

## 7. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Эти датчики находят очень широкое применение, поскольку контроль положений и перемещений является важным элементом правильного функционирования большого числа разнообразных машин, например станков. В то же время многие физические величины измеряются с помощью их первичного преобразования в перемещения, которые они вызывают в образцах; это относится к измерению сил, давлений, ускорений, температур и т. д.

Существует два основных метода определения положения и измерения перемещений.

В первом методе, наиболее употребительном, датчик вырабатывает сигнал, являющийся функцией положения одной из его частей, связанных с подвижным объектом, а изменения этого сигнала отражают перемещение; в важной группе таких датчиков используется зависимость электрического импеданса от положения подвижного элемента — потенциометра, индуктивности с подвижным сердечником, конденсатора с подвижными обкладками, трансформатора с переменным числом подключаемых витков.

К этой категории датчиков относятся также кодовые датчики абсолютных значений, с помощью которых положение и перемещения определяются посредством оптического или магнитного считывания с двойчной шкалы, нанесенной на рейку или диск и соединенной с подвижной частью.

Во втором методе, менее употребительном, датчик генерирует единичный импульс на каждом элементарном перемещении; положение и перемещение определяются подсчетом суммы или разности испущенных импульсов в зависимости от направления перемещения, т. е. речь идет о датчиках последовательных приращений.

Датчики, называемые бесконтактными, характеризуются отсутствием механической связи с объектом, расстояние до которого или перемещения которого они измеряют, поэтому они мало влияют на измеряемую величину. Связь между подвижным объектом и датчиком осуществляется в этом случае посредством магнитного, электромагнитного или электростатического поля, а интенсивность этой связи, являющаяся функцией относительного расположения объекта и датчика, определяет электрический сигнал датчика.

### 7.1. Резисторные потенциометры

Датчик этого типа основан на простом принципе действия, что приводит к конструкциям умеренной стоимости; измеряемый сигнал, который он позволяет получать, может иметь весьма высокий уровень и не требовать специальной электрической схемы обработки. Однако такой датчик обладает внутренним трением, которое влияет на его точность, являясь источником шумов и причиной износа, что влечет за собой ухудшение характеристик (линейности, точности) и устанавливает предел количества измерений, которые датчик может выдержать. Кроме того, на его функционирование может заметно влиять окружающая атмосфера (влажность, пыль).

#### 7.1.1. Устройство потенциометра

**Различные формы.** Потенциометр представляет собой резистор постоянного сопротивления  $R_n$ , по которому перемещается скользящий электрический контакт. Этот контакт механически соединяется с деталью, перемещения которой он должен передавать; скользящий контакт потенциометра электрически изолируется от контролируемой детали.

Величина сопротивления  $R$  между скользящим контактом и одним из концов резистора является функцией, с одной стороны, положения скользящего контакта  $x$ , следовательно, по движной детали, положение которой измеряется, и, с другой стороны, конструкции резистора. Если резистор имеет однородную конструкцию, то потенциометр линеен, так как существует соотношение прямой пропорциональности между величиной  $R$  и положением скользящего контакта.

В зависимости от формы данного резистора и, следовательно, от траектории перемещения скользящего контакта, различают:

— потенциометр линейного перемещения (рис. 7.1, а)

$$R(l) = (l/L) R_n,$$

— потенциометр углового перемещения

$$R(\alpha) = (\alpha/\alpha_M) R_n,$$

а точнее, круговой потенциометр ( $\alpha_M < 360^\circ$ , рис. 7.1, б), многооборотный геликоидальный потенциометр ( $\alpha_M > 360^\circ$ , рис. 7.1, в).

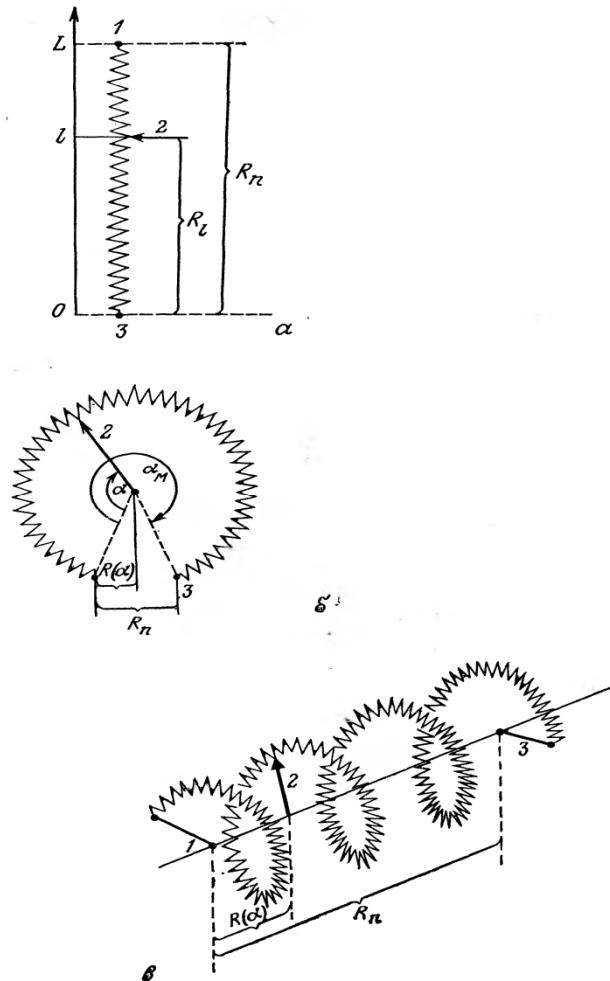


Рис. 7.1. Потенциометры различных форм: электрические схемы и конструкции (документация фирмы MCB).

а — линейный потенциометр; б — круговой потенциометр; в — многооборотный потенциометр. 1 — контактная полоса; 2 — измерительная полоса.

Далее мы будем обозначать через  $x$  перемещение скользящего контакта — линейное ( $x=l$ ) или угловое ( $x=\alpha$ ), а его максимальное значение — через  $X$  ( $L$  либо  $\alpha_M$ ).

**Резистор.** Он может быть образован либо намотанной проволокой, либо проводящей полоской.

Проволока должна обладать малым температурным коэффициентом сопротивления и малой термо-Э.Д.С. (при использо-

вании меди), стабильностью кристаллического строения и коррозионной стойкостью. Обычно для изготовления такой проволоки применяют сплавы типа Ni—Cr, NiCu, Ni—Cr—Fe, Ag—Pb. Проволока, намотанная на изолирующий стержень (из стекла, керамики или пластика), сама изолируется эмалью или поверхностным окислом; она открыта в той части, которая соприкасается со скользящим контактом.

Проводящие полосы, выполненные на пластиковой основе, покрываются проводящим порошком углерода или металла с размером зерен порядка  $10^{-2}$  мм. Из-за зернистого строения полоска электрически неоднородна, что ограничивает разрешающую способность.

Значение сопротивления  $R_n$  чаще всего заключено между 1 и 100 кОм. но может достигать нескольких МОм.

*Температурный коэффициент сопротивления.* Он обычно более высокий для полосковых сопротивлений (порядка  $3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ); температурный коэффициент сопротивления не имеет первостепенной важности, если температура потенциометра однородна, а сигнал является функцией только  $R(x)/R_n$ .

*Собственная линейность.* Некоторые неоднородности в структуре или составе материалов, небольшие отклонения размеров могут повлечь нарушения линейности характеристики потенциометра, которые проявляются в изменении, по мере перемещения, величины  $dR(x)/dx$ . Порядок величины расхождения между действительной кривой  $R(x)$  и прямой в зависимости от типа потенциометра лежит в пределах от 0,01% до 1%  $R_n$ .

*Скользящий контакт.* Скользящий контакт должен обеспечивать хорошее электрическое соединение, что требует отсутствия термо-э.д.с., а также малого и стабильного сопротивления контакта в процессе эксплуатации (износ) и в условиях вибраций или при повышенных скоростях перемещения контакта.

Переходное сопротивление контакта зависит от давления на скользящий контакт, а также от характера и состояния его поверхности. Оно существенно больше для потенциометров с проводящей полосой и может достигать нескольких процентов сопротивления полосы. Кроме того, случайные изменения этого сопротивления во время перемещения являются источником шума; это одно из неудобств полосковых потенциометров, но оно существенно только в том случае, когда ток через скользящий контакт относительно велик (включение в режиме реостата).

### 7.1.2. Метрологические характеристики

**Рабочий диапазон.** Значения отношения  $R(x)/R_n$  на концах резистора  $R_n$  обычно нарушаются либо концевыми ограничителями, либо контактом с проводом питания. Рабочий диапазон потенциометра — это область изменения  $x$ , в которой  $R(x)$  является линейной функцией перемещения (рис. 7.2).

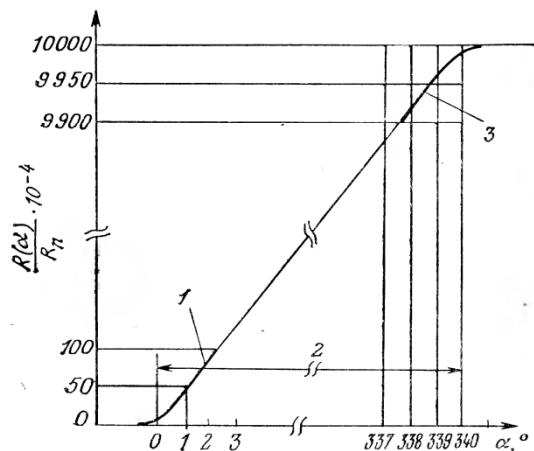


Рис. 7.2. Изменение потенциометрического отношения в зависимости от положения скользящего контакта (круговой потенциометр Н 22, фирма-изготовитель МСВ).

1 — начало полосы; 2 — используемый участок характеристики; 3 — конец полосы.

**Разрешение.** Лучшее разрешение обеспечивают полосковые потенциометры; оно ограничено зернистой структурой полос, что порождает ошибку разрешения порядка 0,1 мкм.

В случае намотанного потенциометра, состоящего из  $n$  витков, скользящий контакт может занимать  $2n - 2$  электрически различных положений:  $n$  положений, в которых контакт находится на одном витке (рис. 7.3, а), и  $n - 2$  положений, в которых контакт находится на двух витках (рис. 7.3, б).

Измеряемое напряжение изменяется дискретным образом при каждом переходе скользящего контакта с одного положения на другое (рис. 7.3, в).

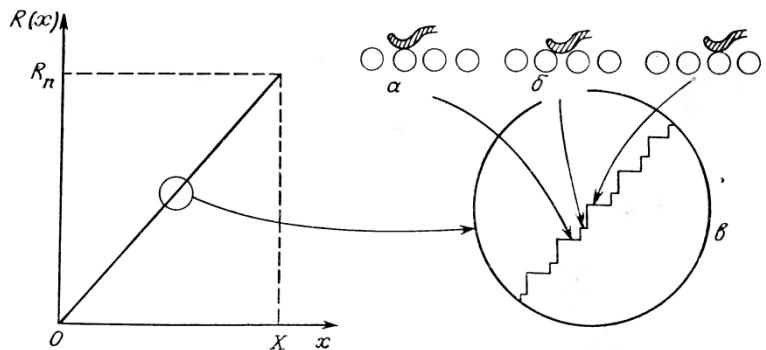
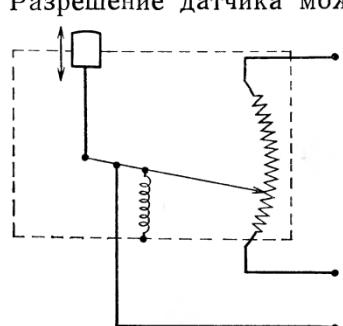


Рис. 7.3. Разрешение намотанного потенциометра.  
а, б — характерные положения скользящего контакта; в — изменение сопротивления.

Разрешение определяется максимальным перемещением, необходимым для перехода скользящего контакта из своего положения в ближайшее соседнее; оно зависит от формы и размеров проволоки и скользящего контакта и может меняться по мере их износа. Поскольку разрешающая способность определяется расстоянием между двумя витками, получается удручающий результат. Для того чтобы улучшить разрешающую способность, приходится увеличивать количество витков на единицу длины стержня и, следовательно, уменьшать диаметр проволоки. Это влечет за собой более быстрый износ из-за трения скользящего контакта и увеличивает риск обрыва проволоки. Лучшие конструкции намотанных потенциометров обеспечивают разрешение  $\sim 10$  мкм, что равно минимальному диаметру используемой проволоки.

Разрешение датчика можно улучшить по сравнению с разрешением потенциометра, если посредством некоторого механизма — рычага, зубчатой передачи — увеличить масштаб перемещения скользящего контакта по сравнению с перемещением точки касания датчика



Датчик М 412 (фирма SFIM) состоит из потенциометра и рычажного «усилителя перемещения» точки касания (рис. 7.4).

Потенциометр образован 214 витками, расположенными

на отрезке 15 мм; следовательно, ошибка разрешения потенциометра составляет 70 мкм. При отношении плеч рычага, равном 3,75 диапазон перемещений датчика сокращается до 4 мм, а ошибка разрешения уменьшается до 19 мкм.

**Максимальная скорость перемещения скользящего контакта.** Для обеспечения надлежащего качества соединения конструктор обычно устанавливает предел  $v_{\max}$  максимальной скорости перемещения скользящего контакта.

Максимально допустимая скорость движения скользящего контакта определяет максимальную частоту перемещений, при которой еще допустимы измерения с помощью потенциометра; эта частота обратно пропорциональна амплитуде перемещений и имеет порядок килогерц.

**Срок службы.** Трение скользящего контакта о проволоку или токопроводящую дорожку вызывает их износ и ограничивает срок службы потенциометра. Неравномерный износ потенциометра в связи с частыми колебательными движениями скользящего контакта вблизи одного положения влечет за собой ухудшение линейности и может привести к разрыву проволоки намотанного потенциометра; накопление под скользящим контактом отделившихся частиц проводящей дорожки увеличивает сопротивление контакта и шум, характеризуемый коэффициентом Р.Н.В.

Условия эксплуатации влияют на срок службы; он тем более ограничен, особенно для потенциометров с пластмассовой дорожкой, чем больше ток, проходящий через скользящий контакт, и чем выше рабочая температура. Порядок величины срока службы для намотанного потенциометра составляет  $10^6$  перемещений, а для потенциометра с пластиковой дорожкой — от  $5 \cdot 10^7$  до  $10^8$  перемещений.

### 7.1.3. Потенциометры без механического скользящего контакта

Существенные трудности, связанные с трением механического скользящего контакта о дорожку (износ, шум, тормозящий момент), могут быть устранены заменой механического соедине-

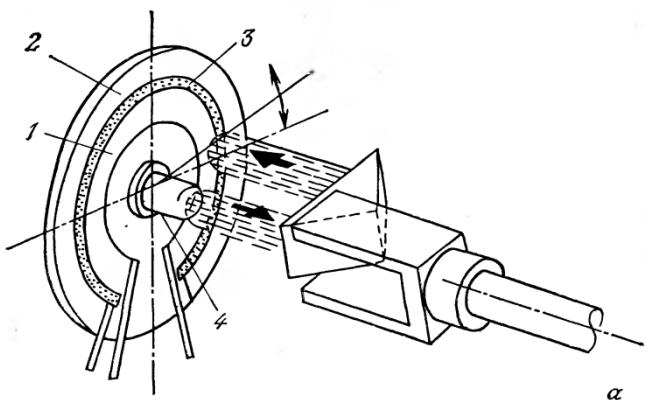


Рис. 7.5. Угловой потенциометр с оптической связью (документация фирмы Segor).

*a* — принципиальная схема; *б* — зависимость сопротивления в фотопроводящей зоне от времени освещения. *1* — измерительная полоса; *2* — контактная полоса; *3* — фотопроводящая полоса; *4* — электролюминесцентный диод.

ния между подвижной осью и полосой сопротивления оптической либо магнитной связью.

В угловом потенциометре с оптической связью измерительная полоса сопротивления отделена от контактной узкой полосой фотопроводника (CdSe), по которой во время поворота оси потенциометра перемещается световое пятно (рис. 7.5, а). Сопротивление фотопроводящей зоны на освещенной части существенно уменьшается, обеспечивая связь между измерительной и контактной полосами.

### 7.1.4. Влияние различных элементов измерительной цепи

**Основная схема (рис. 7.7, а).** Потенциометр питается от источника э.д.с.  $E_s$  с собственным сопротивлением  $R_s$ . Напряжение  $v_m$  на клеммах резистора переменного сопротивления  $R(x)$  измеряется прибором с входным сопротивлением  $R_i$ . Таким образом, напряжение  $v_m$  определяется формулой

$$v_m = E_S \frac{R(x)}{R_S + R_n} \frac{1}{1 + \frac{R(x)}{R_i} \left[ 1 - \frac{R(x)}{R_S + R_n} \right]}.$$

В идеальном случае измеряемое напряжение равно

$$v_m = E_S \frac{R(x)}{R_n} = E_S \frac{x}{X},$$

т. е. для линейного потенциометра  $v_m = E_S(l/L)$ , а для кругового  $v_m = E_S(\alpha/\alpha_M)$ .

Этот идеальный случай соответствует двум предельным условиям  $R_S=0$  и  $R_i=\infty$ .

**Влияние источника.** Предполагая в данном рассмотрении  $R_i \gg R_n$ , получаем

$$v_m = E_S \frac{R(x)}{R_S + R_n} = E_S \frac{x}{X} \frac{1}{1 + R_S/R_n}.$$

Чувствительность схемы в этом случае равна

$$S = \frac{\Delta v_m}{\Delta x} = \frac{E_S}{X} \frac{1}{1 + R_S/R_n},$$

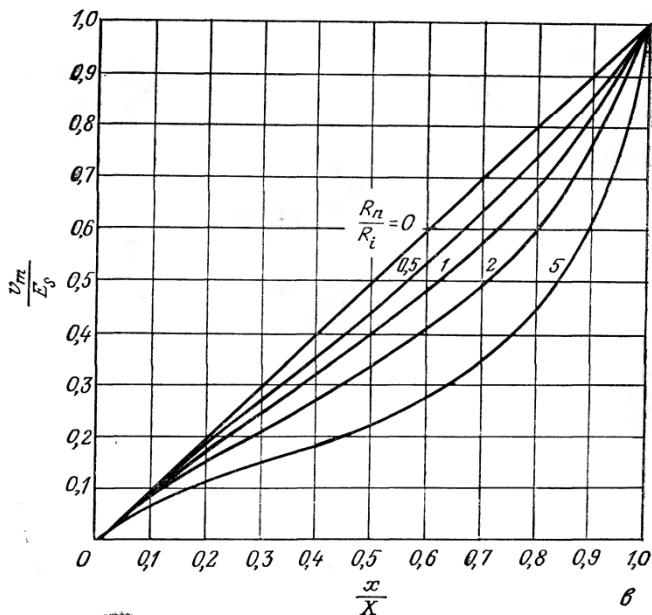
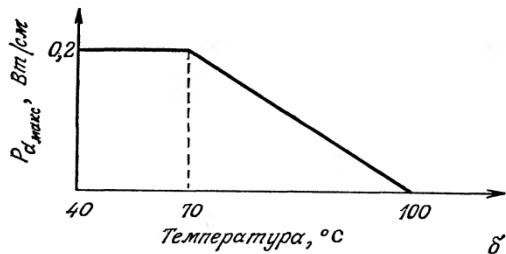
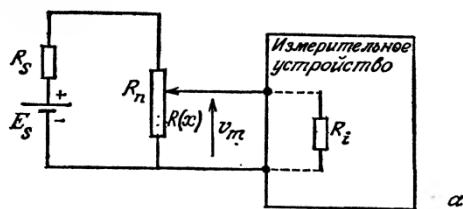


Рис. 7.7. Схема потенциометра (потенциометр с пластиковой дорожкой типа Н12, материалы МСВ).

**а** — основная схема; **б** — максимальная мощность, рассеиваемая на сантиметр длины в зависимости от внешней температуры; **в** — влияние входного сопротивления измерительного прибора на линейность.

где  $X$  — весь диапазон измерений. Чувствительность  $S$  не зависит от  $x$ ; сопротивление  $R_s$  снижает чувствительность, но не ухудшает линейности, если  $R_i \gg R_n$ .

Повышенная чувствительность достигается подбором источника с малым внутренним сопротивлением  $R_s \ll R_n$  и значительной э.д.с.  $E_s$ .

**Влияние входного сопротивления измерительного прибора.** Если сопротивление источника выбрано в соответствии с условием  $R_s \ll R_n$ , то выражение для измеряемого напряжения приобретает вид

$$v_m = E_s \frac{R(x)}{R_n} \frac{1}{1 + \frac{R(x)}{R_i} \left[ 1 - \frac{R(x)}{R_n} \right]},$$

или, как функция положения  $x$ ,

$$v_m = E_s \frac{x}{X} \frac{1}{1 + \frac{x}{X} \left[ 1 - \frac{x}{X} \right] \frac{R_n}{R_i}}.$$

Чувствительность схемы  $S = \Delta v_m / \Delta x$  является функцией  $x$ , т.е. прибор становится нелинейным и отклонение от линейности тем значительнее, чем больше отношение  $R_n/R_i$  (рис. 7.7, в).

#### 7.1.5. Измерительные схемы

**Определение положения.** Информация выдается в виде напряжения  $v_m$  между скользящим контактом и одним из концов потенциометра. Оно должно быть измерено или зарегистрировано прибором с большим входным сопротивлением, таким, как:

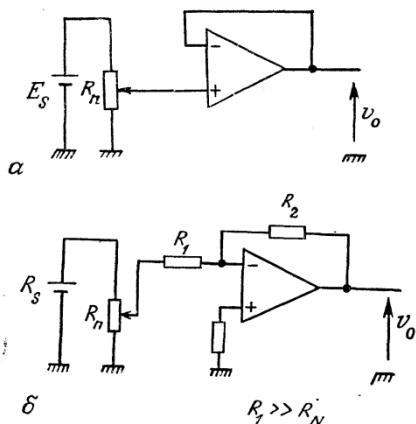
- вольтметр;
- усилитель в следящей схеме — рис. 7.8, а (синфазное напряжение смещения, максимально допустимое для усилителя, должно быть выше напряжения питания потенциометра);
- усилитель в схеме инвертора — рис. 7.8, б (входное сопротивление  $R_1$  схемы должно быть гораздо выше  $R_n$ ).

**Определение перемещения.** В этом случае измерительная информация связана с изменением  $\Delta v_m$  напряжения на скользящем контакте вследствие его перемещения  $\Delta x$  от начального положения  $x_0$ :

$$v_m(x_0 + \Delta x) = v_{m0} + \Delta v_m,$$

где  $v_{m0} = (x_0/X) E_s$  и  $\Delta v_m = (\Delta x/X) E_s$ .

Для точного определения  $\Delta x$  постоянная составляющая  $v_m$  исключается с помощью дифференциального метода измерения, для чего используется компенсирующий потенциометр, идентичный измерительному, с тем же источником питания, но с постоянным и равным  $v_{m0}$  напряжением на его скользящем контакте, зафиксированном в положении  $x_0$  (рис. 7.8, б).



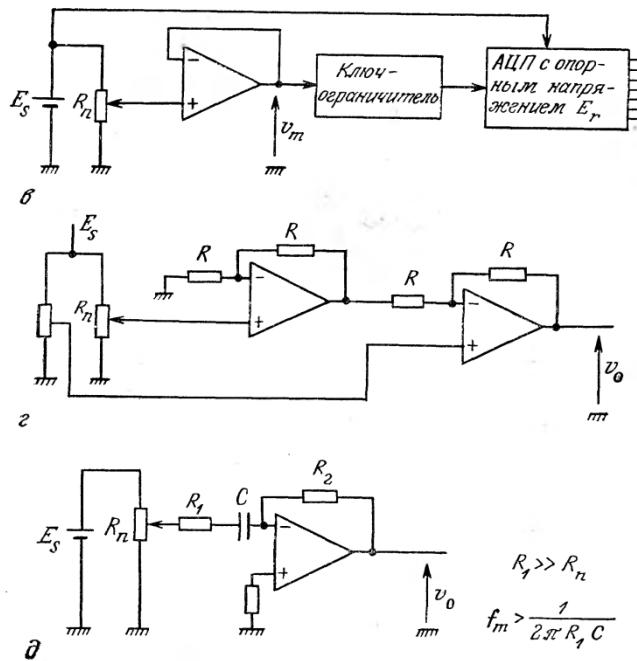


Рис. 7.8. Измерительные схемы (документация Analog Devices).  
 а — следящий усилитель; б — инвертирующий усилитель; в — схема измерения отношений, исключающая влияние измеряемого напряжения; г — схема дифференциального включения для измерения перемещения относительно заданного положения; д — усилитель переменной составляющей с RC-фильтром верхних частот.

## 7.2. Индуктивные датчики

### 7.2.1. Принцип действия и основные характеристики

В перемещение, которое предполагается измерить, вовлекается один из элементов магнитного контура, который вызывает тем самым изменение потока через измерительную обмотку и соответствующий электрический сигнал.

Если подвижным элементом является ферромагнитный сердечник, то его перемещение при поступательном движении или вращении проявляется а) в изменении коэффициента самоиндукции катушки (переменная индуктивность) или б) в изменении коэффициента связи между первичной и вторичной обмотками трансформатора (дифференциальный трансформатор), что приводит к изменению вторичного напряжения.

В трансформаторе с переменной связью одна обмотка может вращаться относительно другой, закрепленной (одна из них играет роль источника, а другая — приемника). Первичная обмотка образует индуктор, а вторичная обмотка с наведенным током дает напряжение в функции угла вращения (индуктивный потенциометр, резольвер).

### 7.2.2. Датчики переменной индуктивности

Коэффициент самоиндукции  $L$  катушки из  $N$  витков проволоки зависит от магнитного сопротивления связанного с ней магнитного контура:

$$L = N^2/R, \text{ где } R = \oint_{\text{(по контуру)}} \frac{dl}{\mu s}.$$

Здесь  $\mu$  — магнитная проницаемость и  $s$  — площадь сечения контура.

Если площадь сечения различных отрезков магнитного контура постоянна,

$$R = \frac{l_f}{\mu_0 \mu_f s_f} + \frac{l_0}{\mu_0 s_0},$$

где  $l_f$  и  $l_0$  — длина силовых линий в ферромагнитном материале и в воздухе соответственно,  $s_f$  и  $s_0$  — площади поперечных сечений магнитного контура и зазора,  $\mu_f$  — относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала (порядка  $10^3 \div 10^4$ ) и  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (в системе СИ).

**Магнитный контур с изменяемым зазором (рис. 7.9).** Исходя из общей формулы, легко установить выражение для коэффициента самоиндукции:

$$L = \mu_0 N^2 s \frac{1}{l_0 + l_f/\mu_f}.$$

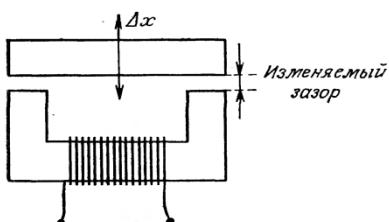


Рис. 7.9. Принципиальная схема датчика с изменяемым зазором.

Поскольку индуктивность должна быть чувствительна к изменению зазора, нужно выбрать  $l_0 \gg l_f/\mu_f$ ; отсюда получаем выражение для  $L$ :

$$L = \mu_0 N^2 s / l_0.$$

Перемещение  $\Delta x$  обкладки приводит к изменению  $\Delta l_0 = -2\Delta x$  зазора, и индуктивность получает новое значение:

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 s}{l_0} \frac{1}{1 + 2\Delta x/l_0},$$

$$\text{откуда } \Delta L = -\frac{2\mu_0 N^2 s}{l_0^2} \frac{\Delta x}{1 + 2\Delta x/l_0}. \quad \text{и } \frac{\Delta L}{L} = -2 \frac{\Delta x}{l_0} \frac{1}{1 + 2\Delta x/l_0}.$$

При  $\Delta x \ll l_0$  практически имеем

$$\Delta L = -\frac{2\mu_0 N^2 s}{l_0^2} \Delta x \left[ 1 - \frac{2\Delta x}{l_0} + \left( \frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right],$$

и чувствительность  $S$  можно записать в виде

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta x} = -\frac{2\mu_0 N^2 s}{l_0^2} \left[ 1 - \frac{2\Delta x}{l_0} + \left( \frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right].$$

Чувствительность зависит от начального положения  $l_0$  обкладки: она тем выше, чем меньше  $l_0$ ; при этом чувствительность может рассматриваться как постоянная только в случае, когда перемещения очень малы по сравнению с  $l_0$ . Это ограничивает применение датчиков такого типа деформациями порядка миллиметра.

Чувствительность и линейность удается улучшить путем дифференциального включения двух одинаковых обмоток и сердечников, расположенных симметрично относительно подвижной обкладки (рис. 7.10).

Изменение коэффициента самоиндукции  $L'$  второй обмотки определяется выражением

$$\Delta L' = \frac{2\mu_0 N^2 s}{l_0^2} \frac{\Delta x}{1 - 2\Delta x/l_0};$$

для  $x \ll l_0$  имеем:

$$\Delta L' = \frac{2\mu_0 N^2 s}{l_0^2} \Delta x \left[ 1 + \frac{2\Delta x}{l_0} + \left( \frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right].$$

Обе индуктивности  $L$  и  $L'$  включены в два смежных плеча моста (разд. 3.3.2), поэтому его напряжение разбаланса пропорционально  $\Delta L' - \Delta L$ :

$$\Delta L' - \Delta L = \frac{4\mu_0 N^2 s}{l_0^2} \Delta x \left[ 1 + \left( \frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right].$$

Чувствительность такого устройства, очевидно, удваивается, но, главное, нелинейность уменьшается до членов второго порядка малости вследствие компенсации нелинейностей первого и вообще всех нечетных порядков.

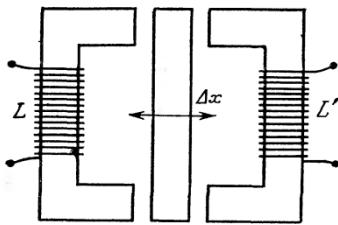


Рис. 7.10. Объединение двух магнитных цепей с противоположными изменениями зазоров.

**Потери энергии и эквивалентные сопротивления.** Омические потери в проводе обмотки. Они определяются сопротивлением проволоки:

$$R_b = \rho (l_b / \pi r^2).$$

Здесь  $l_b$  — длина проволоки,  $r$  — ее радиус и  $\rho$  — удельное сопротивление металла, чаще всего меди,  $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8}$  Ом/м.

Предыдущее выражение для  $R_b$  справедливо в диапазоне частот, для которых толщина скин-слоя  $\delta$  больше  $r$ ; при возрастании частоты  $\delta$  уменьшается; ее величина определяется выражением

$$\delta = \sqrt{\rho / \pi \mu_r \mu_0 f}.$$

Для меди ( $\mu_r = 1$ ) при 10 кГц  $\delta = 0,6$  мм. Когда  $\delta$  становится порядка радиуса  $r$ , сопротивление  $R_b$  с увеличением частоты возрастает.

**Потери из-за токов Фуко в сердечнике.** Переменная индукция, вызывающая ток в катушке, наводит в сердечнике токи Фуко, рассеивающие энергию вследствие эффекта Джоуля. Сопротивление  $R_F$ , соответствующее этим потерям, описывается выражением

$$R_F = (K_F / \rho_N) L f^2,$$

где  $\rho_N$  — удельное сопротивление сердечника, подвергающегося воздействию переменной индукции частоты  $f$ ;  $L$  — индуктивность катушки; коэффициент  $K_F$  зависит от структуры сердечника (листовая, зернистая или сплошной материал) и от его магнитной проницаемости.

**Магнитные потери в сердечнике.** Их вызывают две причины: неполная обратимость явлений намагничивания (гистерезис) и отставание колебаний намагничивания от колебаний поля (запаздывание намагничивания).

Нелинейность связи между индукцией и полем объясняет появление гармоник в контуре. Энергия рассеяния гистерезисной петли пропорциональна ее площади  $A_H$ ; сопротивление  $R_H$ , соответствующее этим потерям, описывается выражением

$$R_H = K_H B_{\max} L f.$$

Коэффициент  $K_H$  зависит от свойств материала  $\mu_i$  и  $\alpha$ .

**Потери из-за запаздывания намагничивания.** Схематически их можно заменить сопротивлением  $R_T$ :

$$R_T = K_T L f,$$

где  $K_T$  — характеристика материала.

Из предыдущих рассуждений следует, что совокупность потерь в сердечнике соответствует сопротивлению  $R_N$ , которое пропорционально  $L\omega$ :

$$R_N = R_F + R_H + R_T = K_N L \omega,$$

где  $K_N$  — функция частоты и индукции в сердечнике; ее величина обычно порядка  $10^{-2}$ .

В соответствии с предыдущими рассуждениями на рис. 7.15 построена эквивалентная схема катушки и ее связи с измерительной установкой. Использованы следующие обозначения:  $L$  — собственная индуктивность катушки;  $C$  — общая емкость,  $C = C_p + C_l$ ;  $R$  — совокупность потерь,  $R = R_b + R_N$ . Импеданс  $Z$  этого двухполюсника легко вычисляется:

$$Z = \frac{R}{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2C^2\omega^2} + j \frac{L\omega(1 - LC\omega^2) + R^2C\omega}{(1 - LC\omega^2)^2 + R^2C^2\omega^2}.$$

Для случая высокой добротности  $Q = L\omega/R$  ( $Q \gg 1$ ) это выражение упрощается:

$$Z = \frac{R}{(1 - LC\omega^2)^2} + j \frac{L\omega}{1 - LC\omega^2}.$$

Из-за емкости  $C$  измеряемые индуктивность и активное сопротивление отличны от индуктивности  $L$  и сопротивления  $R$  собственно катушки:

$$R_{изм} = \frac{R}{(1 - LC\omega^2)^2} \quad \text{и} \quad L_{изм} = \frac{L}{1 - LC\omega^2}.$$

Если и отклонения из-за емкостей пренебрежимы,  $1/C\omega \gg L\omega$ , то получаем упрощенное выражение для импеданса:

$$Z = R + jL\omega.$$

Перемещение сердечника приводит к изменению  $\Delta Z$  импеданса:

$$\Delta Z = \Delta R + j\omega \Delta L.$$

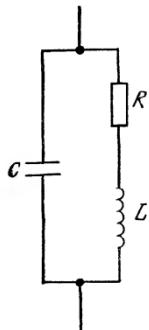


Рис. 7.15. Эквивалентная электрическая схема катушки с соединительным проводом.

Омические потери в проводе не зависят от положения сердечника:

$$\Delta R_b = 0, \quad \Delta R_N = K_N \omega \Delta L \quad \text{и} \quad \Delta Z = (K_N + j\omega) \Delta L.$$

Изменение импеданса пропорционально  $\Delta L$ .

Уравновешенный мост Максвелла (разд. 3.3.2) позволяет довольно точно определить  $\Delta R$  и  $\Delta L$  и, исходя из градуировочной характеристики, измерить перемещение  $\Delta x$  сердечника относительно положения  $x_0$  равновесия моста. Однако измеряют чаще всего отклонение от положения равновесия, а в целях линеаризации включают дифференциально две одинаковые индуктивности (см. разд. 3.3.2). Синхронное детектирование позволяет измерять только ту часть напряжения разбаланса, которая возникает из-за  $j\omega \Delta L$  (разд. 4.4.2) (рис. 7.16). Примерные технические параметры датчиков с дифференциальным включением индуктивностей: диапазон измерения — от  $\pm 0,1$  до  $\pm 200$  мм; чувствительность — от 10 до 100 мВ на 1 В и на 1 мм; отклонение от линейности — от 0,5 до 2% диапазона измерения.

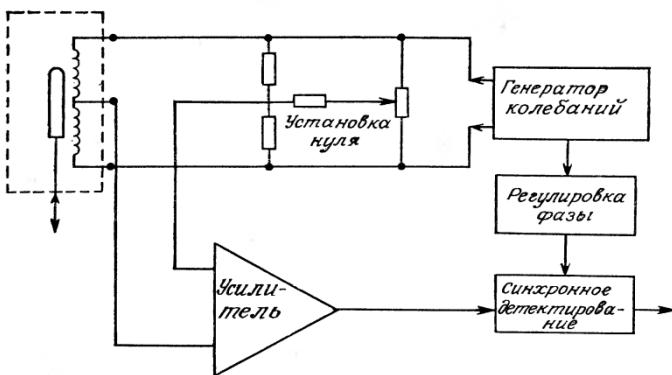


Рис. 7.16. Пример схемы измерений перемещения индуктивным датчиком.

### 7.3. Емкостные датчики

#### 7.3.1. Принцип действия и основные характеристики

Емкостный датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из обкладок которого испытывает подвергаемое контролю перемещение, вызывая изменение емкости. Пренебрегая краевыми эффектами, можно выразить емкость для плоского конденсатора следующим образом:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A/D.$$

Здесь  $\epsilon_r$  — относительная проницаемость среды, заключенной между обкладками,  $A$  — площадь поверхности рассматриваемых обкладок и расстояние между ними соответственно.

Для цилиндрического конденсатора емкость определяется выражением

$$C = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0 l}{\lg(r_2/r_1)},$$

где  $l$  — глубина погружения внутреннего цилиндра (радиуса  $r_1$ ) во внешний (радиуса  $r_2$ ). В системе СИ длина выражается в метрах, емкость — в фарадах,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ .

Краевой эффект становится значительным, когда расстояние между обкладками сравнимо с линейными размерами рассматриваемых поверхностей. Этот эффект в некоторой степени можно устранить, используя защитное кольцо, позволяющее вынести его влияние за границы поверхности обкладок, реально используемой при измерении.

В случае плоского конденсатора перемещение обкладки может происходить либо в собственной плоскости ( $A$  — переменная,  $D$  — постоянная), либо перпендикулярно своей плоскости ( $A$  — постоянная,  $D$  — переменная).

В случае цилиндрического конденсатора обкладка перемещается только параллельно оси ( $l$  — переменная).

Емкостные датчики замечательны своей простотой, что позволяет создавать прочные и надежные конструкции. Диэлектриком обычно служит воздух, так что параметры конденсатора зависят только от геометрических характеристик и не зависят от свойств используемых материалов, если эти материалы правильно подобраны. Следовательно, можно сделать пренебрежи-

мым влияние температуры на изменения площади поверхности и расстояния между обкладками, правильно подбирая марку металла для обкладок и изоляцию для их крепления. С другой стороны, необходимо защищать датчик от тех факторов окружающей среды, которые могут ухудшить изоляцию между обкладками, — от пыли, коррозии, влажности, ионизирующей радиации.

Желательно использовать такой способ измерения, который обеспечивает лучшую линейность взаимосвязи между перемещением и измеряемым сигналом. В зависимости от схемы формирования сигнала датчика этот сигнал может быть линейной функцией изменения емкости  $\Delta C$ , изменения полного сопротивления  $\Delta Z$ , или, наконец, относительного изменения  $\Delta Z/Z$  ( $\Delta Z/Z = -\Delta C/C$ ).

Для того чтобы обеспечить использование наиболее подходящего измерительного прибора, нужно для каждого типа емкостного датчика определить его различные чувствительности к перемещению  $x$ , а именно:

- чувствительность емкости  $S_C = \Delta C / \Delta x$ ,
- чувствительность импеданса  $S_Z = \Delta Z / \Delta x$ ,
- относительную чувствительность  $S_r = \frac{1}{C} \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{1}{Z} \frac{\Delta Z}{\Delta x}$ .

### 7.3.2. Конденсатор с переменной площадью обкладок

**Одиночный конденсатор.** Это обычно либо плоский конденсатор с вращающейся обкладкой (рис. 7.26, *a*), либо цилиндрический конденсатор с одной из обкладок, перемещающейся вдоль оси (рис. 7.26, *b*). В обоих случаях емкость меняется линейно в зависимости от перемещения  $x$ :

$$C(x) = Kx,$$

где для плоского конденсатора  $K = \epsilon_0 \pi r^2 / 360 D$ ,  $x = \alpha^\circ$ ; для цилиндрического конденсатора  $K = 2\pi \epsilon_0 / \lg(r_2/r_1)$ ,  $x = l$ , м.

Чувствительность  $S_C$  постоянна ( $S_C = K$ ), а импеданс является нелинейной функцией  $x$  и  $S_Z = (-1/K\omega) (1/x^2)$ . Относительная чувствительность равна  $S_r = 1/x$ . Чувствительности  $S_Z$  и  $S_r$  тем больше, чем меньше  $x$ , но в этом случае для тех же переме-

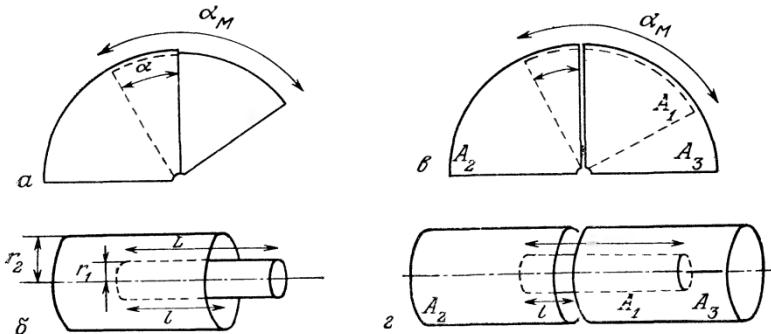


Рис. 7.26. Принципиальная схема емкостных датчиков с переменной площадью обкладок.

*а, в* — вращательные; *б, г* — с прямолинейными перемещениями.

щений  $dx$  нелинейность выражена сильнее. Использование второго конденсатора, включенного дифференциально, позволяет компенсировать этот эффект.

**Двойной дифференциальный конденсатор.** Подвижная обкладка  $A_1$  в таком конденсаторе помещена между двумя закрепленными  $A_2$  и  $A_3$ , образуя два конденсатора, емкости которых  $C_{21}$  и  $C_{31}$  изменяются в противоположных направлениях в функции перемещения  $x$  (рис. 7.26, *в* и *г*). За начало отсчета перемещений принимается положение, когда подвижная обкладка расположена симметрично относительно неподвижных, и емкости  $C_{21}$  и  $C_{31}$  равны. В зависимости от ранее определенных  $K$  и  $x$  и максимального перемещения  $R$  имеем

$$\begin{aligned} C_{21} &= K(X+x) = KX(1+x/X) = C_0(1+x/X), \\ C_{31} &= K(X-x) = KX(1-x/X) = C_0(1-x/X), \end{aligned}$$

### 7.3.3. Конденсатор с переменным зазором между обкладками

Речь идет о плоском конденсаторе, предназначенном для определения прямолинейных перемещений (рис. 7.27).

**Одиночный конденсатор** (рис. 7.27, *a*). Обозначая  $d$  перемещение относительно начального зазора  $D_0$ , имеем:

$$\begin{aligned} C(d) &= \epsilon_0 A / (D_0 + d), \\ S_C &= -\epsilon_0 A / (D_0 + d)^2, \quad S_Z = 1/\epsilon_0 A \omega, \quad S_r = -1/(D_0 + d). \end{aligned}$$

В данном случае изменение импеданса является линейной функцией перемещения. Чувствительность  $S_C$  и относительная чувствительность тем выше, чем меньше  $D_0$ ; при  $d \ll D_0$  они могут рассматриваться как постоянные.

Чувствительность  $S_C$  конденсатора с переменным зазором между обкладками гораздо выше, чем у конденсатора с переменной площадью обкладок; например, в случае конденсатора, состоящего из двух квадратных пластин со стороной  $a$ , расположенных параллельно на расстоянии  $D_0$  ( $D_0 \ll a$ ), имеем:

$$S_C (||) = \epsilon_0 a / D_0$$

для перемещения, параллельного одной из сторон, и

$$S_C (\perp) = \epsilon_0 a^2 / D_0^2$$

для малых перемещений, перпендикулярных пластинам, откуда

$$S_C (\perp) / S_C (||) = a / D_0 \gg 1.$$

Однако конденсатор с переменным зазором может использоваться лишь для измерений в малом диапазоне (обычно меньше 1 мм), тогда как конденсатор с переменной площадью об-

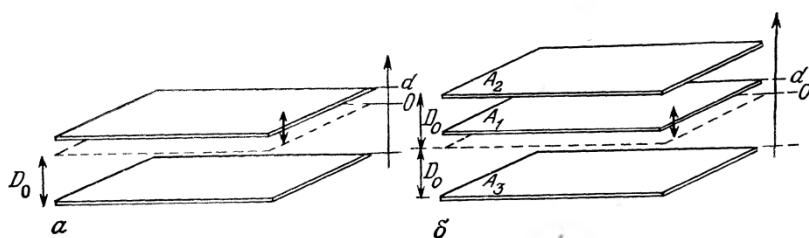


Рис. 7.27. Принципиальная схема емкостного датчика с переменным зазором между обкладками.

*a* — простой конденсатор; *б* — двойной дифференциальный конденсатор.

кладок пригоден для измерений в значительно более широком диапазоне (больше 1 см).

**Двойной дифференциальный конденсатор.** Подвижная обкладка  $A_1$  конденсатора перемещается перпендикулярно своей плоскости между двумя закрепленными обкладками  $A_2$  и  $A_3$  (рис. 7.27, б).

Пусть  $d$  — перемещение относительно начального (равнодistantного от обеих плоскостей) положения  $D_0$ ; для этого случая имеем:

$$C_{21} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0 - d} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0} \frac{1}{1 - d/D_0} = C_0 \frac{1}{1 - d/D_0},$$

$$C_{31} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0 + d} = \frac{\epsilon_0 A}{D_0} \frac{1}{1 + d/D_0} = C_0 \frac{1}{1 + d/D_0},$$

полагая, что  $\epsilon_0 A / D_0 = C_0$ .

#### 7.3.4. Методы измерения изменений емкости

Существуют общие методы измерения импедансов (потенциометр, балансный трансформатор, мост), применение которых к двойному дифференциальному конденсатору позволяет получить измерительный сигнал с амплитудой, пропорциональной перемещению; очевидно, чтобы узнать направление перемещения, необходимо фазочувствительное детектирование (разд. 4.4.2).

**Мост Саути и дифференциальный конденсатор** (рис. 7.28). *Измерение напряжение разбаланса.* Это измерение возможно, если в соответствии со схемой влиянием паразитных емкостей и их изменениями можно пренебречь; тогда имеем:

$$v_m = \frac{e_S}{2} \frac{C_{21} - C_{31}}{C_{21} + C_{31}}.$$

Это выражение для измеряемого сигнала является линейным по перемещению как для конденсатора с переменной площадью, так и для конденсатора с переменным зазором.

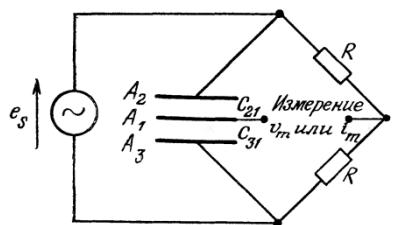


Рис. 7.28. Мост Саути и двойной дифференциальный конденсатор.

**Схема с операционным усилителем.** Пусть один из конденсаторов  $C_1$  или  $C_2$  является емкостью датчика, а другой — постоянным конденсатором (рис. 7.30, *a*);  $R_1$  играет роль защиты инвертирующего входа, а  $R_2$  позволяет постоянному току обратной связи воздействовать на этот вход;  $e_s$  — источник синусоидального напряжения с частотой  $\omega = 2\pi f$ .

Предполагая операционный усилитель идеальным,

$$v_0 = -\frac{Z_2}{Z_1} e_s, \text{ где } Z_2 = \frac{R_2}{1 + jR_2 C_2 \omega} \text{ и } Z_1 = \frac{1 + jR_1 C_1 \omega}{jC_1 \omega},$$

получаем

$$v_0 = \frac{-jR_2 C_1 \omega}{(1 + jR_1 C_1 \omega)(1 + jR_2 C_2 \omega)} e_s.$$

Если элементы схемы таковы, что

$$R_1 C_1 \omega \ll 1 \text{ и } R_2 C_2 \omega \gg 1,$$

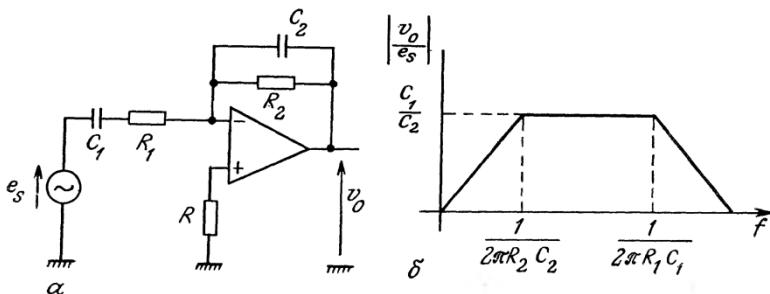


Рис. 7.30. Операционный усилитель, соединенный с емкостным датчиком.  
*а* — схема; *б* — частотная зависимость сигнала.

Схема линейна по перемещению в следующих случаях:

- а)  $C_1$  — конденсатор с переменной поверхностью,  $C_2$  — постоянная емкость;
- б)  $C_1$  — постоянная емкость,  $C_2$  — конденсатор с переменным зазором.

#### 7.4. Цифровые датчики

Измерительную информацию, получаемую в аналоговом виде, часто можно обрабатывать с помощью цифровых схем, что создает дополнительные удобства. Это становится возможным при использовании аналого-цифровых преобразователей. В случае перемещений, между тем, возможно создать датчик, измеряющий положение — линейное или угловое — и выдающий его в цифровой форме. Как и во всех приборах с цифровым преобразованием, информация оказывается квантованной, и, следовательно, разрешение всегда конечно.

##### 7.4.1. Абсолютные цифровые датчики

Это — рейки для линейных перемещений или диски для угловых перемещений, разделенные на  $N$  равновеликих площадок (полос в случае рейки, секторов в случае диска), на которых записаны бинарные слова, соответствующие определяемому положению согласно коду и конкретной технологии. Число пло-

щадок  $N$  определяет разрешение следующим образом:  $L/N$  см для рейки длиной  $L$  см и  $360^\circ/N$  для диска.

Все  $n$  бит, образующие каждое из слов, материализуются на  $n$  параллельных (для рейки) или концентрических (для диска) дорожках (рис. 7.32) при использовании двух различных физических состояний для определения значений 0 или 1:

- ненамагничиваемая или ферромагнитная поверхность (магнитное считывание);
- изолирующая или проводящая поверхность (электрическое считывание);
- непрозрачная и просвечивающая поверхность<sup>1)</sup> (оптическое считывание).

В настоящее время оптическое считывание применяется наиболее часто; для каждой дорожки имеется источник — электролюминесцентный диод, и приемник — фототранзистор (рис. 7.32, в).

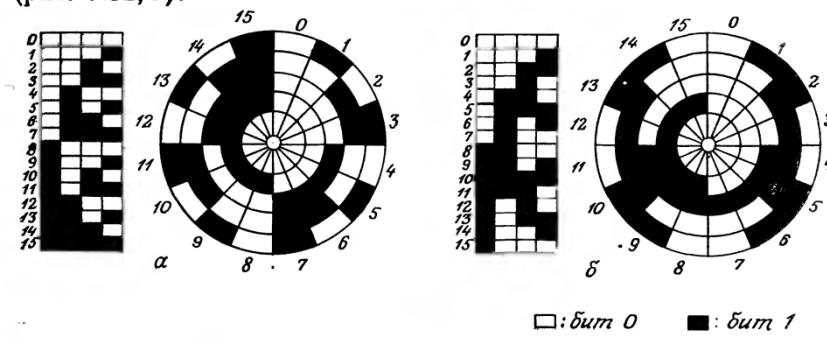


Рис. 7.32. Абсолютные цифровые датчики (документация фирмы MCB).

*a* — рейка и диск с натуральным двоичным кодом; *б* — рейка и диск с кодом Грэя; *в* — диск и электрическая схема считывания.

**Кодирование.** Прямой двоичный код можно использовать с помощью такого обрабатывающего прибора, как вычислитель. Существует минимальное число бит для представления каждого числа. Тем не менее, бывает очень неудобно выражать изменение числа на одну единицу одновременным изменением многих бит (рис. 7.32, *а*), например:

$$15_{10} \leftrightarrow 01111_2, \quad 16_{10} \leftrightarrow 10000_2.$$

Если считающее устройство настроено недостаточно хорошо, изменения бит считаются неодновременно и существует риск ошибки, когда считывание происходит во время пересечения границы двух значений или когда носитель кода останавливается в граничном положении.

Опасность ошибочного считывания, которая существует также и для кода BCD, можно избежать, либо а) используя код, в котором при каждом элементарном перемещении меняется только один бит (обычно это специальный код, см. рис. 7.32, б), либо б) сохранив прямой двоичный или код BCD, но используя дополнительное считающее устройство, позволяющее избежать двусмысленного считывания в переходных зонах (двухдорожечные носители кода с управляемым считыванием).

**Специальные коды.** Наиболее часто используются код Грэя и специальный код BCD. Исходя из этого, можно определить требования к новым носителям специальных кодов с так называемым избытком 3, когда на три единицы в сторону увеличения сдвигаются начальные значения. Такие коды упрощают некоторые арифметические операции.

#### 7.4.2. Оптический генератор приращений

**Принцип действия и конструкция.** Для этого прибора требуется небольшое количество дорожек (2 или 3) с менее сложным рисунком, чем для носителей кодов абсолютных значений. Он генерирует импульс для каждого элементарного перемещения и позволяет различать направление движения. Перемещение (относительно произвольного начала отсчета) распознается подсчетом импульсов; установка нуля счетчика производится в положении, принятом за начало отсчета.

Две концентрические (на диске) или параллельные (на рейке) дорожки разделены каждая на  $N$  равных элементарных площадок, поочередно непрозрачных и просвечиваемых, причем площадки одной дорожки смещены на четверть пространственного периода относительно другой (рис. 7.34). Иногда добавляется третья дорожка (с единственной прозрачной элементарной площадкой) для того, чтобы сделать возможным подсчет числа оборотов или установку нуля счетчика.

Считывание для каждой дорожки осуществляется при помощи источника (электролюминесцентного диода) и приемника света (фототранзистора), расположенных с противоположных сторон диска (рейки).

Считывающее устройство размещается вдоль оси, перпендикулярной перемещению рейки, или вдоль радиуса диска.

**Определение направления перемещения.** Электронная схема позволяет, исходя из сигналов  $S_1$  дорожки 1, распознать передний  $\{\uparrow: (dS_1/dt) > 0\}$  или задний  $\{\downarrow: (dS_1/dt) < 0\}$  фронты и связать их с состоянием  $S_2$  (0 или 1) дорожки 2 в тот же момент.

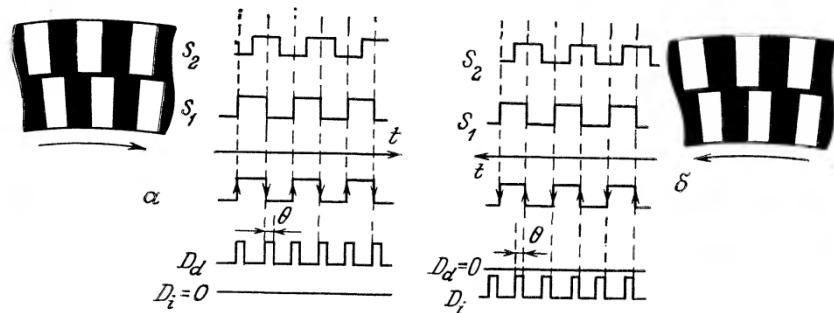


Рис. 7.35. Сопоставление фронтов импульсов дорожки  $S_1$  с состоянием дорожки  $S_2$  в соответствии со знаком перемещения.  
— прямое направление; б — обратное направление.

В самом деле, установлено (рис. 7.35, а, б), что в случае перемещения в прямом направлении имеем

$$\frac{dS_1}{dt} > 0 \text{ и } S_2 = 0, \text{ т. е. } \uparrow \cdot \bar{S}_2 = 1,$$

$$\frac{dS_1}{dt} < 0 \text{ и } S_2 = 1, \text{ т. е. } \downarrow \cdot S_2 = 1,$$

откуда получаем логическое уравнение, соответствующее прямому перемещению  $D_d$ :

$$D_d = \uparrow \cdot \bar{S}_2 + \downarrow \cdot S_2.$$

С другой стороны, в случае обратного перемещения имеем

$$\frac{dS_1}{dt} > 0 \quad \text{и} \quad S_2 = 1, \quad \text{т. е.} \quad \uparrow \cdot S_2 = 1,$$

$$\frac{dS_1}{dt} < 0 \quad \text{и} \quad S_2 = 0, \quad \text{т. е.} \quad \downarrow \cdot \bar{S}_2 = 1,$$

откуда логическое уравнение обратного перемещения  $D_i$ :

$$D_i = \uparrow \cdot S_2 + \downarrow \cdot \bar{S}_2.$$

Сопоставление фронтов  $S_1$ , с одной стороны, и состояний  $S_2$ , с другой, позволяет, таким образом, распознать знак перемещения.

Допустим, импульс 1 проявился на каждом из фронтов  $S_1$ ; в зависимости от соответствующего состояния  $S_2$ , т. е. от направления перемещения, он поступает на вход схемы сложения или на вход схемы вычитания счетчика; следовательно, счетчик показывает алгебраическую сумму перемещений, которые произошли с момента установки нуля.

Импульсы от каждого нарастающего и каждого спадающего фронтов генерируются с помощью двух одностабильных триггеров, один из которых срабатывает от нарастающих фронтов  $S_1$ , а другой — от спадающих фронтов. Решение логических уравнений направления перемещения осуществляется схемой дискриминации импульсов, формируемым этими двумя одностабильными триггерами, и подачей их либо на вход схемы сложения, либо на счетчик вычитания (рис. 7.35).