioner Sensors и положения сиденья Seat Position Sensors в системах автоматической регулировки положения (преобразователи «свет–частота» и «свет–напряжение», линейные массивы);
- контроль закрытия двери;
- коррекция цвета светодиодов (TCS230-преобразователь цветового излучения светодиода в частоту);

- адаптивные системы переднего света, автоматическое включение и контроль интенсивности фар Heads Up Display (HUD);
- контроль освещения интерьера автомобиля;
- обнаружение угарного газа;
- системы оптической идентификации;
- лазерные системы обнаружения и определения расстояния до препятствия, радары, видеодатчики и т. д.

## Оптические энкодеры в автоэлектронике





Угловые оптические энкодеры могут быть эффективно использованы в автоэлектронике как датчики цифровых систем обратной связи с двигателем или как цифровые элементы контроля скорости, положения, крутящего момента.

Актуальность оптических датчиков в автоэлектронике обеспечивают их следующие признаки:

- бесконтактность;
- высокий уровень технологий производства оптических кодовых дисков;
- необходимость малого числа измерительных компонентов;
- доступность недорогих оптоэлектронных компонентов;
- доступность недорогих интерфейсных ASIC;
- способность детектировать угол 360° и более, и значительные линейные перемещения;
- высокая точность измерений;
- высокое разрешение (достигает 25 бит и долей мкм);
- высокая надежность в рабочих пределах устройства;
- многие устройства отличаются сравнительно невысокой ценой.

Сравнивая оптические энкодеры (табл. 17) с современными магнитными энкодерами Холла, необходимо отметить, что их цена сегодня, как правило, выше, но только на 10–20%, причем существенный вклад в стоимость устройства вносит необходимость использования внешней ASIC и других дискретных компонентов. Общее число внешних компонентов для оптического датчика невелико, но в сравнении с магнитным угловым энкодером на основе только одной ИС, отличия в количестве внешних компонентов оцениваются не менее чем в 50%. Значительные перспективы оптических методов детектирования сегодня связаны с созданием интегрированных сенсорных систем — sensor solution-on-a-chip (SSoC) или system-in-package.

Ограничения при использовании оптических технологий в автоэлектронике требуют минимизации факторов воздействия загрязнений. Для автомобильных условий будут приемлемы уплотненные исполнения устройства, в корпусе которого размещается и измерительная головка, и оптический диск или линейка.

Таблица 17. Сравнительные технические данные некоторых автомобильных оптических энкодеров				
Параметр / датчик	Датчик рулевой колонки BEI Duncan	Датчик абсолютного положения руля First Technology	Датчик крутящего момента и абсолютного положения руля First Technology	Инкрементальный энкодер First Technology
				
Функциональный механический диапазон	±720°	—*	Дифференциальные углы до 8°, абсолютное положение до 2000° (±1000°)	—
Разрешение	1°	1,5–0,5°	Дифференциальное разрешение — 0,03°; абсолютное разрешение 1,0°	1,5–4,5°
Точность	±1,0°	30% от разрешения	Дифференциальная точность — до 5%	—*
Период инициализации	—*	≈5°		—*
Выходной интерфейс	Квадратурный 90 PPR, абсолютный аналоговый (потенциометр)	Необработанный, LIN and CAN	LIN или CAN	Квадратурный; открытый коллектор
Напряжение питания, В	5,0 ±0,25; 16 максимум	9–16, 28 максимум		8–16
Ток потребления, мА	40	300	50	50 максимум, 25 мА типично
Максимальная угловая скорость, °/с	—*	2700	2000	—*
Рабочий температурный диапазон, °С	–40...85	–40...85		—*
Габаритные размеры, диаметр диска, мм	—*	Диаметр диска 69,8 мм	Габаритные размеры (119×105×23) мм	—*
Вес, г	—*	—*	150	—*
Срок службы	1 млн. циклов	>10 000 часов		—*
—* Данные отсутствуют / не специфицируются производителем				

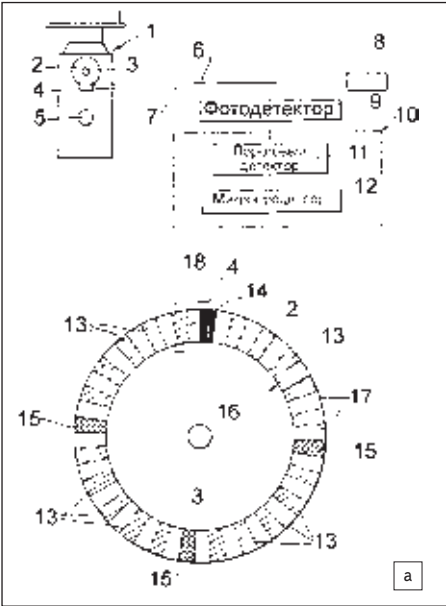
Для компенсации производственных допусков оптические энкодеры часто нуждаются в подстройке потенциометром. Если абсолютные энкодеры выполняются на основе пикселей, то для компенсации старения светодиода может потребоваться периодическая калибровка.

Абсолютные энкодеры стоят на 40–60% дороже, чем инкрементальные, но по мере развития ASIC-решений данная цифра снижается до 20–30% [170]. Кроме того, для автоэлектроники достаточно 8-битного кодирования диска.

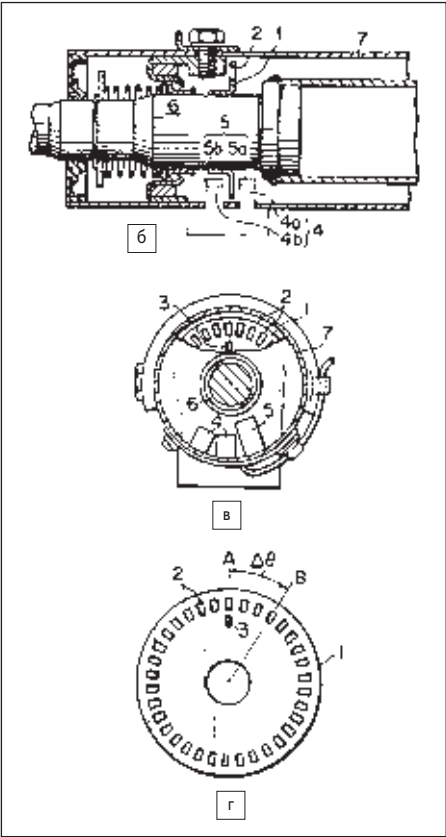
Другие недостатки оптоэлектронных устройств — рабочий температурный диапазон и подверженность оптических дисков и волоконно-оптических соединений сильным ударным воздействиям. Поскольку в автоэлектронике большинство датчиков положения работает в условиях повышенных температур, вибраций или ударов, оптоэлектроника более подходит для систем с менее жестким режимом, например, положения педали акселератора или тормоза, рулевого управления или линейных систем — детектирования положения сиденья или подвески. Оптические энкодеры находят применение как цифровые элементы управления приборной панели: для систем климат-контроля, контроля зеркал, аудиоконтроля, контроля солнечного люка.

Некоторые примеры разработок оптических датчиков для автоэлектроники проиллюстрированы рис. 82 [176–179], другие примеры содержатся в описаниях патентов [180–184].

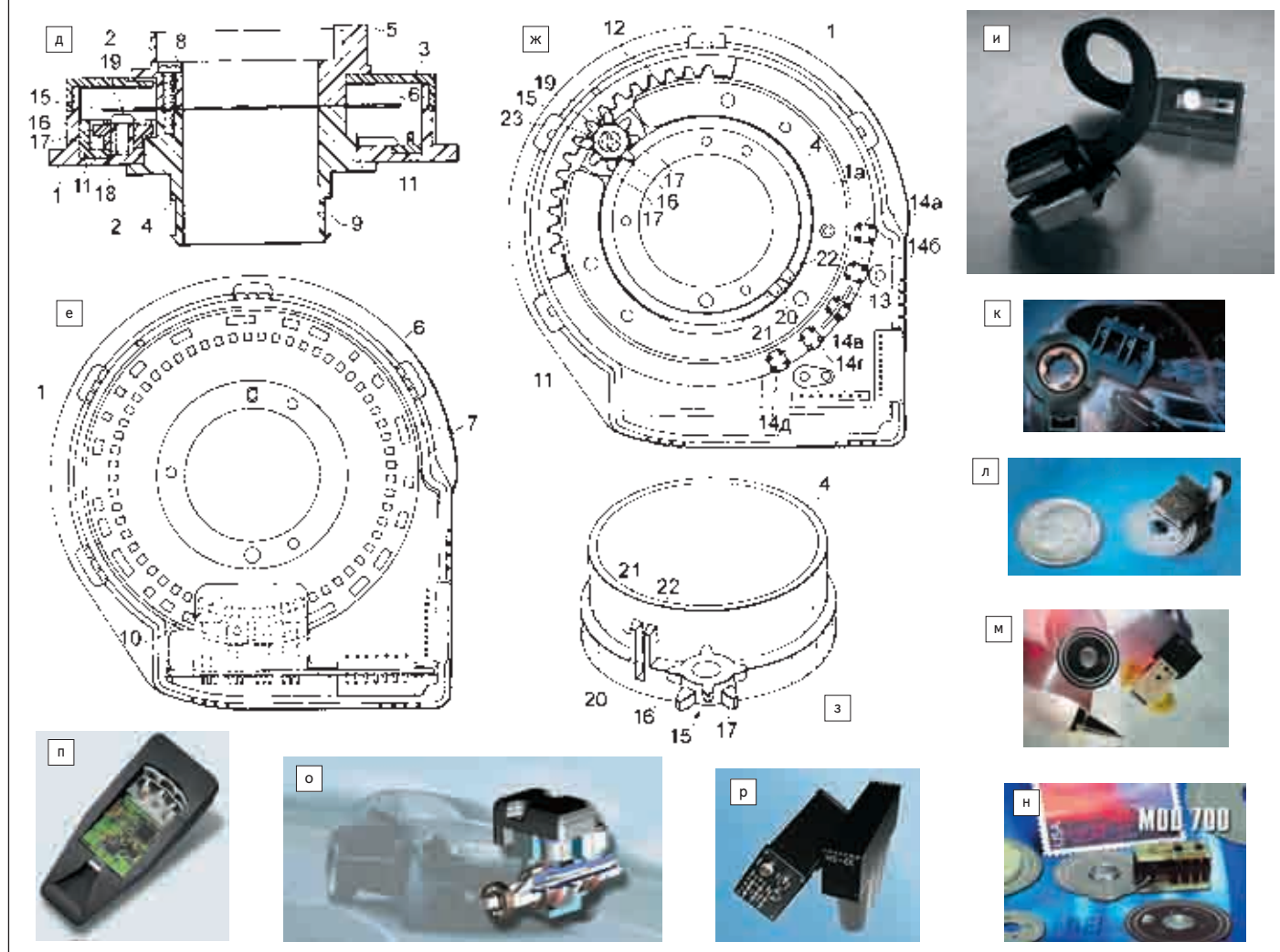
Как упоминалось, стандартные оптические энкодеры обеспечивают высокую точность измерений, высокое разрешение и надежность, что важно в первую очередь для контроля положения рулевого колеса. Инкрементальные и абсолютные энкодеры для этих за-



**Рис. 82.** Примеры разработок оптических датчиков для автоэлектроники  
а — датчик скорости и положения вала двигателя General Motors [177]:  
1 — двигатель; 2 — диск энкодера;  
3 — распределительный вал; 4 — оптическая чувствительная головка; 5 — коленчатый вал;  
6, 7 — оптические волокна; 8 — светодиод;  
9 — фотодиод; 10 — схема декодера;  
11 — пороговый детектор;  
12 — логическая схема — анализатор амплитуды импульсов (микропроцессор); 13 — ординарные (рядовые) сегменты с высокой отражательной способностью; 14 — индексный сегмент с наибольшей отражательной способностью (на рис. показан черным), соответствующий положению первого цилиндра и наибольшей амплитуде сигнала фотодетектора;  
15 — индексные сегменты с отражательной способностью, средней между 13 и 14;  
16 — кодовая дорожка; 17 — светопоглощающий фон;  
18 — светоотражающая точка для выравнивания дорожки с оптической головкой



**Рис. 82.** Примеры разработок оптических датчиков для автоэлектроники  
б–г — датчик абсолютного углового положения руля Fuji [178]:  
1 — диск с прорезями;  
2 — прорези;  
3 — нейтральная отметка положения (опорная метка);  
4 — оптопрерыватели — детекторы ординарных прорезей;  
5 — оптопрерыватель — детектор опорной метки;  
6 — рулевой вал;  
7 — рулевая колонка



**Рис. 82.** Примеры разработок оптических датчиков для автоэлектроники

д-ж — многооборотный датчик углового положения Alps Electric Co. [179]; д-е — инкрементальный энкодер; ж-з — абсолютный энкодер;  
 1 — корпус; 2 — роторный узел; 3 — крышка; 4 — первый ротор узла 2; 5 — второй ротор узла 2; 6 — кодовая пластина; 7 — множество отверстий для кодирования информации;  
 8 — винты для сборки роторов 4, 5 и кодовой пластины 6; 9 — центральное отверстие; 10 — 4 оптопрерывателя; 11 — вращающееся кольцо; 12 — ведомая шестерня;  
 13 — пластина — экран; 14 (а-д) — оптопрерыватели; 15 — промежуточная шестерня; 16, 17 — зубчатые части с четырьмя зубцами каждая, смещенные друг относительно друга на 45°;  
 18 — основа корпуса; 19 — крепежный винт; 20 — зазор; 21, 22 — выступающие части для регулирования направления вращения посредством зацепления с зубьями частей 16 и 17;  
 23 — прокладка (шайба) под винт 19;  
 и — инкрементальный угловой оптический энкодер в компактном корпусе First Technology;  
 к — датчик положения руля BEI;  
 л — измерительный блок датчика рулевого положения с рис. 82к [92];  
 м — оптический энкодер BEI серии 920;  
 н — инкрементальный угловой энкодер серии MOD 700;  
 о — оптический датчик крутящего момента и угла поворота руля Bosch (для электрического рулевого управления и ESP (Electronic Stability Program);  
 п — оптоэлектронная система предупреждения об аварии (лазерная система обнаружения и детектирования расстояния до препятствия) для следующего поколения систем безопасности пассажиров Continental Teves;  
 р — трехосевой оптический датчик HS-CE CORRSYS-DATRON для тестирования скорости и углов поворота автомобиля в продольном, поперечном, вертикальном направлении и высоты подвески

дач составляют большинство выпускаемых автомобильных устройств и поставляются с валом, полым валом, в модульной и комплектной конфигурациях.

Так, компания BEI Duncan Electronics, подразделение BEI<sup>4</sup> Technologies, Inc., разработала автомобильные датчики рулевого колеса, объединяющие оптический энкодер с потенциометром, которые используются, например, системой Cadillac StabiliTRAK (рис. 82к, л) [92].

Потенциометр предоставляет аналоговый выход абсолютного положения, оптический энкодер — цифровой инкрементальный.

Компания выпускает также инкрементальный угловой энкодер серии 920 (рис. 82м) и инкрементальный угловой энкодерный модуль серии MOD 700, основанный на технологии, известной под названием Opto-ASIC (рис. 82н).

MOD 700 включает светодиод и Opto-ASIC, сконфигурированные в малый измеритель

с проводным фреймом для его поверхностного монтажа на печатной плате. Устройство стоимостью \$18 в больших объемах поддерживает широкий диапазон разрешений и стандартизированных кодовых дисков различного диаметра.

Размер корпуса MOD 700 составляет 17,7×9,6×8,89 мм, разрешение — до 2 540 ppr. Высокая степень миниатюризации, достигнутая данным устройством, позволяет встраивать его в системы рулевого управления с ограниченным рабочим пространством, двигатели и другие конструкции

<sup>4</sup> BEI Technologies, Inc. — мировой лидер в области оптических технологий. Кроме разработок для автоэлектроники об этом говорит, в частности, тот факт, что около 90% оптических датчиков, летающих в космосе, — энкодеры BEI.

с плотным размещением внутренних частей.

За пределами автоэлектроники (рис. 82а–п) спектр применения оптических технологий расширяется в область тестирования динамики автомобиля (рис. 82р).

## Заключение

Для выбора датчика, действительно оптимального для конкретной задачи, важно понимать принципы работы, достоинства и недостатки всех типов устройств, комплексно оценивая их взаимодействие в конкретном рабочем окружении.

Значительные перспективы оптических энкодеров сегодня связывают с их использованием в промышленности и других сферах.

Непрерывное развитие современных технологий предполагает заимствование лучших сегодняшних достижений будущими технологиями, а также объединение технологий. Выбор, сделанный автомобильными производителями оптоэлектроники, — это прежде всего комплексный выбор надежной, успешной и развивающейся технологии, а не решение, центрированное относительно применения недорогих компонентов. ■

## Литература

165. Choosing a sensor to measure rotation. Ramsden Ed, Cherry Electrical Products. Electronic Products, Sep 1999.  
[www.electronicproducts.com](http://www.electronicproducts.com)
166. Exploring optical and magnetic sensors. Ball St. Embedded Systems Programming (06.17.03).  
[www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=10700612](http://www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=10700612)
167. Linear and Rotary Encoders. Kissell Th. E., Industrial Electronics, Second Edition, Prentice Hall PTR <http://zone.ni.com>
168. The Basics Of Encoders. Korte R., President Heidenhain Corporation.  
[www.mmsonline.com/articles/049703.html](http://www.mmsonline.com/articles/049703.html)
169. Quadrature-Encoded Position and Beyond. Morgan D. Embedded Systems Programming (02/26/01) <http://www.embedded.com/showArticle.jhtml?articleID=9900043>

170. Optical Incremental and Absolute Rotary Encoders. Lee G., King R., Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Plano, Texas. [www.taosinc.com](http://www.taosinc.com)
171. Automotive Design and Optoelectronic Sensors — An Emerging Alliance That Promises to Light the Road to the Future. Holland W. E. Automotive Market Specialist, Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. (Plano, TX) [www.taosinc.com](http://www.taosinc.com)
172. Optical Encoders: An Emerging Measurement Tool For Automotive Systems. Holland W. E. Automotive Market Specialist, Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc. EPN Magazine Suppl., Dec 2004 [www.taosinc.com](http://www.taosinc.com)
173. Advances in Analog Distance Sensing. Duval B. Sensors, Sep 1, 2004.
174. Лысенко О. Программируемые инкрементальные энкодеры серии DRS61. // Компоненты и технологии. 2006. № 2.
175. A New Dimension in Encoder Technology. Hoffmann Franz-Josef, Stegmann Inc. Sensors, May 2002.
176. Optical fast synchronization shaft position and speed sensor. US Patent 4 866 268. Опубл. 12.09.1989. (General Motors Corporation)
177. Optical shaft position and speed sensor. US Patent 4 866 269. Опубл. 12.09.1989. (General Motors Corporation)
178. Method of detecting absolute steering angle of steering angle sensor for vehicle. US Patent 5 065 324. Опубл. 12.11.1991. (Fuji Jukogyo Kabushiki Kaisha)
179. Rotating detecting device of multi-rotation body. US Patent 6 130 425. Опубл. 5.10.2000. (Alps Electric Co., Ltd.)
180. Magnetic compass with optical encoder. US Patent 4 937 945. Опубл. 3.07.1990. (Donnelly Corporation).
181. Multiple-beam optical position sensor for automotive occupant detection. US Patent 5 737 083. Опубл. 7.04.1998 (Delco Electronics Corporation)
182. Optical two-dimensional position sensor in a control device for automotive applications. US Patent 6 153 875. Опубл. 28.11.2000. (STMicroelectronics)
183. Optoelectronic angle of rotation sensor. US Patent 6 552 330. Опубл. 22.04.2003. (Leopold Kostal GmbH & Co. KG)
184. Vehicle wheel bearing, wheel-speed sensor mechanism assembly, and wheel speed sensor. US Patent 6 774 622. Опубл. 10.08.2004. (Delphi Technologies, Inc.)