



## ГЛАВА 4

### ВРАЩАЮЩИЙСЯ ТРАНСФОРМАТОР (РЕЗОЛЬВЕР) В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ

#### 4.1 Назначение и устройство синусно-косинусного вращающегося трансформатора (резольвера)

Датчик положения, который называется вращающимся трансформатором или резольвером, относится к группе электрических датчиков и широко используются в робототехнике и мехатронике для определения и передачи в систему управления данных о текущем положении или перемещении разнообразных подвижных механических элементов, например, ротора электродвигателя, звена манипулятора или иного механического объекта управления.

Резольвер является преобразователем угловых перемещений и представляет собой электрическую машину индукционного типа малой мощности. Он формирует на выходе электрические сигналы, содержащие информацию о положении подвижного элемента резольвера, а значит, и о положении соединённого с ним объекта управления. При использовании дополнительных электронных устройств эти сигналы преобразуются в цифровой код положения объекта, и он может использоваться в современных высокоточных системах компьютерного управления.

Вращающийся трансформатор (резольвер) состоит из неподвижно устанавливаемого статора и ротора, который соосно размещается внутри статора (рисунок 4.1). Выходные сигналы датчика позволяют определить угол  $\theta$  поворота ротора относительно статора.

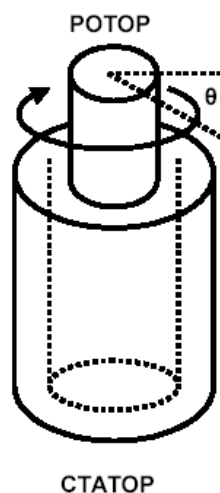


Рисунок 4.1. Схема расположения ротора и статора резольвера

В качестве датчика положения чаще всего используется синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ). Пример исполнения статора и ротора резольвера представлен на рисунке 4.2. Для измерения положения объекта управления он механически соединяется с ротором датчика (ротор резольвера находится на валу объекта управления, например, ротора электродвигателя).



Рисунок 4.2. Ротор и статор резольвера

Современный синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) имеет, как правило, одну обмотку на роторе и

две обмотки на статоре. СКВТ бывают двухполюсными и многополюсными, контактными и бесконтактными. Контактные СКВТ содержат контактные кольца и щётки для передачи напряжения на обмотку ротора. Однако такая конструкция обладает невысокой надёжностью и ограниченным сроком службы, поэтому считается устаревшей и в настоящее время применяется редко. Более распространённый бесконтактный СКВТ имеет на статоре ещё одну дополнительную обмотку, с помощью которой со статора бесконтактно передаётся напряжение на роторную обмотку возбуждения.

Статорные обмотки намотаны таким образом, что их магнитные оси сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 90 градусов. Принцип действия резольвера основан на взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора, которая изменяется в зависимости от угла  $\theta$  поворота ротора относительно статора (рисунок 4.3).

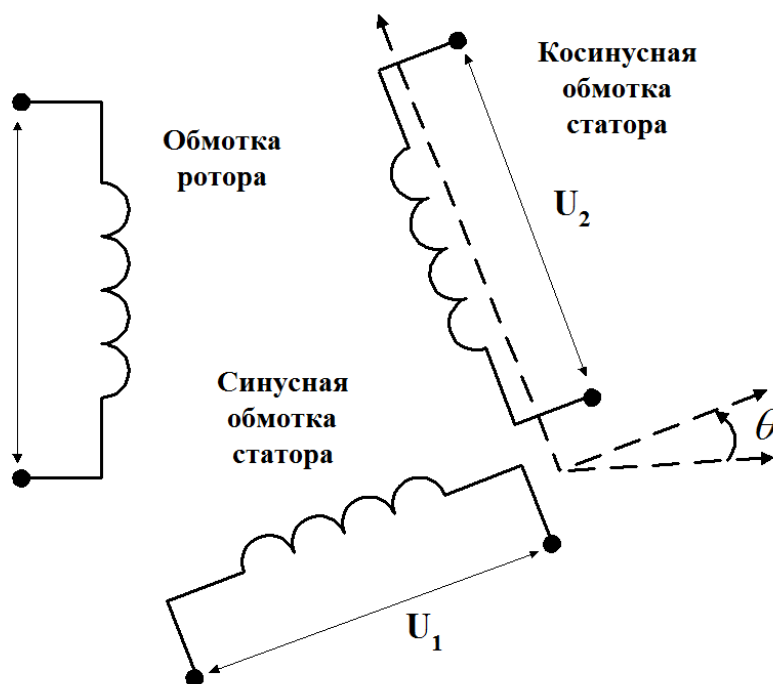


Рисунок 4.3. Взаиморасположение обмоток статора и ротора

На роторную обмотку, играющую роль первичной обмотки трансформатора, подаётся создаваемое генератором опорное переменное напряжение, представляющее собой напряжение возбуждения  $U$ , изменяющееся по гармоническому закону с частотой  $f = 20 \dots 30$  кГц. Это напряжение описывается уравнением

$$U = V \sin \omega t,$$

где  $V$  – амплитуда напряжения возбуждения;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $t$  – время.

Амплитуда ЭДС, возникающая на вторичной (статорной) обмотке, зависит от взаимного положения первичной и вторичной обмоток. Если ротор находится в положении, при котором одна статорная обмотка имеет наилучшую магнитную связь с обмоткой ротора, то в этой статорной обмотке наводится наибольшая ЭДС. При этом в другой статорной обмотке ЭДС равна нулю. Поворот ротора на 90 градусов относительно статора приводит к тому, что в первой обмотке ЭДС становится равной нулю, а во второй наблюдается наибольшая амплитуда ЭДС. Коэффициенты трансформации зависят от угла  $\theta$  поворота ротора относительно статора. Поэтому в промежуточном положении ротора ЭДС  $U_1$  и  $U_2$  в первой и второй обмотках статора, называемых синусной и косинусной обмотками, определяются на основании уравнений

$$U_1 = kV \sin \theta \cdot \sin \omega t,$$

$$U_2 = kV \cos \theta \cdot \sin \omega t,$$

где  $k$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей резольвера.

Можно заметить, что в СКВТ происходит амплитудная модуляция выходных сигналов, снимаемых с его статорных обмо-

ток. При этом амплитуды колебаний, происходящих с основной несущей частотой, изменяются в функции синуса и косинуса угла поворота ротора относительно статора. Эти амплитудно-модулированные сигналы несут информацию об угле  $\theta$  и используются для измерения положения ротора и связанного с ним объекта управления относительно статора.

#### 4.2 Методы обработки сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора (резольвера)

Цель преобразования сигналов резольвера – получение информации об угле поворота ротора относительно статора.

Первый метод – это *метод прямого преобразования* текущих значений выходных сигналов  $U_1$  и  $U_2$  синусной и косинусной обмоток, которые подвергаются *детектированию* и *фильтрации*. Детектирование сигналов  $U_1$  и  $U_2$  осуществляется двумя фазочувствительными выпрямителями (ФЧВ1 и ФЧВ2) (рисунок 4.4).

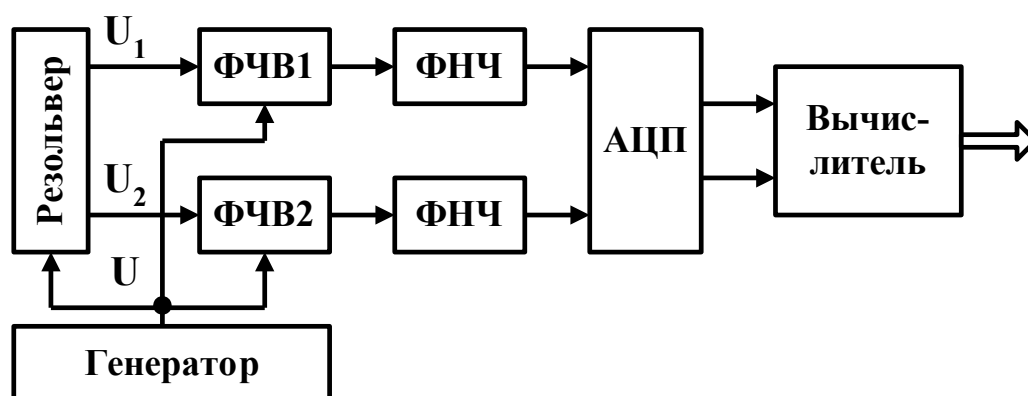


Рисунок 4.4. Схема устройства обработки сигналов резольвера, реализующего метод прямого преобразования

На первые входы ФЧВ1 и ФЧВ2 поступают сигналы  $U_1$  и  $U_2$  соответственно. На вторые входы этих ФЧВ подаётся опорный сигнал  $U$ . В результате детектирования образуются пульсирующие сигналы, в спектре которых присутствуют полезные медленно изменяющиеся составляющие, содержащие информацию об угле поворота ротора  $\theta$ , и высокочастотные составляющие, влияние которых существенно ослабляется фильтрами нижних частот (ФНЧ), дополняющими ФЧВ1 и ФЧВ2.

После детектирования и фильтрации сигналов  $U_1$  и  $U_2$  образуются сигналы

$$U_{1\Phi} = kV \sin \theta,$$

$$U_{2\Phi} = kV \cos \theta.$$

Они подаются на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и превращаются в цифровые коды  $N_{U1}$  и  $N_{U2}$  соответственно. В контроллере или управляющей ЭВМ эти коды используются для вычисления угла  $\theta$  поворота ротора относительно статора по формуле

$$\theta = \arctg \frac{N_{U1}}{N_{U2}}.$$

Для правильного определения  $\theta$  необходимо учитывать знаки чисел  $N_{U1}$  и  $N_{U2}$ , а также корректно осуществлять преобразование в случае, когда  $N_{U2}$  становится слишком малым по модулю, для исключения деления на ноль.

Второй метод - *метод следящего преобразования*. Он обеспечивает более высокую точность определения угла поворота ротора  $\theta$ , позволяет получить цифровой код этого угла и одновременно с этим определить скорость вращения ротора датчи-

ка. Для его реализации создаётся электронный вычислитель, представляющий собой *электронную систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью* (рисунок 4.5).

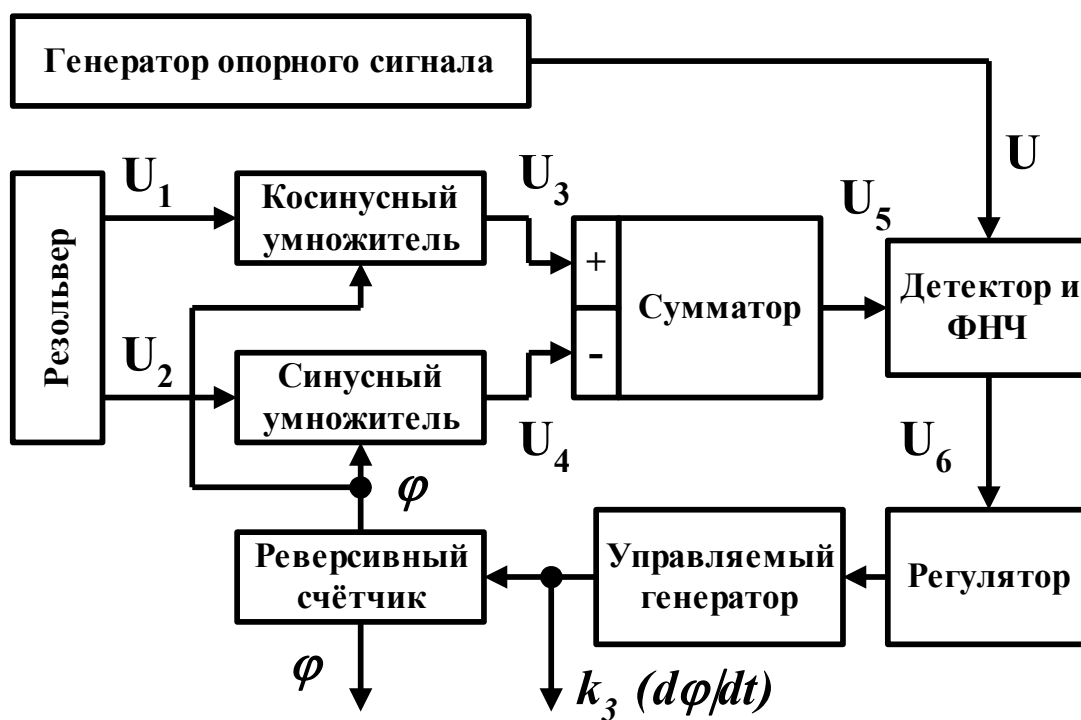


Рисунок 4.5. Структурная схема электронного вычислителя для реализации метода следящего преобразования

На входы системы поступают сигналы  $U_1$  и  $U_2$  с синусной и косинусной обмоток резольвера, а также опорный сигнал  $U$ . На выходе следящей системы образуется цифровой код вычисленного системой угла  $\varphi$  поворота ротора относительно статора. Следящая система замкнута по углу  $\varphi$ , поэтому значения регулируемой переменной  $\varphi$  оказываются достаточно близкими к значению реального угла поворота ротора  $\theta$  относительно статора.

Входные сигналы  $U_1$  и  $U_2$  преобразуются в косинусном и синусном умножителях соответственно. На вторые входы этих



преобразователей подаётся код угла  $\varphi$ , являющийся выходной переменной системы. В результате этого образуются сигналы

$$U_3 = kV \sin \omega t \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi,$$

$$U_4 = kV \sin \omega t \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi.$$

Они поступают на входы элемента, который из  $U_3$  вычитает  $U_4$  и на выходе формирует величину

$$\begin{aligned} U_5 &= kV \sin \omega t \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - kV \sin \omega t \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi = \\ &= kV \sin \omega t \cdot \sin(\theta - \varphi). \end{aligned}$$

Эта величина подаётся на вход детектора, в качестве которого используется **фазочувствительный выпрямитель** (ФЧВ). На второй его вход поступает напряжение от генератора опорного сигнала  $U = V \sin \omega t$ . На выходе ФЧВ образуется пульсирующий сигнал, изменяющийся с круговой частотой  $\omega$  и имеющий высоту импульсов, пропорциональную  $\sin(\theta - \varphi)$ . В спектре такого сигнала присутствует **постоянная составляющая** и переменные составляющие, изменяющиеся с частотами  $\omega$ ,  $2\omega$ ,  $3\omega$  и т.д.

Полезную информацию содержит постоянная и медленно изменяющаяся составляющие пульсирующего сигнала. Поэтому на выходе ФЧВ установлен **фильтр нижних частот** (ФНЧ), который выделяет эти составляющие и существенно ослабляет быстро изменяющиеся переменные составляющие. В результате детектирования и последующей фильтрации образуется величина

$$U_6 = k_2 \sin(\theta - \varphi),$$

где  $k_2$  — коэффициент пропорциональности, значение которого обусловлено свойствами ФЧВ и фильтра нижних частот.

При достаточно малом различии значений истинного  $\theta$  и вычисленного  $\varphi$  углов поворота ротора относительно статора, величина  $U_6$  оказывается практически пропорциональной разности этих углов:

$$U_6 \approx k_2(\theta - \varphi).$$

Поэтому можно рассматривать угол  $\theta$  как *задающее воздействие* следящей системы, а угол  $\varphi$  как *регулируемую переменную*. При этом детектор с фильтром нижних частот выступают в роли элемента сравнения, а величина  $\delta = \theta - \varphi$  представляет собой *рассогласование следящей системы*, поступающее на вход регулятора.

В регуляторе следящей системы реализован пропорционально-интегральный или интегральный закон регулирования. На выходе регулятора образуется воздействие, влияющее на *частоту импульсов*, формируемых *управляемым генератором*. Чем больше  $U_6$ , тем быстрее меняется частота следования импульсов генератора. Фактически на выходе генератора образуется сигнал, пропорциональный *скорости вращения ротора резольвера*. В частности, этот сигнал можно использовать для коррекции динамических свойств следящих приводов по скорости вращения вала двигателя.

Импульсы, формируемые управляемым генератором, поступают на входы *реверсивного счётчика*. На его выходе образуется цифровой код величины  $\varphi$ , который используется для вычисления величин  $U_3$  и  $U_4$ . Таким образом осуществляется замыкание электронной следящей системы и автоматическое определение величины  $\varphi$ , имеющей значение, максимально близкое к значению реального угла  $\theta$  поворота ротора датчика относительно его статора.

## ГЛАВА 5

### ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

#### 5.1 Назначение и типы фотоэлектрических преобразователей перемещений

Фотоэлектрические преобразователи перемещений предназначены для получения информации о положении или перемещении объекта управления. Как правило, они дополняются *электронными устройствами*, с помощью которых осуществляется преобразование полученной информации в двоичный цифровой код и передача его в цифровой контроллер или управляющую ЭВМ мехатронного устройства, робота или станка. Таким образом, фотоэлектрические преобразователи перемещений совместно с дополнительными электронными устройствами представляют собой *цифровые датчики положения*.

Фотоэлектрические преобразователи перемещений имеют в своём составе подвижный элемент и неподвижную часть. С подвижным элементом механически соединяется объект управления мехатронной или робототехнической системы, положение которого необходимо измерять. Различают фотоэлектрические датчики для измерения *угловых* и *линейных* перемещений. Такие датчики могут быть *инкрементными* и *абсолютными*.

Инкрементные фотоэлектрические преобразователи контролируют перемещения подвижного элемента и связанного с ним механического объекта управления относительно заранее установленного начального (базового) положения. Выходные сигналы инкрементного датчика *содержат сведения только о приращениих позиции объекта управления*. Поэтому для получения

данных о его положении необходим так называемый **квадратурный счётчик**, преобразующий сигналы датчика в цифровой код перемещения относительно заданного исходного положения.

При включении датчика и квадратурного счётчика состояние последнего имеет случайный набор элементов, образующих выходной код, и, таким образом, не несущее никакой информации о фактическом положении объекта управления. Поэтому перед началом работы системы управления движением надо выполнить **реферирование датчика**. Это действие означает предварительную настройку квадратурного счётчика. Для этого объект управления перемещают в заданное начальное положение и изменяют содержимое счётчика на значение, соответствующее этому начальному положению.

**Недостатком инкрементных датчиков** является потеря информации при отключении питания датчика и квадратурного счётчика. Для предотвращения этого явления в ответственных системах датчик и квадратурный счётчик запитываются от источника бесперебойного питания, имеющего аккумуляторные батареи.

Совокупность выходных сигналов **абсолютных** преобразователей перемещений непосредственно образуют **цифровой код положения** связанного с датчиком механического объекта управления. Между числовым значением, представленным в виде цифрового кода на выходе абсолютного датчика положения, и положением его подвижного элемента, например, углом поворота вала, существует **взаимно однозначное соответствие**. Поэтому для работы таких датчиков не требуется счётчик. И в этом состоит их принципиальное отличие от инкрементных преобразователей перемещений.

Абсолютные датчики положения имеют ряд важных преимуществ. Взаимно однозначное соответствие между положени-

ем подвижного элемента, с которым связан объект управления, и цифровым кодом на выходе датчика справедливо и при неподвижном положении объекта управления, и при его движении. Помехи могут нарушить это соответствие, но после прекращения действия помех соответствие восстанавливается. При отключении питания и повторном его включении абсолютный датчик снова даёт корректную информацию о положении без необходимости осуществления дополнительных операций для восстановления его работы.

**Недостатком абсолютных датчиков** положения является их сложность, высокая стоимость и ограниченное число разрядов выходного кода по сравнению с инкрементными датчиками перемещения. Цифровой код абсолютных датчиков чаще всего имеет не более 16 двоичных разрядов. Для многих задач управления движением мехатронных и робототехнических систем этого оказывается недостаточно. В то же время квадратурные счётчики, используемые совместно с инкрементными датчиками, создают коды с 24, 32 и большим количеством двоичных разрядов.

Характерный вид инкрементных преобразователей угловых перемещений представлен на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1. Инкрементные преобразователи угловых перемещений (энкодеры)

Такие датчики могут иметь различные **названия**: датчик перемещения, инкрементный датчик положения, датчик угловой, датчик поворота, датчик угла, датчик угловых перемещений, инкрементный энкодер, инкрементальный энкодер, оптический энкодер, фотоимпульсный датчик положения (ФИД).

Преобразователи **линейных перемещений** (рисунок 5.2) могут иметь несколько альтернативных названий, например, датчик линейных перемещений, датчик положения, фотоимпульсный датчик линейных перемещений.

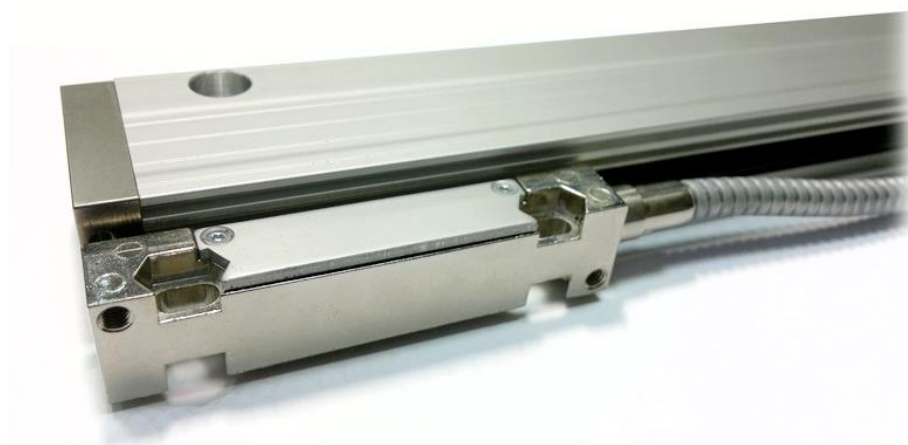


Рисунок 5.2. Инкрементный преобразователь линейных перемещений

## 5.2 Устройство и принцип действия энкодеров

Преобразователь имеет **радиальную растровую шкалу** 1, жёстко связанную с валом преобразователя и потому способную вращаться, и неподвижный **растровый анализатор** 2 (рисунок 5.3). Радиальная растровая шкала, называемая также **лимбом**, содержит две концентрические информационные дорожки и большое количество отверстий, через которые может проходить свет и



попадать на группы **фотоприёмников** 5 и 6. Между отверстиями расположены участки, через которые световой поток пройти не может. Одна из дорожек является дорожкой регулярного растра, а вторая – дорожкой референтной метки Б.

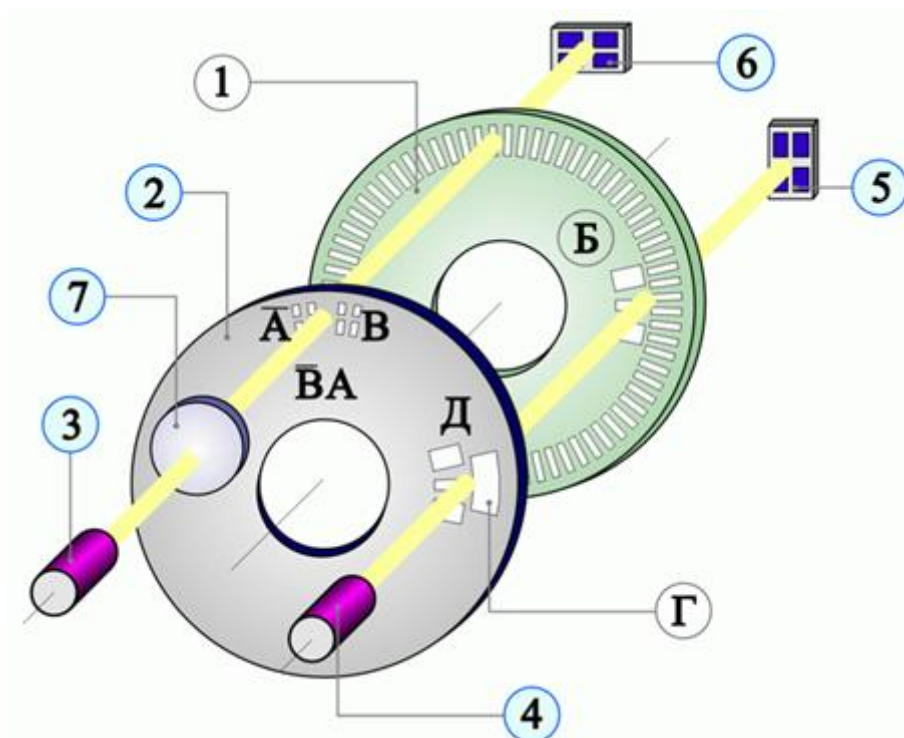


Рисунок 5.3. Схема инкрементного энкодера

Растровый анализатор 2 содержит несколько окон, через которые проходит свет, создаваемый осветителями, в качестве которых используются **светодиоды** 3 и 4. Светодиод 3 предназначен для работы системы инкрементного считывания. В неё входят окна формирования выходных сигналов датчика А, В и инверсных по отношению к ним сигналов  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ . Применение прямых и инверсных сигналов позволяет **увеличить помехозащищённость датчика**. Положения этих окон согласованы с дорожкой регулярного растра лимба. Для правильной работы датчика используется конденсор 7, который формирует параллельный пучок лучей, создаваемых светодиодом 3. Светодиод 4 служит для

формирования так называемой референтной метки с помощью окон Д.

В каждой паре окон  $A$ ,  $\bar{A}$  и  $B$ ,  $\bar{B}$  растры смещены друг относительно друга *на половину их шага*. Пространственный сдвиг растров между окнами  $A$  и  $B$  составляет *четверть шага растров*. Такой же сдвиг имеется между окнами  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$ . Положения отверстий референтной метки Д также согласованы с дорожкой референтных меток лимба Б.

При работе инкрементного энкодера группами *фотоприемников* 5 и 6 считывающего узла регистрируется световой поток от светодиодов 3 и 4, который проходит через растровое сопряжение, т.е. окна растрового анализатора 2 и окна радиальной растровой шкалы 1. Прохождение или блокирование светового потока зависит от положения шкалы 1 и совпадающего с ним положения вала энкодера относительно положения неподвижного растрового анализатора 2. *При вращении вала датчика происходит чередование засветки и затемнения фотоприёмников*. Получаемые на выходе этих фотоприёмников сигналы дают информацию о перемещении вала энкодера и служат основой для определения угла поворота объекта управления.

Основной канал считывания данных образуют светодиод 3, конденсор 7, окна  $A$ ,  $\bar{A}$  и  $B$ ,  $\bar{B}$  растрового анализатора 2 и группа фотоприемников 6. Сигнал референтной метки формируется в канале преобразователя, включающем светодиод 4, окна Д растрового анализатора 2 и группа фотоприемников 5. Сигналы, получаемые от фотоприёмников, усиливаются и преобразуются в выходные сигналы датчика с помощью электрической схемы выделения и обработки информации о перемещении.



### 5.3 Сигналы инкрементного преобразователя и их обработка

*При вращении вала энкодера с постоянной частотой* ток, протекающий в электрическом контуре, в котором находится фотоприёмник, имеет *синусоидальный характер*. Период изменения тока равен шагу растра датчика. Это справедливо для каждого фотоприёмника. Но поскольку отверстия в растровых сопряжениях, через которые проходят световые потоки для каналов  $A$  и  $B$ , сдвинуты друг относительно друга на четверть шага растра, то токи  $i_A$  и  $i_B$  в этих каналах также *сдвинуты по фазе на 90 электрических градусов* (рисунок 5.4).

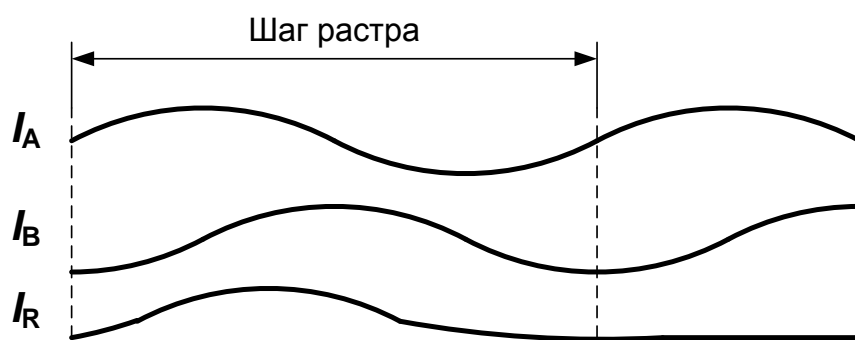


Рисунок 5.4. Токи, формируемые фотоприёмниками

Токи  $i_{\bar{A}}$  и  $i_{\bar{B}}$ , создаваемые фотоприёмниками каналов  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$ , также сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90 электрических градусов и имеют синусоидальный характер. При этом сигналы каналов  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  оказываются *в противофазе* по отношению к сигналам каналов  $A$  и  $B$  соответственно. При одном обороте вала энкодера ток фотоприёмника  $i_R$ , формирующий сигнал референтной метки  $R$ , образует только одну относительно короткую полуволну (рисунок 5.4). Кроме этого используется также сигнал канала  $\bar{R}$ , находящийся в противофазе по отношению к сигналу  $R$ .

Выходные сигналы энкодера формирует электронное устройство обработки сигналов, входящее в состав энкодера, на основании токов  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_R$ . Форма этих сигналов может повторять форму токов, показанную на рисунке 5.4. Но чаще выходные сигналы энкодера, например, напряжения  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_R$  являются результатом преобразования сигналов, пропорциональных токам, с помощью *триггеров Шмитта* и имеют вид *прямоугольных импульсов*. Например, при вращении вала датчика с постоянной скоростью импульсы появляются периодически с периодом  $T$  (рисунок 5.5). При одном обороте вала датчика появляется только один импульс  $U_R$  в канале  $R$  референтной метки.

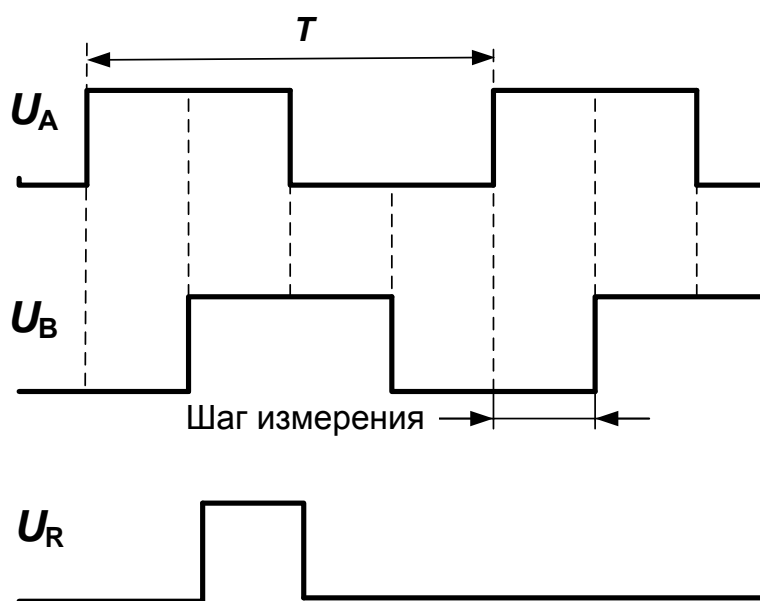


Рисунок 5.5. Выходные напряжения, имеющие вид прямоугольных импульсов

Использование выходных сигналов прямоугольной формы упрощает процесс определения квадратурным счётчиком числового кода, соответствующего перемещению объекта управления. Квадратурный счётчик подсчитывает все фронты и спады им-

пульсов, поступающих по каналам  $A$  и  $B$ , *с учётом направления вращения вала датчика*.

Если передний фронт импульса  $A$  появляется раньше переднего фронта импульса  $B$ , то квадратурный счётчик определяет, что вращение вала датчика происходит в одну сторону. При этом число фронтов и спадов импульсов добавляется к содержимому счётчика. А если раньше появляется передний фронт импульса в канале  $B$ , то квадратурный счётчик распознаёт вращение, происходящее в другую сторону. При этом из содержимого счётчика вычитается число обнаруженных фронтов и спадов импульсов.

Например, если датчик по каналу  $A$  выдаёт 1000 импульсов за один оборот вала, то квадратурный счётчик зафиксирует число 4000. При этом говорят, что происходит *учетверение импульсов*. Но квадратурный счётчик может быть настроен и таким образом, что при этом будет определено число 1000, равное количеству дискрет датчика на один оборот вала. В этом случае счётчик подсчитывает только число передних фронтов сигнала  $U_A$ , а коэффициент умножения равен 1. При другом варианте настройки происходит подсчёт количества передних фронтов сигналов  $U_A$  и  $U_B$ , а это даст число 2000, что соответствует удвоению импульсов.

Для увеличения помехозащищённости датчика положения на основе энкодера на входы квадратурного счётчика подаются не только сигналы каналов  $A$  и  $B$ , но и сигналы, формируемые в каналах  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$ , которые находятся в противофазе по отношению к сигналам каналов  $A$  и  $B$  соответственно.

Пример электрической схемы, используемой для подключения выходов каналов  $A$  и  $\bar{A}$  энкодера с TTL-выходными сигналами к приёмному устройству, например, контроллеру привода показан на рисунке 5.6. Такие же схемы используются и для

подключения к приёмному устройству выходов  $B$ ,  $\bar{B}$  и  $R$ ,  $\bar{R}$ . Таким образом, на входы приёмного устройства из энкодера поступают шесть сигналов.

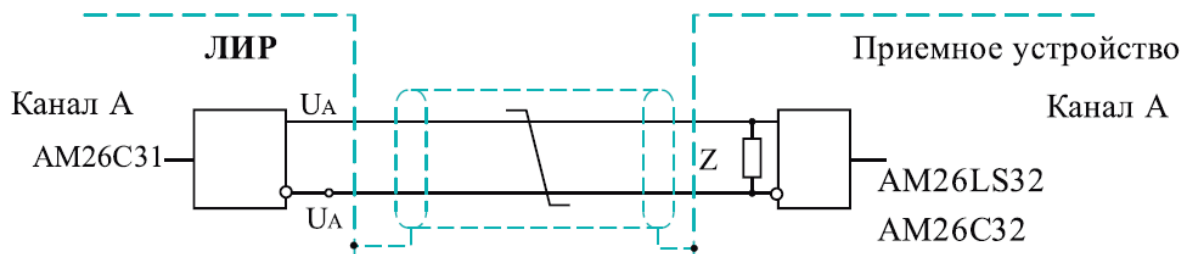


Рисунок 5.6. Схема соединения выходов энкодера с приёмным устройством

Сигналы  $A$  и  $\bar{A}$  передаются по двум линиям экранированного кабеля и поступают на входы микросхемы приёмного устройства, формирующей на своём выходе сигнал, пропорциональный разности входных сигналов. Помеха вызывает одновременное и одинаковое изменение сигналов  $A$  и  $\bar{A}$ . Поэтому выходной сигнал микросхемы приёмного устройства оказывается нечувствительным к действию такой помехи. Это способствует увеличению помехозащищённости датчика.

Для обеспечения гальванической развязки датчика и приёмного устройства, входящего в состав устройства управления ротора или мехатронной системы, применяется схема с оптронной парой (рисунок 5.7).

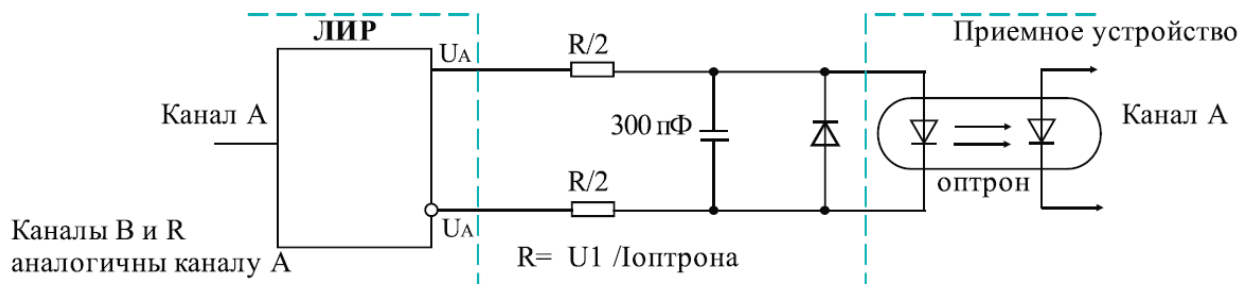


Рисунок 5.7. Схема соединения выходов энкодера с приёмным устройством при использовании оптронной пары

Инкрементные энкодеры имеют различную разрешающую способность и точность. Среди них есть *прецизионные* устройства, дающие возможность измерять перемещения с высокой точностью. В качестве примера можно привести два датчика, которые производит СКБ информационных устройств: ЛИР-190Е,С и ЛИР-1170.

Два варианта датчика ЛИР-190Е,С соответствуют третьему или четвёртому классам точности. *Третий класс точности* означает, что погрешность не превышает  $\pm 2,5''$ , а четвёртый класс точности соответствует погрешности датчика не более  $\pm 5''$ . Диаметр корпуса датчика равен 90 мм. В режиме учетверения *разрешающая способность составляет 1,8 миллиона дискрет на один оборот вала датчика*. Таким образом, угол поворота вала, при котором появляется одна дискрета и содержимое квадратного счётчика изменяется на единицу, равен  $3,49 \cdot 10^{-6}$  радиан.

Датчик ЛИР-1170 тоже имеет две модификации. Одна из них соответствует *2 классу точности* (погрешность  $\pm 1,5''$ ), а другая – 3 классу точности (погрешность  $\pm 2,5''$ ). Диаметр корпуса датчика равен 170 мм. Разрешающая способность достигает 3,6 миллиона дискрет на один оборот вала датчика, что соответствует приращению угла поворота  $1,75 \cdot 10^{-6}$  радиан, вызывающему изменение на единицу числа в счётчике.

Такого рода инкрементные преобразователи создают основу для создания прецизионных приводов и мехатронных устройств.

### 5.5 Частотные свойства инкрементных датчиков перемещений

При выборе инкрементных датчиков перемещений необходимо учитывать их динамические характеристики. Чем больше частота вращения вала энкодера и количество импульсов на его выходах, возникающих при повороте вала датчика на один оборот, тем выше частота изменения выходных сигналов. При росте этой частоты возникают всё более заметные искажения формы этих сигналов, и с определённого уровня таких искажений квадратурный счётчик не сможет работать корректно. Возникнут существенные ошибки в определении кода положения объекта управления. Поэтому для энкодеров указывают граничную частоту изменения выходных сигналов. Если фактическая частота не превышает граничную частоту, то форма выходных сигналов остаётся приемлемой для нормальной работы квадратурного счётчика.

Значения граничной частоты различны для разных моделей энкодеров и зависят от частотных характеристик используемых аппаратных компонентов. На рисунке 5.10 приведён пример взаимозависимости допустимых значений частоты вращения вала энкодера  $n$  и количества импульсов  $N$ , возникающих в любом из его выходных каналов при одном обороте вала и определяющих разрешающую способность датчика положения.

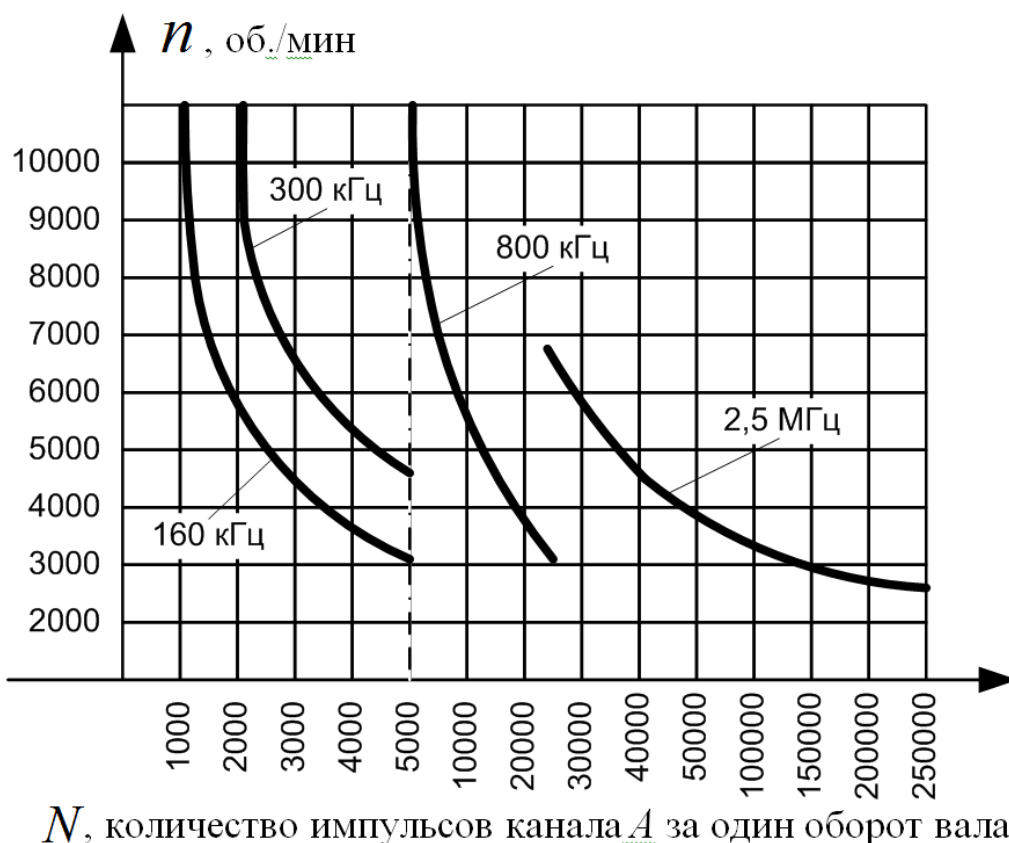


Рисунок 5.10. Частотные свойства энкодеров

На рисунке 5.10 приведены взаимозависимости для четырёх типов энкодеров, отличающихся частотными свойствами используемых аппаратных средств и имеющих значения граничной частоты 160, 300, 800 и 2500 кГц. Если точка, соответствующая сочетанию частоты вращения и количества импульсов, лежит не выше кривой, относящейся к определённой граничной частоте, то такое сочетание допустимо при использовании энкодера. В противном случае надо выбирать датчик с большим значением граничной частоты, меньшей разрешающей способностью или уменьшать частоту вращения его вала. Например, энкодер, имеющий граничную частоту 800 кГц и создающий 10000 импульсов при одном обороте вала, можно использовать при частоте вращения его вала до 5000 оборотов в минуту. А вот энкодер с гра-

ничной частотой 160 кГц при частоте вращения вала 5000 оборотов в минуту должен иметь  $N$  не более 2500.

При выборе оптико-электронных растровых преобразователей линейных перемещений их частотные свойства учитывают с помощью графиков, на которых показаны границы допустимых сочетаний скорости линейного движения измеряемого объекта и минимального промежутка времени  $\tau$  между фронтами сигналов  $A$  и  $B$  при различных шагах измерения датчиков. Чем лучше частотные свойства преобразователя, тем с меньшим промежутком времени  $\tau$  он может работать. Например, на основании данных, приведённых в [37], можно обнаружить, что преобразователь с шагом измерения 5 мкм и способный функционировать с минимальным промежутком времени между фронтами сигналов  $A$  и  $B$ , равным 2 мкс, может уверенно измерять перемещения, совершающиеся со скоростью до 1 м/с.

Не менее важно согласовать частотные свойства энкодера и приёмного устройства. Последнее должно быть способно корректно воспринимать входные сигналы. Например, устройства управления ряда приводов рассчитаны на приём сигналов энкодеров, изменяющихся с частотой до 300 кГц. В этом случае выбранное сочетание максимальной частоты вращения и значения параметра  $N$  не должно приводить к образованию частоты изменения выходных сигналов, превышающей 300 кГц, а применение более высокочастотных датчиков не даст положительного эффекта. Если же требования к разрешающей способности датчика положения диктуют необходимость использования энкодера с большим значением  $N$ , то приёмная аппаратура привода должна обладать соответствующими частотными свойствами.



## 5.6 Реферирование и определение начального состояния квадратурного счётчика

Инкрементные преобразователи формируют выходные сигналы, по которым можно определить только *приращение позиции* объекта управления относительно исходного положения этого объекта в начальный момент работы датчика. Однако инкрементный датчик не способен самостоятельно определить это исходное положение. Поэтому необходимо предварительно настроить квадратурный счётчик с учётом реального положения объекта управления. Для этого осуществляется операция *реферирования* с использованием сигналов *конечных выключателей* и *дискретного датчика*, установленного в заранее известном месте в пределах возможного хода объекта управления, которое принимается за начальное его положение.

На схеме организации реферирования датчика положения на основе инкрементного преобразователя (рисунок 5.11) показаны *три конечных выключателя* 1, 2, 3 и три возможных исходных положения, в которых может оказаться объект управления в начальный момент времени.

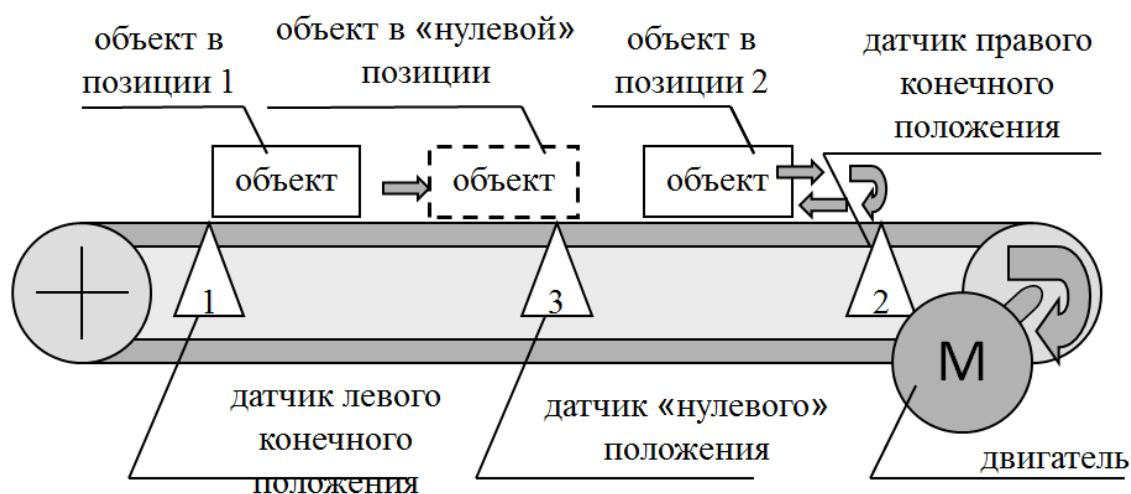


Рисунок 5.11. Схема организации реферирования датчика положения на основе инкрементного преобразователя

Линейное движение объекта управления создаётся исполнительным двигателем М привода и зубчато-ремённой передачей. На валу двигателя находится инкрементный энкодер, а его сигналы обрабатываются квадратурным счётчиком, создающим на выходе цифровой код перемещения объекта.

Конечные выключатели 1 и 2 являются датчиками *левого конечного положения* и *правого конечного положения* соответственно. Датчик 3 играет роль *датчика начального* (или «нулевого») положения объекта управления.

Вначале производятся *поисковые движения* объекта управления с помощью привода, замкнутого по скорости. При этом показания датчика положения не используются, т.к. они лишены всякого смысла. Предположим, что первое движение производится слева направо по схеме, представленной на рисунке 5.11. Если объект находится в исходном положении 1, то через некоторое время он переместится в положение, в котором срабатывает датчик 3. Его сигнал используется для принудительной записи в счётчик начального, например, нулевого кода положения объекта. С этого момента времени квадратурный счётчик активирован и, обрабатывая сигналы энкодера, выдаёт правильный код положения объекта управления. Привод замыкается по положению и переводится в основной режим слежения.

Если объект управления находится в исходном положении 2, то его движение направо приведёт к срабатыванию конечного выключателя 2. Сигнал этого датчика вызовет изменение направления движения объекта. После срабатывания датчика 3 движение будет продолжено в том же направлении до тех пор, пока этот датчик не отключится. Вслед за этим объект управления начнёт перемещаться слева направо и будут осуществлены те же действия по установке начального кода счётчика, что и описанные выше. Подход объекта к датчику 3 с одной и той же

стороны необходим для более точного соответствия начального кода квадратурного счётчика выбранному «нулевому» положению объекта. После завершения процесса реферирования конечные выключатели 1 и 2 играют роль датчиков предельных положений объекта. Если один из них срабатывает, то дальнейшее движение объекта за пределы этого датчика запрещается.

Более высокую точность настройки квадратурного счётчика при реферировании можно достичь *при одновременном учёте сигнала датчика 3 и сигнала референтной метки*. Установка требуемого начального кода счётчика и перевод датчика в режим определения положения производится в тот момент, когда впервые одновременно присутствуют оба упомянутых сигналов.

## 5.7 Абсолютные преобразователи угловых перемещений

Абсолютные преобразователи угловых перемещений в отличие от инкрементных преобразователей образуют на выходе *цифровой код положения* механического объекта без использования дополнительных устройств, например, квадратурных счётчиков. При этом они измеряют не перемещения относительно предварительно выбранного в процессе реферирования исходного положения, а определяют положение вала датчика относительно одного и того же «нулевого» положения корпуса этого датчика. Поэтому такие датчики условно называются абсолютными преобразователями или абсолютными датчиками положения. Каждому значению углового положения своего вала такие датчики ставят в соответствие числовое значение, представленное в виде цифрового кода на выходе.

Информацию о положении даёт *кодвая шкала* (лимб) в виде диска, имеющего несколько кольцевых дорожек, расположенных на разном удалении от центра (рисунок 5.12).

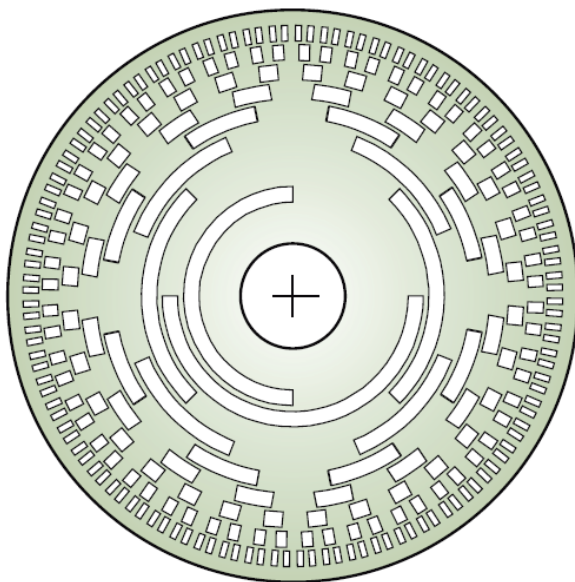


Рисунок 5.12. Кодвая шкала абсолютного датчика

На кольцевых дорожках расположены чередующиеся прозрачные (отверстия) и непрозрачные участки. Чем дальше от центра находится дорожка, тем больше в ней отверстий. Через отверстия этих дорожек проходят световые потоки от источника освещения до соответствующего фотоприёмника, формирующего дискретный выходной сигнал.

Выходные сигналы фотоприёмников можно считать логическими и обозначать 1, если фотоприёмник освещён, и 0, когда путь свету перекрывает непрозрачная часть лимба. Выходной сигнал абсолютного преобразователя представляет собой упорядоченное сочетание сигналов фотоприёмников всех кольцевых дорожек и рассматривается как бинарный код положения, составленный из сигналов 0 и 1. По этой причине рассматриваемые датчики называют кодовыми датчиками.

Чем больше кольцевых дорожек, а следовательно, и кодовых разрядов датчика, тем выше его разрешающая способность. Код может иметь от 8 до 24 двоичных разрядов. Наиболее распространённые типы абсолютных датчиков положения имеют 12-ти или 16-ти разрядный код.

Для кодирования информации о положении в абсолютных преобразователях угловых перемещений могут применяться разные способы. С целью уменьшения ошибок при передаче данных наиболее часто используется *код Грея*. Его особенность состоит в том, что двоичные коды соседних чисел отличаются ровно на один бит. Для дальнейшего использования в системе управления код Грея аппаратно или программно преобразуется в прямой или дополнительный двоичный код. Пример соответствия десятичного кода, двоичного кода и кода Грея показан в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Пример соответствия десятичного кода, двоичного кода и кода Грея

Десятичный код	Двоичный код				Код Грея			
	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$				
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1

Выходные данные абсолютного датчика перемещений передаются в устройство управления робота или мехатронного устройства *в параллельном или последовательном кодах*.

Передача данных в виде параллельного кода Грея происходит одновременно для всех разрядов и по нескольким проводам. Количество таких проводов, не считая общего провода, равно числу разрядов датчика. Электронное устройство, входящее в состав датчика, одновременно выставляет все разряды двоичного кода на выходной шине. На рисунке 5.13 показан пример изменения во времени состояния выходов 12-ти разрядного абсолютного датчика, вызванное вращением его вала. На этом рисунке D0 – младший разряд кода, а D11 – старший разряд кода датчика.

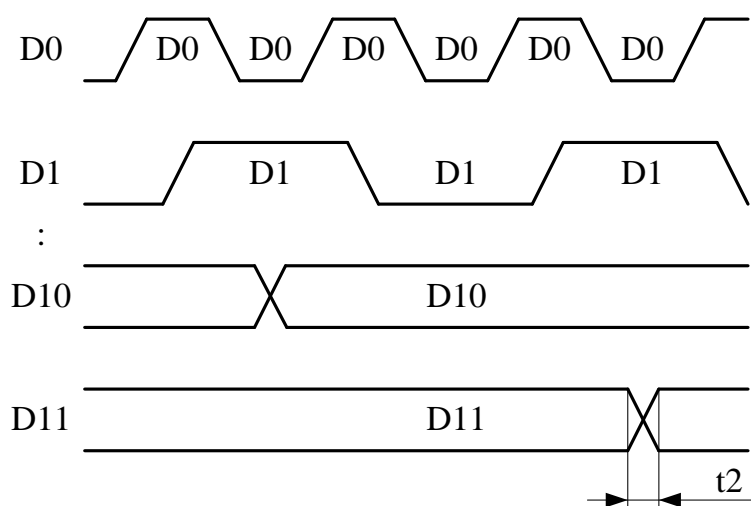


Рисунок 5.13. Пример выходных сигналов 12-ти разрядного абсолютного датчика

Приёмное устройство запоминает текущее состояние выходных сигналов датчика в своём параллельном регистре и использует полученную информацию для выработки управляющих воздействий.

Преимущество передачи сигналов в виде последовательного кода состоит в том, что оно происходит при использовании зна-

чительно меньшего числа проводов. Данные о разрядах двоичного кода передаются датчиком последовательно во времени друг за другом (рисунок 5.14) и запоминаются во входном регистре приёмного устройства. На передачу одного бита данных затрачивается некоторое время, обозначенное на рисунке 5.14 буквой  $T$ .

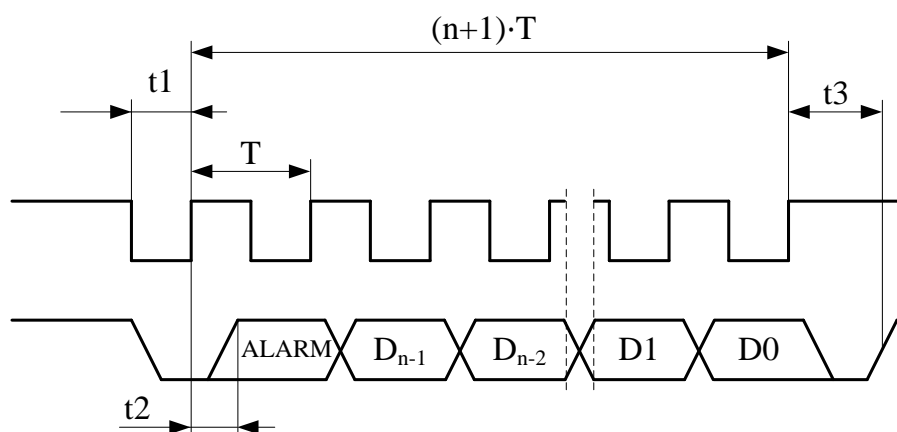


Рисунок 5.14. Процесс передачи данных в последовательном коде

Сначала передаётся младший разряд  $D_0$ . Затем  $D_1$ ,  $D_2$  и так далее, включая старший разряд  $D_{n-1}$ . Количество разрядов  $n$  может быть весьма значительным, например, 24, и оно не влияет на число проводов соединительного кабеля между датчиком и приёмным устройством. Но время передачи данных тем больше, чем больше число разрядов кода. Для исключения опасности появления ошибок при передаче данных используется синхронизирующий сигнал прямоугольной формы, показывающий в какие моменты времени на выходе датчика присутствуют корректные данные, подлежащие записи в регистр приёмного устройства.

## 5.8 Статические характеристики цифровых датчиков положения

Цифровые датчики положения (ЦДП) могут быть

- *кодовыми датчиками*, непосредственно выдающими код положения,
- *инкрементными датчиками*, дополняемыми квадратурными счётчиками, или
- *резольверами с цифровой обработкой их сигналов*.

Важно то, что на выходе таких датчиков образуются числовые данные, а датчики представляют собой *своеобразные аналого-цифровые преобразователи* в цифровой код положения  $M_{\text{ЦДП}}$  аналоговой величины, которой является угол  $\alpha$  поворота вала датчика вращательного типа или продольное перемещение считывающей головки датчика линейного типа относительно его неподвижной части.

Входная аналоговая величина (перемещение)  $\alpha$  преобразуется в цифровом датчике *в целое число* и при этом подвергается *усечению*. Такая операция называется *квантованием по уровню* и объясняется тем, что цифровое представление выходной величины  $M_{\text{ЦДП}}$  соответствует фиксированным положениям, отличающимся друг от друга на некоторые дискретные значения, кратные постоянной величине  $\delta_{\text{ЦДП}}$ . Поэтому *статическая характеристика* цифрового датчика имеет *ступенчатый вид* (рис. 5.15).



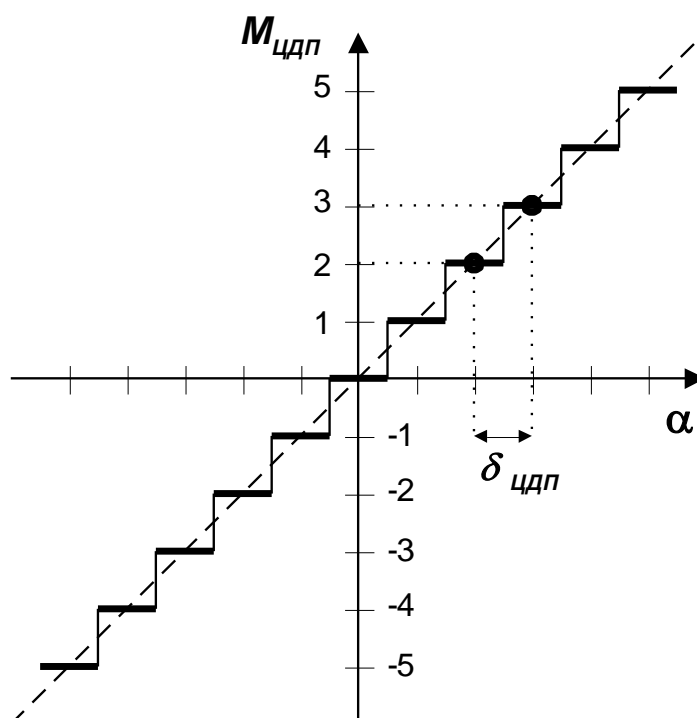


Рисунок 5.15. Статическая характеристика цифрового датчика положения

Величина  $\delta_{цдп}$  равна *цене единицы младшего разряда двоичного кода* на выходе ЦДП, физическая размерность которой совпадает с размерностью входной аналоговой величины  $\alpha$ .

Цену единицы младшего разряда двоичного кода  $\delta_{цдп}$  фотоимпульсного датчика (ФИД) можно определить по формуле

$$\delta_{цдп} = \frac{\pi}{2N_{фид}},$$

где  $N_{фид}$  — количество импульсов на выходе датчика, возникающее при одном обороте его вала.

В приведённой формуле учтено, что квадратурный счётчик, обрабатывающий импульсные сигналы датчика, подсчитывает все фронты и спады импульсов на двух своих входах, и таким образом формируемое счётчиком число оказывается в четыре ра-

за больше импульсов, поступающих на его вход по одному из каналов. Например, цена единицы младшего разряда двоичного кода  $\delta_{ЦДП}$  фотоимпульсного датчика, имеющего 5000 дискрет (единиц) на оборот, приблизительно равна  $3,1416 \cdot 10^{-4}$  радиан/единицу. Таким образом, при повороте вала датчика на угол, равный  $3,1416 \cdot 10^{-4}$  радиан, десятичное число, соответствующее выходному коду датчика, изменится на одну единицу.

Преобразование аналоговых величин в цифровой код в ЦДП и аппаратных квадратурных счётчиках происходит настолько быстро, что при анализе и синтезе систем компьютерного управления цифровые датчики положения можно считать *безынерционными устройствами*.

Но при выборе ЦДП необходимо *учитывать частотные свойства аппаратуры датчиков и приёмных устройств*. Частота следования импульсов на выходе ФИД равна произведению  $N_{ФИД}$  на частоту вращения вала датчика и может достигать нескольких мегагерц. Поэтому важно, чтобы выбранные датчик и приёмное устройство системы управления могли функционировать, не искажая выходные сигналы и надёжно распознавая принимаемые сигналы достаточно высокой частоты.

При использовании ЦДП, имеющих большое количество двоичных разрядов (16 ... 24 и более), эффекты квантования по уровню относительно слабо влияют на свойства системы компьютерного управления движением роботов и мехатронных устройств. Поэтому при аналитических исследованиях и на первых этапах проектирования таких систем можно пренебречь квантованием по уровню и воспользоваться *линеаризованными статическими характеристиками ЦДП*.

Линеаризация основана на предположении, обратном тому, которое применяется при линеаризации непрерывных систем.

Если принять, что изменения входного сигнала ЦДП значительно больше веса единицы младшего разряда преобразователя, то можно пренебречь влиянием ступенчатости статической характеристики ЦДП. Линеаризация означает замену ступенчатой линии на рисунке 5.15 некоторой средней прямой.

Наибольшая ошибка при переходе от нелинейной характеристики ЦДП к линейной не будет превышать по модулю  $0,5 \delta_{\text{ЦДП}}$ , и во многих практически важных случаях оказывается несущественной.

С использованием линеаризованной характеристики **коэффициент передачи ЦДП** может быть определён по формуле

$$k_{\text{ЦДП}} = \frac{M_{\text{ЦДП.М}}}{\alpha_{\text{МАХ}}},$$

где  $M_{\text{ЦДП.М}}$  – наибольшее положительное число на выходе ЦДП, соответствующее перемещению  $\alpha_{\text{МАХ}}$  подвижного элемента датчика положения. С учётом того, что

$$\alpha_{\text{МАХ}} = \delta_{\text{ЦДП}} M_{\text{ЦДП.М}},$$

полученный в результате линеаризации коэффициент передачи ЦДП определяется по формуле

$$k_{\text{ЦДП}} = \frac{1}{\delta_{\text{ЦДП}}} = \frac{2^{N_{\text{ЦДП}}} - 1}{\alpha_{\text{МАХ}}},$$

где  $N_{\text{ЦДП}}$  – количество двоичных разрядов выходного кода ЦДП.

Так, например, 12-ти разрядный ЦДП, выдающий число 4095 при одном обороте его вала, обладает коэффициентом передачи  $k_{\text{ЦДП}} \approx 651,74$  един./радиан при наибольшей ошибке, свя-

занной с переходом к линейной характеристике, не превышающей  $7,67 \cdot 10^{-4}$  радиана.

Коэффициент передачи  $k_{\text{ЦДП}}$  ЦДП, представляющего собой пару энкодер – квадратурный счётчик, и полученный на основании его статической характеристики, вычисляется по формуле

$$k_{\text{ЦДП}} = \frac{1}{\delta_{\text{ЦДП}}} = \frac{2N_{\text{ФИД}}}{\pi}.$$

Например, при использовании фотоимпульсного датчика, имеющего 2000 дискрет на один оборот его вала, получаем  $k_{\text{ЦДП}} \approx 1273,24$  един/рад.

## ГЛАВА 6

### ДАТЧИКИ СКОРОСТИ

Датчики скорости предназначены для измерения угловой или линейной скоростей движения механических объектов и передачи данных об этих скоростях в устройства управления движением.

Датчики скорости используются очень широко, например, при построении приводов роботов, станков и иных технологических машин, в авиации, ракетостроении, в транспортных системах.

#### *Классификация датчиков скорости*

Датчики скорости подразделяются на

- аналоговые (непрерывные) датчики скорости,
- дискретные датчики скорости.

Датчики скорости могут измерять

- угловую скорость,
- скорость прямолинейного движения.

Среди датчиков скорости можно выделить

- тахогенераторы,
- датчики скорости на основе датчиков Холла,
- датчики скорости, основанные на численном дифференцировании данных датчиков положения.

## 6.1 Принцип действия и классификация тахогенераторов

Тахогенератор является аналоговым датчиком, измеряющим угловую скорость (частоту вращения) механического объекта. Тахогенератор представляет собой малогабаритную электрическую машину, работающую в режиме генератора (рисунок 6.1). ЭДС, возникающая в тахогенераторе, пропорциональна угловой скорости вращения его вала. Вал тахогенератора соединяют с валом двигателя или иного вращающегося объекта и, измеряя напряжение на внешних зажимах тахогенератора, получают сведения о скорости вращения вала этого двигателя или объекта.



Рисунок 6.1. Тахогенератор

### *Классификация тахогенераторов*

Тахогенераторы подразделяются на

- тахогенераторы постоянного тока и
- тахогенераторы переменного тока.

Тахогенераторы переменного тока бывают

- синхронные и
- асинхронные.

### ***Требования, предъявляемые к тахогенераторам***

Тахогенераторы являются измерительными устройствами. Поэтому они должны удовлетворять следующим требованиям:

- линейность статической характеристики, отражающей зависимость напряжения на обмотке тахогенератора от скорости вращения его вала в установившемся режиме;
- достаточно большая крутизна статической характеристики;
- минимальное остаточное напряжение при нулевой скорости у тахогенераторов переменного тока;
- минимальная зона нечувствительности у тахогенераторов постоянного тока;
- минимальная фазовая погрешность для тахогенераторов переменного тока;
- малый момент инерции ротора;
- малый момент трения;
- минимальные объём и масса тахогенератора.

## **6.2 Тахогенераторы постоянного тока**

Тахогенераторы постоянного тока (рисунок 6.2) представляют собой маломощные генераторы. Они, как и двигатели постоянного тока, состоят из статора и ротора. На статоре находится система возбуждения, а на роторе – якорная обмотка, в которой при вращении вала возникает ЭДС. Для съёма напряжения тахогенератора постоянного тока используется коллекторно-щёточный узел.



Рисунок 6.2. Тахогенератор постоянного тока ТПП-1

Создание магнитного потока возбуждения в таких тахогенераторах осуществляется с помощью обмотки возбуждения или постоянных магнитов, находящихся на статоре. Вариант тахогенератора с постоянными магнитами обладает более стабильными характеристиками и поэтому является наиболее распространённым.

Информацию о скорости вращения ротора содержит напряжение, образующееся на выходных контактах тахогенератора, к которым подключается нагрузочный резистор. Схема подключения показана на рисунке 6.3.

Падение напряжения  $U_{ТГ}$ , возникающее на нагрузочном резисторе в установившемся режиме работы, определяется уравнением

$$U_{ТГ} = R_H i_{Я},$$

где  $i_{Я}$  – ток, протекающий в обмотке тахогенератора;  $R_H$  – активное сопротивление нагрузки.



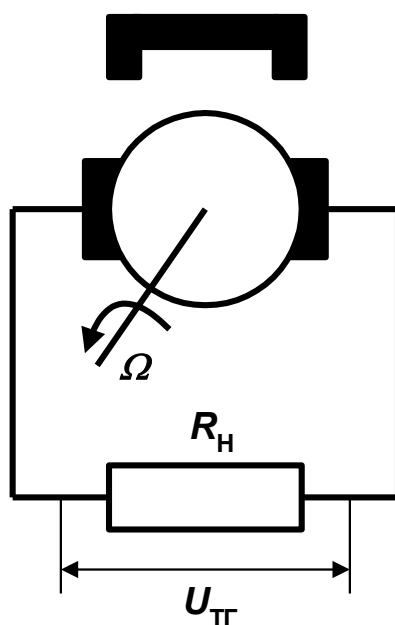


Рисунок 6.3. Схема подключения тахогенератора к нагрузочному резистору

С учётом ЭДС это напряжение определяется в соответствии уравнением

$$U_{ТГ} = \frac{R_H}{R_H + R_{Я}} (E_{Я} - \Delta U),$$

где  $E_{Я}$  – ЭДС в якорной обмотке;  $R_{Я}$  – активное сопротивление якоря;  $\Delta U$  – падение напряжения на щётках.

При постоянном магнитном потоке возбуждения ЭДС, возникающая в якорной обмотке тахогенератора, прямо пропорциональна угловой скорости  $\Omega$  вращения его ротора. При таком предположении можно принять

$$E_{Я} = c_E \Phi \Omega = k_{ТГ} \Omega,$$

где  $c_E$  – конструктивный коэффициент тахогенератора;  $k_{ТГ} = c_E \Phi$  – крутизна тахогенератора. Следовательно, при беско-

нечно большом сопротивлении нагрузки, что обеспечивает нулевой ток якоря,

$$U_{\text{ТГ}} = k_{\text{ТГ}}\Omega - \Delta U.$$

Особенность коллекторно-щёточного узла состоит в том, что при малом значении ЭДС тахогенератора сопротивление щёток столь велико, что падение напряжения на щётках  $\Delta U$  практически равно этой ЭДС. Это приводит к образованию зоны нечувствительности в статической характеристике тахогенератора постоянного тока, которая поэтому является нелинейной (рисунок 6.4).

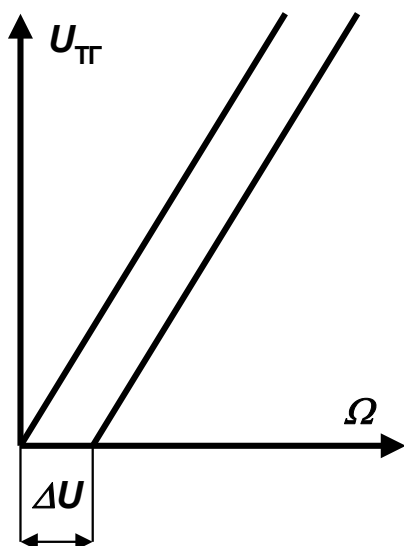


Рисунок 6.4. Статические характеристики тахогенератора постоянного тока

На рисунке 6.4 показаны идеальная характеристика (при отсутствии падения напряжения на щётках), которая начинается при нулевом значении скорости, и реальная характеристика тахогенератора с учётом зоны нечувствительности.

Наличие зоны нечувствительности является недостатком тахогенератора постоянного тока. Она может быть уменьшена при соответствующем выборе материала щёток. В прецизионных тахогенераторах вместо графитовых щёток используются серебряно-графитовые щётки или щётки с серебряным покрытием.

Другая причина нелинейности характеристики тахогенератора постоянного тока обусловлена действием реакции якоря. Магнитный поток возбуждения не остаётся постоянным, поскольку при протекании тока по якорной обмотке он также создаёт магнитное поле, влияющее на результирующий магнитный поток. Ток якоря образует магнитодвижущую силу, которую называют реакцией якоря. Это влечёт за собой уменьшение результирующего магнитного потока на величину

$$\Phi_P = c_P i_Y,$$

где  $c_P$  — коэффициент влияния тока на магнитный поток реакции якоря. Поэтому

$$E_Y = c_E (\Phi_0 - c_P i_Y) \Omega.$$

В установившемся режиме работы выходное напряжение тахогенератора постоянного тока определяется уравнением

$$U_{TG} = \frac{k_{TG} \Omega - \Delta U}{1 + \frac{c_E c_P \Omega + R_Y}{R_H}} = \frac{R_H}{R_H + R_Y + c_E c_P \Omega} (k_{TG} \Omega - \Delta U).$$

Это уравнение показывает, что снимаемое с тахогенератора напряжение  $U_{TG}$  — это нелинейная функция угловой скорости вращения вала тахогенератора и активного сопротивления нагрузки. Вид статической характеристики тахогенератора постоянного тока при различных значениях сопротивления показан

на рисунке 6.5. Характеристики построены при  $R_{H1} \rightarrow \infty$  и  $R_{H3} < R_{H2}$ . На рисунке 6.5 пунктиром изображена также идеальная характеристика.

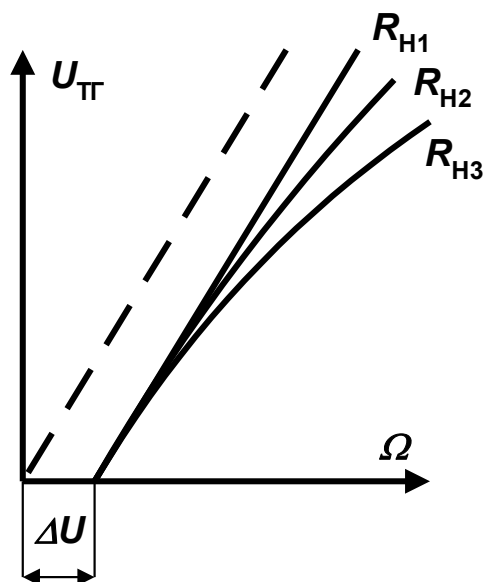


Рисунок 6.5. Статические характеристики тахогенератора постоянного тока при различных значениях сопротивления нагрузки.

Линейность характеристики тахогенератора возрастает при увеличении сопротивления нагрузки. В пределе, при его стремлении к бесконечности, характеристика становится линейной. Поэтому рекомендуется использовать тахогенератор при достаточно большом сопротивлении нагрузки.

Ещё одна причина, снижающая точность измерения скорости, состоит в том, что выходное напряжение тахогенератора содержит пульсации. Они обусловлены коммутацией на коллекторе, имеющем ограниченное количество ламелей. Эти пульсации вызывают также появление высокочастотных помех. Для улучшения качества сигнала тахогенератора стремятся увеличить количество коллекторных пластин.

Достоинствами тахогенераторов постоянного тока являются их небольшие размеры и масса, значительная мощность выходного сигнала, отсутствие фазовой погрешности, работа без источника электрической энергии (при магнитах на статоре).

Недостатки таких тахогенераторов обусловлены сложностью конструкции, высокой стоимостью, нелинейностью выходной характеристики из-за наличия коллекторно-щёточного узла и реакции якоря, пульсациями выходного напряжения и возникающими в результате этого радиопомехами, а также необходимостью периодической очистки коллектора и замены щёток.

### 6.3 Асинхронные тахогенераторы

Асинхронный тахогенератор представляет собой бесконтактную электрическую машину переменного тока малой мощности, предназначенную для измерения угловой скорости вращения её вала [2]. Такой тахогенератор является аналоговым, имеет ротор и статор. Вал асинхронного тахогенератора соединяется с валом двигателя или иного вращающегося механического объекта, угловую скорость которого необходимо измерить.

На статоре находятся две обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве на угол  $90^\circ$  (рисунок 6.6). Одна обмотка выполняет функцию обмотки возбуждения. Она подключена к источнику переменного тока и получает от него напряжение возбуждения  $U_B$ . Частота, с которой меняется напряжение  $U_B$ , обычно составляет 50 или 400 Гц. Вторая обмотка называется генераторной и служит для получения выходного сигнала  $U_G$ , несущего информацию о скорости вращения вала асинхронного тахогенератора.



Рисунок 6.6. Схема асинхронного тахогенератора

Ротор асинхронного тахогенератора является электропроводящим, немагнитным и полым. Он аналогичен ротору двухфазного асинхронного двигателя. При рассмотрении пары обмотка возбуждения – ротор можно заметить, что ротор выступает в роли вторичной обмотки трансформатора. Под действием переменного магнитного поля, вызванного изменяющимся во времени током в обмотке возбуждения, в роторе индуцируется ЭДС. Под влиянием этой ЭДС в роторе возникают токи, которые создают продольный магнитный поток [2]. Он ослабляет магнитный поток возбуждения.

Ось генераторной обмотки перпендикулярна оси обмотки возбуждения. Поэтому при неподвижном роторе ЭДС в генераторной обмотке практически отсутствует. При вращении ротора в магнитном поле, создаваемом обмоткой возбуждения, в нём возникает ещё одна ЭДС, которая называется ЭДС вращения. Амплитуда этой ЭДС пропорциональна угловой скорости вращения ротора.

Ротор имеет большое электрическое сопротивление. Поэтому токи, протекающие в роторе, невелики и практически совпадают по фазе с ЭДС вращения. Эти токи создают пульсирующий

магнитный поток, который, в свою очередь, наводит ЭДС в генераторной обмотке асинхронного тахогенератора [2]. Частота, с которой изменяется ЭДС, совпадает с частотой напряжения на обмотке возбуждения. Амплитуду ЭДС можно считать почти пропорциональной угловой скорости ротора. Поэтому статическую характеристику асинхронного тахогенератора можно было бы считать линейной. Но всё-таки реальная характеристика такого тахогенератора обладает некоторой нелинейностью.

Одной из причин нелинейности характеристики асинхронного тахогенератора является размагничивающее действие генераторной обмотки. При подключении этой обмотки к нагрузке в ней протекает ток, зависящий от активного и индуктивного сопротивлений электрической цепи. В результате происходит отклонение поперечного магнитного потока от оси генераторной обмотки. Кроме того, происходит изменение потока возбуждения в результате действия продольной составляющей магнитного потока ротора. Ошибку измерения скорости вызывает дополнительная (мешающая) составляющая ЭДС, возникающая в обмотке возбуждения, которая пропорциональна квадрату угловой скорости. Для уменьшения амплитудной погрешности асинхронного тахогенератора целесообразно снижать частоту вращения его вала. В [2] рекомендуется выбирать её максимальное значение не более 60% от частоты напряжения обмотки возбуждения.

Точность измерения скорости возрастает при увеличении сопротивления ротора. Это достигается использованием для изготовления ротора материалов с высоким удельным сопротивлением, например, фосфористой или марганцовистой бронзы.

Одной из характерных погрешностей асинхронного тахогенератора является остаточная ЭДС. Она обнаруживается при неподвижном роторе и обусловлена взаимной индуктивностью обмоток статора. Причины, вызывающие появление остаточной

ЭДС в основном носят технологический характер и устраняются в результате совершенствования конструкции тахогенератора и процессов его изготовления.

Интересной особенностью асинхронного тахогенератора является его способность давать *оценку углового ускорения*. Для этого обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока. При вращении ротора с постоянной скоростью, т.е. при отсутствии ускорения, в роторе индуцируется постоянная ЭДС. Поэтому в генераторной обмотке ЭДС не возникает. Если же предположить, что скорость изменяется по линейному закону, то ток в роторе также будет меняться по тому же закону. Это приведёт к соответствующему изменению магнитного потока, действующего вдоль оси генераторной обмотки, и возникновению в ней ЭДС, пропорциональной ускорению.

Главные преимущества асинхронных тахогенераторов по сравнению с тахогенераторами постоянного тока – это высокая долговечность и надёжность, обусловленные отсутствием трущихся частей, а также малый момент инерции ротора. Поэтому такой тахогенератор, присоединённый к двигателю, несущественно увеличивает суммарный момент инерции подвижных частей привода. Это важно при создании быстродействующих приводов. Кроме того, в некоторых случаях асинхронный тахогенератор можно использовать как датчик углового ускорения.

Недостатками асинхронных тахогенераторов являются остаточная ЭДС при неподвижном роторе; существенные погрешности, зависящие сложным образом от ряда факторов; размеры и масса, превышающие размеры и массу тахогенераторов постоянного тока.



## 6.4 Синхронный тахогенератор

Синхронный тахогенератор состоит из статора и ротора, представляет собой электрическую микромашину с магнитоэлектрическим возбуждением и является аналоговым датчиком скорости. На роторе расположены постоянные магниты, а на статоре – одна или несколько обмоток (рисунок 6.7). При наличии одной обмотки тахогенератор называется однофазным, а если их несколько, то многофазным.

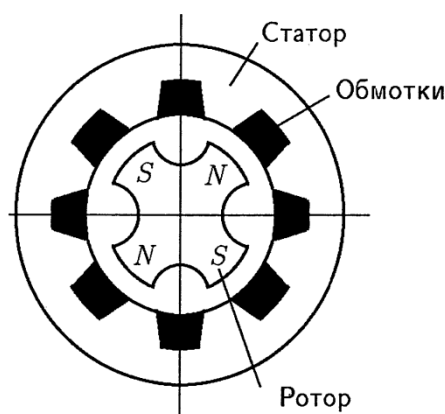


Рисунок 6.7. Схема синхронного тахогенератора

Магнитные силовые линии изменяющегося магнитного поля, возникающего при вращении ротора, пересекают витки статорной обмотки, и в ней наводится ЭДС. Эта ЭДС и содержит информацию об угловой скорости вращения ротора.

При вращении ротора изменяются и амплитуда, и частота выходного сигнала  $U_{BIX}$ . В этом состоит особенность синхронного тахогенератора. Важное преимущество синхронного тахогенератора состоит в том, что частота изменения выходного сигнала пропорциональна угловой скорости вращения ротора и не зависит от температуры обмоток и магнитного потока, создаваемого магнитами на роторе. Поэтому именно частота использует-

ся чаще всего как носитель информации о скорости. Вычисление скорости осуществляет контроллер устройства управления, который с помощью имеющихся у него счётчика и таймера подсчитывает количество импульсов за определённый промежуток времени. Получающееся число даёт информацию об угловой скорости.

Для улучшения динамических свойств систем, в которых применяется тахогенератор, необходимо измерять скорость за возможно меньшее время. Тогда система успевает быстрее реагировать на изменение скорости движения. Поэтому используют синхронные тахогенераторы с большим числом пар магнитных полюсов на роторе. Это приводит к тому, что повышается частота изменения выходного сигнала и поэтому требуется меньше времени для вычисления скорости. Конфигурацию синхронный тахогенератор - контроллер можно рассматривать как аналого-цифровой датчик скорости.

В случае применения однофазного синхронного тахогенератора существует проблема определения знака скорости. Для её решения необходимы дополнительные устройства и алгоритмы, которые могут сообщить устройству обработки сигналов тахогенератора сведения о направлении вращения ротора.

Амплитуда выходного сигнала тахогенератора также увеличивается с ростом частоты вращения. Однако изменение амплитуды происходит не пропорционально изменению частоты вращения. Это вызвано тем, что электрическая цепь содержит индуктивность. Поэтому метод определения скорости вращения на основании амплитуды выходного напряжения обладает меньшей точностью, чем описанный выше частотный метод. Тем не менее, иногда синхронный тахогенератор может использоваться совместно с выпрямителем и фильтром нижних частот. Тогда информацию о скорости даёт амплитуда выходного сигнала дат-

чика. Но при этом необходимо ввести в систему обработки сигналов тахогенератора динамические звенья, способные скорректировать зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты вращения. Такой вариант целесообразно использовать в том случае, если применяется тахогенератор, обладающий большим количеством пар полюсов и поэтому выдающий сигнал, изменяющийся с высокой частотой.

Преимущество синхронных тахогенераторов состоит в простоте их конструкции, долговечности и надёжности, а также в отсутствии необходимости проводить регламентные работы, т.к. в них нет коллекторно-щёточного узла.

Недостатками синхронных генераторов являются зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты вращения и невозможность определения направления вращения непосредственно по сигналу однофазного тахогенератора. Иногда недостатком считают и зависимость частоты выходного сигнала от скорости вращения. Но при наличии цифрового контроллера это скорее преимущество синхронного тахогенератора, легко позволяющее получить выходной цифровой сигнал, который можно использовать в системах компьютерного управления.

## **6.5 Использование датчика Холла в качестве датчика частоты вращения**

Для измерения частоты вращения ротора двигателя или иного вращающегося механического объекта на нём могут быть установлены постоянные магниты, а на статоре – датчик Холла (рисунок 6.8). При вращении ротора с магнитами датчик Холла оказывается в магнитном поле, индукция которого увеличивается и уменьшается с частотой, пропорциональной частоте вращения ротора.

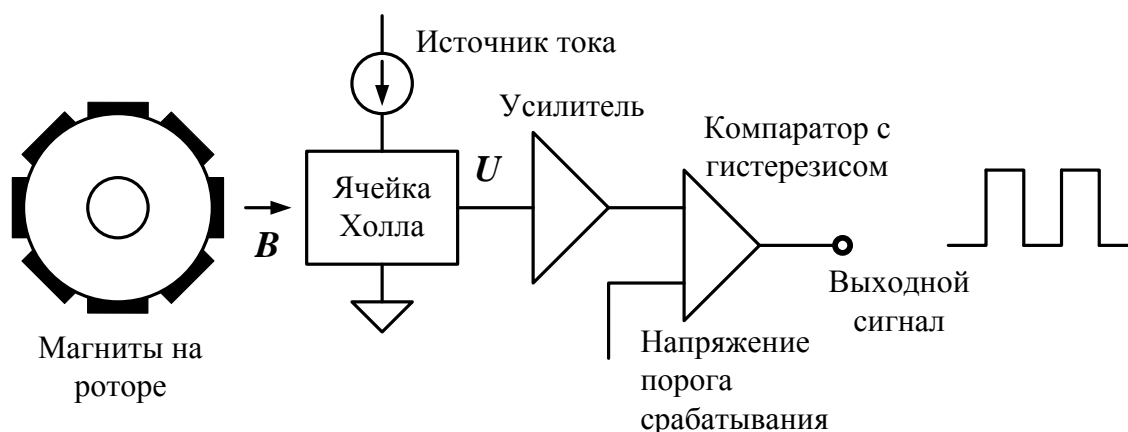


Рисунок 6.8. Схема устройства для определения частоты вращения с применением датчика Холла

Если магнит находится напротив ячейки Холла, то индукция магнитного поля  $B$  достаточна для образования сигнала  $U$ , который после усиления приводит к образованию напряжения высокого уровня на выходе компаратора. Если же напротив ячейки Холла нет магнита, то индукция магнитного поля такова, что на выходе компаратора образуется напряжение низкого уровня. Компаратор имеет гистерезис. Поэтому на его выходе могут быть напряжения либо низкого, либо высокого уровня. Промежуточные значения невозможны. В результате при вращении ротора на выходе компаратора формируется последовательность прямоугольных импульсов (рисунок 6.8).

О частоте вращения ротора можно судить по количеству импульсов на выходе компаратора за заданный промежуток времени, например, за 10 мс. Для подсчёта импульсов используется счётчик и таймер. При запуске таймера счётчик сбрасывается и начинает подсчитывать количество импульсов. По истечении заданного промежутка времени фиксируется определённое счётчиком число импульсов и запоминается в цифровом регистре. Из этого регистра данные о скорости могут быть переданы в устройство управления.

## 6.6 Оценка скорости вращения вала двигателя по данным цифрового датчика положения

В большинстве современных промышленных цифровых приводов тахогенераторы не применяются, и информация об угловой скорости вращения вала двигателя формируется в контроллере на основании данных, поступающих от цифрового датчика положения. Контроллер играет роль вычислителя скорости.

Пример подключения цифрового датчика положения к вычислителю скорости показан на рисунке 6.9. В качестве цифрового датчика положения выступает пара устройств: энкодер и квадратурный счётчик.

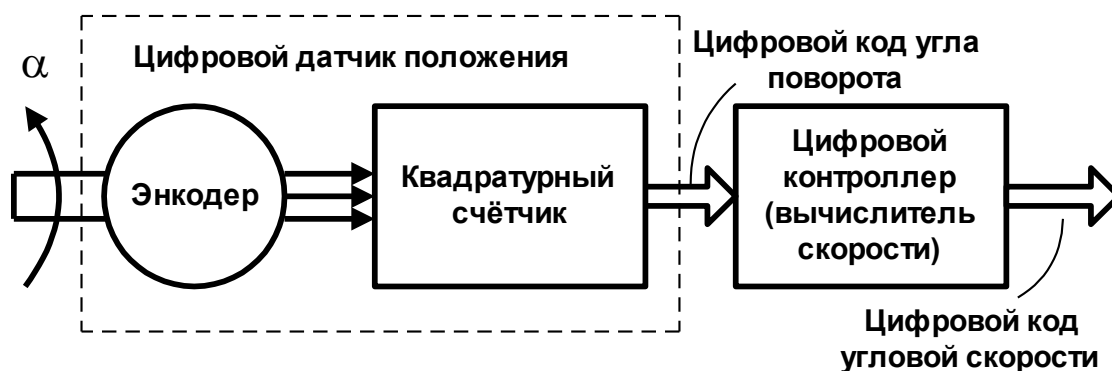


Рисунок 6.9. Схема получения информации об угловой скорости по данным датчика положения

Датчик положения формирует цифровой код угла поворота вала двигателя, который преобразуется контроллером в цифровой код угловой скорости. При этом выполняется численное дифференцирование данных, получаемых от цифрового датчика положения. Вычисления угловой скорости производятся не непрерывно, а дискретно во времени, т.е. с периодом, равным  $T_C$ .

Информацию о скорости вращения вала двигателя  $\Omega$  содержит приращение  $\Delta\alpha$  угла поворота этого вала  $\alpha$ , происходящее за заданный промежуток времени, например,  $T_C$ . Между приращением угла  $\Delta\alpha$  и скоростью существует очевидная связь

$$\Delta\alpha = \int_0^{T_C} \Omega(t) dt = T_C \Omega_T,$$

где  $\Omega_T$  – *оценка среднего значения скорости на интервале времени, равном  $T_C$* . Поэтому величину  $\Omega_T$  можно вычислять в контроллере привода по формуле

$$\Omega_T = \frac{\Delta\alpha}{T_C} = \frac{\alpha(T_C n) - \alpha[T_C(n-1)]}{T_C},$$

где  $\alpha(T_C n)$  – угол поворота вала двигателя в текущий дискретный  $n$ -й момент времени  $t = T_C n$ ;  $\alpha[T_C(n-1)]$  – угол поворота вала двигателя в предыдущий  $(n-1)$ -й момент времени  $t = T_C(n-1)$ . Величина  $n$  имеет смысл номера тактового момента времени и принимает только целые значения, например,  $0, 1, 2, \dots$ . Оценка  $\Omega_T$  имеет отношение к текущему дискретному моменту времени  $t = T_C n$ . Поэтому её правильнее обозначать так:  $\Omega_T(nT_C)$ .

Можно заметить, что речь идёт о вычислении оценки скорости  $\Omega_T(nT_C)$  путём **численного дифференцирования данных**, получаемых от цифрового датчика положения.

В ряде случаев, например, при формировании отрицательной обратной связи по скорости в следящих приводах нет необходимости в вычислении значения скорости вращения вала двигателя. Достаточно бывает определить величину, пропорцио-

нальную оценку скорости. Это позволяет упростить алгоритм и уменьшить объём вычислений, необходимых для формирования сигнала обратной связи [10].

Учтём, что

$$\Omega_T(nT_C) = \{\alpha(nT_C) - \alpha[(n-1)T_C]\}T_C^{-1}.$$

В контроллере вычисляется не оценка скорости  $\Omega_T(nT_C)$ , а величина  $U_{OCC}(nT_C)$ , характеризующая обратную связь по скорости и пропорциональная оценке скорости:

$$U_{OCC}(nT_C) = \Omega_T(nT_C)T_C k_{ДП} = k_{ДП}\{\alpha(nT_C) - \alpha[(n-1)T_C]\},$$

где  $k_{ДП}$  – коэффициент передачи цифрового датчика положения.

В текущий дискретный  $n$ -й момент времени датчик положения выдаёт число

$$U_{ДП}(nT_C) = k_{ДП}\alpha(nT_C),$$

соответствующее положению вала двигателя. Кроме того, имеется запомненное число

$$U_{ДП}[T_C(n-1)] = k_{ДП}\alpha[T_C(n-1)],$$

соответствующее положению вала в предыдущий  $(n-1)$ -й момент времени. Тогда вычисление величины  $U_{OCC}(nT_C)$ , несущей информацию о скорости вала двигателя, можно производить по формуле

$$U_{OCC}(nT_C) = U_{ДП}(nT_C) - U_{ДП}[T_C(n-1)].$$

Видно, что величина  $U_{OCC}(nT_C)$  пропорциональна скорости вращения вала двигателя и может непосредственно использоваться для создания отрицательной обратной связи по скорости в следящем приводе.

В этом можно убедиться, рассмотрев пример. Пусть  $k_{ДП} = 1000$  единиц/рад и  $T_C = 1$  мс. При значениях скорости 1 рад/с, 10 рад/с и 100 рад/с значения приращения угла поворота вала двигателя равны 0,001 рад, 0,01 рад и 0,1 рад соответственно, а величина  $U_{ОСС}(nT_C)$  имеет значения 1, 10 и 100 единиц соответственно. В данном примере формируемое контроллером привода число  $U_{ОСС}(nT_C)$ , измеряемое в безразмерных единицах, численно равно угловой скорости вращения вала двигателя, измеряемой в рад/с.

Значение коэффициента отрицательной обратной связи по скорости  $k_{ОСС}$ , соответствующее уравнению

$$U_{ОСС}(nT_C) = k_{ОСС} \Omega_T(nT_C),$$

можно вычислить по формуле

$$k_{ОСС} = k_{ДП} T_C,$$

зная период дискретизации по времени  $T_C$  и коэффициент передачи  $k_{ДП}$  цифрового датчика положения.

Следует отметить, что такой же подход используется и для получения информации о линейной скорости движения механических объектов. При этом применяются цифровые датчики линейных перемещений, например, оптико-электронные растровые преобразователи линейных перемещений в паре с квадратурными счётчиками.



## ГЛАВА 7

### КОНТАКТНЫЕ И БЕСКОНТАКТНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ ДАТЧИКИ

#### 7.1 Контактные дискретные датчики

Контактные дискретные датчики используются, прежде всего, в качестве *конечных выключателей*. Они формируют на выходе дискретный электрический сигнал, свидетельствующий о том, что перемещающийся механический объект управления достиг положения, в котором установлен датчик. Это может означать, что объект управления вышел за пределы допустимых перемещений в результате отказа устройства управления и необходимо его остановить для предотвращения аварийной ситуации. Контактные дискретные датчики могут использоваться также для реферирования инкрементных датчиков.

Устройство и принцип действия контактного дискретного датчика поясняет рисунок 7.1.

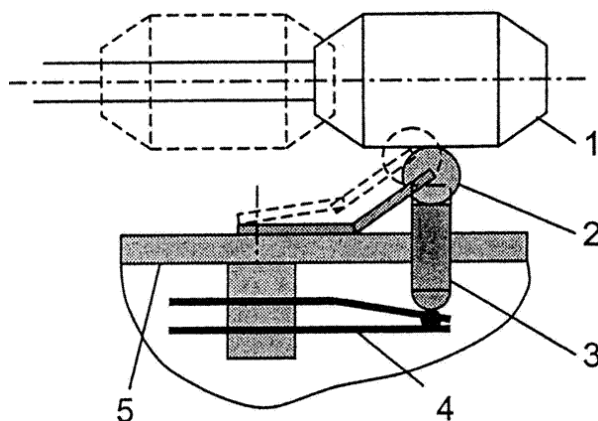


Рисунок 7.1. Устройство контактного дискретного датчика

Контактный дискретный датчик состоит из пары контактов 4, закреплённых на основании датчика 5, плунжера 3 и рычага с шарнирно установленным на нём роликом 2. Контакты могут быть нормально разомкнутыми или нормально замкнутыми. В ряде датчиков присутствуют одновременно и разомкнутые, и замкнутые контакты.

Когда контролируемый механический объект 1 при своём движении нажимает на ролик 2, это приводит к перемещению плунжера 3 и замыканию контактов. Контакты включены в электрическую цепь, по которой начинает протекать электрический ток. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки содержит информацию о замыкании контактов, а следовательно, о том, что объект управления достиг положения, в котором установлен контактный датчик. Нагрузкой может быть обмотка реле, катушка исполнительного устройства, например, электропневматического распределителя или вход контроллера.

Часто важен факт замыкания или размыкания контактов, поэтому воздействия на датчик и его реакции можно описывать логическими переменными. Более подробно работа контактного датчика представлена на рисунке 7.2. Отсутствие механического воздействия на рычаг с роликом будем характеризовать логической переменной  $U = 0$ . При этом нормально замкнутые контакты остаются замкнутыми, и через нагрузочный резистор протекает электрический ток. Это даёт информацию о том, что контролируемый объект управления находится вне зоны установки датчика. Реакцию датчика в цепи нормально замкнутых контактов можно охарактеризовать логической переменной  $R = 1$ .

Одновременно с этим имеется и другая реакция датчика, которая наблюдается в цепи с нормально разомкнутыми контактами. Они остаются разомкнутыми, поэтому через них ток не течёт, и реакция характеризуется логической переменной  $R = 0$ .

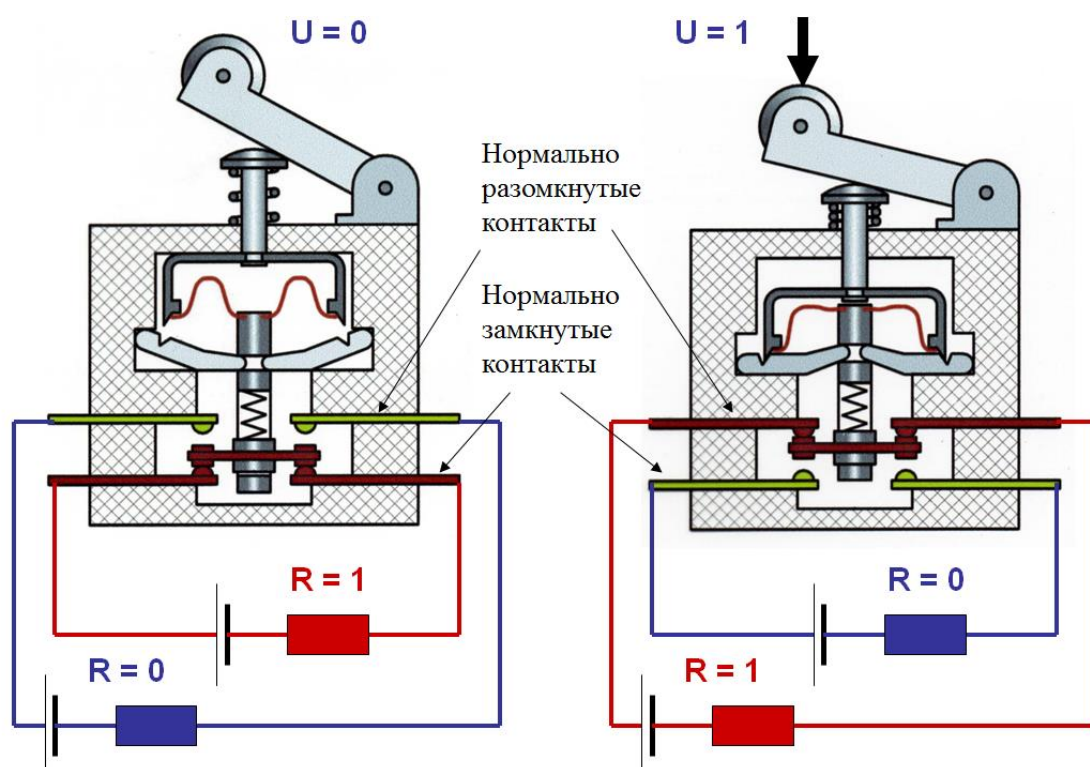


Рисунок 7.2. Пояснение работы контактного датчика

Механическое воздействие  $U = 1$  на рычаг с роликом приводит к замыканию нормально разомкнутых контактов и одновременно вызывает размыкание нормально замкнутых контактов. При этом изменяются реакции датчика. В цепи нормально замкнутых контактов  $R = 0$ , а в цепи нормально разомкнутых контактов  $R = 1$ .

Дискретные контактные датчики имеют ряд важных преимуществ. К ним относятся

- простота конструкции и дешевизна датчиков,
- возможность одновременной коммутации нескольких цепей с нормально разомкнутыми и нормально замкнутыми парами контактов,
- коммутация нескольких гальванически не связанных цепей с различными источниками питания,

- отсутствие внутренних электронных устройств и необходимости применения источников энергии для питания датчика.

Но у контактных дискретных датчиков есть и недостатки:

- малый срок службы и низкая надёжность, обусловленные слабой защитой контактов от действия факторов окружающей среды и наличием перемещающихся механических элементов,
- контакты могут «залипать», «подгорать» и окисляться, а механические элементы могут сломаться, что приводит к выходу датчика из строя,
- дребезг контактов.

***Дребезг контактов*** — это явление, происходящее после первого момента замыкания контактов и состоящее в том, что в течение некоторого времени могут происходить многократные замыкания и размыкания контактов, обусловленные упругостью элементов контактной системы. Это ведёт к неоднозначности данных, снимаемых с датчика, и затрудняет корректную работу системы управления. Кроме того, дребезг контактов вызывает искрение между контактами и их повышенный износ.

## **7.2 Классификация бесконтактных датчиков перемещений и положения объектов управления**

Бесконтактные датчики перемещений предназначены для бесконтактного измерения перемещений рабочих органов машин, звеньев манипуляционных механизмов и других объектов управления. Результат измерения выдаётся в виде непрерывного или дискретного электрического сигнала. Наиболее распростра-

нёнными являются бесконтактные датчики, формирующие дискретные (релейные) выходные сигналы.

Бесконтактные датчики перемещений так же как и контактные датчики могут использоваться в качестве **конечных выключателей** или средств, используемых для реферирования инкрементных датчиков положения.

Основные типы бесконтактных датчиков перемещений

- герконовые,
- на эффекте Холла,
- индуктивные,
- ёмкостные,
- оптические,
- ультразвуковые.

### 7.3 Герконовые датчики

Так же, как и контактный датчик, герконовый датчик имеет электрические контакты. Но в отличие от контактного датчика контакты герконового датчика надёжно защищены от действия неблагоприятных факторов окружающей среды (рисунок 7.3).



Рисунок 7.3. Герконовый датчик

Такой датчик имеет в своём составе геркон (от слов «герметичные контакты»). Геркон содержит одну или несколько пар электрических ферромагнитных контактов, находящихся в герметично запаянной стеклянной колбе, заполненной инертным га-

зом. Контакты изготовлены из упругого электропроводящего материала, который одновременно с этим является и магнитопроводящим.

Существуют герконы с парой замыкающихся контактов, с парой размыкающихся контактов и переключающимися контактами. Чаще используются герконы, контакты которых нормально разомкнуты.

Если на геркон действует достаточно сильное магнитное поле, контакты притягиваются друг к другу, что ведёт к образованию надёжного электрического контакта. На рисунке 7.4 показан перемещающийся механический объект 1, на котором установлен постоянный магнит 2. В корпусе датчика 3 размещена заполненная инертным газом колба 4 с контактами герконового датчика.

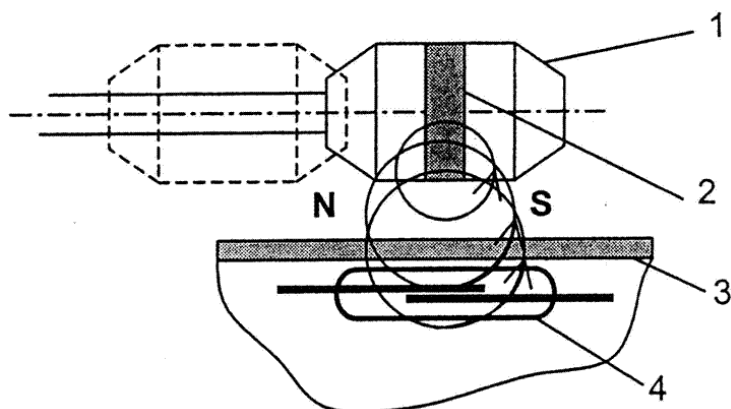


Рисунок 7.4. Пояснение работы герконового датчика

Как только объект 1 оказывается в зоне установки герконового датчика, контакты замыкаются под действием магнитного поля магнита 2. В этом случае в цепи, в которую включены эти контакты, протекает электрический ток. Он даёт информацию о том, что в зоне установки герконового датчика появилось магнитное поле, а значит, и контролируемый объект. При перемещении этого объекта в другое положение, когда магнитное поле

в зоне установки датчика практически исчезает, контакты геркона вновь размыкаются. Таким образом, при оснащении перемещающегося механического объекта постоянным магнитом можно контролировать наличие этого объекта вблизи места установки геркона.

Для удобства настройки системы герконовые датчики оснащаются сигнальным светодиодом, который загорается при срабатывании датчика. Символическое обозначение и подключение к нагрузке и источнику питания герконовых датчиков, которые бывают с двумя и тремя выводами, показаны на рисунке 7.5.

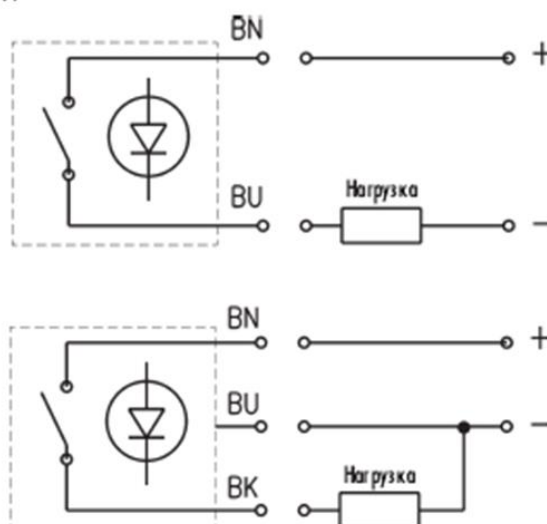


Рисунок 7.5. Варианты исполнения и схемы включения герконовых датчиков

Более качественными характеристиками обладает трёхвыводной датчик. В нём элементы, предназначенные для задействования светодиода, не попадают к цепь, включающую контакты геркона и нагрузочный резистор.

Нужно иметь в виду, что любой бесконтактный датчик, в том числе и герконовый датчик, не обладает высокой точностью. Он имеет относительно протяжённую зону срабатывания, в ко-

торой его сигнал активен и воспринимается как наличие объекта вблизи датчика. Эта зона соответствует некоторой области перемещений объекта относительно датчика, размер которой может составлять, например, от 5 до 20 мм.

Поскольку геркон имеет механические контакты, то возможен дребезг контактов. Для снижения негативного влияния этого явления на систему управления применяют контактные пары, смоченные ртутью. В этом случае при вибрации контактов между ними образуются перемычки из жидкой ртути и электрическая цепь не разрывается.

В некоторых случаях выходной сигнал герконового датчика подвергают предварительному преобразованию в электронном устройстве, содержащем последовательно соединённые фильтр нижних частот и триггер Шмитта, обладающий петлёй гистерезиса. Преобразованный таким образом сигнал можно подавать на вход цифрового контроллера. Программное обеспечение контроллера также даёт возможность преодолеть негативное влияние дребезга контактов. Для этого в программе задаётся некоторое время задержки. После того, как обнаружено первое замыкание контактов, все их последующие замыкания и размыкания игнорируются на промежутке времени, несколько превышающем длительность процесса дребезга.

К преимуществам герконовых датчиков относятся

- простота конструкции и относительная дешевизна датчика,
- высокая защищённость контактов датчика,
- большой срок службы, достигающий 10 миллионов срабатываний,
- высокая надёжность,
- возможность работы на постоянном и переменном токе,
- широкий диапазон рабочих температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ,



- отсутствие внутренних электронных устройств и необходимости применения источников энергии для питания датчика.

Недостатком герконовых датчиков является наличие механических контактов, которое ограничивает быстродействие датчика, срок его службы и может приводить к дребезгу контактов.

#### 7.4 Датчики приближения на эффекте Холла

Датчики Холла способны реагировать на изменение индукции магнитного поля. Поэтому при приближении к датчику постоянного магнита, установленного на движущемся механическом объекте управления, дискретный датчик Холла срабатывает, и на его выходе появляется сигнал высокого уровня.

На рисунке 7.6 показана структура дискретного датчика Холла. Напряжение, снимаемое с ячейки Холла, усиливается и поступает на вход компаратора. На второй его вход подаётся пороговое напряжение.

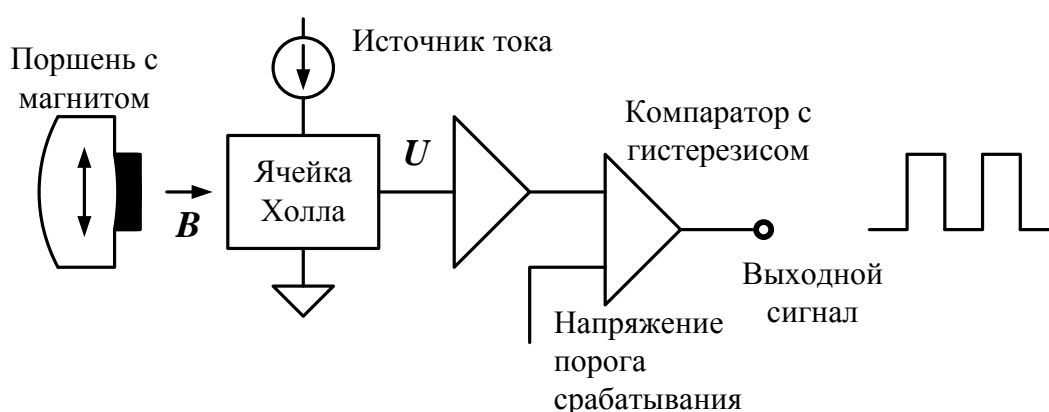


Рисунок 7.6. Структура дискретного датчика Холла

Компаратор представляет собой элемент сравнения входных сигналов и обладает значительным коэффициентом усиления разности этих сигналов. Поэтому, если выходное напряжение усилителя сигнала ячейки Холла больше порогового напряжения, то на выходе компаратора образуется напряжение высокого уровня. В противном случае выходное напряжение имеет низкий уровень. Для устранения влияния «дрожания» сигнала ячейки Холла на выходной сигнал датчика характеристика компаратора имеет гистерезис.

Датчики Холла дискретного действия широко применяются в робототехнике, мехатронике, при создании разнообразных приводов. Например, такой датчик Холла может использоваться для определения положения магнитов на роторе бесконтактного двигателя постоянного тока относительно статора или для выявления того факта, что поршень пневматического цилиндра находится в определённом месте в пределах рабочего хода. Для этого на поршень одевается специальное магнитное кольцо. Датчик выполняется в таком виде, чтобы его можно было установить в специальной продольной канавке на наружной поверхности цилиндра. Примером таких датчиков являются датчики Холла компании Камоцци (Camozzi) [17], показанные на рисунке 7.7.



Рисунок 7.7. Датчики приближения на эффекте Холла компании Камоцци

Датчики Холла оснащаются светодиодом, который загорается при срабатывании датчика, и всегда имеют три вывода. Два из них служат для подачи напряжения питания, а к третьему выводу и общему проводу подключается сопротивление нагрузки.

Так же, как и герконовый датчик, датчик Холла обладает определённой зоной срабатывания, составляющей несколько миллиметров.

К преимуществам дискретных датчиков Холла относятся

- компактность и относительная дешевизна датчика,
- отсутствие механических контактов,
- высокое быстродействие (время срабатывания порядка 1 мс),
- большой срок службы, достигающий 1 миллиарда срабатываний,
- высокая надёжность,
- широкий диапазон рабочих температур от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ,
- высокая степень защиты от действия внешних факторов IP67.

Недостатками дискретных датчиков Холла являются

- необходимость применения источника энергии для питания датчика,
- работа только на постоянном токе,
- чувствительность к магнитным полям, создаваемым посторонними объектами.

## 7.5 Индуктивные датчики приближения

Индуктивные датчики приближения являются дискретными электрическими датчиками, реагируют на наличие металла в зоне срабатывания и служат для бесконтактного измерения пе-

ремещений механических объектов управления. Индуктивные датчики могут иметь и другие названия, например, датчик приближения, датчик присутствия, индуктивный выключатель, бесконтактный датчик, бесконтактный выключатель, proximity sensor. Пример индуктивного датчика приближения показан на рисунке 7.8.



Рисунок 7.8. Пример индуктивного датчика приближения

Для работы датчика на него должно быть подано напряжение питания от источника постоянного тока. Принцип действия индуктивного датчика приближения основан на изменении индуктивности катушки, входящей в состав датчика, при приближении к датчику металлического предмета.

Схема, поясняющая работу датчика, показана на рисунке 7.9. В электрический контур входят внутренний электрический генератор высокочастотных колебаний, резистор, имеющий сопротивление  $R$ , и катушка, обладающая индуктивностью  $L$ . С катушки снимается напряжение, которое усиливается и поступает на вход компаратора, имеющего характеристику с небольшой петлёй гистерезиса для повышения помехоустойчивости. На второй вход компаратора подаётся опорное напряжение. На выходе компаратора может быть сигнал либо высокого, либо низкого уровня.

Индуктивность катушки зависит от наличия вблизи датчика металлического предмета. При его отсутствии или значительной

удалённости от датчика индуктивность относительно невелика. Поэтому напряжение, снимаемое с катушки мало. На выходе компаратора формируется напряжение низкого уровня. Его можно рассматривать как сигнал отсутствия металлического предмета в зоне установки датчика.

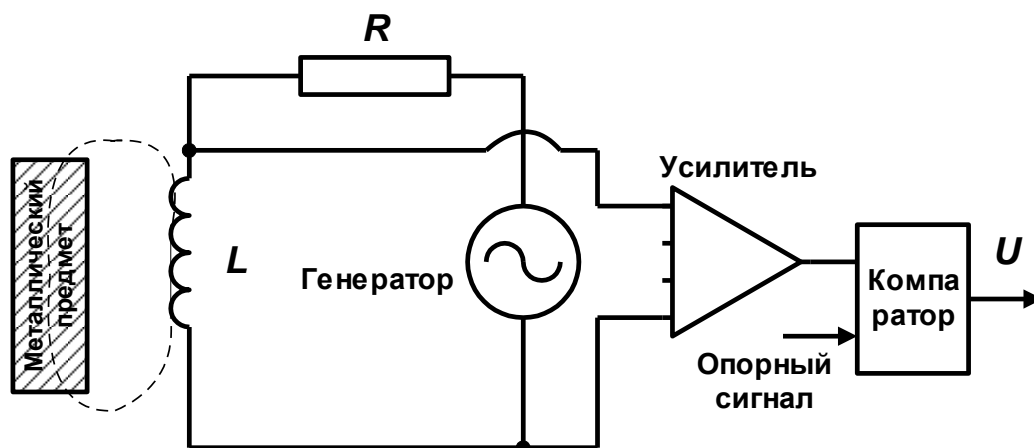


Рисунок 7.9. Схема работы индуктивного датчика

При приближении металлического предмета к датчику всё большая часть магнитного поля замыкается через этот предмет. Это вызывает увеличение индуктивности катушки, что приводит к росту снимаемого с неё напряжения. В этом можно убедиться, рассматривая амплитудно-частотную характеристику датчика  $|W(j\omega)|$ , зависящую от круговой частоты  $\omega$  колебаний, создаваемых генератором, и характеризующую отношение амплитуды напряжения на катушке к амплитуде напряжения генератора. Такая АЧХ определяется по формуле

$$|W(j\omega)| = \frac{\omega L}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}.$$

Видно, что при  $L\omega \ll R$  снимаемое с катушки напряжение растёт пропорционально индуктивности, но затем возникает насы-

щение и при  $L\omega \gg R$  можно считать, что это напряжение равно напряжению генератора. При определённом расстоянии между датчиком и металлическим предметом напряжение на выходе усилителя достигает уровня, при котором компаратор формирует на своём выходе напряжение высокого уровня.

Чаще всего индуктивный датчик имеет выходной транзисторный ключ. При срабатывании датчика происходит насыщение выходного транзистора этого ключа, и в цепи между его коллектором и эмиттером может протекать ток, обусловленный напряжением внешнего источника питания постоянного тока и сопротивлением нагрузки.

Выходной транзистор может иметь различную структуру (NPN или PNP). При использовании транзистора NPN сопротивление нагрузки подключается между коллектором этого транзистора и плюсовым выводом источника питания. В состав датчик обычно включаются защитный стабилитрон и диоды. Они предотвращают выход датчика из строя при ошибочной подаче напряжения противоположной полярности. Для удобства настройки системы управления с индуктивным датчиком и контроля его срабатывания датчик снабжается светодиодом.

В случае, если требуется включить нагрузку между выходом датчика и общим проводом, к которому присоединён минус источника питания, применяются индуктивные датчики, у которых выходной транзистор имеет структуру PNP. Тогда сопротивление нагрузки включается между коллектором выходного транзистора и общим проводом.

Более высокой чувствительностью обладает индуктивный датчик резонансного типа. Катушка и другие элементы датчика обладают не только индуктивностью, но и ёмкостью. Поэтому фактически в составе датчика присутствует параллельный коле-

бательный контур. Вид амплитудно-частотной характеристики индуктивного датчика показан на рисунке 7.10.

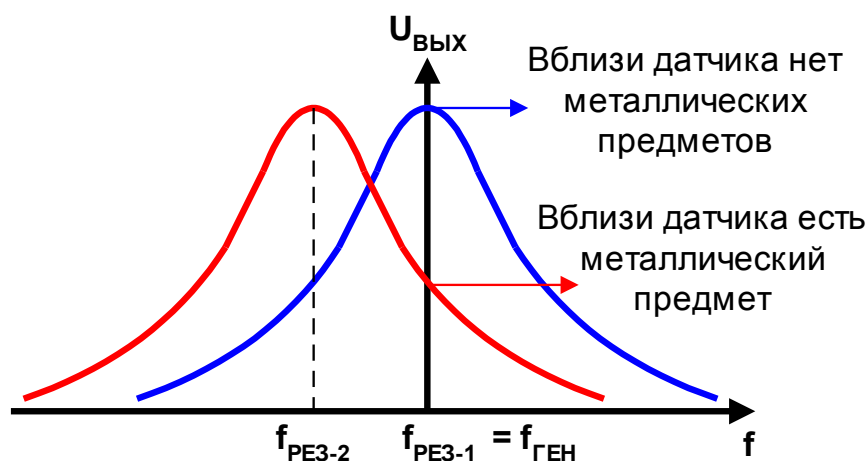


Рисунок 7.10. Амплитудно-частотные характеристики индуктивного датчика резонансного типа

Частота генератора  $f_{\text{ГЕН}}$ , составляющая несколько мегагерц, выбирается равной резонансной частоте  $f_{\text{PE3-1}}$  колебательного контура при отсутствии металлического предмета вблизи датчика. При этом с колебательного контура снимается переменное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  с наибольшей амплитудой. Оно подаётся на компаратор, обладающий гистерезисом, где сравнивается с опорным напряжением. Компаратор настроен таким образом, что на его выходе образуется сигнал низкого уровня, поэтому выходной транзисторный ключ разомкнут и через нагрузку ток не течёт.

При приближении металлического предмета к датчику возрастает индуктивность, что приводит к снижению резонансной частоты колебательного контура. Она становится равной  $f_{\text{PE3-2}}$ , но частота генератора  $f_{\text{ГЕН}}$  не изменяется. Поэтому уменьшается амплитуда напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ , снимаемого с колебательного контура. В результате этого компаратор формирует на своём выходе

напряжение высокого уровня. Транзисторный ключ переходит в режим насыщения. Выходная цепь замыкается и через нагрузку протекает ток. Это свидетельствует о наличии металла в непосредственной близости от датчика.

Различные индуктивные датчики имеют разное расстояние до металлического предмета (рабочий зазор), при котором происходит их надёжное срабатывание. Оно составляет от долей миллиметра до 20...30 мм. Наиболее часто встречающимися значениями рабочих зазоров являются 2, 3, 4, 8 мм.

Индуктивные датчики встречаются с цилиндрическим и прямоугольным корпусом, изготовленным из металла или пластика. Значения диаметра цилиндрического датчика лежат в диапазоне от 4 до 30 мм.

Основными преимуществами индуктивных датчиков приближения являются

- отсутствие подвижных механических элементов и механических контактов,
- отсутствие дребезга контактов и обусловленных этим ложных срабатываний,
- большое быстродействие и высокая частота переключений до 3 кГц,
- значительная устойчивость к механическим воздействиям,
- высокая надёжность и большой срок службы.

Вместе с тем, индуктивные датчики приближения имеют и некоторые недостатки, среди которых

- невозможность контролировать положение немаetalлических объектов,
- зависимость индуктивного сопротивления от частоты питающего напряжения,
- зависимость расстояния срабатывания от вида металла (сталь, медь, алюминий),



- воздействие, хотя и слабое, датчика на контролируемый металлический объект в результате взаимного притяжения объекта и датчика.

Несмотря на отмеченные недостатки, индуктивные датчики широко применяются в робототехнике и мехатронике, при построении различного рода систем автоматизации в промышленности.

### 7.6 Ёмкостные датчики приближения

Принцип действия ёмкостного датчика основан на зависимости электрической ёмкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними. Поэтому ёмкостный датчик срабатывает при попадании в его поле активности практически любого предмета, поскольку этот предмет способен изменить ёмкость конденсатора, образованного датчиком и этим предметом.

Конструктивное исполнение и принцип действия ёмкостного датчика похожи на исполнение и принцип работы индуктивного датчика (рисунок 7.11). В состав ёмкостного датчика резонансного типа, обладающего наиболее высокой чувствительностью, входит колебательный контур, образованный катушкой и конденсатором, генератор высокочастотных колебаний, преобразователь, компаратор и выходной релейный каскад на транзисторе. Частота сигнала генератора достигает десятков мегагерц.

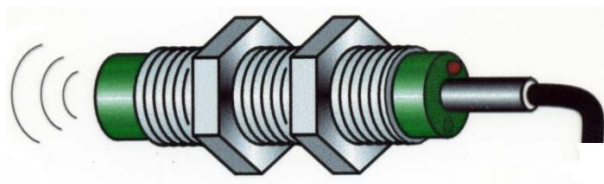


Рисунок 7.11. Конструктивное исполнение ёмкостного датчика

Особенность ёмкостного датчика состоит в том, что на выходной сигнал влияет изменение ёмкости колебательного контура, а не изменение его индуктивности, как это происходит в индуктивном датчике. Частота генератора  $f_{ГЕН}$  равна резонансной частоте  $f_{РЕЗ-1}$  колебательного контура при отсутствии предметов вблизи датчика, а значит, при наименьшей ёмкости колебательного контура. Вид АЧХ датчика показывает, что при этом амплитуда переменного напряжения  $U_{ВЫХ}$ , снимаемого с колебательного контура, имеет наибольшее значение (рисунок 7.12).

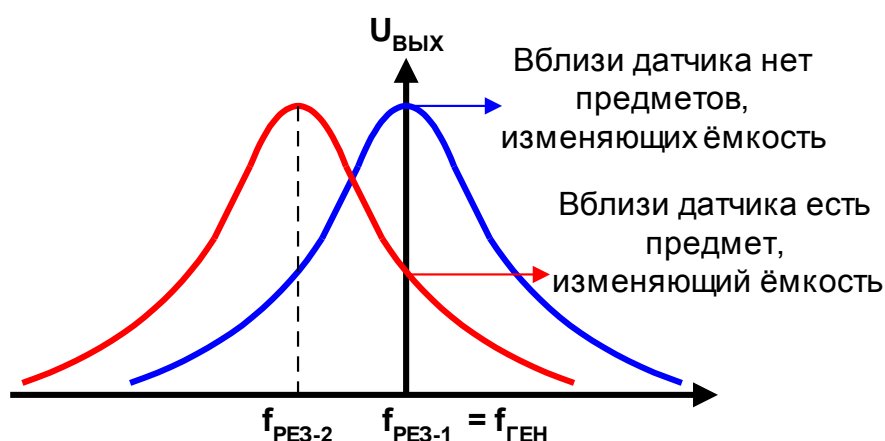


Рисунок 7.12. Амплитудно-частотные характеристики ёмкостного датчика резонансного типа

Компаратор, обладающий гистерезисом, сравнивает напряжение, поступающее с колебательного контура, с опорным напряжением и создаёт на своём выходе сигнал низкого уровня. При этом выходной транзисторный ключ разомкнут, поэтому ток через нагрузку не течёт.

При приближении объекта к датчику возрастает ёмкость, входящая в состав колебательного контура. Это вызывает снижение его резонансной частоты, например, до значения  $f_{РЕЗ-2}$ , и уменьшение амплитуда снимаемого напряжения  $U_{ВЫХ}$ . Компара-

тор формирует на своём выходе напряжение высокого уровня. Транзисторный ключ переходит в режим насыщения, выходная цепь замыкается и через нагрузку протекает ток. Это свидетельствует о наличии объекта в непосредственной близости от ёмкостного датчика.

Схемы подключения нагрузки к ёмкостному датчику похожи на схемы её подключения к индуктивному датчику. Выходной транзисторный ключ может иметь структуру NPN или PNP. В частности, для включения нагрузки между выходом датчика и общим проводом применяются ёмкостные датчики, у которых выходной транзистор имеет структуру PNP.

Ёмкостные датчики приближения имеют следующие преимущества:

- возможность контролировать положение металлических и неметаллических объектов,
- высокая чувствительность,
- отсутствие подвижных механических элементов и механических контактов,
- отсутствиедребезга контактов и ложных срабатываний,
- большое быстродействие и высокая частота переключений до 3 кГц,
- значительная устойчивость к механическим воздействиям,
- высокая надёжность и большой срок службы.

К недостаткам ёмкостных датчиков приближения следует отнести

- влияние внешних электрических полей на работу датчика,
- зависимость расстояния срабатывания от свойств контролируемого объекта (металл, пластмасса, фанера и т.д.).