

1. Реостатные преобразователи линейных и угловых перемещений.

Реостатным преобразователем называют реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины.

Естественной входной величиной реостатных преобразователей является перемещение движка, а выходной величиной — сопротивление.

На рис. 5-7, а показано устройство реостатного преобразователя. На каркас 1 из изоляционного материала намотана с равномерным шагом проволока 2. Изоляция проволоки на верхней грани каркаса зачищается, и по металлу проволоки скользит щетка 3. Добавочная щетка 5 скользит по токосъемному кольцу 4. Обе щетки изолированы от приводного валика 6.

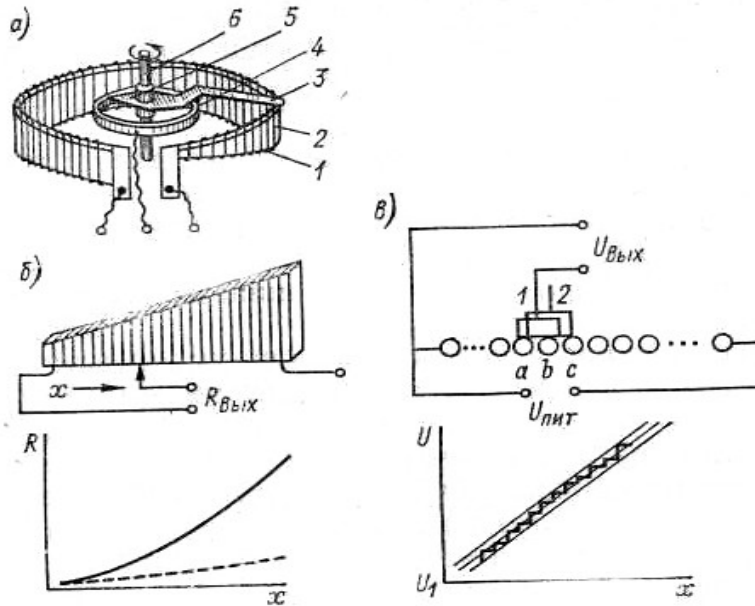


Рис. 5-7

Реостатные преобразователи выполняют как с проводом, намотанным на каркас, так и реохордного типа. Чаще всего используется провод из различных сплавов платины, обладающих повышенной коррозионной и износостойкостью; применяются также манганин, константан, фехраль.

Формы каркасов очень разнообразны: они могут быть в виде пластины, цилиндра, кольца и т. д. Выбирая форму каркаса, можно получить определенную функциональную зависимость между перемещением и выходным сопротивлением, как показано в качестве примера на рис. 5-7, б. Выходное сопротивление реостатного преобразователя, периметр каркаса p и входное перемещение x связаны между собой

зависимостью $R = \int_0^x r \omega_0 p dx$, где r — сопротивление 1 м провода;

ω_0 — число витков на единицу длины

преобразователя. Из заданной зависимости $R = f(x)$ можно определить зависимость $p = f(x)$

Реостатные преобразователи аналогично контактным являются ступенчатыми (дискретными) преобразователями (за исключением преобразователей реохордного типа), поскольку непрерывному изменению входной величины соответствует ступенчатое изменение сопротивления. При перемещении движка преобразователя на расстояние l , соответствующее ω виткам, будут иметь место 2ω ступенек, однако эти ступеньки неодинаковы по длине преобразователя.

Рассмотрим в качестве примера выходную характеристику преобразователя, включенного в режиме делителя напряжения, как показано на рис. 5-7, в. В положении 1 движок, имеющий ширину $2d$, где d — диаметр витка, замыкает накоротко витки a и b , и выходное

напряжение $U'_{\text{вых}} = \frac{nU}{\omega_0 - 2} = U \frac{n}{\omega}$, где ω_0 — полное число витков и n — число витков до витка a . При смещении движка на расстояние

$d/2$, т. е. в положение 2, движок замыкает накоротко три витка a, b и c , и выходное напряжение $U''_{\text{вых}} = U \frac{n}{\omega - 1}$, при смещении движка

еще на $d/2$ выходное напряжение $U'''_{\text{вых}} = U \frac{n+1}{\omega}$. Размер ступенек напряжения при перемещении движка на расстояние $d/2$ будет

зависеть от n : первая ступенька с увеличением n увеличивается, а вторая — уменьшается, сумма остается постоянной: $\Delta U_1 + \Delta U_2 = \frac{U}{\omega}$.

Выходное напряжение преобразователя показано на рис. 5-7, в.

Дополнительное расширение полосы неопределенности происходит за счет шума, «генерируемого» движком при его движении (вариации контактного сопротивления, временное разъединение движка и контактной дорожки, ЭДС трения и т. д.). Поэтому в целом

погрешность нуля реостатных преобразователей оценивается значением: $\pm \left(\frac{2}{\omega} \div \frac{1}{\omega} \right)$.

Измерительные цепи, в которые включаются реостатные преобразователи, питаются преимущественно постоянным напряжением, но могут питаться и переменным напряжением. Напряжение питания преобразователя определяется его допустимой мощностью (для самых малогабаритных преобразователей допустимая мощность составляет не менее 0,1 Вт) и сопротивлением. Напряжение питания, как правило, стабилизируется. Наиболее распространенным является включение преобразователя в виде управляемого делителя напряжения или включение преобразователя в измерительный мост. Номинальное изменение сопротивления реостатного преобразователя достигает 90%, поэтому необходимо учитывать нелинейность, вносимую измерительной схемой, и, исходя из допустимой погрешности линейности, выбирать сопротивление измерительного прибора.

Применяется в устройствах электроавтоматики.

2. Металлические тензорезисторы. Конструкция. Области применения.

В основе работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении сопротивления проводников и полупроводников при их механической деформации. Относительное изменение сопротивления $R = \frac{\rho l}{S}$ при деформации резистора определяется как $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S}$. Учитывая, что в твердом теле в зоне упругих деформаций величины поперечных и продольных деформаций связаны через коэффициент Пуассона μ как $\varepsilon_b = -\mu \varepsilon_l$ ($\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$, $\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b}$), где b – поперечный размер проводника, выражение для ε_R можно представить в виде $\varepsilon_R = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon_l$.

В металлах удельное сопротивление зависит только от напряжения растяжения или сжатия (рис. 5-8, а), не зависит от сдвиговых напряжений и определяется как:

$$\frac{E_1}{J_1} = \rho_1 = \rho_0(1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}\sigma_2 + \pi_{13}\sigma_3) = \rho_0[1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)],$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – механические напряжения в трех взаимно перпендикулярных направлениях; π_{11} и $\pi_{12} = \pi_{13}$ – тензорезистивные коэффициенты, называемые соответственно продольным и поперечным; E_1 и J_1 – напряженность поля и плотность тока в направлении 1, совпадающим с направлением действия напряжения σ_1 (рис. 5-8, б).

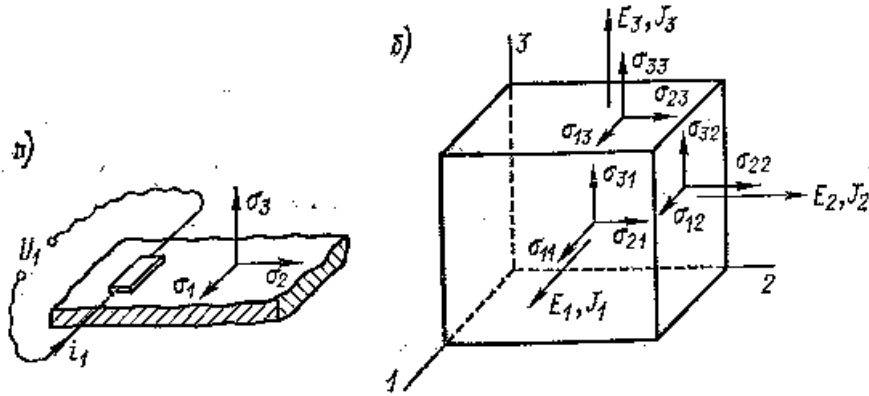


Рис. 5-8

Для металлического тензоэлемента $\pi_{11} = \pi_{22} = \pi_{33}$ и $\pi_{12} = \pi_{13} = \pi_{21} = \pi_{23} = \pi_{32}$.

Для константана, из которого чаще всего делают тензорезисторы, $\pi_{11} = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ д} \cdot \text{а}^{-1}$; $\pi_{12} = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ д} \cdot \text{а}^{-1}$.

При линейно напряженном состоянии $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi_{11}\sigma$; $\varepsilon_R = \pi_{11}\sigma + (1 + 2\mu)\varepsilon_l$.

Учитывая, что в зоне упругих деформаций $\sigma = E \varepsilon_l$, где E – модуль упругости, получим:

$$\varepsilon_R = [\pi_{11}E + (1 + 2\mu)]\varepsilon_l. \text{ Величина } K_T = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} \text{ - коэффициент тензочувствительности.}$$

При гидростатическом сжатии изменения сопротивления и давления связаны формулой

$$\varepsilon_R = - \left[\pi_{11} + 2\pi_{12} - \frac{1 - 2\mu}{E} \right] P. \text{ Коэффициент } K_P = \frac{\varepsilon_R}{P} \text{ - барический коэффициент резисторов. Барический коэффициент константана}$$

$$K_P = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ д} \cdot \text{а}^{-1}, \text{ манганина } K_P = 27 \cdot 10^{-12} \text{ д} \cdot \text{а}^{-1}.$$

При изменении температуры изменяется начальное сопротивление тензорезистора и коэффициент тензочувствительности. Таким образом, для тензорезисторов характерна температурная погрешность нуля и температурная погрешность чувствительности. Изменение начального сопротивления наклеенного тензорезистора определяется двумя факторами: изменение удельного сопротивления материала ρ непосредственно под действием температуры и изменением ρ под действием дополнительного механического напряжения, появляющегося в тензорезисторе, если коэффициенты линейного расширения детали и тензорезистора не равны. Величина кажущейся деформации под воздействием температуры определяется формулой:

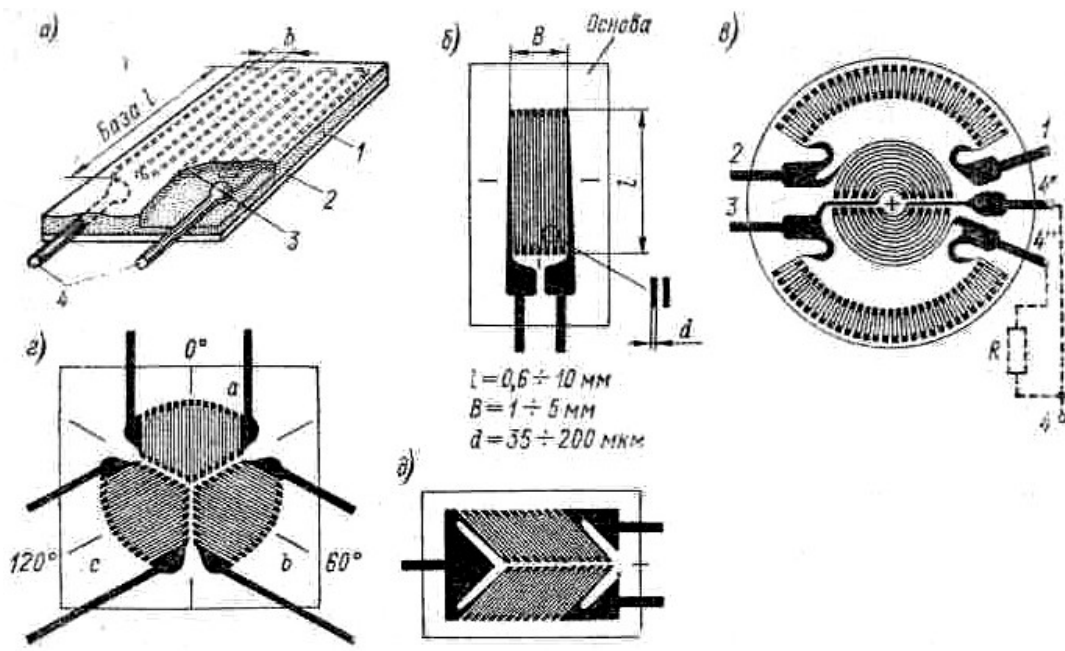
$$\Delta \varepsilon_\Theta = \left[\frac{\alpha_\Theta}{K_T} + (\beta_d - \beta_T) \right] \Theta$$

где α_Θ – ТКС тензодатчика;

β_d и β_T – коэффициенты линейного расширения материалов детали и тензодатчика.

Конструкция металлических тензорезисторов.

Устройство наиболее распространенного типа наклеиваемого проволочного тензорезистора изображено на рис. 5-12, а. На полоску тонкой бумаги или лаковую пленку 2 наклеивается так называемая решетка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки 3 диаметром 0,02 – 0,05 мм. К концам проволоки присоединяются (пайкой или сваркой) выводные медные проводники 4. Сверху преобразователь покрывается слоем лака 1. Такой преобразователь, будучи приклеенным, к испытываемой детали, воспринимает деформации ее поверхностного слоя. Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5–20 мм, обладающие сопротивлением 30–500 Ом.



Фольговые преобразователи представляют собой ленту из фольги толщиной 4—12 мкм, на которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся его часть образует решетку с выводами. Фольговые преобразователи имеют меньшие габариты, чем проволочные; известны тензорезисторы с базой до 0,8 мм.

Металлические пленочные тензорезисторы изготавливаются путем вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на основу (подложку). Форма тензорезистора задается маской, через которую производится напыление. Пленочные тензорезисторы имеют толщину меньше 1 мкм.

Весьма важным параметром тензочувствительной решетки является расстояние между витками. Это расстояние определяет при заданных габаритах резистора число витков и, следовательно, сопротивление, а также допустимый ток, который ограничивается самонагревом и будет тем меньше, чем меньше расстояние между витками.

Кроме того, наличие поперечных участков длиной b (рис. 5-12, а) вызывает изменение сопротивления тензорезистора за счет деформации этих участков при действии на деталь напряжения, перпендикулярного оси чувствительности тензорезистора. Для проволочных

тензорезисторов отношение поперечной и продольной чувствительностей определяется отношением b/l . У фольговых тензорезисторов поперечная чувствительность значительно меньше за счет расширения поперечных участков (рис. 5-12, б).

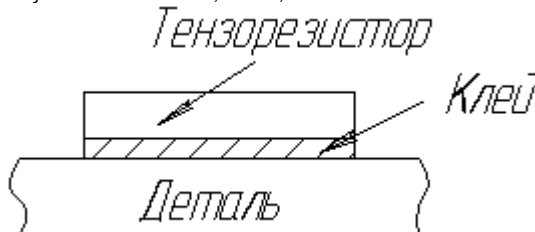
Характерные типы фольговых преобразователей показаны на рис. 5-12, в, г, д. На рис. 5-12, в, изображен элемент, состоящий из четырех тензорезисторов, образующих четыре плеча моста. Этот элемент наклеивается на мембрану Тензорезисторы, расположенные в центре, испытывают растяжение, на периферии — сжатие. К выводам 1 и 3 подводится питание, выводы 2, 4 и 4'' образуют измерительную диагональ. Выводы 4' и 4'' разомкнуты для того, чтобы можно было включить добавочный резистор R в нужное плечо и добиться подбором R равновесия моста. Розетка из трех тензорезисторов, показанная на рис. 5-12, г, применяется при измерении напряжений детали, находящейся в плосконапряженном состоянии, в том случае, когда направления действия напряжений неизвестны. По изменениям сопротивлений трех тензорезисторов определяются направления главных напряжений и их значения. Элемент, показанный на рис. 5-12, д, состоит из двух тензорезисторов и используется при измерении деформации валов при их скручивании.

Для тензорезисторов, работающих в диапазоне температур до 180°C, в качестве тензочувствительного материала используется константан. Для более высоких температур (200—1000 °C) применяются специальные сплавы.

Основа тензорезистора (рис. 5-12, а) представляет собой тонкую полоску пропитанной клеем бумаги или лаковую пленку, из этого же материала выполняется обычно и покрывка. При высокой температуре (до 400 °C) может быть применена стеклоткань, пропитанная высокотемпературным цементом.

Для крепления тензорезистора к детали чаще всего используется клей. Креплению должно уделяться очень большое внимание, так как именно через пленку клея происходит передача деформации с детали на тензорезистор и теплоотдача в деталь.

Нарушение технологии может привести к весьма существенным погрешностям, вызываемым ползучестью клея. В результате ползучести измеряемая деформация уменьшается по абсолютной величине. Значение погрешности зависит от технологии приклейки, температуры, величины деформации и в лучшем случае составляет 0,05—0,2%.



Из сравнения температурных возможностей тензочувствительного материала и клея видно, что ограничение температурного диапазона обуславливается прежде всего клеями. Поэтому для крепления высокотемпературных тензорезисторов применяются неорганические фосфатные цементы и жаростойкие окислы алюминия, наносимые на деталь методом газопламенного напыления. При таком креплении температурный диапазон ограничивается не ползучестью крепления с повышением температуры, а ухудшением изоляционных свойств цемента или окиси алюминия. Рабочий диапазон тензорезисторов ограничен температурой 350—600°C. При статических деформациях и 600—800°C при динамических деформациях. В случае измерения динамических деформаций в диапазоне температур до 1000°C применяется крепление с помощью контактной сварки.

Область применения тензорезисторов.

При всем многообразии задач, решаемых с помощью тензорезисторов, можно выделить две основные области их использования.

К первой области относятся исследования физических свойств материалов, деформаций и напряжений в деталях и конструкциях. Для этих задач характерны значительное число точек тензометрирования, широкие диапазоны изменения параметров окружающей среды, а

также невозможность градуировки измерительных каналов. Основной причиной погрешности в этих случаях является разброс параметров тензорезисторов R и КТ вокруг средних для данной партии значений, и погрешность измерения составляет 2-10%.

Вторая область — применение тензорезисторов для измерения механических величин, преобразуемых в деформацию упругого элемента. В этом случае датчики градуируются по измеряемой величине и погрешности измерений лежат в диапазоне 0,5—0,05%.

Тензорезисторы используются для измерения статических и динамических деформаций, верхняя граница частотного диапазона определяется соотношением между длиной волны λ и базой l тензорезистора. Для того чтобы не было искажения результата измерения из-за

усреднения деформации, принимается отношение $\frac{l}{\lambda} \leq 0,1$. В частности, для измерения в стальных деталях динамических деформаций с частотой до 50 кГц должны применяться тензорезисторы с базой, не большей 10 мм, так как скорость распространения ультразвука в стали v

$$= 5000 \text{ м/с и длина волны } \lambda = \frac{v}{f} = 100 \text{ м}.$$

При измерении динамических деформаций величина максимальной деформации для проволочных тензорезисторов не должна превышать $\varepsilon_l \leq 0,1\%$, для полупроводниковых $\varepsilon_l \leq 0,02\%$, так как при больших деформациях резко понижается надежность тензорезисторов.

Для повышения точности и чувствительности тензорезисторов, а также измерительных цепей к ним представляет интерес установление предельных возможностей тензорезисторов, определяемых термодинамическими флуктуациями. Тензорезистор является параметрическим преобразователем с внутренним сопротивлением R и может представлен в виде эквивалентного генератора с мощностью

короткого замыкания $P_{\dot{\varepsilon}, \zeta} = P_T \varepsilon_R^2 = P_T (K_T \varepsilon_l)^2$, где P_T — мощность, потребляемая тензорезистором. Средняя мощность термодинамического шума равна $P_{\phi} = 4kT\Delta f$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура;

Δf — полоса частот. Отсюда средняя квадратическая погрешность находится в виде:

$$\delta = \sqrt{\frac{P_{ш}}{P_{к.з.}}} = \frac{1}{K_T \varepsilon_l} \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{P_T}}.$$

.Полупроводниковые тензорезисторы. Интегральное исполнение.

Из полупроводниковых материалов для тензорезисторов используется кремний p и n -проводимости. Кремний является анизотропным материалом, и для него при одновременном воздействии электрического поля и механических напряжений растяжения—сжатия и сдвига каждая из компонент E_1 , E_2 и E_3 напряженности электрического поля (рис. 5-8, б) является функцией плотности токов, текущих во всех трех направлениях, т. е. $E_i = \varphi(J_1, J_2 \text{ и } J_3)$. Мэзоном и Тарстоном было показано, что для материала, обладающего симметрией кремния, компоненты электрического поля представляются следующими выражениями:

$$E_1/\rho_0 = J_1(1 + \pi_{1111}\sigma_{11} + \pi_{1122}\sigma_{22} + \pi_{1133}\sigma_{33}) + J_2\pi_{1212}\sigma_{12} + J_3\pi_{1313}\sigma_{13};$$

$$E_2/\rho_0 = J_2(1 + \pi_{2211}\sigma_{11} + \pi_{2222}\sigma_{22} + \pi_{2233}\sigma_{33}) + J_1\pi_{1212}\sigma_{12} + J_3\pi_{2323}\sigma_{23};$$

$$E_3/\rho_0 = J_3(1 + \pi_{3311}\sigma_{11} + \pi_{3322}\sigma_{22} + \pi_{3333}\sigma_{33}) + J_1\pi_{1313}\sigma_{13} + J_2\pi_{2323}\sigma_{23}.$$

Переходя к замене индексов (см. § 4-5) и учитывая, что вследствие симметрии для кремния равны коэффициенты $\pi_{11} = \pi_{22} = \pi_{33}$; $\pi_{12} = \pi_{23} = \pi_{13}$ и $\pi_{44} = \pi_{55} = \pi_{66}$, приведенные выражения можно записать в виде

$$E_1/\rho_0 = J_1[1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)] + \pi_{44}(J_2\sigma_6 + J_3\sigma_5);$$

$$E_2/\rho_0 = J_2[1 + \pi_{11}\sigma_2 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_3)] + \pi_{44}(J_1\sigma_6 + J_3\sigma_4);$$

$$E_3/\rho_0 = J_3[1 + \pi_{11}\sigma_3 + \pi_{12}(\sigma_1 + \sigma_2)] + \pi_{44}(J_2\sigma_4 + J_1\sigma_6).$$

Коэффициенты π_{11} , π_{12} и π_{44} называются соответственно продольным, поперечным и сдвиговым тензорезистивными коэффициентами. Если тензоэлемент вырезан вдоль одной из кристаллографических осей, например вдоль оси I , и напряжение приложено вдоль той же оси, то $E_1/\rho_0 = J_1(1 + \pi_{11}\sigma_1)$. Если тензоэлемент ориентирован произвольно относительно кристаллографических осей (см. рис. 4-9), то для него продольный коэффициент определяется формулой

$$\pi'_{11} = \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l^2m^2 + l^2n^2 + m^2n^2),$$

где l , m и n — направляющие косинусы.

Таким образом, тензорезистивный коэффициент π'_{11} определяется не только коэффициентами π_{11} , π_{12} и π_{44} , но и ориентацией тензоэлемента относительно кристаллографических осей.

Значения тензорезистивных коэффициентов зависят от концентрации примесей в кремнии и однозначно связаны с удельным сопротивлением кремния. Для p -кремния ($\rho = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) $\pi_{44} = 94,5 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$; $\pi_{11} = 0,048 \pi_{44} = 4,53 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$; $\pi_{12} = -0,008 \pi_{44} = 0,75 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$; для n -кремния ($\rho = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) $\pi_{11} = -72,6 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$; $\pi_{12} \approx \approx -0,52\pi_{11} = 38 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ и $\pi_{44} = 0,13 \pi_{11} = -9,5 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$.

Тензоэлемент из кремния n -типа вырезается обычно, как показано на рис. 5-9, а, в направлении кристаллографической оси I , т. е. в направлении, обозначаемом $[100]$. (Символ любого вектора или оси определяется заключенными в квадратные скобки величинами проекций вектора на соответствующие кристаллографические оси, расположенные в порядке 1, 2 и 3 и называемые x_1 , x_2 , x_3 или X , Y , Z .) Тензо-

элементы из кремния *p*-типа (рис. 5-9, б) в направлении оси [111] имеют максимальную чувствительность, тензоэлементы в направлении оси [110] имеют одинаковые по значению, но противоположные по знаку тензорезистивные коэффициенты π'_{11} и π'_{12} , у тензоэлементов, выполненных в плоскости *D*, независимые от углового положения тензорезистивные коэффициенты, у тензоэлементов, расположенных вдоль оси [100] или [010], минимальные тензорезистивные коэффициенты.

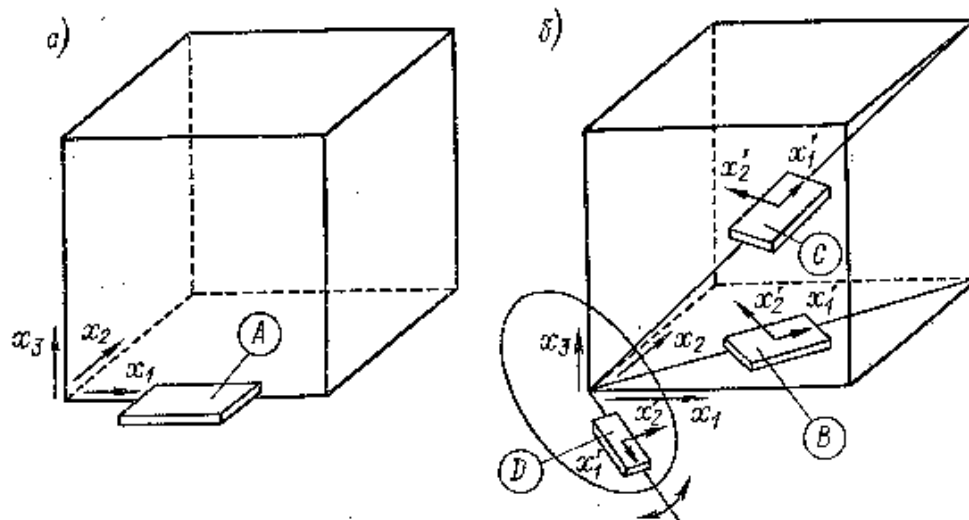


Рис. 5-9

Значения тензорезистивных коэффициентов приведены в табл. 5-1.

Таблица 5-1

Тензоэлемент	Значение коэффициентов			
	$\pi'_{11},$ 10^{-11} Па^{-1}	$\pi'_{12},$ 10^{-11} Па^{-1}	$K_T \approx K_\rho =$ $= E\pi'_{11}$	$K_\rho,$ 10^{-11} Па^{-1}
<i>n</i> -Si $\rho = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ A [100]	-72,6	37,6	-95,3	-2,9
<i>p</i> -Si $\rho = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ $\pi_{44} = 94,5 \times$ $\times 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$	B [110]	49,14	-45,3	83,5
	C [111]	64,0	-30,5	94,2
	D	49,1	-15,6	92,7
	A [100]	4,5	-0,75	-
				-3,0

При линейно напряженном состоянии чувствительность полупроводникового тензоэлемента, так же как и металлического, оценивается коэффициентом тензочувствительности $K_T = \epsilon_R/\epsilon_l$, однако значение этого коэффициента почти полностью определяется тензорезистивным эффектом, т. е. $K_T \approx K_\rho$. Действительно, $K_T = \pi'_{11}E' + 1 + 2\mu$. Для оси [111] $1/E' = 64,0 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$; $\pi'_{11} = 6,85 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$; $\mu = 0,256$; $K_T = 94,2 + 1,5 = 95,7$, что мало отличается от $K_\rho = 94,2$.

Значения коэффициентов тензочувствительности K_T и барических коэффициентов K_ρ также приведены в табл. 5-1. Тензорезистивные

Таким образом, кажущаяся деформация тензорезистора, наклеенного на сталь, составляет примерно $\Delta \varepsilon_{\theta} = (7,4 + 8,5)10^{-6} \approx 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что приводит при максимальной измеряемой деформации $\varepsilon_t = 10^{-3}$ к температурной погрешности нуля $\gamma_{\theta} = 0,016 \text{ K}^{-1}$.

Температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) определяется изменением коэффициентов тензочувствительности под действием температуры. Как видно из приводимой ниже табл. 5-2, для константовых тензорезисторов ТКЧ очень мал и составляет $\gamma_S = -0,00003 \text{ K}^{-1}$, для полупроводниковых тензорезисторов из кремния *p*-типа ТКЧ достигает $\gamma_S = -0,0016 \text{ K}^{-1}$.

Полупроводниковые тензорезисторы дискретного типа представляют собой тонкие полоски из кремния *p*-типа, вырезанные в направлении оси [111], или из кремния *n*-типа, вырезанные в направлении оси [100]; применяется также германий *p* и *n*-типов. На концах полоски расположены контактные площадки, к которым припаиваются выводы; длина контактной площадки 0,25—0,6 мм. Полупроводниковые тензорезисторы имеют длину 2—12 мм, ширину 0,15—0,5 мм. Начальные сопротивления тензорезисторов лежат в диапазоне 50—10 000 Ом, коэффициент тензочувствительности $K_T = 50 \div 200$.

Вследствие очень больших температурных погрешностей дискретные полупроводниковые тензорезисторы находят применение только для измерения очень малых динамических деформаций, где решающим фактором является коэффициент тензочувствительности.

Конструкции интегральных полупроводниковых тензорезисторов. В последние годы благодаря широкому развитию планарной технологии появилась возможность изготавливать датчики с полупроводниковыми тензорезисторами, выращивая последние непосредственно на упругом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы из кристаллических материалов обладают упругими свойствами, близкими к идеальным, и существенно меньшими погрешностями гистерезиса и линейности по сравнению с металлическими. Тензорезистор «сцепляется» с материалом упругого элемента за счет внутримолекулярных сил, что исключает все погрешности, связанные с передачей деформации от упругого элемента к тензорезистору. На одном упругом элементе выращивается обычно не один тензорезистор, а структура в виде полумоста или даже целый мост и, кроме того, термокомпенсирующие элементы. Благодаря применяемой технологии два тензорезистора, входящие в полумост, обладают значительно большей идентичностью, чем дискретные резисторы; кроме того, благодаря малым габаритам тензорезисторов обеспечивается большая идентичность внешних условий и, таким образом, существенно снижаются погрешности нуля. Все это ведет к широкому развитию в последние годы датчиков с так называемыми интегральными тензорези-

сторами, выполняемых в виде КНК-структур (кремний на кремнии) и КНС-структур (кремний на сапфире). В КНК-структурах электрическая изоляция осуществляется *p-n*-переходом, несовершенство изоляционных свойств которого ограничивает надежность датчиков; датчики с КНС-структурами обладают большей стабильностью характеристик. КНС-структура положена, например, в основу датчиков давления, входящих в приборный комплекс «Сапфир-22», разработанный НИИ «Теплоприбор».

4. Индуктивные преобразователи линейных величин.

Типы индуктивных преобразователей. На рис.1, а изображен наиболее распространенный преобразователь с малым воздушным зазором δ , который изменяется под действием измеряемой величины P . Рабочее перемещение в преобразователях с переменным зазором составляет 0,01—10 мм. В этих преобразователях могут быть использованы ферритовые элементы 2 (рис.1, б), выпускаемые промышленностью; для изготовления подвижного сердечника 1 используется основание такого же элемента 2, стенки которого сошлифовываются. На рис.1, в изображен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он представляет собой катушку 1, внутри которой помещен стальной сердечник 2. Перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности катушки. Этот тип преобразователя применяется для измерения значительных перемещений сердечника (10—100 мм).

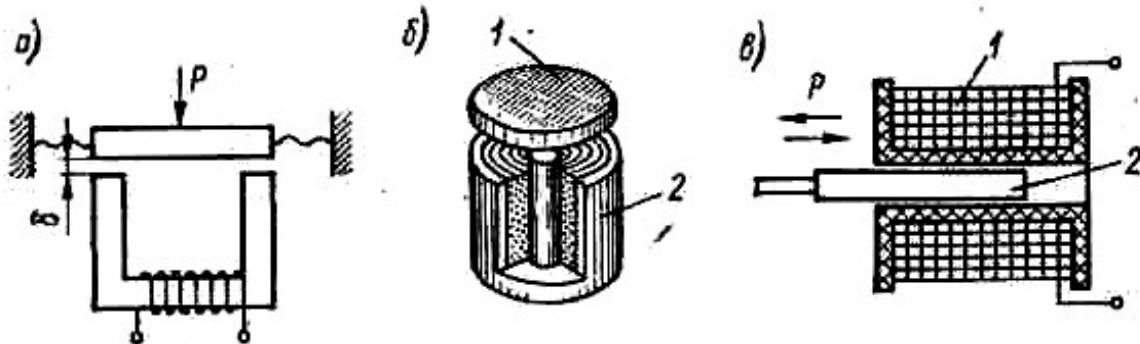


Рис. 1

Одним из основных достоинств индуктивных преобразователей является возможность получения большой мощности преобразователя (до 1—5 В·А), что позволяет пользоваться сравнительно малочувствительным указателем на выходе измерительной цепи и регистрировать измеряемую переменную величину самописцем или вибратором осциллографа без предварительного усиления. Лишь при малогабаритных преобразователях приходится прибегать к включению усилителя.

При перемещении якоря под действием силы изменяется воздушный зазор δ , следовательно, меняется сопротивление магнитной цепи, что приводит к изменению индуктивности L по гиперболическому закону и нелинейности характеристики:

$$L = \mu_0 \frac{w^2 S}{\delta}$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздушного зазора,

w — число витков обмотки,

S — площадь поперечного магнитопровода.

Электрическое сопротивление индуктивного преобразователя (рис.1, а), если считать, что все сопротивление утечки $R_{ут}$ включено параллельно зазору, выразится формулой:

$$Z = R_0 + j \frac{\omega w^2}{R_M + jX_M + R_\delta \parallel R_{ут}} = R_0 + j \frac{\omega w^2}{R_M + jX_M + \frac{\delta}{\mu_0 S} \parallel R_{ут}} =$$

$$= \left[R_0 + \frac{\omega w^2 X_M}{\sqrt{(R_M + R_\delta \parallel R_{ут})^2 + X_M^2}} \right] + j \frac{\omega w^2 \left(R_M + \frac{\delta}{\mu_0 S} \parallel R_{ут} \right)}{\sqrt{(R_M + R_\delta \parallel R_{ут})^2 + X_M^2}}$$

Из этой формулы видно, что Z связано с длиной δ воздушного зазора зависимостью, близкой к гиперболической. С увеличением зазора δ , следовательно, сопротивления R_0 полное электрическое сопротивление уменьшается так, как показано на рис.2, а: от

$Z_{max} = \left[R_0 + j \omega w^2 / (R_M + jX_M) \right]$ при бесконечно малом зазоре до $Z_{min} = \left[R_0 + j \omega w^2 / (R_M + jX_M + R_{\delta\delta}) \right]$ при бесконечно

большом зазоре. Линейный участок характеристики преобразователя с начальным зазором δ_0 ограничен значением $\Delta\delta$, равным $(0,1 \pm 0,15) \delta_0$. Относительное изменение сопротивления $\Delta Z/Z$ из-за наличия активного сопротивления обмотки, потока утечки и магнитного сопротивления магнитопровода в 2—5 раз меньше относительного изменения зазора $\epsilon\delta = \Delta\delta/\delta_0$. Кроме того, следует обратить внимание на то,

что при изменении сопротивления зазора R_δ изменяется не только реактивная $X = \omega w^2 (R_M + R_\delta \parallel R_{\delta\delta}) / Z_M^2$, но и активная

$R = R_0 + \omega w^2 X_M / Z_M^2$ составляющая сопротивления Z , и вектор сопротивления изменяется так, как показано на рис.2, б.

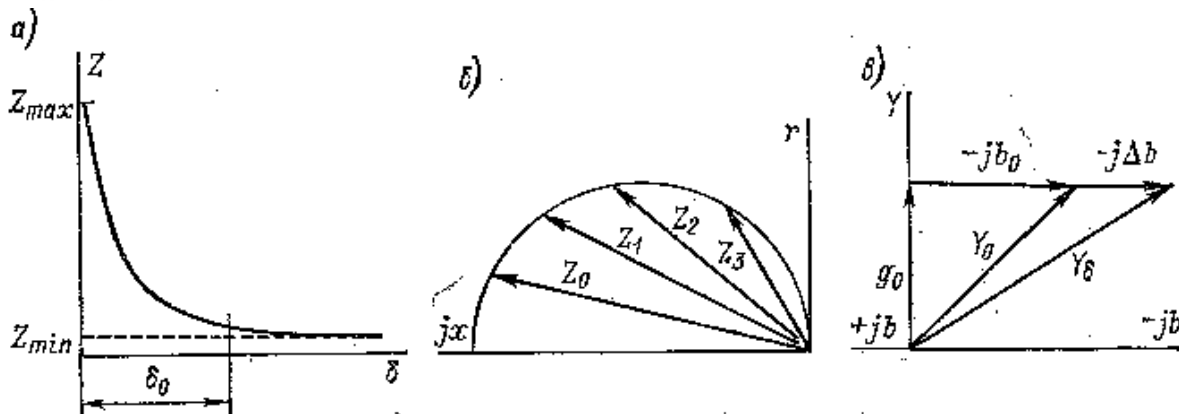


Рис.2

Расширения линейного участка характеристики можно добиться, если выбрать в качестве выходной величины преобразователя не сопротивление Z , а проводимость Y , которая (если пренебречь сопротивлением R) связана с изменением зазора как

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{Z_M}{j\omega w^2} = \frac{1}{j\omega w^2} \left(R_M + jX_M + \frac{\delta}{\mu_0 S} \| R_{YT} \right)$$

Изменение проводимости при относительном изменении зазора $\varepsilon\delta = \Delta\delta/\delta_0$ составит

$$\Delta Y = \frac{R_{\delta_0} \varepsilon_\delta}{j\omega w^2} \frac{1}{(1 + R_{\delta_0} \| R_{YT}) [1 + (1 + \varepsilon_\delta) (R_{\delta_0} \| R_{YT})]}$$

и будет почти линейно связано с изменением зазора, в особенности при $R_{YT} \gg R\delta$. Уравнение можно представить как

$$Y = \frac{X_M}{\omega w^2} - j \frac{R_M}{\omega w^2} - j \frac{R_{\delta_0} \| R_{YT}}{\omega w^2}$$

откуда очевидно, что соответствующий вектор параллелен мнимой оси и сохраняет свое направление вне зависимости от изменения параметров, так как изменяются обе его составляющие.

Существенно уменьшить погрешности и увеличить линейный участок характеристики позволяет применение дифференциальных преобразователей. Поэтому в практике индуктивные преобразователи всегда выполняются дифференциальными. На рис. 8-31,а показана схематическая конструкция преобразователя для измерения малых перемещений, на рис. 8-31,б — для измерения больших перемещений. В том и другом преобразователе происходит перемещение сердечника 1 и при перемещении в направлении стрелки — увеличение сопротивления Z_2 и уменьшение сопротивления Z_1 .

Измерительные цепи индуктивных преобразователей.

Индуктивные преобразователи могут быть следующих видов: с переменной длиной воздушного зазора; с изменяющимся сечением воздушного зазора; дифференциальные; дифференциальные трансформаторные; дифференциальные трансформаторные с разомкнутой магнитной цепью и магнитоупругие.

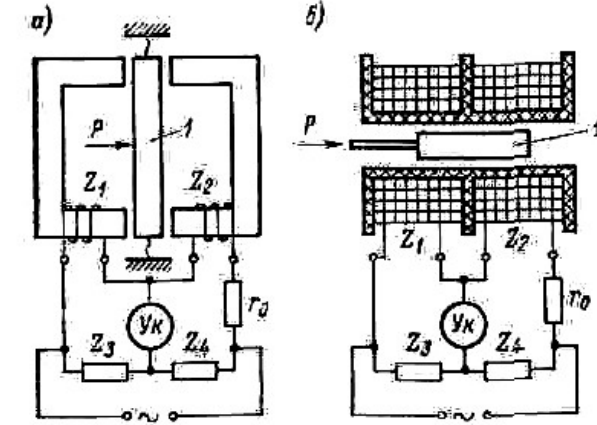


Рис. 8-31

Наиболее распространенной измерительной цепью является неравновесный измерительный мост, в два плеча которого включены две половины дифференциального преобразователя (рис. 8-31). С измеряемой величиной линейно связана проводимость преобразователя. Поэтому оптимальным является включение преобразователей параллельно источнику и питание моста от источника напряжения. Уравновешивание моста в начальном положении, т. е. при отсутствии входной величины (технологически трудно получить точное равенство сопротивлений двух половин преобразователя), производится по двум составляющим — изменением сопротивления нерабочего плеча Z_3 или Z_4 и изменением сопротивления R_0 , включаемого в плечо, имеющее меньшее активное сопротивление. Если при $\Delta\delta=0$ цепь была уравновешена, то при $\Delta\delta \neq 0$ через указатель потечет ток, равный $I_{Yk} = U\Delta Y$, где ΔY — приращение электрической проводимости преобразователя.

Ток I_{Yk} сдвинут по фазе относительно напряжения питания. Угол сдвига $\varphi=90^\circ$, если $R_{Yk} \rightarrow 0$ и $\varphi=0$ при $R_{Yk} \rightarrow \infty$; при согласовании сопротивления указателя с выходным сопротивлением моста $\varphi=45^\circ$. Это обстоятельство необходимо учитывать при наличии в измерительной цепи фазочувствительных устройств.

5. Методы измерения линейных и угловых величин (характеристики измеряемых величин, классификация методов измерения).

Измерения линейных и угловых величин весьма распространены, широко применяются в машиностроении, геодезии, в военном деле, космонавтике, астрономии и т.д. Например, в машиностроении они составляют 80% от всех производимых измерений. Широкое распространение измерений линейных и угловых размеров обусловлено тем, что наиболее используемые методы измерений ряда физических величин, таких, как механическое напряжение, сила, момент, давление, параметры движения, основаны на промежуточном преобразовании этих величин в угловое или линейное перемещение и измерении этих перемещений. Кроме того, выходной величиной всех аналоговых измерительных приборов является линейное или угловое перемещение указателя показывающего или регистрирующего устройства и погрешность определения этого перемещения — одна из основных погрешностей прибора.

Современная практика требует измерения линейных размеров в очень широком диапазоне (10^{-15} - 10^{23} м). Угловые размеры чаще всего ограничены полной окружностью, и требуемый диапазон их измерений составляет $0,0001''$ — 360° (или 2π радиан). Нижний предел измерений линейных размеров 10^{-15} м соответствует размерам микрочастиц (радиусы атомных ядер лежат в пределах 10^{-15} — $6 \cdot 10^{-15}$ м) и длинам волн рентгеновского и гамма-излучения.

Относительная нестабильность длин волн лучших лазеров не менее 10^{-11} , а возможная для измерения доля интерференционной полосы составляет 10^{-9} , что в видимой области спектра ($\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м) соответствует нижнему теоретическому пределу измерения длины $3 \cdot 10^{-27}$ м. Однако, из-за тепловых флуктуаций, дробового эффекта, квантовых пределов малых перемещений и других помех нижний предел измеряемых длин в настоящее время составляет $3 \cdot 10^{-12}$ м, а угловых размеров — $0,0001''$. Верхний предел измерения длин определяется размерами галактик, которые предположительно составляют 20-200 млрд. световых лет ($2 \cdot 10^{26}$ — $2 \cdot 10^{27}$ м).

Наиболее часто встречающиеся задачи измерения линейных и угловых размеров можно разделить на следующие группы:

1) Воспроизведение и измерение сверхмалых длин и перемещений (менее 10^{-10} м), которые необходимо выполнять при создании эталонных мер единицы длины с относительной погрешностью менее 10^{-6} , при измерении толщин мономолекулярных пленок, при создании средств измерений очень малых сил (10^{-12} Н и менее), при которых надо регистрировать смещения порядка 10^{-18} м, при детектировании гравитационных волн, исследовании структуры вещества и микрочастиц, определении межатомных расстояний в совершенных монокристаллах, при точном определении числа Авогадро и других экспериментальных исследованиях.

2) Измерение линейных размеров в диапазоне от 0,01 мкм до нескольких десятков метров и угловых размеров от $0,1''$ до 360° , которые имеют место в машиностроении и приборостроении. Наиболее часто встречающиеся задачи этой группы — измерение параметров шероховатости, являющейся модификацией длины; измерение отклонений размера от заданного значения; измерение диаметров отверстий, параметров зубчатых передач, толщины деталей и изделий, в том числе при одностороннем доступе, например, измерение толщины различных антикоррозионных покрытий. В связи с развитием микроэлектронной элементной базы возникают сложные задачи измерения толщины покрытий и микропленок из полупроводниковых, изоляционных и проводящих материалов, а также толщины многослойных изделий и структур в диапазоне $2 \cdot 10^{-9}$ — 10^{-5} м.

3) Измерение размеров в диапазоне от 0,001 м до сотен метров при определении уровней жидких и сыпучих веществ в различных резервуарах и скважинах, уровня горючего в баках различных транспортных средств, разности уровней верхнего и нижнего бьефов платины, в строительстве, в геодезии и т. д.

4) Определение координат объектов и расстояний между объектами, в том числе и космическими, которые лежат в пределах от долей микрометра до многих миллиардов километров и более.

Измерение линейных и угловых размеров обычно связано с определением координат границ раздела отдельных объектов, веществ, сред и фаз, отличающихся по каким-то параметрам. Поэтому многие методы и средства измерений размеров основаны на использовании свойств различных сред или объектов, образующих границы измеряемого размера.

Основные электрические методы и соответствующие средства измерения линейных и угловых размеров в зависимости от наличия или отсутствия механического контакта между объектом и средством измерений разделяются на контактные и неконтактные. В зависимости от принципа измерительного преобразования методы делятся на электромеханические, электрофизические и спектрометрические (волновые).

Электромеханические методы в зависимости от используемого вида первичного преобразователя разделяются на резистивные, индуктивные, емкостные, оптоэлектронные, обкатывания и т. д.

Электрофизические методы в зависимости от используемого физического свойства вещества или явления делятся на электроиндуктометрические, теплоиндуктометрические, магнитные, емкостные, электромагнитные, многопараметрические и т. д.

Спектрометрические (волновые) методы и соответствующие средства измерений обычно указываются два или несколько признаков, например в зависимости от длины волны используемого излучения на звуковые, ультразвуковые, радиоволновые, СВЧ, оптические (лазерные), рентгеновские, радиоактивные. С другой стороны, в зависимости от используемого явления или комбинации явлений спектрометрические методы разделяются на локационные, интерферометрические, голографические, доплеровские и др.

При наименовании метода или соответствующего средства измерений обычно указываются два или несколько признаков, например рентгеновский интерферометр, лазерный рефрактометр и т. д. По назначению рассматриваемые средства измерений разделяются на микрометры, миниметры, толщинометры, профилометры, уровнемеры, глубиномеры, путемеры, угломеры, гониометры и т. д.

6. Контактные преобразователи и преобразователи контактного сопротивления

Электроконтактный преобразователь – это устройство, преобразующее линейное перемещение измерительного стержня в электрический сигнал – команду путем замыкания электрических контактов.

По своему назначению электроконтактные преобразователи подразделяются на три основные группы, и от того, к которой из этих групп относится преобразователь, зависит порядок его расчета и выбор конструкции.

К первой группе относятся преобразователи, обеспечивающие относительно невысокую точность фиксации положения поверхности контролируемого тела (порядка нескольких мкм). Такие преобразователи (путевые выключатели, микропереключатели и т. д.) обеспечивают установку узлов машин в требуемом положении, остановку объекта контроля на измерительной позиции и т. д. С их помощью проводят включение и выключение электрических цепей, управляющих работой электромагнитов, реле, а в некоторых случаях – двигателей. Большая допустимая погрешность фиксации положения поверхности контролируемого тела позволяет нагружать электроконтакты таких преобразователей большими токами и использовать их для включения и выключения цепей со значительными напряжениями и содержащими большие индуктивности.

Ко второй группе относятся преобразователи контроля размеров изделий, обеспечивающие более высокую точность релейного преобразования перемещения в электрическое сопротивление. Погрешность преобразования обычно не должна превышать 1-2 мкм, а в ряде случаев должна быть значительно меньше. Такие электроконтактные устройства с целью сохранения формы и размеров контактов нельзя нагружать большими токами и использовать в цепях с высокими напряжениями и большой индуктивностью. Преобразователи этой группы, например, включают в электроконтактные измерительные головки, которые, в свою очередь, подразделяются на предельные (для контроля размеров деталей в контрольных приспособлениях, контрольно – сортировочных автоматах и т. д.) и амплитудные (для контроля отклонений формы деталей от правильной).

К третьей группе относятся преобразователи, реагирующие не на механическое перемещение, а на другие величины, например, ускорение или магнитное поле, позволяющее использовать электроконтакты, находящиеся в герметически закрытом баллоне, из которого откачен воздух, и который заполняется инертным газом. Примером преобразователей этой группы являются герконы. Они применяются в электрических реле (управляются внешним магнитным полем), а также для контроля ускорений и связанных с ними величин (амплитуды, частоты вибрации и т. д.).

Контактными называются измерительные преобразователи незлектрических величин, в которых измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Таким образом, естественной выходной величиной контактных преобразователей является перемещение.

Одноопредельный контактный преобразователь показан на рис.1, а и имеет одну пару контактов 4 и 5, замыкание которых происходит в функции измеряемого перемещения, например изменения размера изделия 1. При увеличении размера изделия шток 3 переместится в направляющих 2 и укрепленный на нем контакт 4 войдет в соприкосновение с контактом 5. При этом сопротивление между контактами 4 и 5 изменится от бесконечности до малого значения, определяемого значением контактного сопротивления.

В измерительной технике в цепях коммутации широко применяются магнитоуправляемые контакты, называемые герконами. В стеклянном баллоне, имеющем диаметр около 3 мм и длину около 20 мм, помещаются контактные пластины. Переключаемые токи составляют $5 \cdot 10^{-6}$ – 0,5 А при напряжениях до 220 В. Исследования, проведенные Я. Б. Петерсоном, показали, что сопротивление между контактами в замкнутом состоянии не превышает 0,1 Ом, в разомкнутом состоянии — не менее 109 Ом, емкость между контактами 0,4пФ, индуктивность 0,5—1,5 мкГн. При замыкании контактов наблюдается в среднем шесть отскоков, и время дребезга контактов составляет 100—120 мкс. Дребезг контактов приводит к возникновению дополнительного шума. Кроме того, при наличии разницы температур между выводами контакта приходится учитывать термо-ЭДС, которая составляет около 40 мкВ при температурном градиенте 1 К.

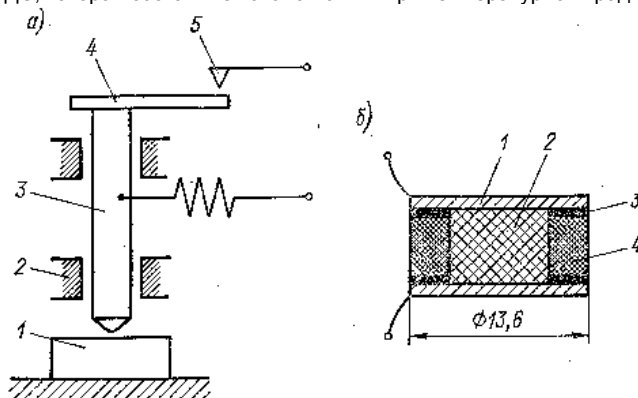


Рис.1

Преобразователи контактного сопротивления основаны на изменении под действием давления сопротивления между проводящими элементами, разделенными слоями полупроводящего материала. Преобразователь может быть выполнен в виде столбика из ряда слоев

электропроводящей бумаги, электропроводящей резины или металлических пластин, на которые путем напыления нанесен высокоомный резистивный слой. Преобразователи контактного сопротивления имеют большие погрешности гистерезиса и линейности (до 10%), но очень просты конструктивно, имеют высокую надежность и достаточную выходную мощность. На рис. 1, б показана схематическая конструкция преобразователя, применяемого в биоэлектрическом протезе, где 1 — электрод; 2 — электропроводящая пластина; 3 — клей; 4 — изолятор из резины. При изменении давления от 0 до 10^5 Па сопротивление изменяется от 100 до 2 кОм при деформации чувствительного элемента до 50%, допустимая мощность рассеяния 0,5 Вт. Подобные преобразователи используются в тактильных датчиках роботов и манипуляторов.

7. Термоэлектрические преобразователи (принцип действия, их измерительные цепи).

Явление термоэлектричества было открыто в 1823 г. Зеебеком и заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами (рис. 1), причем температуру Θ_1 одного места соединения сделать отличной от температуры Θ_0 другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников: $E_{AB}(\Theta_0, \Theta_1) = f(\Theta_1) - f(\Theta_0)$

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или иначе термопарой; проводники, составляющие термопару, — термоэлектродами, а места их соединения — спаями.

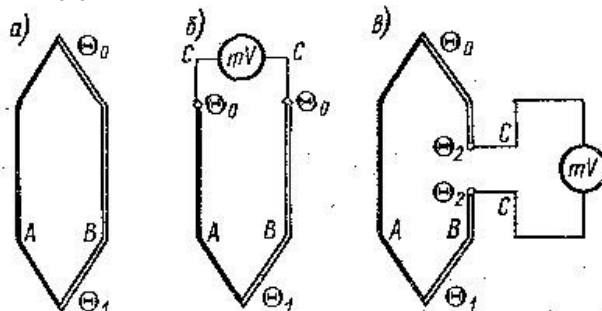


Рис.1.

Термо-ЭДС при небольшом перепаде температур между спаями можно считать пропорциональной разности температур:

$$E_{AB} = S_{AB} \Delta\Theta$$

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников, значение термо-ЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температуры вдоль проводников. Термоэлектрический контур можно разомкнуть в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников. Если все появившиеся при этом места соединений находятся при одинаковой температуре, то не возникает никаких паразитных термо-ЭДС.

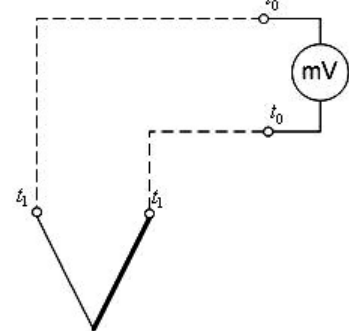
Можно разомкнуть контур в месте контактирования термоэлектродов А и В и вставить дополнительный проводник С между ними (рис. 1,б). Значение термо-ЭДС в этом случае определится как $E = E_{AB}(\Theta_1) + E_{BC}(\Theta_0) + E_{CA}(\Theta_0) = E_{AB}(\Theta_1) + E_{BA}(\Theta_0) = E_{AB}(\Theta_1) - E_{AB}(\Theta_0)$, так как если два любых проводника А и

В имеют по отношению к третьему С термо-ЭДС E_{AC} и E_{BC} , то термо-ЭДС термопары АВ равна $E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$.

Можно разорвать также один из термоэлектродов и вставить дополнительный проводник в место разрыва (рис. 1, в). Значение термо-ЭДС в этом случае будет тем же, что и в предыдущем. Действительно: $E = E_{AB}(\Theta_1) + E_{BC}(\Theta_2) + E_{CB}(\Theta_2) + E_{BA}(\Theta_0) = E_{AB}(\Theta_1) - E_{AB}(\Theta_0)$.

Таким образом, прибор для измерения термо-ЭДС может быть включен как между свободными концами термопары, так и в разрыв одного из термоэлектродов.

Конструктивно термопара представляет собой две проволоки из разнородных металлов, нагреваемые концы которых скручиваются, а затем свариваются или спаиваются. Как правило, горячий спай промышленных термопар изготавливается сваркой. Пайка применяется редко и только при изготовлении нестандартных лабораторных термопар из очень тонких проволок.



Для правильного измерения необходимо соблюдать равенство температур t в точках t_1 и t_0 . Это равенство обеспечивается тем, что точки t_1 и t_0 помещаются близко одна к другой в головке термопары. Спаи с температурой t_0 удалены от головки термопары на длину термоэлектродных проводов, что обеспечивает их термостатирование. Далее до измерительного прибора можно применять медные провода. Как правило, соединительные провода для термопар изготавливают из неблагородных металлов (из тех же материалов, что и сами термоэлектроды).

Создаваемая термо-ЭДС невелика: она составляет $E \approx 70 \text{ мВ}$. При измерении термо-ЭДС необходимо применять высокочувствительные измерительные приборы.

При измерении температуры в широком диапазоне необходимо учитывать нелинейность функции преобразования ТЭП. Например, функция преобразования медь-константановых термопар в диапазоне температур -200 до $+3000^\circ\text{C}$ с погрешностью $\pm 2 \text{ мВ}$ описывается следующей эмпирической

формулой $E = At + Bt^2 + Ct^3$. А, В и С – постоянные величины, определяемые путем измерения термо-ЭДС трех известных температурах; t – температура рабочего спая ($t_0=0^\circ\text{C}$).

Для всех стандартных термопар имеются градуировочные таблицы.

Термопары позволяют измерять температуру от -200 до $+2200^\circ\text{C}$.

- до 1100°C используют термопары из неблагородных металлов (хромель-алюмель, медь-константан);
- от 1100°C – из благородных металлов и металлов платиновой группы;
- выше 1600°C применяются термопары из жаростойких сплавов (на основе вольфрама - ВР 5/20).

Термосопротивления.

Омическое сопротивление проводников и полупроводников представляет собой некоторую функцию от температуры, т.е. $R = f(t)$. Вид этой функции зависит от природы материала. Измеряя сопротивление нагретого проводника или полупроводника одним из известных методов и зная вид функции $R = f(t)$ для данного материала, можно определить его температуру, а следовательно, и температуру пространства или среды, в которую он помещен.

Термопреобразователями называются сопротивления, выполненные из материала, свойства которых в значительной степени зависят от температуры.

Чувствительность термосопротивлений к изменению температуры характеризуется температурным коэффициентом электросопротивления α , который выражает относительное изменение сопротивления на единицу приращения температуры

$$\alpha = \frac{\Delta R/R}{\Delta T} = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} \approx \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

Зависимость сопротивления от температуры определяется теплообменом между материалом и средой, в которой он находится. Теплообмен между термосопротивлением и окружающей средой осуществляется различными способами: конвекцией, теплопроводностью среды и самого материала, а также излучением.

Интенсивность режима обмена зависит от:

- температуры жидкой и газовой среды;
- физических свойств среды (плотность, теплопроводность);
- скорости перемещения среды;
- геометрических размеров термосопротивления.

Зависимость сопротивления материала от указанных свойств можно использовать для измерения различных неэлектрических величин, характеризующих газовую, жидкую или дисперсную среду: скорость, температура, концентрация, теплопроводность.

Термосопротивления применяются в качестве первичных преобразователей (датчиков) в различных устройствах автоматики.

Приборы для измерения температуры, в которых в качестве преобразователя используются термосопротивления, называются термометрами сопротивления. Такие термометры, в отличие от манометрических термометров, обладают рядом преимуществ:

- более высокой точности;
- имеется возможность централизации контроля температуры путем присоединения к одному измерительному прибору нескольких термометров;
- обладают меньшим запаздыванием в показаниях.

Недостаток термометров сопротивления – необходимость во внешнем источнике питания.

Основным требованием к материалам, применяемым для преобразователей термометров сопротивления, является возможно больший и стабильный температурный коэффициент сопротивления при достаточно большом удельном сопротивлении. Для изготовления термосопротивления применяются чистые металлы (платина, медь) и полупроводники.

Металлические термосопротивления – терморезисторы – изготавливаются из чистых металлов: меди, железа, никеля, платины. Сопротивление чистых металлов монотонно возрастает с увеличением температуры. Эта зависимость отличается стабильностью и приблизительно подчиняется линейному закону до температуры 100-2000С. Для многих металлов зависимость $R = f(t)$ может быть представлена в виде:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots), \text{ где}$$

α - ТКС металла ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Коэффициенты α_i убывают с возрастанием показателя степени температуры. Для температур значительно меньших температуры плавления, слагаемыми степени выше 1-й можно пренебречь, т.е.:

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

Подчинение линейному закону изменения сопротивления чистых металлов при изменении температуры дает возможность легко справиться с градуировкой терморезисторов, т.к. шкала измерительного прибора при этом получается равномерной.

В случае наличия примесей в металле их сопротивление от температуры изменяется не линейно и значительно отличается от линейного закона. Поэтому сплавы для изготовления терморезисторов не применяются.

Наиболее стабильным и часто применяемым в автоматике является платиновое сопротивление, его характеристика в диапазоне от 50 до 600 $^{\circ}\text{C}$ выражается формулой:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \text{ где}$$

$$A = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$$

$$B = -5,8 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-2}$$

Полупроводниковые термосопротивления изготавливаются из окислов металлов (окиси меди, никеля, марганца, магния), а также из сульфидов, нитридов, и карбидов этих металлов.

Удельное сопротивление таких полупроводников зависит от их состава, но оно оказывается всегда больше сопротивления металлов и может превышать удельное сопротивление металлов в 10-100 раз. Кроме того, вследствие малой проводимости полупроводников из них можно изготавливать термометры малых размеров с большим начальным сопротивлением, что позволяет не учитывать сопротивление соединительных проводов и других элементов электрической схемы термометра. Сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры, поэтому ТКС - отрицателен.

В узком температурном интервале зависимость термистров (полупроводниковых термосопротивлений) от температуры нелинейна:

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right), \text{ где}$$

A и B - постоянные коэффициенты, зависящие от физических свойств материала полупроводника, размеров и формы термистра.

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \text{ и } A = R_1 \cdot \exp\left(-\frac{B}{T_1}\right)$$

Чувствительность термистров к изменению температуры значительно выше, чем для терморезисторов. Так, если для металлов $\alpha = (4 \div 6) \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, то для полупроводников $\alpha \approx -40 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Недостатками полупроводниковых термосопротивлений являются:

- нелинейная зависимость сопротивления от температуры;
- слабая воспроизводимость свойств полупроводников, что исключает их взаимозаменяемость;
- сравнительно невысокая максимальная рабочая температура;
- большой разброс по величине ТКС даже в пределах партии чувствительных элементов с одинаковыми номинальными характеристиками.

Для измерения температуры наиболее часто применяют термосопротивления типов ММТ-1, ММТ-4, ММТ-5, КМТ-1, КМТ-4.

ММТ - сплав и окислы меди и марганца.

КМТ - сплав и окислы кобальта с марганцем.

8. Резистивные делители тока и напряжения

Резистивные делители широко применяются в электрических цепях приборов. Схемы простейших делителей тока и напряжения приведены на рис.1, а, б. Коэффициенты передачи, или коэффициенты деления, делителей соответственно $\mu_0 = R_2/(R_1+R_2)$; $\mu_1 = R_1/(R_1+R_2)$ и

определяются отношением сопротивлений входящих в них резисторов, поэтому точность коэффициента деления определяется не точностью самих сопротивлений резисторов, а лишь точностью поддержания их отношения.

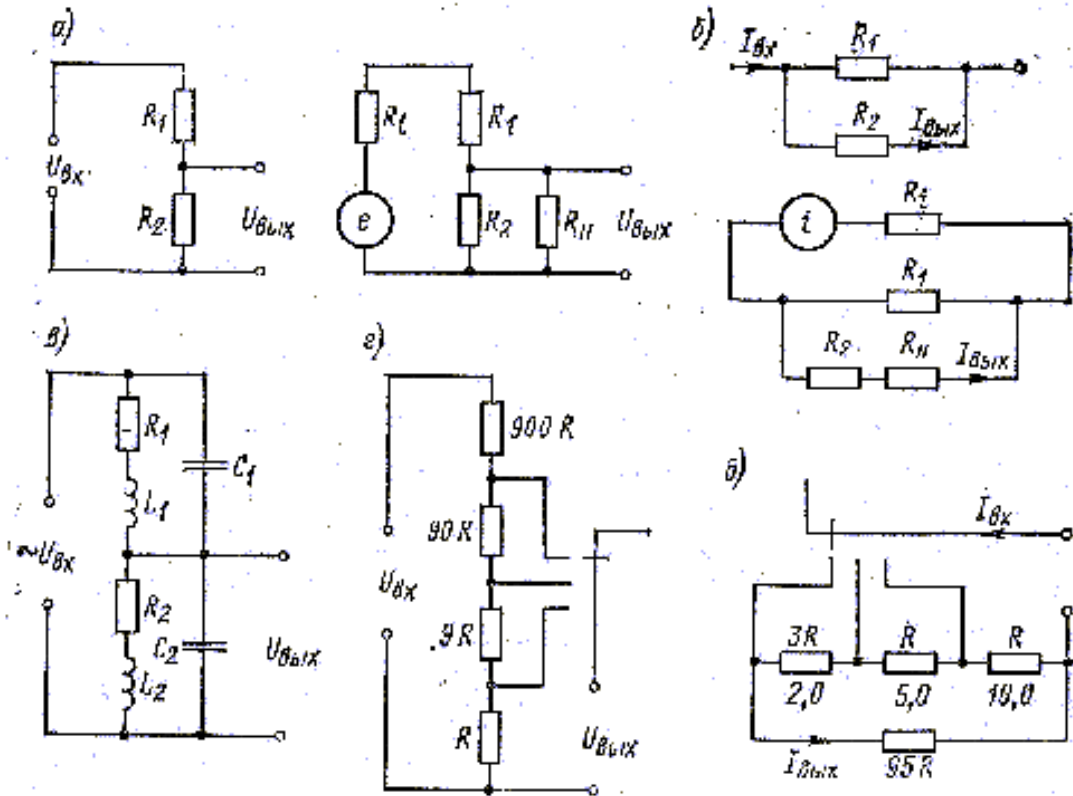


Рис.1

Приведенные выражения справедливы для случая, когда можно пренебречь внутренними сопротивлениями источников и нагрузок, полагая, что для делителя напряжения $R_H \rightarrow \infty$, а для делителя тока $R_H \rightarrow 0$. С учетом сопротивлений источников и нагрузок выходной ток и выходное напряжение определяются формулами:

$$I_{\text{ВЫХ}} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_H}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = E \frac{R_2 \parallel R_H}{R_1 + R_2 \parallel R_H}$$

Коэффициент деления тока не зависит от сопротивления цепи, включенной последовательно с делителем, т. е. от сопротивления источника. При постоянных сопротивлениях делителя и нагрузки изменение коэффициента деления учитывается формулами:

$$\mu'_I = \mu_I \left(1 - \frac{R_H}{R_1 + R_2 + R_H} \right); \quad \mu'_U = \mu_U \left[1 + \frac{1}{1 + R_H (R_1 + R_2) / (R_1 R_2)} \right]$$

Или, учитывая, что выходные сопротивления делителей составляют $R_{\text{ВЫХ}I} = R_1 + R_2$ ($R_i \rightarrow \infty$) и $R_{\text{ВЫХ}U} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ ($R_i = 0$), коэффициенты деления можно представить в виде:

$$\mu'_I = \mu_I \left(1 - \frac{R_H}{R_{\text{ВЫХ}I} + R_H} \right); \quad \mu'_U = \mu_U \left(1 + \frac{R_{\text{ВЫХ}U}}{R_H + R_{\text{ВЫХ}U}} \right)$$

Из приведенных формул легко определить погрешность делителей при изменении сопротивления нагрузки или выходных сопротивлений делителей. Однако, даже если нагрузки остаются неизменными, включение нагрузок, имеющих сопротивления, сравнимые с выходными сопротивлениями делителей, крайне нежелательно, так как это приводит к существенному возрастанию погрешностей делителей под влиянием внешних факторов.

Для ненагруженных делителей погрешности от влияния внешних факторов пренебрежимо малы, так как используемые в них резисторы идентичны и отношение их сопротивлений является инвариантной величиной. По-разному влияют внешние воздействия на сопротивления делителя и нагрузки, так как последние выполняются из различных материалов, и поэтому возрастают соответствующие погрешности. Полагая, что под действием температуры относительная погрешность резисторов делителя составляет γ_R , а относительная погрешность сопротивления нагрузки γ_{RH} , можно написать следующие выражения для погрешностей коэффициентов деления:

$$\gamma_{\mu I} \approx (\gamma_R - \gamma_{RH}) R_H / R_{\text{ВЫХ}I}; \quad \gamma_{\mu U} \approx -(\gamma_R - \gamma_{RH}) R_{\text{ВЫХ}U} / R_H.$$

Если на вход резистивного делителя подается переменное напряжение достаточно высокой частоты или напряжение, содержащее высокочастотные гармоники, то необходимо учитывать реактивные составляющие сопротивлений входящих в делитель резисторов.

Для того чтобы избежать частотной погрешности, должно выполняться следующее условие: $R_1/R_2 = L_1/L_2 = C_2/C_1$, где L_1, L_2, C_1, C_2 — параметры эквивалентной схемы резисторов (рис.1, в).

Влияние индуктивной составляющей комплексного сопротивления обычно невелико, что объясняется соответствующей конструкцией непроволочных резисторов и бифилярной намоткой высокочастотных проволочных резисторов. Емкостная же составляющая сопротивления может вносить заметную погрешность. Эту погрешность можно исключить, выравняв постоянные времени резисторов делителя, для чего подбирают небольшие конденсаторы, включаемые параллельно резисторам. Использование подобной емкостной коррекции позволяет снизить частотную погрешность делителей до десятых долей процента для частот звукового диапазона при применении микропроволочных резисторов типа МВСГ и для частот вплоть до нескольких десятков мегагерц при использовании непроволочных резисторов.

Дальнейшее снижение частотной погрешности возможно при применении более сложных схем частотной коррекции.

Существенно увеличиваются частотные погрешности делителей при включении сопротивления нагрузки. В рабочем диапазоне частот, где резисторы делителя имеют чисто активные сопротивления, частотные погрешности, вызванные реактивными составляющими сопротивлений нагрузок, определяются формулами:

$$Y_{\mu I}(\omega) = -\frac{1}{2} \left(\frac{\omega L}{R_1 + R_2 + R_H} \right)^2; \quad Y_{\mu U}(\omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega C}{1/R_H + (R_1 + R_2)/(R_1 R_2)} \right)^2$$

если считать, как это и бывает в большинстве случаев, что нагрузка делителя тока имеет индуктивную составляющую, а нагрузка делителя напряжения — емкостную.

Многоступенчатые резистивные делители напряжения и тока приведены на рис. 1, г и д, где в качестве примеров указаны значения сопротивлений. Подобные схемы используются для переключения пределов амперметров и аналоговых электронных вольтметров. Особую роль играют многоступенчатые делители с многозначными регулируемыми коэффициентами деления, используемые в современных цифровых приборах и компенсаторах ручного уравнивания. В качестве примера на рис.2 показан трехзначный делитель, который может выполняться как с ручным, так и с автоматическим изменением коэффициента деления. Принцип действия делителя поясняется рис.2, а. Делитель состоит из идентичных резисторов, по которым перемещаются два механически соединенных, но электрически изолированных движка. Часть резистора, к которой приложено напряжение, показана штриховкой; та часть резистора, с которой снимается напряжение, показана более густой штриховкой. На рис.2, б, в представлены построенные на этом принципе соответственно делитель с ручным управлением (при указанном положении движков $U_{\text{вых}} = 0,120 U_{\text{вх}}$) и с автоматическим управлением путем замыкания и размыкания соответствующих контактов реле (при указанном положении контактов ($U_{\text{вых}} = 0,538 U_{\text{вх}}$)).

Число знаков коэффициента деления определяется возможным диапазоном сопротивлений резисторов, поскольку, как видно из рис.2, в, для того чтобы не сказывались остаточные параметры ключей, меньшее сопротивление должно быть на 1—2 порядка больше сопротивления R_k замкнутого ключа, а большее сопротивление — на 2—3 порядка меньше сопротивления R_k разомкнутого ключа.

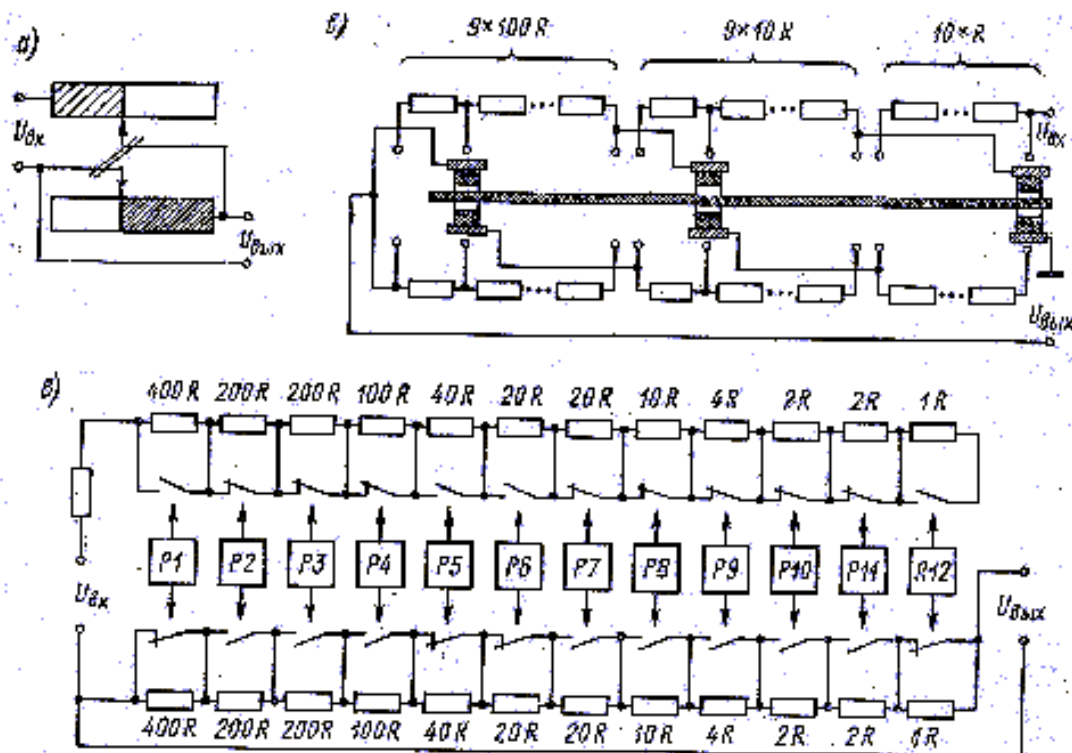


Рис. 2.

Если предположить, что $r_k = 0,01$ Ом, а $R_k = 108$ Ом, то можно реализовать пятизначный делитель, в котором коэффициент деления будет иметь погрешность, не превышающую последнего знака. Анализируя различные схемы делителей, следует обратить внимание на следующие характеристики: постоянство входного сопротивления, постоянство выходного сопротивления, наличие общей шины между цепями входного и выходного напряжения, влияние остаточных параметров ключей, число используемых в делителе номиналов резисторов. В современных цифровых приборах применяются лестничные делители тока и напряжения на выполненных по интегральной технологии матрицах резисторов, содержащих всего два номинала резисторов R и $2R$. Схемы таких делителей показаны на рис.3.

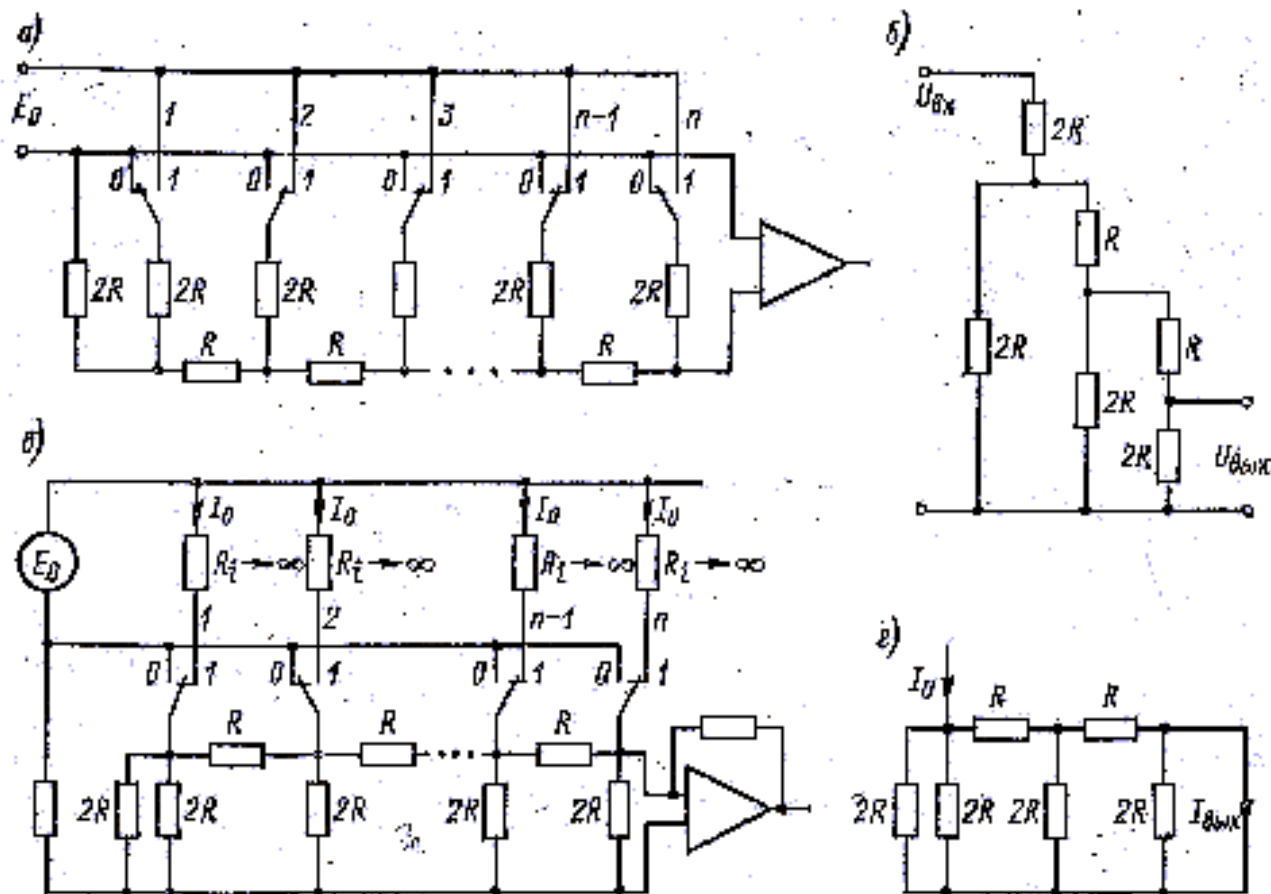


Рис. 3.

В делителе напряжения (рис.3, а) используется один источник напряжения и усилитель с бесконечно большим входным сопротивлением, с выхода которого снимается нужная часть входного сигнала. В делителе тока (рис.3, в) используется несколько идентичных источников тока и суммирующий усилитель с бесконечно малым входным сопротивлением. На рис.3, б и г показаны эквивалентные схемы того и другого делителя при замыкании $(n - 2)$ -го ключа в положение 1.

Резистивная матрица имеет постоянное входное сопротивление $R_{вх} = R$. Коэффициенты деления делителя тока и делителя напряжения составляют:

$$\mu_i = (1/2^n) \sum \alpha_i 2^i; \quad \mu_v = (1/2^{n+1}) \sum \alpha_i 2^i$$

где α_i принимают значения 0 и 1 в зависимости от положения ключей.

При подключении к выходу делителей конечных сопротивлений нагрузок коэффициенты деления меняются.

Лучшие делители имеют до 16 разрядов, погрешность линейности $\pm 0,002\%$, температурную погрешность $\pm 0,0007\%$ на 1 К.

9. Электростатические преобразователи (принцип действия, область применения).

Простейший электростатический преобразователь содержит два электрода площадью S , параллельно расположенных на расстоянии δ в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ .

С электрической стороны преобразователь характеризуется напряжением U между пластинами, зарядом $q = CU$, где C – ёмкость, равная при плоскопараллельном расположении пластин $C = \frac{\epsilon S}{\delta}$ (без учета краевого эффекта), током $i = \frac{dq}{dt}$, энергией электрического

поля $W_{\dot{y}} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}$. Если одна из пластин (или диэлектрик между ними) имеет возможность перемещаться, то с механической стороны преобразователь характеризуется жесткостью подвеса подвижной пластины ω , ее перемещением x , скоростью перемещения $v = \frac{dx}{dt}$ и электростатической силой притяжения $f_{\dot{y}\dot{N}} = \frac{dW_{\dot{y}}}{dx}$.

Взаимосвязь механической и электростатической сторон преобразователя отражается уравнениями:

$$dF = \omega x + E_0 C_0 u$$

$$dq = E_0 C_0 x + C_0 u$$

Эти уравнения даны в линеаризованной форме, т.е. в предположении, что значение u и x малы по сравнению с начальными напряжением и зазором между пластинами ($C_0, E_0 = \text{const}$). Из приведенных уравнений видно, что любое воздействие с механической стороны изменяет электрическое состояние преобразователя и, наоборот, изменение электрического поля приводит к изменению механических характеристик. Коэффициент электромеханической связи $K_{эм} = C_0 E_0$. Эта взаимосвязь должна учитываться при любых применениях электростатических преобразователей. Например, из первого уравнения следует, что если напряжение u зависит от перемещения x , то эквивалентная жесткость включенного в цепь преобразователя отличается от жесткости подвеса. Из второго уравнения видно, что ток через

преобразователь определяется не только составляющей $i_1 = \left(\frac{dq}{dt}\right)_1 = C_0 \frac{du}{dt}$, но и не всегда учитываемой составляющей, обусловленной

перемещением электродов: $i_2 = \left(\frac{dq}{dt}\right)_2 = E_0 C_0 \frac{dx}{dt}$.

Выходной величиной электростатического преобразователя может быть:

1. изменение емкости С.
2. сила $f_{\vec{Y}\vec{N}}$
3. ЭДС, генерируемая при взаимном перемещении электродов, находящихся в электрическом поле.

Для электростатических преобразователей, в которых изменяется емкость, входными величинами могут быть механическое перемещение, изменяющее зазор или площадь, или изменение диэлектрической проницаемости ϵ под действием изменения температуры или состава диэлектрика.

Электростатические преобразователи с изменяющейся емкостью (емкостные) используются в различных датчиках прямого преобразования, а также как преобразователи неравновесия в датчиках уравнивания. Емкостные преобразователи работают на переменном токе несущей частоты ω , которая должна значительно превышать наибольшую частоту Ω изменения емкости под действием измеряемой величины. В качестве емкостных преобразователей используют также запертые р-п переходы: р и п-области играют роль пластин, разделенных обедненным слоем, ширина которого δ , а соответственно и емкость р-п перехода изменяются под действием приложенного напряжения. Эти полупроводниковые элементы называются варикапами.

Для электростатических преобразователей с выходной величиной в виде силы входной величиной является напряжение. Эти преобразователи используются в электростатических вольтметрах, а также в датчиках уравнивания в качестве обратных преобразователей давления.

При емкости, принудительно изменяемой по известному закону, например $C = C_0 + \Delta C \sin \Omega t$, электростатический преобразователь работает в емкостных модуляторах и измерителях поверхностных зарядов (генераторный режим). Электростатический преобразователь емкостного модулятора в зависимости от постоянной времени RC-цепи (рис. 7-1) может работать в режиме заданного заряда при $\Omega RC \gg 1$ и заданного напряжения при $\Omega RC \ll 1$.

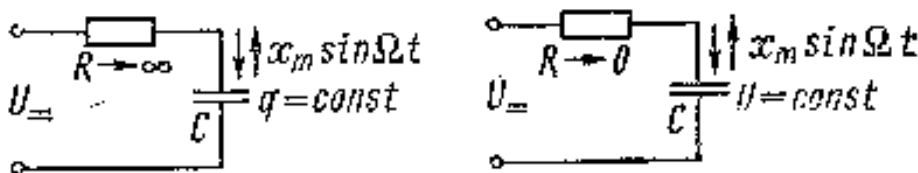


Рис. 7-1

В первом случае:

$$q = CU_c = const; \quad U_c = \frac{q}{C} = \frac{C_0 U_x}{C_0 + \Delta C \sin \Omega t} = U_x \left(1 - \frac{\Delta C}{C} \sin \Omega t \right)$$

т. е. выходной величиной является переменная составляющая напряжения U_c (или U_R).

Во втором случае:

$$U_c = U_x = const; \quad q = U_x (C_0 + \Delta C \sin \Omega t)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = U_x \Omega \Delta C \cos \Omega t$$

т. е. выходной величиной модулятора, пропорциональной постоянному напряжению U_x , является ток

В том же генераторном режиме работают и конденсаторные микрофоны, преобразующие энергию акустических колебаний в электрическую. В этом случае $U_x = U_0$ задается от стабильного источника и переменная составляющая напряжения пропорциональна в зависимости от режима перемещению пластины конденсатора или скорости ее перемещения.

Ёмкостные преобразователи

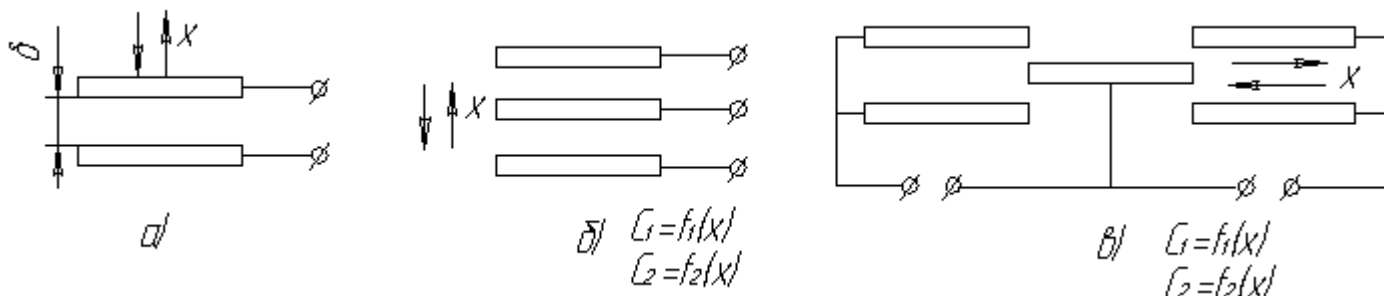


Рис. 1

На рис. 1 показано устройство различных ёмкостных преобразователей. Их принцип работы основан на зависимости ёмкости конденсатора от размеров, его взаиморасположения обкладок и среды между ними.

$$\text{Ёмкость конденсатора } C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{\delta},$$

Где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

В ёмкостном преобразователе переменной величиной (входной) может быть зазор δ между обкладками, площадь обкладок или диэлектрическая проницаемость среды.

Функция преобразователя $C=f(\delta)$ оказывается нелинейной, следовательно, приходится прибегать к линеаризации. Чувствительность этого преобразователя возрастает с уменьшением зазора. Минимальное значение зазора δ определяется напряжением пробоя конденсатора.

Такие преобразователи используются для измерения малых перемещений < 1 мм (рис.1.а). На рис.1.б показан дифференциальный ёмкостной преобразователь, в котором при перемещении центральной пластины, ёмкость одного конденсатора увеличивается, а другого уменьшается.

На рис.1.в изображён дифференциальный преобразователь, но в нём происходит изменение активной площади пластины. В таком преобразователе можно получить функцию преобразования путём профилирования пластины. Их целесообразно использовать для сравнения больших линейных величин >1 мм, а также угловых перемещений.

Достоинства.

Простота конструкции, высокая чувствительность и возможность получения малой инерционности преобразователя.

Недостатки.

Влияние внешних магнитных полей, температуры, влажности, относительная сложность схем включения и необходимость специальных источников питания повышенной частоты.

Пьезоэлектрическими называются кристаллы и текстуры, электризующиеся под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформирующиеся в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Пьезоэффект обладает знакочувствительностью, т. е. происходит изменение знаков заряда при замене сжатия растяжением и изменение знака деформации при изменении направления поля. Пьезоэлектрическими свойствами обладают многие кристаллические вещества: кварц, турмалин, ниобат лития, сегнетова соль и др., а также искусственно создаваемые и специально поляризуемые в электрическом поле пьезокерамики: титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и т. д.

Физическую природу пьезоэффекта рассмотрим на примере наиболее известного пьезоэлектрического кристалла — кварца. На рис. 6-1, а показана форма элементарной ячейки кристаллической структуры кварца. Ячейка в целом электрически нейтральна, однако в ней можно выделить три направления, проходящие через центр и соединяющие два разнополярных иона. Эти полярные направления

называются электрическими осями или осями X , и по ним направлены векторы поляризации P_1 , P_2 и P_3 . Если к кристаллу кварца вдоль оси приложена сила F_x , равномерно распределенная по грани, перпендикулярной оси X , то в результате деформации элементарной ячейки ее электрическая нейтральность нарушается. При этом, как показано на рис. 6-1, б, в деформированном состоянии ячейки сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X становится меньше (при сжатии) или больше (при растяжении) вектора P_1 . В результате появляется равнодействующая вектора поляризации, ей соответствуют поляризационные заряды на гранях, знаки которых для сжатия показаны на рис. 6-1, б. Нетрудно видеть, что деформация ячейки не влияет на

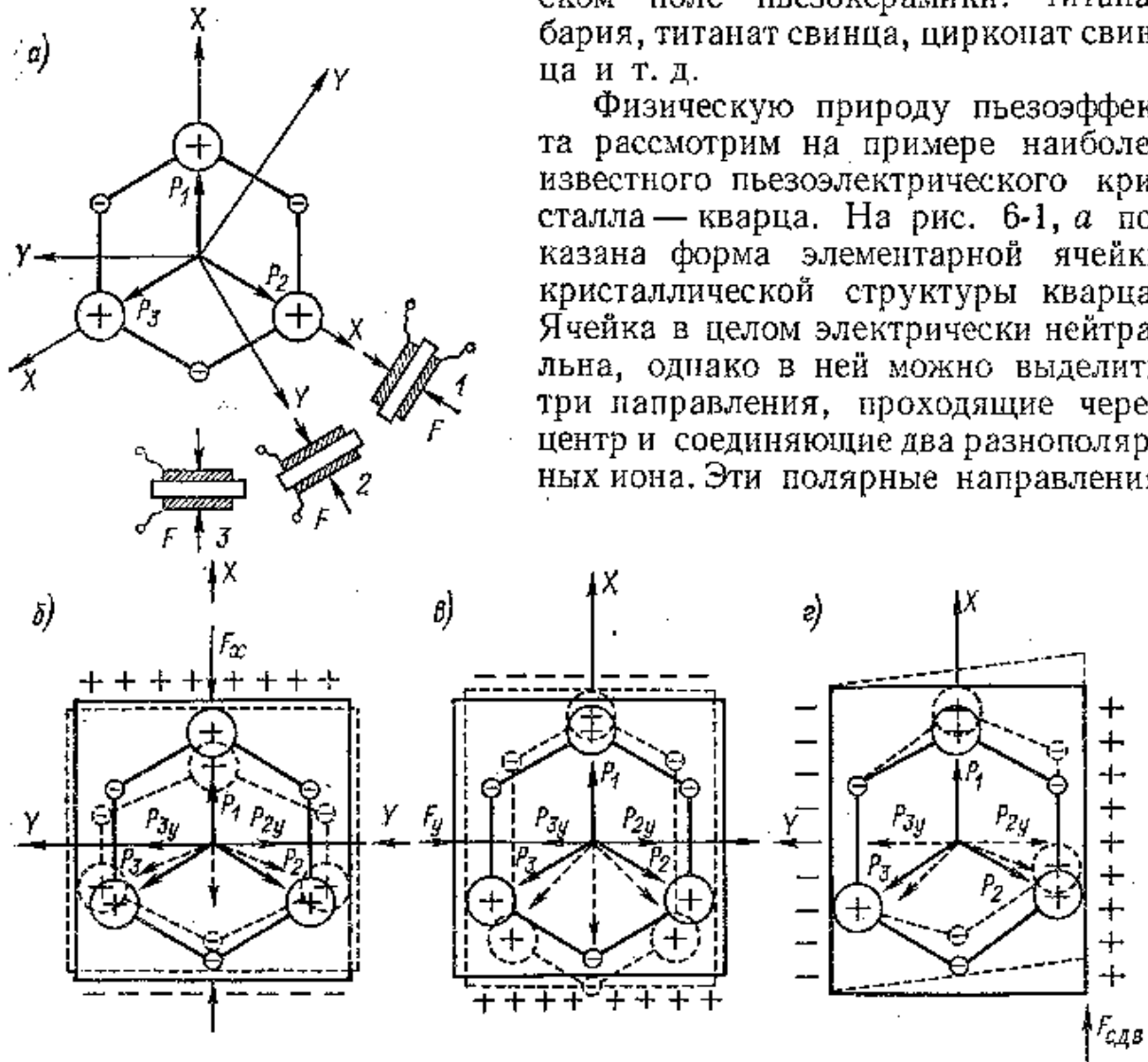


Рис. 6-1

называются электрическими осями или осями X , и по ним направлены векторы поляризации P_1 , P_2 и P_3 . Если к кристаллу кварца вдоль оси приложена сила F_x , равномерно распределенная по грани, перпендикулярной оси X , то в результате деформации элементарной ячейки ее электрическая нейтральность нарушается. При этом, как показано на рис. 6-1, б, в деформированном состоянии ячейки сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X становится меньше (при сжатии) или больше (при растяжении) вектора P_1 . В результате появляется равнодействующая вектора поляризации, ей соответствуют поляризационные заряды на гранях, знаки которых для сжатия показаны на рис. 6-1, б. Нетрудно видеть, что деформация ячейки не влияет на

электрическое состояние вдоль оси Y . Здесь сумма проекций векторов равна нулю, ибо $P_{2y} = P_{3y}$.

Образование поляризационных зарядов на гранях, перпендикулярных оси X , при действии силы по оси X называется продольным пьезоэффектом.

При механических напряжениях, приложенных вдоль одной из осей Y (их называют механическими осями), геометрическая сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось Y равна нулю, и на гранях пьезоэлемента, перпендикулярных оси Y , заряды не образуются. Однако сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X оказывается не равной вектору P_1 . Так, при сжатии пьезоэлемента, как изображено на рис. 6-1, в, указанная сумма превышает P_1 , в результате на нижней грани образуются положительные заряды, а на верхней — отрицательные. Рассмотренный эффект образования зарядов на гранях, перпендикулярных нагружаемым граням, называется поперечным. При равномерном нагружении со всех сторон (например, гидростатическое сжатие) кристалл кварца остается электрически нейтральным. При нагружении по оси Z , перпендикулярной осям X и Y и называемой оптической осью кристалла, кристалл кварца также остается электрически нейтральным. При механическом напряжении сдвига, деформирующем ячейку так, как показано на рис. 6-1, в, геометрическая сумма проекций векторов P_2 и P_3 на ось X равна вектору P_1 , направленному по оси X , и на гранях, перпендикулярных оси X , заряд не возникает. Однако проекции векторов P_2 и P_3 на ось Y не равны, и на гранях, перпендикулярных оси Y , возникает заряд.

Рассмотрение физической природы пьезоэффекта показывает, что при напряженном состоянии материала заряды принципиально могут возникать между тремя парами граней. Таким образом, поляризационный заряд является вектором и описывается тремя компонентами. Напряженное состояние характеризуется тензором второго ранга с девятью компонентами (см. § 4-5).

Пьезоэлектрический модуль, определяющий зависимости заряда от напряженного состояния, является тензором третьего ранга и определяется 27 компонентами.

Однако, как было сказано в § 4-5, тензор механических напряжений содержит только шесть независимых компонент, которые обозначаются так: $\sigma_{11} = \sigma_1$, $\sigma_{22} = \sigma_2$, $\sigma_{33} = \sigma_3$, $\sigma_{23} = \sigma_4$, $\sigma_{13} = \sigma_5$ и $\sigma_{12} = \sigma_6$. Это позволяет перейти к упрощенной форме записи пьезомодуля, представив его в виде таблицы, содержащей 18 компонент:

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix}.$$

По таблице пьезомодулей можно рассчитать плотность заряда на всех трех гранях при действии любого напряжения. При сжатии по оси X (рис. 6-2, а) на грани, перпендикулярной этой оси, возникает заряд, плотность которого $\delta_1 = d_{11}\sigma_1$; при сжатии по оси Y

(рис. 6-2, б) — заряд $\delta_1 = d_{12}\sigma_2$, при всестороннем сжатии (рис. 6-2, в) — заряд $\delta_1 = d_{11}\sigma_1 + d_{12}\sigma_2 + d_{15}\sigma_3$, наконец, при сдвиге (рис. 6-2, г) $\delta_1 = d_{14}\sigma_4$.

При продольном пьезоэффекте заряд не зависит от размера пьезоэлементов. Так, при сжатии по оси X заряд $q_1 = \delta_1 S_1 = S_1 d_{11} F_1 / S_1 = d_{11} F_1$.

При поперечном пьезоэффекте заряд может быть увеличен соответствующим выбором относительных размеров пьезоэлемента, т. е.

длин ребер x и y : $q_1 = \delta_1 S_1 = S_1 d_{12} F_2 / S_2 = d_{12} F_2 zy / (zx) = d_{12} F_2 y / x$.

В общем виде плотность заряда определяется формулой $\delta_i = d_{ij} \sigma_j$ ($i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

Индекс пьезомодуля d_{ij} означает, что рассматривается заряд на грани i при действии напряжения вдоль оси j . При определении знаков заряда за положительное направление поля принимается направление поля вне пьезоэлемента, совпадающее с положительным направлением

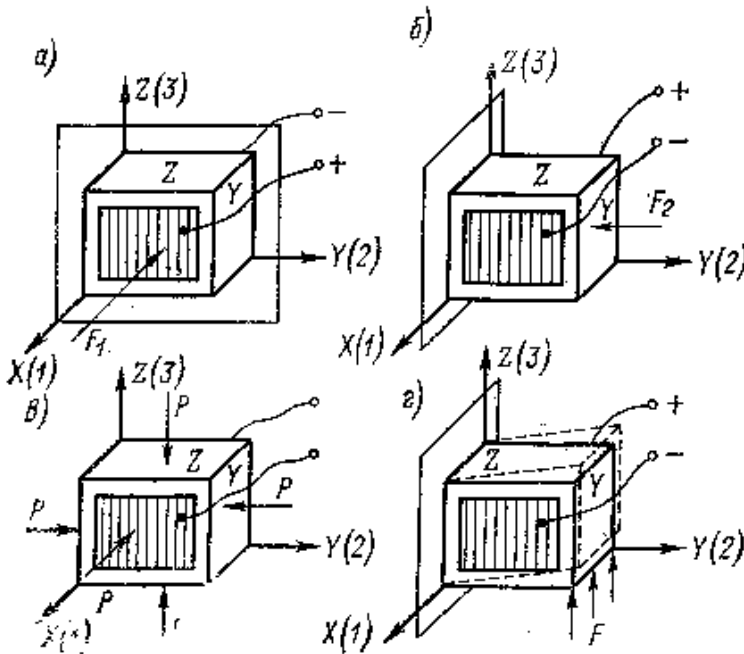


Рис. 6-2

соответствующей оси. Знаки механических напряжений определены в § 4-5. Обратный пьезоэффект также определяется по матрице пьезомодулей. При приложении электрического поля напряженностью E_1 между гранями $I-I$, или $x-x$, происходит деформация элемента в направлении оси X , равная $\varepsilon_1 = d_{11} E_1$.

Удобно привести следующую схему, объединяющую пьезоэлектрические уравнения:

	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	
E_1	δ_1	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}
E_2	δ_2	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{24}	d_{25}	d_{26}
E_3	δ_3	d_{31}	d_{32}	d_{33}	d_{34}	d_{35}	d_{36}

Симметрия структуры веществ приводит к сокращению числа независимых компонент в матрицах пьезомодулей, большая часть компонент оказывается равной нулю. Значения пьезомодулей d_{ij} в единицах 10^{-12} Кл/Н для кварца и титаната бария приведены в табл. 6-1.

Чтобы измерять статические величины нужно использовать кварцевый резонатор. Опорная частота и частота от датчика используются как разностные частоты:

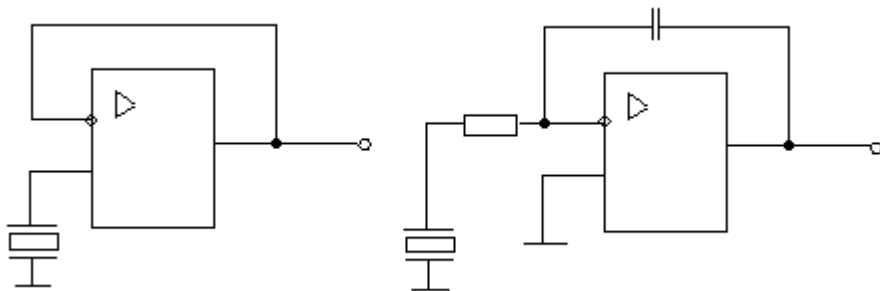


Схема подключения

Схема усиления заряда

Схема подключения №1 служит для сохранения заряда. Для этого существует обратная связь. Во второй схеме для этого используется конденсатор, который хранит заряд порядка нескольких секунд. Что позволяет иметь достаточное время для снятия информационных сигналов.

11. Пьезорезонансные преобразователи.

В пьезоэлектрическом резонаторе происходит преобразование электрического напряжения между электродами в деформацию и механические напряжения в пьезоэлементе, которые вызывают ответную реакцию по выходу в виде зарядов на электродах, возникающих под действием механических напряжений. Обратимость пьезоэлектрического эффекта позволяет выполнять пьезорезонатор в виде двухполюсника, объединяющего системы электрического возбуждения механических колебаний и съема электрического сигнала.

Резонансные колебания в пьезоэлементе возникают в результате установления в нем стоячих ультразвуковых волн. Длина волны

$\lambda = \frac{v}{f}$, где v — скорость распространения ультразвука; f — частота излучения. Скорость распространения ультразвука в материале

определяется как $v = \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}$, где E_{ij} - константа упругости; ρ — плотность материала. Следовательно, длина волны $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{\sqrt{E_{ij}}}{f \rho}$.

Если длина волны λ такова, что на отрезке h между гранями, от которых отражаются волны, укладывается целое число полувольт, то в пьезоэлементе устанавливаются стоячие волны. Таким образом, стоячим волнам соответствует частота возбуждающего напряжения

$f_{\lambda \hat{E}} = \frac{n}{2h} \cdot \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}$, где n — число уложившихся полувольт. Частота колебаний, при которой на длине h укладывается одна полуволна,

является основной частотой $f_{\hat{E}} = \frac{1}{2h} \cdot \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}$.

Основой любого пьезорезонансного частотного датчика является пьезорезонатор, частота которого изменяется под действием измеряемой величины. Изменение частоты может происходить под воздействием:

- 1) температуры, которая влияет на геометрические размеры образца, плотность и упругие свойства материала;
- 2) механических напряжений в резонаторе или его деформации, также вызывающих изменение h , ρ и n ;
- 3) при присоединении дополнительной массы к резонатору, изменяющей его толщину h и среднюю плотность ρ .

Таким образом, различают термо-, тензо- и массочувствительные пьезорезонаторы. Кроме этого, используются пьезорезонансные датчики с амплитудным выходом. В этих датчиках, работающих на близких к резонансной частотах при изменении акустических потерь изменяется амплитуда колебаний.

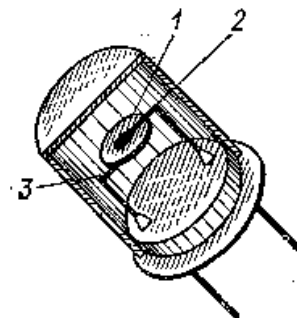
При построении пьезорезонансного датчика к пьезорезонатору предъявляются следующие требования: высокая добротность и чувствительность к измеряемой величине, малая чувствительность к помехам и возможность колебаний только на определенной частоте (моночастотность). Это обеспечивается выбором среза пьезоэлемента и типа возбуждаемых колебаний.

Конструкция термочувствительного пьезорезонансного датчика приведена на рис.1:

В миниатюрном металлическом герметизированном баллоне (диаметр 6—8 мм) размещен линзовый кварцевый резонатор 1, укрепленный, как на растяжках, на токоподводах 2 и 3. Для уменьшения тепловой инерционности баллон заполнен гелием, обладающим хорошей теплопроводностью. Выпускаются также датчики с резонаторами в стеклянных вакуумированных баллонах. Эти датчики имеют большую инерционность, но более высокую временную стабильность и разрешающую способность.

Схематические конструкции и схемы нагружения тензочувствительных пьезорезонаторов показаны на рис.2.

В качестве тензочувствительных резонаторов применяются пьезоэлементы температурно-независимого АТ-среза, в которых используются колебания сдвига по толщине к колебания изгиба, так как только для этих типов, колебаний удастся решить проблему развязки между колеблющейся частью резонатора и конструктивными элементами, через которые передается механическая нагрузка.



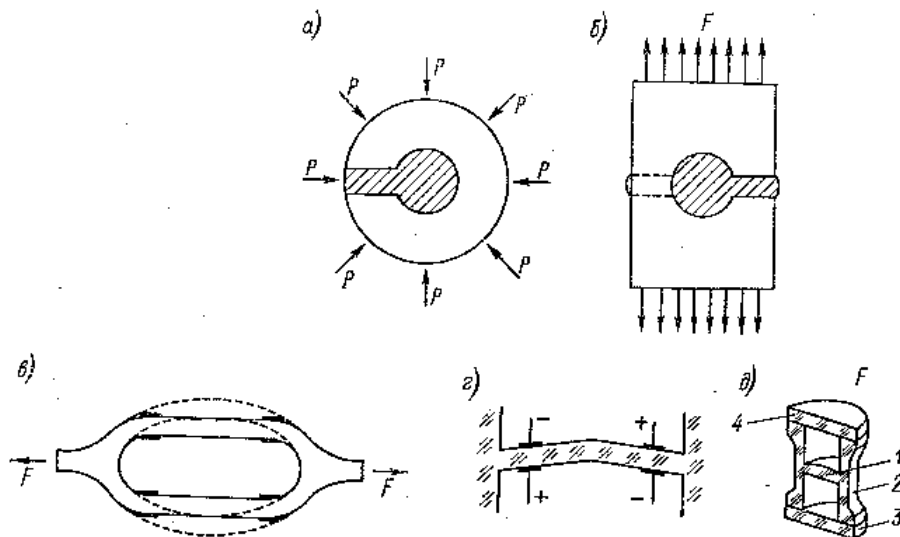


Рис.2

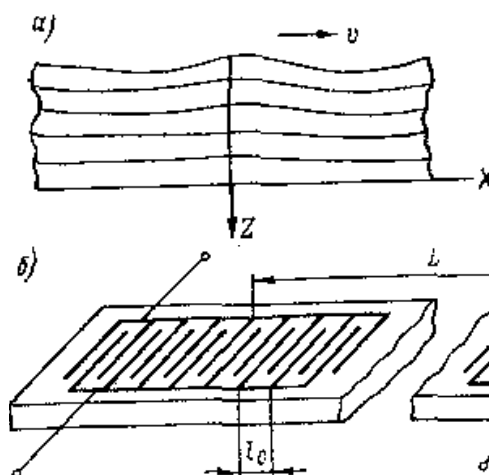
В резонаторах (рис. 2, а и б) используются колебания сдвига по толщине, поэтому закрепление резонатора и передача усилий могут осуществляться по свободной от колебаний периферии. Резонаторы подобного типа реализуются на диапазон частот 0,3—100 МГц, имеют толщину 0,05—5 мм при поперечных размерах 3—30 мм, относительное изменение частоты при номинальной входной величине $\frac{\Delta f}{f} = 0,1 \div 1\%$.

В резонаторах (рис. 2, в) используются изгибные колебания, которые возбуждаются системой из четырех электродов, обеспечивающей противоположные по знаку сдвиговые деформации так, как показано на рис. 2, г. Так, если при положительном потенциале на верхнем электроде происходит в надэлектродной области сдвиг «вправо», то при отрицательном потенциале — «влево» и пластина изгибается. Деформации, вызываемые в ножках «камертона» колебаниями верхней и нижней пластин, взаимно гасятся, так как пластины перемещаются в противофазе. Резонаторы с изгибными колебаниями реализуются на диапазон частот 1-100кГц, но имеют меньшую жесткость и, следовательно, большую чувствительность, чем резонаторы с колебаниями сдвига; относительное изменение частоты достигает значений $\frac{\Delta f}{f} = 10 \div 20\%$.

Масс-чувствительные резонаторы выполняются из тонких пластин или линз кварца температурно-независимого АТ-среза. В резонаторах возбуждаются колебания сдвига по толщине. Присоединяемая масса может наноситься с одной или с двух сторон, как на электроды, так и на периферию резонатора. Нарращивание массы, т. е. процесс сорбции вещества, может происходить по-разному и носить как необратимый, так и обратимый характер. Например, при отработке технологии процессов напыления в установке заподлицо с поверхностью, на которую производится напыление, помещается пьезорезонатор-толщиномер, позволяющий непрерывно контролировать процесс по изменению частоты пьезорезонатора в зависимости от толщины напыленной на него пленки. В гигрометрах и газоанализаторах пьезорезонаторы покрываются специальными сорбционными покрытиями, удерживающими исследуемое вещество. Так, измерительный резонатор гигрометра покрывается тонкой ($3 \cdot 10^{-7}$ мкм) пленкой окислов кремния. После измерения резонатор может быть «высушен», т.е. происходит десорбция вещества.

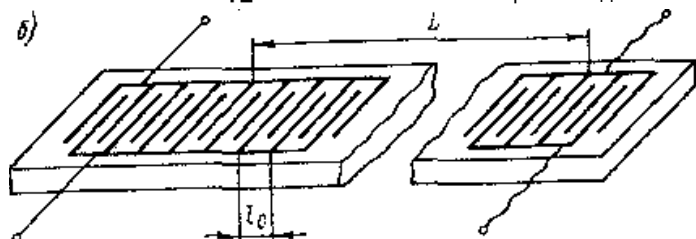
Максимальная присоединяемая масса не должна превышать $2 \cdot 10^{-3}$ г/см², и толщина пленок должна быть не более 1—2 мкм, в противном случае резко падает добротность резонатора, что приводит к нестабильности и большой погрешности измерения.

12. Измерительные преобразователи, основанные на использовании ПАВ.



Поверхностные акустические волны (ПАВ) находят широкое применение при разработке фильтров и линий задержек, применяемых в радиотехнических устройствах. В последнее время ПАВ используются также при разработке измерительных преобразователей.

Известно несколько видов ПАВ, наиболее часто на практике применяют волны Релея. Смещение частиц твердого тела при распространении волны Релея в направлении оси X иллюстрируется рис.1. Как видно из рис. 1, волны распространяются вблизи границы твердого тела и затухают почти полностью на расстоянии Z от поверхности, примерно равном длине волны λ .



Одной из основных причин возрастающего интереса к ПАВ является именно сосредоточенность энергии в тонком слое, так как благодаря этому к технологии изготовления ПАВ-элемента предъявляется лишь одно требование — тщательна обработка рабочей поверхности, по которой распространяется акустическая волна.

Для возбуждения ПАВ на поверхности пьезоэлемента наносятся гребенки встречно включенных электродов (рис. 2), представляющие собой встержноштыревой преобразователь (ВШП), имеющий шаг $l_0 = \lambda$. При подключения напряжения к ВШП под ним вследствие обратного пьезоэффекта происходят смещения частиц и возникает ПАВ, распространяющаяся в обе стороны. Если при этом длина волны совпадает с шагом ВШП, то вследствие суперпозиции колебаний, возникающих под каждой парой электродов, суммарная энергия достигает максимума; если длина волны не совпадает с шагом ВШП, энергия ПАВ уменьшается и при определенном соотношении между λ и l_0 волна за пределами ВШП может полностью погаситься.

Для приема энергии ПАВ используется второй ВШП, также имеющий шаг, равный длине волны. На электродах приемного ВШП вследствие прямого пьезоэффекта возникают заряды и появляется напряжение. Линия задержки состоит из входного и выходного ВШП. В первом приближении оба ВШП можно рассматривать как локальные электроды, расположенные на расстоянии L, равном расстоянию между

геометрическими центрами ВШП. Время задержки t равно времени прохождения акустической волны между ВШП, т.е. $t = \frac{L}{V}$, где $V = \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}$

- скорость распространения ПАВ; E_{ij} - константа упругости; ρ - плотность материала.

Изменение времени задержки ПАВ-структуры под воздействием внешних факторов используется в измерительных преобразователях с частотным выходом. При изменении L относительное изменение частоты генератора составляет $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$.

Изменение времени задержки определяется изменением длины L и фазовой скорости V и равно $\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta E_{ij}}{2E_{ij}} + \frac{\Delta\rho}{\rho}$.

Изменение времени задержки может происходить при механических деформациях ПАВ-структур под воздействием температуры, при нагружении поверхности тонкими пленками (толщина пленки $h' < 0,1\lambda$), при изменении зазора δ между поверхностью распространения ПАВ и токопроводящим экраном ($\delta < \lambda$). Соответственно, на базе ПАВ-структур могут быть созданы преобразователи для измерения механических величин ($\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$ - до 1%), температуры ($\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$ - до 1%), микроперемещений, для микровзвешивания и исследования параметров

тонких пленок ($\frac{\Delta\tau}{\tau_0}$ - до 10%). При бесконтактной системе возбуждения ПАВ-преобразователи могут быть использованы также для измерения перемещения объекта, вызывающего перемещение одного из ВШП и приводящего к изменению L .

13. Вихревые преобразователи.

Принцип действия вихревых индукционных преобразователей основан на изменении индуктивности катушек при приближении к ним токопроводящего тела. При этом глубина проникновения электромагнитной волны определяется так: $Z = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu \omega}}$, где Z - расстояние проникновения, γ - проводимость материала, μ - магнитная проницаемость среды, ω - частота тока.

Например, для 50Гц $Z=10$ мм. Если же частота тока 500кГц, то $Z=0,1$ мм.

Вследствие приближения проводящего материала к катушке, её магнитное поле будет изменяться. На рис.1. показано, как искажается магнитное поле катушки при приближении к ней проводящей пластины.

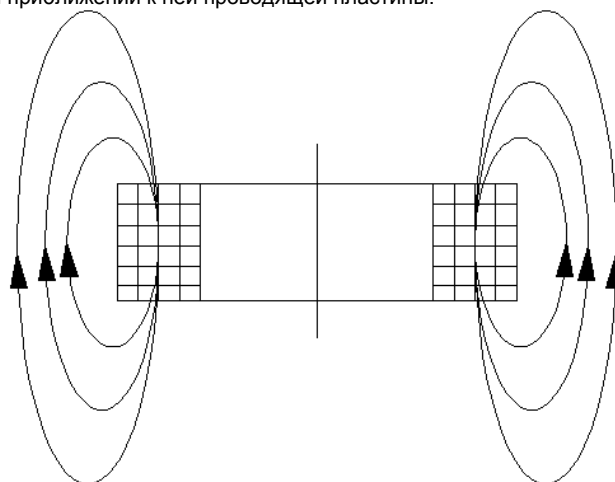


Рис. 1а. Электромагнитное поле без внесённого проводника.

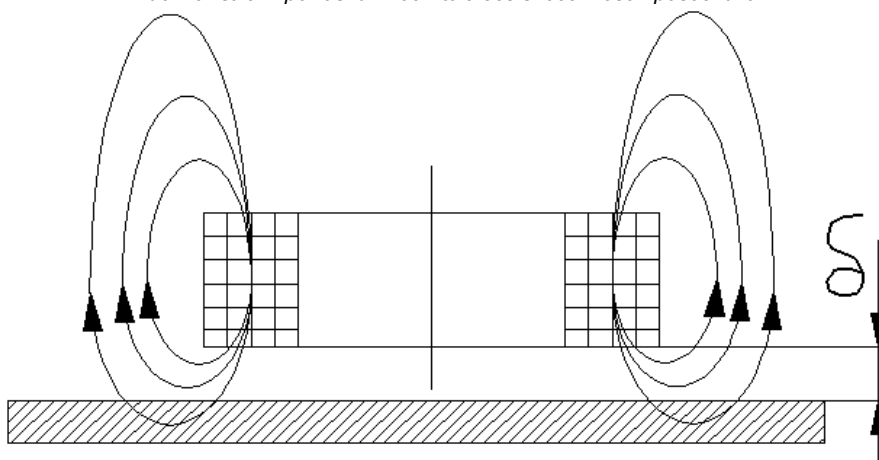


Рис. 1б. Электромагнитное поле с внесённым проводником.

Присутствие вблизи витков с переменным током проводящей среды ведёт к изменению первоначального электрического поля, а значит активного и реактивного сопротивления витков катушки. При этом активное сопротивление витка растёт за счёт роста потерь энергии в проводящей среде, а индуктивное падает. Значение этих сопротивлений при постоянной частоте питания при постоянных геометрических размерах катушки зависит от расстояния δ до этой пластины, электрической проводимости материала пластины γ и толщины пластины d . Оптимально считается, если $d < 2Z$. Вихревые преобразователи находят широкое применение в области бесконтактного контроля линейных размеров тонких пластин и толщины покрытий, а также для обнаружения дефектов в деталях (царапин, трещин). Для этих целей используются накладные, экранные и щелевые датчики (рис.2).

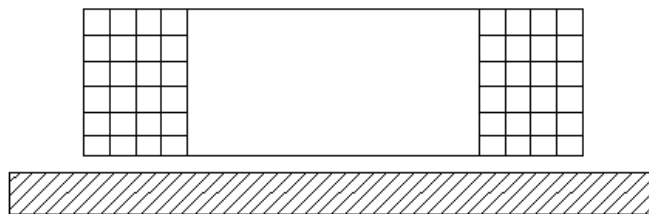


Рис.2а. Накладной вихретоковый преобразователь.



Рис.2б. Экранный вихретоковый преобразователь.

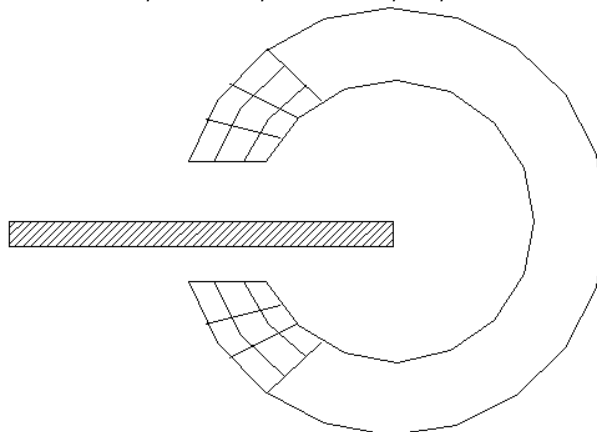


Рис.2в. Щелевой вихретоковый преобразователь.

Применение вихретоковых датчиков для измерения перемещения целесообразно, когда предмет не имеет ферромагнетиков, так как чувствительность ВТД к перемещению в 5-20 раз меньше, чем у индуктивного преобразователя с катушкой, помещенной в магнитопровод с перемещающимся сердечником. Кроме того, эти датчики имеют значительные погрешности, обусловленные температурными изменениями электрической проводимости проводящего тела.

14. Фотоприемники. Фоторезисторы и фотодиоды. Схемы включения.

Классификация фотоприемных устройств:

- Интегральные
- Селективные

Интегральные фотоприемники. Принцип действия их основан на изменении механических или иных свойств при изменении температуры, изменение которой осуществляется под действием светового потока

Различают следующие типы:

- 1) Боллометры, у которых под действием температуры изменяется сопротивление.
- 2) Термоэлементы, используют термоэлектрический эффект, заключающийся в том, что под действием тепловой энергии на обкладках термочувствительного элемента возникает ЭДС.
- 3) Пирозлектрические, их действие основано на изменении параметров сегнетоэлектрика под действием изменяющегося светового потока.

Селективные фотоприемники. В таких фотоприемниках имеет место прямое взаимодействие падающих фотонов с электронами чувствительного слоя.

Селективные фотоприемники делятся на типы:

- 1) С внутренним фотоэффектом;
- 2) С внешним фотоэффектом.

К селективным фотоприемникам с внешним фотоэффектом относятся:

- 1) Вакуумный фотоэлемент - это электровакуумный прибор, преобразующий оптическое излучение в электронный поток.
- 2) Газонаполненный фотоэлемент - это электровакуумный прибор, преобразующий оптическое излучение в электронный поток, при этом величина фототока в нем в несколько раз превосходит токи в вакуумных фотоэлементах. Это достигается за счет того, что при движении фотоэлектроны ионизируют молекулы газа, вызывая газовый разряд.

3) Фотоумножители – это электровакуумный прибор, преобразующий оптическое излучение в электронный поток с последующим усилением на катодах. В этих приборах кроме первичного фотокатода имеются вторичные катоды (эммитеры), на которых происходит вторичная термоэлектронная эмиссия.

К селективным фотоприемникам с внутренним фотоэффектом относятся:

- 1) Фоторезисторы. У них изменяется сопротивление под действием световой энергии;
- 2) Фотодиод. Под действием фотонов светового потока происходит увеличение количества неосновных носителей заряда в области базы, тем самым изменяется ширина р-п перехода. Поскольку световой поток переменен во времени, то изменение ширины перехода переменное. В результате проводимость диода становится переменной и зависит от изменения светового потока.
- 3) Фототранзистор. Под действием переменного светового потока изменяется концентрация неосновных носителей заряда в области базы, т.к. облучается база, тем самым изменяется проводимость между коллектором и эмиттером.
- 4) Фототиристор. Под действием светового потока, облучая управляющую зону, мы будем изменять порог электрического пробоя тиристора.
- 5) Фотоварикап. Под действием светового потока происходит изменение емкости р-п перехода.
- 6) Оптрон. Это комбинированный источник света и приемник излучения. Между элементами оптронной пары отсутствует электрическая связь, а передача сигнала происходит посредством световой энергии. Оптроны получили широкое распространение как элементы схем измерительных приборов, позволяющие осуществить гальваническую развязку сетей.

Характеристики фотоприемников.

Монохроматическая чувствительность – отношение приращения фототока к изменению плотности монохроматического потока

с длиной волны λ , а именно: $S_\lambda = \frac{\Delta I}{\Delta P_\lambda}$ в микрометрах на ватт.

Спектральная характеристика фотоприемника – зависимость $S_\lambda = f(\lambda)$. Практически чаще используется **относительная**

спектральная характеристика – зависимость $\gamma_\lambda = \frac{S_\lambda}{S_{\lambda \max}}$, где $S_{\lambda \max}$ – максимальное значение монохроматической чувствительности.

Интегральная чувствительность – отношение приращения величины фототока к изменению спектральной плотности лучистого

потока, а именно: $S_p = \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{S_{\lambda \max} \int_0^\infty P_\lambda \gamma_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda d\lambda}$.

Фотоприемники, предназначенные для работы в видимой области спектра, характеризуются **интегральной световой**

чувствительностью: $S_\sigma = \frac{\Delta I}{\Delta \sigma} = \frac{S_{\lambda \max} \int_0^\infty P_\lambda \gamma_\lambda d\lambda}{683 \int_{0,4}^{0,8} K_\lambda P_\lambda d\lambda}$.

Где $K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{\lambda \max}}$ – относительная спектральная чувствительность глаза ($K_\lambda = 1$ при $\lambda = 0,555$ мкм)

V_λ – спектральная чувствительность глаза, отражающая реакцию человеческого глаза на свет видимой части спектра.

Вольт – амперная характеристика – зависимость фототока от напряжения питания, приложенного к фотоприемнику при постоянном значении светового потока.

Световая характеристика – зависимость фототока от значения светового потока неизменного спектрального состава – характеризует нелинейность фотоприемника.

Постоянная времени – определяет быстродействие фотоприемника и возможность измерения светового потока переменной интенсивности.

Порог чувствительности – минимальное значение потока излучения, которое вызывает на выходе фотоприемника сигнал, в заданное число (m) раз превышающий уровень шума. Т. к. уровень шума обычно задается дисперсией u_o^2 , порог чувствительности

определяется формулой: $\Delta P = m \frac{\sqrt{u_o^2}}{S}$.

Фоторезистором называют полупроводниковый прибор, сопротивление которого меняется под действием света. Принцип действия фоторезистора основан на внутреннем фотоэффекте, который заключается в перераспределении электронов по энергетическим состояниям, происходящем в конденсированных средах при поглощении света. Толщина рабочего тела фоторезистора обычно соизмерима с глубиной проникновения света в полупроводник. Для обеспечения необходимой механической прочности служит подложка из материала с хорошими диэлектрическими свойствами.

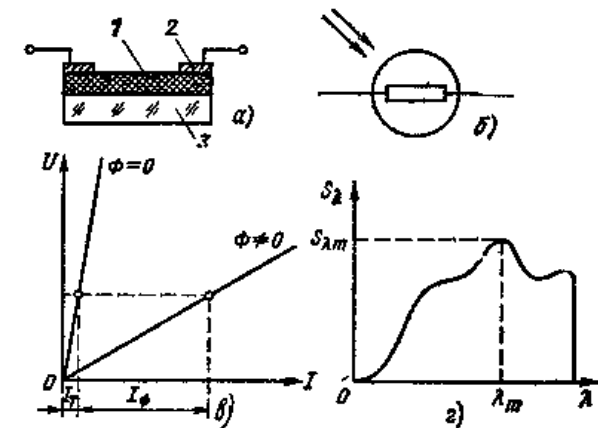


Рис. 5.9. Фоторезистор:

a – устройство; b – условное обозначение; c – рабочий участок ВАХ; d – спектральная характеристика

Характеристики фоторезисторов (темновое сопротивление, чувствительность, инерционность) сильно зависят от температуры. Темновое сопротивление и чувствительность с ростом температуры уменьшаются, а постоянная времени увеличивается. Для большинства фоторезисторов допустимый температурный диапазон составляет от -60 до $+60^\circ\text{C}$.

Зависимость темнового сопротивления от температуры называют **температурной характеристикой фоторезистора**.

Инерционность фоторезистора характеризуют постоянной времени – временем, в течение которого фототок при освещении или затемнении фоторезистора изменяется в e раз. Измерение постоянной времени делается при определенных условиях (освещенность 200 лк, температура среды 20°C , сопротивление нагрузки 1 кОм). Различают постоянные времени нарастания $T_{на}$ и спада $T_{сп}$. Постоянная времени уменьшается с ростом освещенности и температуры. Численные значения постоянных времени различных фоторезисторов – от десятков микросекунд до десятков миллисекунд.

Уровнем собственных шумов называют наибольшее за конечный промежуток времени амплитудное значение флуктуации напряжения, получающееся на нагрузке приемника при отсутствии облучения. Оцениваются шумы по их

среднеквадратичному значению. Уровнем шумов определяется пороговый поток, под которым понимают минимальный световой поток, обуславливающий появление на фоторезисторе сигнала, вдвое превышающего уровень его шумов.

Допустимая рассеиваемая на фоторезисторе мощность определяется из уравнения теплового баланса при температуре рабочего тела, равной допустимому значению

Измерительные цепи фоторезисторов строятся с использованием как постоянного, так и переменного напряжения питания.

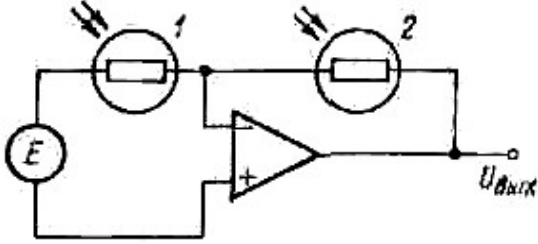


Рис. 12-14

Допустимое напряжение питания определяется допустимой мощностью рассеяния и сопротивлением максимально освещенного фоторезистора как $U \leq \sqrt{P_{\text{доп}} \cdot R_{\text{мак}}}$. Наиболее распространенной измерительной цепью является

мостовая цепь, реже применяется включение фоторезистора в цепь делителя напряжения. При выборе элементов мостовой измерительной цепи следует иметь в виду, что сопротивление или проводимость фоторезистора меняются очень существенно и измерительная цепь может внести дополнительную нелинейность. В состав современных измерительных цепей включаются операционные усилители. Пример измерительной цепи с операционным усилителем показан на

рис. 12-14. Выходное напряжение усилителя $U_{\text{вых}} = -E \frac{G_1}{G_2}$ пропорционально

преобразователя. При использовании одинарного преобразователя и замене фоторезистора 2 резистором R_0 , напряжение $U_{\text{вых}} = -ER_0 G_1$ пропорционально изменению проводимости фоторезистора 1; при замене фоторезистора 1 резистором R_0 , напряжение

$U_{\text{вых}} = -E \frac{R_2}{R_0}$ пропорционально изменению сопротивления фоторезистора 2.

Фотодиод представляет собой открытую для доступа света пластинку полупроводника, в которой имеются области электронной и дырочной электропроводности, разделенные p-n переходом.

ФД могут работать в двух режимах – фотогенераторном (вентильном) и фотодиодном. В фотогенераторном режиме источник внешнего напряжения отсутствует. В фотодиодном режиме к ФД приложено запирающее напряжение. При отсутствии облучения под действием этого напряжения проходит лишь небольшой темновой ток, а при освещении p-n перехода ток увеличивается в зависимости от интенсивности облучения.

Затемненный фотодиод не отличается от полупроводникового диода, и для него справедливы те же соотношения. Обратный ток в этом случае называют темновым током.

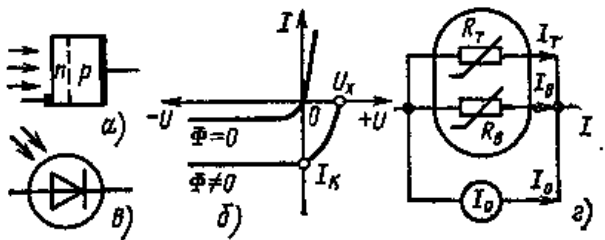


Рис. 5.14. Фотодиод:

а — структура; б — ВАХ; в — обозначения; г — схема замещения

Под действием света, падающего на поверхность полупроводника, в последнем образуются пары электрон—дырка. Неосновные носители диффундируют в область p-n перехода, втягиваются его полем и выбрасываются в область, расположенную за переходом, образуя в ней заряд.

ВАХ фотодиода описывается выражением:

$$I = I_0 (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) - I_{\phi}$$

где I_{ϕ} — фототок, т. е. ток, созданный носителями, возбужденными светом; I — ток во внешней цепи.

включается в схемы делителей (рис. 12-17, а) или мостовые измерительные цепи (рис. 12-17, б), позволяющие в известной степени уменьшить влияние дрейфа темнового тока. ФД по напряжению питания хорошо согласуются с полупроводниковыми электронными элементами, поэтому используются обычно в схемах совместно с операционными усилителями. На рис. 12-17, в показана схема включения ФД, работающего в фотогенераторном режиме. Благодаря тому, что входное сопротивление усилителя ($R = R_{o.c.} / k_0$) не превышает 10 Ом, ФД работает в режиме, близком к короткому замыканию (прямая 2 на рис. 12-15, б) и обладает достаточно линейной характеристикой. Использование низкоомной нагрузки позволяет также увеличить быстродействие фотодиода за счет снижения постоянной времени $\tau = R_i \tilde{N}_{\text{оа}}$.

Схемы включения фотодиодов показаны на рис. 12-17. В

фотодиодном режиме ФД может рассматриваться как резистор и фотогенераторном режиме ФД может рассматриваться как резистор и

фотогенераторном режиме ФД может рассматриваться как резистор и

фотогенераторном режиме ФД может рассматриваться как резистор и

фотогенераторном режиме ФД может рассматриваться как резистор и

15. Датчики Холла. Области применения, конструкция.

Датчики Холла относятся к гальваномангнитные преобразователи (ГМП), они основаны на физических эффектах, возникающих в находящихся в магнитном поле твердых телах при движении в них заряженных частиц. Датчики Холла основаны на использовании эффекта Холла. Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) на боковых гранях пластины. Обусловлен изменением траектории движения заряженных частиц в магнитном поле.

В магнитном поле носители заряда под действием сил Лоренца $F = evB$ (заряд * ск-ть дрейфа * магн. индукция) изменяют свою траекторию, вследствие чего на одной из боковых граней концентрация зарядов одного знака увеличивается, в то время как на противоположной грани — уменьшается.

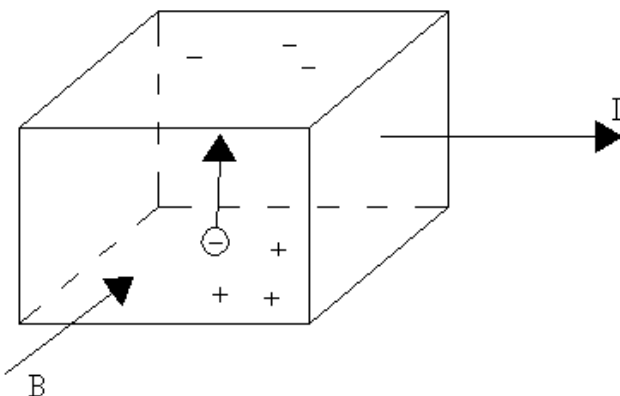
Преобразователь Холла представляет собой четырехполюсник, обычно выполняемый в виде тонкой пластинки или пленки из полупроводникового материала. Токковые электроды 1 и 2 (рис. 1) выполняются по всей ширине поперечных граней, что обеспечивает равномерное распределение входного тока по сечению преобразователя. Потенциальные (Холловые) электроды 3 и 4 расположены в центральной части продольных граней.

Возникающая разность потенциалов (ЭДС Холла) определяется выражением

$$E_x = R_x \varphi(K_{\text{холл}} \theta) IB \cos(\alpha / d)$$

(1)

где $R_{\text{хл}}$ — постоянная Холла, зависящая от свойств материала преобразователя;



$\varphi(K_{\text{geom}}(\theta))$ — функция, зависящая от геометрии преобразователя и так называемого угла Холла θ между векторами плотности

тока и напряженности вызывающего его электрического поля, определяемого подвижностью носителей зарядов и значением магнитной индукции (при $l/b = 2$ и $a/l \leq 0,1$ функция $\varphi \approx 1$); α — угол между вектором магнитной индукции и магнитной осью преобразователя, совпадающей в первом приближении с нормалью к плоскости преобразователя.

Особенно сильно эффект Холла проявляется в германии (Ge), кремнии (Si) и в полупроводниках, состоящих из элементов III и V групп периодической системы.

Постоянные Холла для полупроводниковых материалов имеют порядок 10^2 — 10^4 мЗ/(А*с), в то время как для чистых металлов, например для меди, $R_{\text{Хл}} = 6 \cdot 10^{-11}$ мЗ/(А*с).

Кристаллические преобразователи Холла выполняются в виде тонких пластинок ($d = 0,01$ — $0,2$ мм), которые вырезаются из монокристаллов и шлифовкой доводятся до необходимой толщины. Выводы укрепляются на боковых гранях путем пайки или сварки. Пластины наклеиваются на подложки из радиотехнической слюды, ультрафарфора или ситалла.

Хорошими метрологическими характеристиками отличаются пленочные преобразователи Холла из тонких поликристаллических пленок InAs и InSb на стеклянных подложках и преобразователи на основе гетерозипитак-сиальных структур InSb и GaAs на подложках из полуизолирующего арсенида галлия. Чувствительный элемент преобразователя выполняется в виде тонкой пленки (5—10 мкм) способом фотолитографии. Такие преобразователи можно выполнять сложной формы с малой площадью чувствительной зоны (0,2 X 0,05 мм и менее).

Основная погрешность большинства приборов, в которых используются преобразователи Холла, составляет 0,5—1,0 % и более. Только при применении сложных методов коррекции можно снизить погрешность измерения до 0,1—0,2 % при работе в узком диапазоне температур.

Нашли широкое применение из-за простоты конструкции и дешевизны. Наиболее широкое применение преобразователи Холла получили для измерения параметров постоянных, переменных и импульсных магнитных полей и для определения характеристик ферромагнитных материалов. Кроме этого, они используются для измерений ряда других физических величин, которые легко преобразуются в изменение магнитной индукции (электрические токи, угловые и линейные перемещения и др.) (Применялись в клавиатурах с клавишами на магнитах.)

