

# Поворотные шифраторы:

## основные типы и некоторые особенности применения

Первичные измерительные преобразователи (датчики) являются главными чувствительными органами измерительной аппаратуры и всех устройств систем контроля и управления. Эффективность автоматических устройств и систем управления технологическими процессами в значительной степени определяется качеством датчиков.

Виктор Жданкин

victor@prosoft.ru

Для улучшения метрологических и информационных характеристик существующих и разрабатываемых типов датчиков, ВУЗами и научно-исследовательскими организациями постоянно проводятся научные исследования, известными зарубежными фирмами разрабатываются принципиально новые конструкции датчиков на основе применения технологий и материалов микроэлектроники. В результате достигается высокая воспроизводимость физико-механических свойств и геометрических параметров основных конструктивных элементов, существенно снижаются погрешность, массо-габаритные показатели и стоимость датчиков.

При модернизации существующих типов датчиков преследуется цель снижения их погрешности, расширения пределов измерений и повышения устойчивости к условиям эксплуатации. Обычно модернизация подвергается датчики традиционных конструкций с преобладанием элементов электромеханики, и улучшение метрологических и информационных характеристик достигается применением новых, более современных конструктивных материалов, введением в измерительную схему дополнительных термокомпенсирующих элементов. Кроме

того, устранение значительной части систематических погрешностей осуществляется за счет использования микропроцессоров, что позволяет проводить предварительную обработку измерений, получать из них и выдавать им не аналоговый, а цифровой сигнал, проводить самодиагностику и т. п. [1].

Актуальной задачей в системах автоматизации управления является измерение линейных и угловых перемещений, для ее решения в настоящее время широко используются преобразователи, созданные с применением различных физических принципов. К наиболее известным методам измерения параметров положения относятся:

- потенциометрический;
- емкостный;
- индуктивный (индуктивные дифференциальные преобразователи линейных перемещений/угловых перемещений — LVDT/RVDT, планарные индуктивные катушки);
- использующий эффект Холла;
- использующий магниторезистивный эффект;
- на основе явления магнитострикции;
- оптический.

Для решения задач измерения значительных перемещений (более 1 м) используются кодирующие преобразователи. Кодирующие устройства (шифраторы) представляют собой преобразователи, в которых на выходе в цифровой форме представляются воспринимаемые ими перемещения. Линейные перемещения воспринимаются линейными, угловые — угловым или поворотным кодирующим устройством.

На рис. 1 показаны линейные и угловые поворотные кодирующие устройства, созданные на основе различных принципов кодирования: с помощью точного кодирующего устройства, оптического устройства либо с помощью магнитного устройства.

На практике в промышленной робототехнике, станках механизации, числового программного управления и других промышленных системах управления и контроля широко используются два основных типа оптических угловых кодирующих устройств: шифраторы приращений и абсолютные шифраторы.

В данной статье представлены некоторые общие сведения о принципах действия обоих типов шифраторов, их конструкции и эксплуатации.

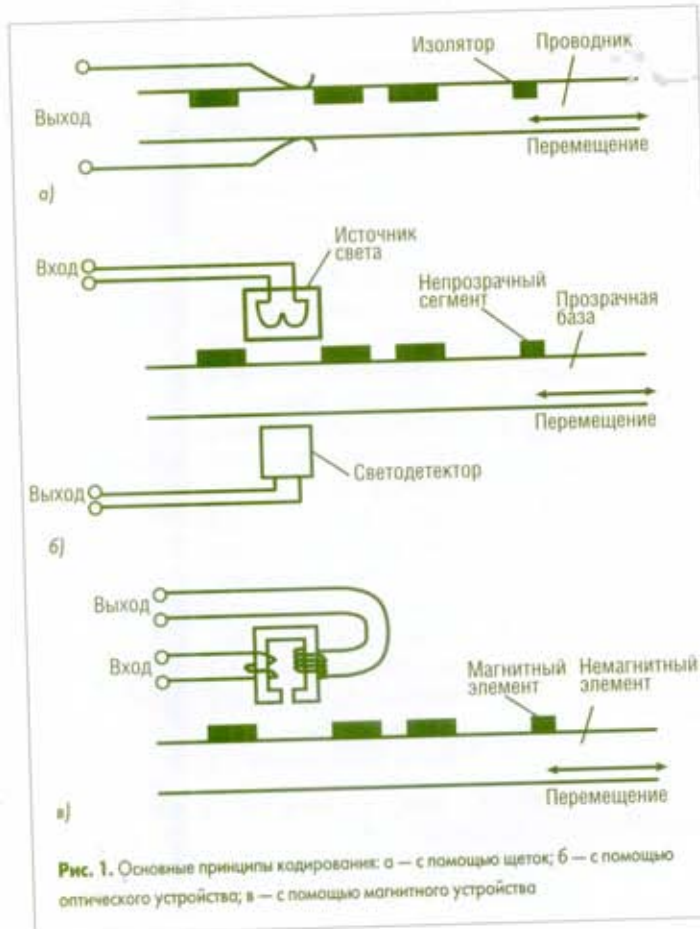


Рис. 1. Основные принципы кодирования: а — с помощью щеток; б — с помощью оптического устройства; в — с помощью магнитного устройства

**Измерение перемещений и углов поворота**

Цифровые измерения линейных перемещений (длины) и углов поворота, в частности функциональных элементов роботов и металлообрабатывающих станков, можно осуществ-

лять так называемым методом считывания с использованием кодирующих линейчатых масок и кодирующих дисков. На них нанесены кодирующие дорожки в виде темных (соответствуют «0») и светлых (соответствуют «1») элементов [3]. Примеры кодирующих линейчатых масок показаны на рис. 2.

решающая способность такого диска определяется длиной окружности с наибольшим радиусом.

Для таких кодирующих устройств характерна специфическая погрешность, вызываемая неоднозначностью считывания кода либо по причине попадания в рабочую зону считывающих элементов границы между соседними столбцами (словами) либо из-за плохой юстировки, например из-за угловых отклонений линии позиционирования считывающих элементов, как это показано на рис. 4.

При простом двоичном кодировании ошибка из-за неопределенности считывания, равная единице младшего разряда кода, может вызвать для ряда чисел перенос единицы в старший разряд, вследствие чего минимальная ошибка трансформируется в максимальную. Для уменьшения указанной погрешности вместо двоичного кода используют код Грея. В коде Грея изменение младшего разряда на 1 вызывает изменение только соседнего старшего разряда (рис. 5).



Рис. 2. Примеры кодирующих линейчатых масок: а — двоично-кодированная маска; б — маска в коде Грея

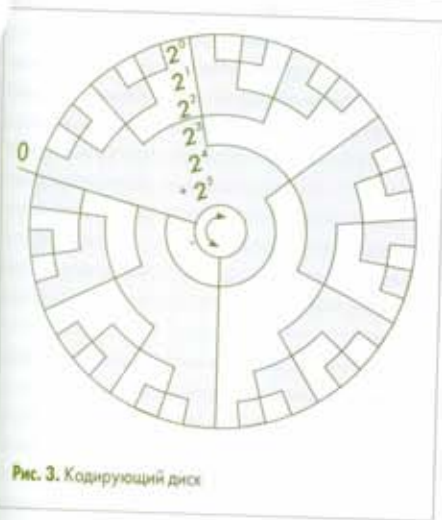


Рис. 3. Кодирующий диск

Считывание кода и получение соответствующих сигналов обычно осуществляется оптоэлектронным способом (элементы дорожек просвечиваются). Разрешающая способность масок ограничивается различной длиной элемента кода. При магнитном способе считывания она составляет примерно 0,1 мм, а при фотоэлектрическом — порядка единиц микрометра, то есть существует механический предел их чувствительности. Оптические шифраторы приращений интерферометрического типа обладают существенно более высокой разрешающей способностью за счет эффективного увеличения расстояния между чувствительными сегментами.

На рис. 3 показан кодирующий диск, кодовые дорожки на котором нанесены concentрически. Диапазон измерений равен 360°. Раз-

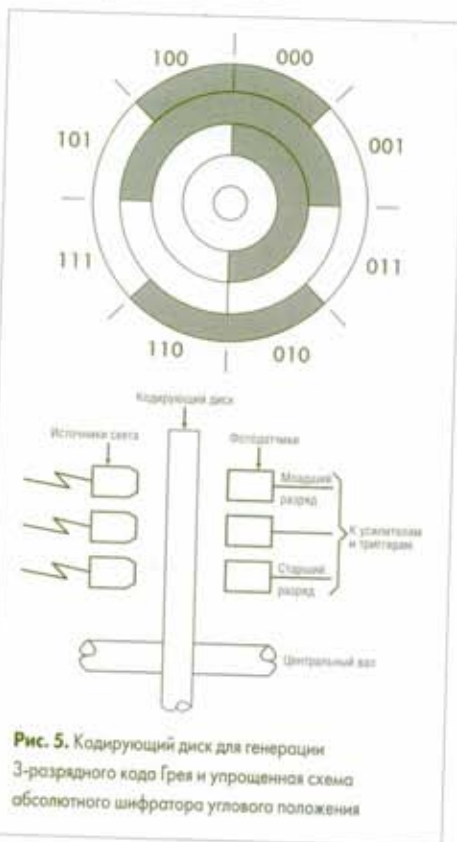


Рис. 5. Кодирующий диск для генерации 3-разрядного кода Грея и упрощенная схема абсолютного шифратора углового положения

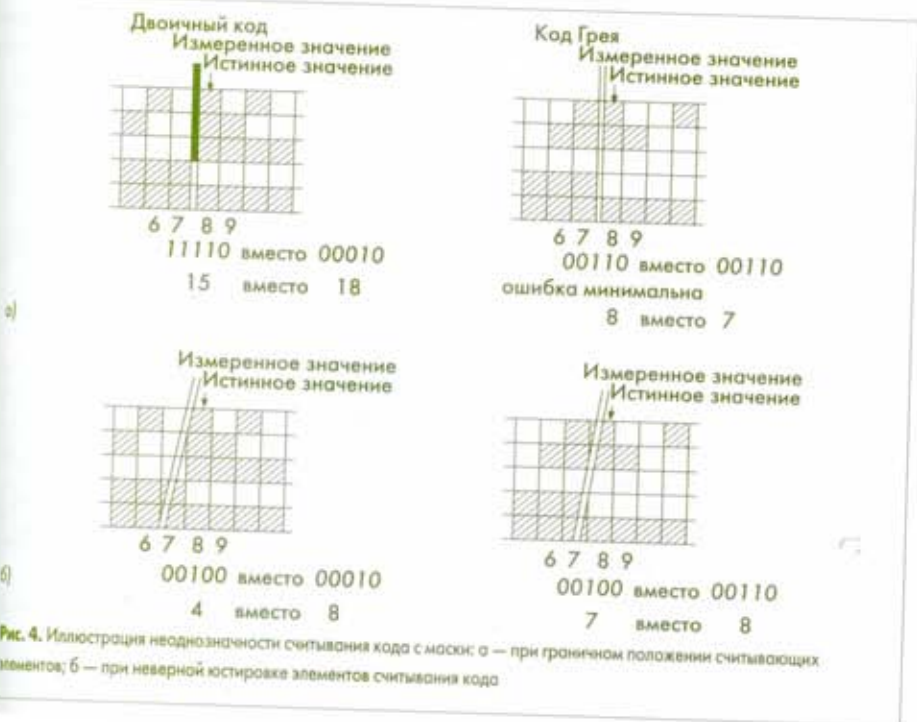


Рис. 4. Иллюстрация неоднозначности считывания кода с масок: а — при граничном положении считывающих элементов; б — при неверной юстировке элементов считывания кода

Независимо от того, какой код используется в шифраторе, измерительная система должна его преобразовывать в простой двоичный цифровой код.

Погрешности шифраторов с обычным бинарным кодом можно минимизировать также с помощью методов сканирования, которые обычно реализуются за счет включения двух преобразующих элементов на каждую дорожку. При этом ведущий элемент располагается несколько впереди ведомого. Данные обрабатываются внешней логической схемой [2]. Принцип любого из данных методов заключается в том, что вне зависимости от используемого простого двоичного кода последовательный переход системы из одного состояния в другое должен сопровождаться изменением состояния младшего разряда кода. При увели-

чении двоичного числа, если младший разряд изменяет свое состояние из 0 в 1, не должно происходить изменений в других разрядах; если младший разряд переходит из 1 в 0, то как минимум еще один разряд должен изменить свое состояние. При уменьшении двоичного кода все происходит наоборот. Внешние логические схемы должны интерпретировать эти случаи и осуществлять переключения между ведущим и ведомым преобразующими элементами, так, чтобы обеспечить однозначность выходного кода.

Одним из недостатков любого двоичного цифрового кода является то, что общее число комбинаций в последовательности равно некоторой степени числа 2 (например, из 4-разрядного кода Грея видно, что общее число кодов  $2^4=16$ ). При использовании поворотных шифраторов не исключена ситуация, когда может потребоваться, чтобы выход преобразователя отображал угловое положение объекта непосредственно в градусах. Поскольку в одном полном обороте диска содержится  $360^\circ$ , в этом случае получается двоичный цифровой циклический код, напоминающий код Грея с 360 различными «словами». В таком шифраторе обычно используется электронная маска, которая при прохождении диска от  $359^\circ$  к  $0^\circ$  генерирует на выходе прибора нулевой код, не создающий проблем однозначности, так как все нули генерируются от одного и того же сигнала и возникают одновременно.

### Абсолютные шифраторы и шифраторы приращений

Шифратор приращений индицирует только перемещение при движении от начального состояния, а абсолютный шифратор индицирует абсолютное положение. В абсолютных шифраторах углового положения используется электромеханический способ аналого-цифрового преобразования, предполагающий непосредственное преобразование угла поворота вала в соответствующий цифровой выходной сигнал, который может быть использован для обработки и интерпретации информации любым измерительным комплексом.

Абсолютные шифраторы применяются в тех случаях, когда устройство бездействует в течение продолжительных интервалов времени или перемещается с небольшой скоростью. Примерами таких устройств могут быть задвижки управления подъемом воды, телекопы, грузовые краны и т. д.

В традиционном абсолютном шифраторе маска на диске состоит из ряда концентрических дискретных дорожек с числом периодов на один оборот, удвоенным на каждой следующей дорожке увеличенного радиуса. Каждая дорожка имеет собственные фотодетекторы, и расположены дорожки так, что показания всех детекторов генерируют параллельный двоичный код (рис. 6), обычно код Грея, преимущество которого заключается в изменении только одного разряда при переходе в последовательном счете от одного числа к другому. Например, шифратор с 12 дорожками будет генерировать 4096 слов за один оборот

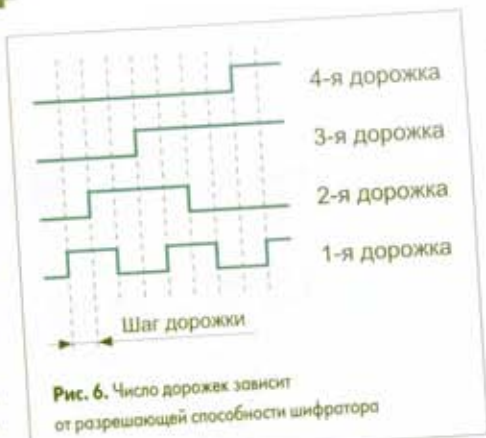


Рис. 6. Число дорожек зависит от разрешающей способности шифратора

вала. Оптомеханика и электроника считывания кода такого шифратора являются значительно более сложными и дорогостоящими, чем у шифратора приращений. Тем не менее он имеет существенное преимущество: предоставление информации точно же после запуска, без процедуры возврата в исходное положение.

Двумя другими характерными свойствами абсолютных шифраторов являются следующие:

- так как шифратор генерирует параллельный двоичный код, просто и непосредственно обеспечивается сопряжение с любым микропроцессорным оборудованием или устройством индикации;
- шифратор «запоминает» данные о положении посредством кодированной маски диска, т. е. нет необходимости постоянно накапливать данные с его выхода; данные просто считываются всякий раз, когда необходимо определить текущее положение.

Абсолютные шифраторы по принципу действия делятся на однооборотные и многооборотные. У однооборотных шифраторов один оборот вала ( $360^\circ$ ) делится максимум на 8192 отсчета (13-битовый код измерений). После каждого полного оборота код возвращается к своему начальному значению. Контроллер шифратора не распознает количества сохраненных оборотов.

В дополнение к кодирующему диску, применяемому в однооборотных шифраторах, многооборотные шифраторы имеют встроенный редуктор, который является подчиненным и закодирован таким образом, что может быть обнаружено до 4096 оборотов (12 бит). Поэтому полная разрешающая способность абсолютного шифратора составляет 25 бит — однооборотная разрешающая способность и 12 бит — количество оборотов. Этот тип шифраторов, характеризующийся большим значением допустимого числа измерений (33554432), может быть использован для длительных по времени применений, требующих для управления более одного оборота приводного устройства (например, зубчатая рейка и шестерня, подающий винт, шкив или конвейер с ремennым приводом).

Абсолютные шифраторы могут использовать различные коды, но наиболее распространенными являются коды Грея, двоичный, двоично-десятичный с весами 8-4-2-1 (BCD). Используется также модифицированный код Грея, являющийся частью полного кода Грея.

В некоторых моделях абсолютных шифраторов предусматриваются вспомогательные входы:

- Latch (фиксация данных) — информация о положении объекта может быть сохранена в абсолютном поворотном шифраторе. Посредством подачи команды Latch всем абсолютным шифраторам системы устройство управления способно временно сохранить значения углового положения шифраторов и затем постепенно вводить данные для обработки;
- TriState переводит выходные каскады абсолютного шифратора с параллельным интерфейсом в высокоимпедансное состояние, что дает возможность нескольким шифраторам работать с одной платой обработки сигналов;
- Preset1 и Preset2 (предустановка) — выходное значение шифратора может быть установлено в положение, равное углу 0 или  $90^\circ$ ;
- Counting Direction — изменение направления счета на противоположное.

Шифратор приращений генерирует выходные импульсы, которые подсчитываются реверсивным счетчиком, показания которого соответствуют тому, как далеко диск или полоска (для линейных кодирующих устройств) продвинулись от начала отсчета. Чаще всего применяются два чувствительных элемента, расположенных в преобразователе таким образом, что их выходы сдвинуты относительно друг друга на  $90^\circ$  по фазе. В этом случае можно использовать специальную логическую схему для определения направления перемещений и, следовательно, для определения того, в каком или обратном режиме должен считываться счетчик.

Шифраторы приращений могут быть как шифрованы следующим образом.

1. Одноканальные (тахометрические) шифраторы применяются для измерения скорости или частоты и не могут быть использованы для определения направления перемещения. Выходной сигнал обычно представляет собой периодическую импульсную последовательность (рис. 7, а).



Рис. 7

Двухканальные шифраторы, генерирующие сдвинутые относительно друг друга по фазе на 90° выходные периодические импульсные последовательности (рис. 7, б), позволяют с помощью внешних логических цифровых устройств определять направление вращения вала и таким образом делают возможным двунаправленное позиционирование. Сигнальные последовательности, предоставляющие информацию, закодированную в соотношении фаз двух выходных сигналов, называются квадратурными сигналами.

Направление вращения определяется по начальному опережению или отставанию по фазе сигнала канала А относительно сигнала канала В. В случае применения шифратора тахометрического типа может возникнуть ошибка, если шифратор остановится на границе чувствительного элемента. В результате воздействия вибрации устройство будет пересекать эту границу в прямом и обратном направлениях, счетчик будет подсчитывать каждый переход, и несмотря на фактическую остановку системы (явление позиционного дрожания), двухканальный шифратор, благодаря использованию квадратурного определения и изменению взаимного состояния противоположных каналов, генерируется достоверная информация о направлении вращения. Величина скорости определяется посредством измерения либо интервала времени между импульсами, либо числа импульсов в заданном временном интервале.

Квадратурное измерение обеспечивает точность одно- (1х), двукратной (2х) или четырехкратной (4х) разрешающей способности диска абсолютного кода. 10 000 импульсов за один оборот может быть получено от двухканального шифратора с 2500 угловыми отсчетами, что при качественном диске и правильно сфазированном шифраторе обеспечивает точность выше 1/2 величины отсчета [4].

Трехканальные шифраторы приращений генерируют так называемый нулевой импульс, который вырабатывается один раз за оборот и имеет следующие названия: сигнал реперной точки, маркерный сигнал, сигнал ис-

ходной точки, Z-сигнал. Он может быть не привязанным к основным каналам (нулевой маркерный сигнал 01), логически связанным с сигналами каналов А или В (нулевой маркерный сигнал 02) или логически связанным с сигналами каналов А и В (нулевой маркерный сигнал 03). Маркер 01 — нестробированный с длительностью импульса больше, чем длительность импульсов канала А или В. Маркер 02 — стробированный с сигналами А или В, допускающий длительность импульса 50 % периода. Маркер 03 — стробированный с сигналом А и В, допускающий длительность импульса 25 % периода (рис. 7, в).

Дифференциальные выходы применяются для надежной передачи информационной посылки между достаточно удаленными устройствами и/или в условиях помех (рис. 8, а).

Число измерительных интервалов может быть удвоено посредством выполнения операции сложения по модулю 2 (исключающее ИЛИ) сигналов А и В (рис. 8, б). Это создает возможность для увеличения разрешающей способности в 2 раза.

Увеличение разрешающей способности в 4 раза может быть выполнено посредством измерений нарастающих и спадающих фронтов периодических импульсных последовательностей каналов А и В (рис. 8, в).

В рамках проведенной классификации покажем некоторые особенности шифраторов.

### Оптические шифраторы приращений интерферометрического типа

Интерферометрический принцип позволяет оптическим шифраторам считывать световые сигналы, пропускаемые через прорезы на вращающемся диске толщиной около 1 мкм, значительно увеличивая точность устройства [5].

За последние 50 лет конструкция оптического шифратора приращений изменилась незначительно. Традиционный шифратор приращений (рис. 9) в своей основе состоит из источника света, неподвижной маски с установленным шаблоном непрозрачных штрихов, закрывающей прохождение света через прорезы вращающегося диска, фотоэлектрического диода на стороне диска, расположенного напротив источника света, и узла обработки сигнала.

Так как диск вращается, свет либо проходит через одну из прорезей, либо попадает в пространство между двумя прорезями. Пропускаемые вспышки света выявляются фотодетектором и воспринимаются узлом обработки сигнала как единица, отсутствие света интерпретируется как ноль. Генерируемый та-

ким образом сигнал представляет собой бинарный спектр, соответствующий ряду напряжений, пропорциональных углу поворота вала, на котором установлен диск. Так как процессор должен «знать» предыдущее положение вала, для того чтобы вычислить новое местоположение, на внешнем крае диска обычно размещается специальная реперная прорезь, используемая для обнуления последующих измерений в системе питания.

В технологиях производства дисков шифраторов за последнее время были проведены существенные усовершенствования. Современные компоненты, такие как светодиоды и пороговые считывающие фотоэлементы, обеспечивают высокую надежность. Тем не менее пороговая величина точности шифратора по-прежнему определяется его способностью точно детектировать свет, проходящий через 5000–10000 прорезей в кодирующем диске, каждая из которых шириной около 10 мкм. Свет не может пройти прямолинейно через более узкие прорезы. Простая геометрическая модель распространения световой энергии не работает с тонкими (узкими) прорезями. В этом случае наблюдаются отклонения (девиации) в непосредственном соседстве теней, выражающиеся в появлении темных и светлых линий, известных как интерференционные полосы. Попытки усилить сигнал от этих полос с помощью электронных устройств дают обнадеживающие результаты, но тем не менее не обеспечивают достаточной точности.

Физика явления интерференции лежит в основе нового способа построения шифраторов. Два источника возмущения создают две группы концентрических волн, которые формируют интерференционные картины в точках перекрытия.

Оптическая интерференция требует устройства, посредством которого свет от источника, разделенный на два луча, затем совмещается. Интенсивность света в зоне суперпозиции меняется от точки к точке между максимальным значением и минимальным, которое может быть нулевым.

Для применения явления интерференции в шифраторах необходимо решить три технологические проблемы:

- каким образом разместить интерференционные элементы непосредственно на оптическом диске;
- как создать прямолинейные интерференционные линии, равные по ширине прорезям на диске шифратора;
- каким образом минимизировать потери энергии света.

Для того чтобы сформировать картинку линейной интерференции, требуются две плоские волны. Даже очень небольшое отклонение от абсолютной плоскостности волнового фронта будет причиной того, что линии изображения станут непараллельными и непрямолинейными. Поэтому необходимо использование прецизионных отражателей, призм или светоделительной пластины.

Рассмотрим элементарную формулу интерференции:

$$D = \lambda / \sin \alpha$$



Рис. 8



Рис. 9. В традиционном шифраторе приращений свет, до того как он достигнет диска шифратора, проходит через оптическую маску; так как диск вращается, фотодетектор получает не больше половины начальной засветки через каждую прорезь диска

Здесь  $D$  — расстояние между линиями или их ширина,  $l$  — длина волны светового излучения,  $q$  — угол, под которым пересекаются две волны.

Для шифратора с переменной разрешающей способностью величина  $D$  должна быть регулируемой. Для этого необходимо иметь возможность изменять угол  $q$ . Решением является применение двух отражателей.

Светоделительная пластина была разработана для устранения дифракционных пятен изображений, полученных в когерентном свете (спекл), и потерь энергии. Кроме того, ее использование делает конструкцию шифратора в целом защищенной от пыли и предохраняет от внешних воздействий отдельные детали.

В конструкции современного шифратора свет от монохроматического точечного источника проходит сначала через коллиматор, который посылает когерентный луч света через диафрагму, придающую лучу форму, необходимую для перекрытия светочувствительных зон всех четырех фотодетекторов. Затем свет проходит через светоделительную пластину, которая разбивает его на два луча с одинаковой яркостью (интенсивностью) и направляет их под точным углом для формирования интерференционной картинке, соответствующей картинке на диске, помещенном в поле интерференции.

Между коллиматором и светоделительной пластинкой размещены два отражателя, которые могут быть использованы для настройки параметров интерференционной картинке. Поляризатор, размещенный после светоделительной пластинки, служит для увеличения контрастности интерференционной картинке посредством уравнивания направлений поляризации двух лучей. Основные компоненты подобных шифраторов показаны на рис. 10.



Рис. 10. Для обеспечения стабильности оптической системы все компоненты: светоделительная пластина, отражатели и источник света — установлены на прочном алюминиевом основании

На рис. 11 показан шифратор приращений, использующий оптический диск с четырьмя рядами светопоглощающих полос, сдвинутыми на  $1/4$  периода друг относительно друга. Комплект, состоящий из четырех фотодетек-

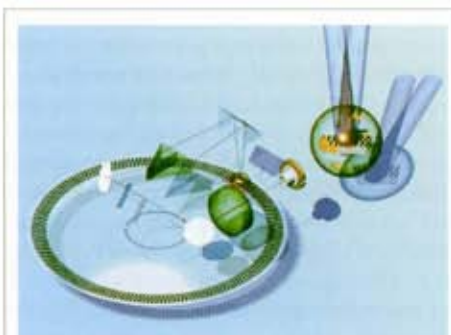


Рис. 11. Направления распространения света в шифраторе приращений

торов, воспринимает свет, проходящий между полосами на диске, поэтому сигналы фотодетекторов также сдвинуты по фазе на  $1/4$  периода. Две группы из двух полупериодных сигналов фотодетекторов используются в дополнительных усилителях для формирования сдвинутых на  $1/2$  периода выходных последовательностей по аналогии с описанными ранее шифраторами приращений.

Метод, основанный на интерферометрии, создает настраиваемые параллельные линии света тоньше 1 мкм (рис. 12), позволяя разместить 32768 линий на диске шифратора.



Рис. 12. Интерферометрический метод создает тонкие параллельные полосы света на очень коротких расстояниях

В случае, когда диск перемещается, интенсивность света на входах фотодетекторов изменяется; подсчет соответствующих сигналов в обоих направлениях делает возможным выявлять реверсивное движение (рис. 13).



Рис. 13. Два сигнала, поступающие от фотодетектора, сфазированы так, что электронным управляющим устройством может быть обнаружено движение по часовой стрелке или против нее

### Технические требования по выбору шифраторов и их установке

Современным инженерам и системным интеграторам приходится решать сложные задачи по выбору компонентов системы в условиях дефицита времени и существования множества альтернатив. Одним из основных компонентов многих систем автоматизации является шифратор. Так как время наработки на отказ является существенным параметром любой системы, шифраторы должны быть корректно встроены в систему и подобраны

таким образом, чтобы оптимизировать рабочие характеристики системы и не снизить надежность.

Большая часть шифраторов является шифраторами приращений поворотного типа. Они герметизированы в целях защиты от пыли, грязи, масляных брызг или воздействия влаги. Всегда необходимо включать в качестве пункта спецификации уплотнение вала поворотного шифратора, которое защищает зону, где вал входит в корпус шифратора и захватывается подшипником. Защита этой зоны преследует цель обеспечения эксплуатационной долговечности подшипника и шифратора в целом. В зависимости от применяемых стандартов существуют различные обозначения степени защиты изделий от попадания внутрь твердых посторонних тел или воды — IP или NEMA.

Выход из строя подшипников является распространенным конструктивным отказом шифраторов, вызванным повышенными нагрузками. Именно подшипники обеспечивают компактность конструкции вала и узла поворотного диска, влияют на точность и стабильность выходного сигнала в течение всего срока службы устройства.

Поэтому конструктивный ресурс поворотных шифраторов в основном обусловлен нагрузкой, которой подвергается узел подшипников.

Должны учитываться два типа нагрузок на вал: радиальная и осевая. Радиальная нагрузка — нормальная составляющая силы, приложенной к валу. Осевая нагрузка — сила, которая приложена параллельно оси вращения вала. Срок службы подшипников определяется несколькими факторами. Этот срок сокращается при увеличении осевой или радиальной нагрузки на вал. По этой причине допустимая величина нагрузки на вал или перекос валов всегда должны быть заданы при установке шифраторов.

Фактический срок службы подшипника зависит и от частоты вращения. Более высокая скорость вращения сокращает ресурс подшипника. В худшем случае, который предполагает высокое значение нагрузки на вал при высокой скорости, срок службы подшипника будет значительно меньше ожидаемого значения. Идентичные силы, приложенные к валу при пониженных скоростях вращения, не могут быть причиной беспокойства относительно срока службы подшипника.

При монтаже шифраторов необходимо помнить следующее обстоятельство: радиальная нагрузка на вал линейно увеличивается по мере удаления места приложения усилия от подшипника. Это весьма похоже на удержание тяжелого предмета на вытянутых руках. При установке на конце вала шкива или зубчатого барабана срок службы подшипника может снизиться. Эти же законы действуют, когда используются удлиненные валы. Таким образом, всегда лучше устанавливать шкив, зубчатый барабан, колесо или любое другое устройство как можно ближе к подшипнику.

Другим фактором, влияющим на срок службы подшипника, является тепло. Воздействие чрезмерно высоких температур может уменьшить количество консистентной сма-

ки в подшипнике, а это, в свою очередь, может привести к отказу.

Постороннее вещество, жидкость или твердый предмет, попадая в подшипник, также может быть причиной быстрого отказа, так как шарикоподшипники являются прецизионными устройствами с крайне критичными внутренними зазорами и все, что способно нарушить эти зазоры, непременно сократит ожидаемый срок службы. По этой причине большая часть моделей шифраторов поставляется с сальниковыми уплотнениями вала.

Таким образом, для того чтобы реализовать максимально возможный ресурс шифратора, необходимо соблюдать требуемые меры предосторожности при монтаже устройства, обеспечить точное центрирование вала и специфицировать необходимое уплотнение вала, когда это нужно.

Правильный монтаж шифратора является главным условием его эффективного применения. Если два вала не могут быть точно сопряжены или ось вращения вала не совпадает с его геометрической осью, то в этих случаях вал поворотного шифратора должен соединяться с ведущим валом посредством гибких соединительных муфт (рис.14).



Рис. 14. Внешний вид конструкций гибких муфт фирмы Pepperl+Fuchs GmbH

Для шифраторов с пустотелым валом могут быть применены соединительные рычаги, шашки (ролики), штифтовое соединение. Для систем, в которых применяются ролик и ремень для приведения в движение шифратора, необходимо обеспечить плотную посадку ступицы ролика на валу шифратора и натяжение ремня посредством подпружиненного натяжного ролика, который ограничивает влияние боковых нагрузок на вал шифратора.

Требования к выходным сигналам шифраторов могут быть простыми или чрезвычайно сложными вследствие широкого разнообразия применений этих устройств.

Основным критерием функциональности шифратора является его основная разрешающая способность или число циклов включения/выключения на одном выходном канале при полном обороте вала. Выбор разрешающей способности шифратора зависит от его применения. Для определения мерных длин и линии резки разрешающая способность может быть определена допуском на местоположение разреза с разрешенным отклонением  $\pm 1$  импульс шифратора. При регулирова-

нии скорости определяющими факторами являются время отклика и возможная полоса пропускания системы. В случае позиционного регулирования требования к разрешающей способности определяют точность позиционирования и допустимое отклонение из-за конструктивных факторов.

**Обработка квадратурных сигналов**

Не так давно при синтезе цифровых устройств обработки сигналов с шифраторов пользовался популярностью метод, основанный на обнаружении фронта. Нарастающие и спадающие фронты сигналов, поступающих с шифраторов, служат своего рода спусковым крючком, вызывающим формирование отсчета. По каждому фронту электронная схема не только генерирует одиночный импульс счета, но и определяет направление перемещения, используя информацию о текущем направлении отсчета (прямое или обратное), о характере перепада сигнала и состоянии сигнала другого канала, как показано в табл. 1.

Таблица 1. Определеие направления перемещения по сигналам двух каналов

Перемещение, направленное вперед		Перемещение в обратном направлении	
Канал А	Канал В	Канал А	Канал В
Счет в прямом направлении	Высокий уровень (логическая 1)	Счет в прямом направлении	Низкий уровень (логический 0)
Счет в обратном направлении	Низкий уровень (логический 0)	Счет в обратном направлении	Высокий уровень (логическая 1)
Низкий уровень (логический 0)	Счет в прямом направлении	Высокий уровень (логическая 1)	Счет в прямом направлении
Высокий уровень (логическая 1)	Счет в обратном направлении	Низкий уровень (логический 0)	Счет в обратном направлении

Таблица 2. Определеие направления перемещения по логическим состояниям каналов

Перемещение, направленное вперед				Перемещение в обратном направлении			
Канал А		Канал В		Канал А		Канал В	
От состояния		К состоянию		От состояния		К состоянию	
A	B	A	B	A	B	A	B
0	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1	1
0	0	0	1	0	0	1	0

В современных цифровых устройствах используются не фронты, а изменения логических состояний. Как правило, цифровые счет-

ные устройства имеют в своем составе высокоскоростной генератор тактовых сигналов, и постоянно производится опрос состояний сигналов каналов А и В (рис. 15). В случае когда обнаруживается изменение, счетное устройство выбирает прямое или обратное направление счета по логике (табл. 2). Вместо того чтобы ожидать запускающий фронт от шифратора, цифровое устройство генерирует собственный сигнал запуска, исходя из результатов анализа изменения состояния каналов шифратора.

Наряду с этими восемью разрешенными изменениями состояний (А, В), существуют также четыре комбинации, которые означают возникновение ошибки: (0,0) ->(1,1), (1,1) ->(0,0), (0,1) ->(1,0), и (1,0) ->(0,1). Данные ошибки означают, что по крайней мере одно состояние было пропущено. Схема пользователя должна вырабатывать сигнал, предупреждающий о подобных ошибках.

Так как существуют четыре различных состояния (или фронта) за период, то обычно использовали преимущества собственной

разрешающей способности шифратора. В настоящее время есть готовые микросхемы, осуществляющие квадратурное декодирование, поэтому пользователям нет необходимости синтезировать собственную цифровую схему.

При прежнем методе регистрации фронта было важно, чтобы сигнал начала отсчета (INDEX) был привязан к конкретному переходу из одного состояния в другое, в противном случае временная стабильность сигнала INDEX будет потеряна. При сигнале INDEX полнопериодного или полупериодного формата пользователь должен стробировать его



Рис. 15. Определеие полного периода двухканального шифратора приращений

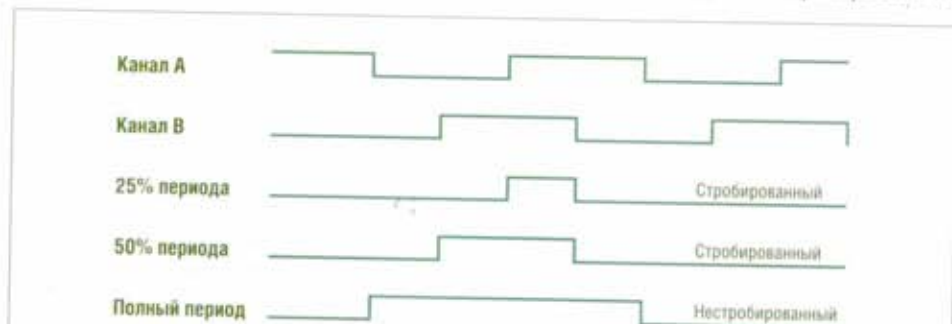


Рис. 16. Обработка квадратурных сигналов

высокое состояние с высоким состоянием сигнала канала А и перепадом сигнала канала В. Результирующий стробированный сигнал всегда будет совпадать с одним и тем же фронтом сигнала канала В.

Что касается современных цифровых устройств, то здесь более важным представляется привязать INDEX к конкретному квадратурному состоянию. Пользователь может в этом случае стробировать высокое состояние полупериодного или полупериодного сигнала INDEX с высокими значениями логических состояний каналов А и В. Результатом будет четвертьпериодный INDEX (рис. 16), который имеет высокое логическое состояние при аналогичных состояниях каналов А и В. Многие современные шифраторы приращений сами формируют четвертьпериодный сигнал INDEX.

При реализации метода, основанного на регистрации фронтов, зачастую было удобно иметь шифратор, который не только определял число фронтов за период (1, 2, 3 или 4), но и сразу же предоставлял информацию о направлении движения. Это было в те времена, когда многие компании предлагали шифраторы с импульсным выходом. Выходной импульсный сигнал отличается от сигнала, представляющего собой периодическую импульсную последовательность, двумя важными свойствами [6]:

- длительность импульса является фиксированным временным интервалом, тогда как длительность импульса в последовательности является функцией скорости (расстояние между импульсами, соответственно, является функцией местоположения);
- «квадратура» не имеет смысла при импульсном выходе; импульсы FWD (направление перемещения вперед) формируются на одном выходе, а импульсы REV (перемещение в обратном направлении) — на другом (или импульсы формируются на одном выходе, а информация о направлении движения на другом).

Модели шифраторов с импульсными выходами были довольно популярными одно время, но совершенно потеряли свое значение после того, как стали доступны новые микросхемы квадратурного декодирования, и спрос на эти модели со стороны заказчиков, применяющих современные технологии, резко сократился. В новейших шифраторах импульсные выходы более не предусматриваются.

Однако шифраторы с импульсным выходом оставили свой след в терминологии. Широко используется словосочетание «число импульсов за один оборот» (pulses per revolution — PPR) даже в тех случаях, когда на самом деле имеется в виду число периодов квадратурных периодических последовательностей импульсов за один оборот. Поскольку шифраторы с импульсными выходами все еще применяются, многие производители поворотных шифраторов рекомендуют применять термин «импульс» для обозначения отклонения напряжения или тока от некоторого постоянного уровня (в частности, от нулевого), наблюдаемого в течение некоторого времени. Если же этот термин используется совместно со словом

«квадратура», то, естественно, подразумеваются «периоды/оборот».

Вместо «4X умножение» и «4X регистрация фронтов» лучше использовать термины «квадратурное дешифрирование» и «квадратурная обработка».

Рекомендуется применять термин «импульсы счета/оборот» для обозначения того, что получается после дешифрирования; допустимыми также являются термины «выходные единичные перепады» или «измерительные перепады».

Английская аббревиатура CPR означает cycles/rev (периоды/оборот) или counts/rev (импульсы счета/оборот), поэтому использовать эту аббревиатуру необходимо осознанно.

### К вопросу о точности

В мире шифраторов часто смешиваются термины «разрешающая способность», «точность» и «воспроизводимость», и иногда их даже считают синонимами.

Разрешающая способность характеризуется количеством одиночных импульсов счета, генерируемых шифратором, на единицу измерения расстояния. Для шифраторов приращений разрешающая способность выражается либо в угловых единицах (градусы, минуты, секунды, десятичные градусы, градиенты или радианы), либо числом интервалов измерения за один оборот вала (например, 10 000 отсчетов/оборот). Часто для удобства последующей цифровой обработки интервал измерения (шаг измерения, измерительный шаг), интерпретируют как «бит», характеризуя наивысшую разрешающую способность показателем степени числа 2, например 16-битовый шифратор генерирует  $2^{16} = 65536$  отсчетов/оборот. Разрешающая способность является основным параметром шифратора.

Точность — это мера того, насколько соответствует показание шифратора истинному значению. Величина точности почти всегда выражается в угловых единицах, несмотря на то что некоторые составляющие погрешности могут иногда представляться в электрических градусах, которые затем должны быть переведены в угловую меру, прежде чем суммироваться с другими ошибками. Точность и погрешность отражают различия между измеренным и истинным местоположением, но с несколько разным подтекстом: точность показывает, насколько близко найденное местоположение к истинному, в то время как погрешность демонстрирует, насколько велико отклонение измеряемой величины от истинного значения.

В то время как разрешающая способность шифратора определяется в процессе его проектирования и производства типом установленного кодирующего диска и классом воспринимающих и обрабатывающих электронных узлов, погрешность шифратора является функцией факторов окружающей среды, таких как температура, нагрузка на вал и срок службы. Это не значит, что число отсчетов за один оборот вала изменяется; такое может

случиться только в результате тяжелого повреждения или загрязнения кодирующего диска или подшипников.

Несмотря на то что точность является неотъемлемой характеристикой всех шифраторов, ее не всегда правильно определяют и нет унификации в описании определяющих точность технических характеристик шифраторов разных поставщиков: одни вдаются в излишние подробности, другие предоставляют ограниченную информацию, а некоторые даже не упоминают этот параметр.

Следует подчеркнуть, что разрешающая способность и точность непосредственно не связаны между собой. В шифраторах с более высокими рабочими характеристиками погрешность иногда может быть равной множеству отсчетов или может быть малой частью одного отсчета, в зависимости от особенностей применения.

Повторяемость (воспроизводимость) — характеристика, показывающая различие между значением показания в данный момент времени и значением, полученным при последнем измерении для движения в том же направлении. В зависимости от применения важно проводить различие между долговременной и кратковременной повторяемостью. Подобно точности, она выражается в угловых единицах. Повторяемость поворотного шифратора стандартного исполнения обычно в 5-10 раз лучше, чем приводимая в технических характеристиках производителя величина общей точности (погрешности).

В определенных применениях повторяемость является более важным параметром, чем точность. При сопровождении самолета, например, критичной должна быть точность, но если робот выполняет простые периодические операции, повторяемость может быть более важной, чем точность.

Статья не претендует на полное освещение данной темы, а лишь готовит почву для начального обзора изделий фирмы Pepperl+Fuchs (Германия), затрагивая вопросы их классификации, физических принципов функционирования, а также терминологии.

### Литература

1. В. Н. Азаров, А. Ф. Каперко. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Приборы и системы управления. № 5, 1998.
2. К. Бридли. Измерительные преобразователи: Справочное пособие. Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Х. Харт. Введение в измерительную технику: Пер. с нем. — М.: Мир, 1999.
4. Scott Orlosky. Specifications for Encoder Selection & Installation // Measurements & Control. — September 2000. — Issue 201. — Pp. 139-143.
5. Andrei Kourilovitch, Patrick Bloechle. A Interference-Based Incremental Optical Encoder // Sensors. — November 2000. — Vol. 17. — № 11.
6. Gerald S. Gordon. Square Waves and Pulses Clarification // Measurements & Control. 1998. — September.