

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

**Элементы и устройства систем
автоматического управления
(первичные преобразователи, исполнительные органы)**

Научно-образовательный модуль
в системе дистанционного обучения MOODLE

УДК 621.31

Автор-составитель: **Медников Валерий Александрович, Матюнин Сергей Александрович**

Элементы и устройства систем автоматического управления (первичные преобразователи, исполнительные органы) [Электронный ресурс] : научно-образоват. модуль в системе дистанционного обучения MOODLE / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. В. А. Медников, С. А. Матюнин. - Электрон. текстовые и граф. дан. (29,5 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (DVD-R).

Научно-образовательный модуль разработан на кафедре электронных систем и устройств радиотехнического факультета для обучения бакалавров по направлению подготовки 220700.62 «Автоматизация технологических процессов и производств», изучающих дисциплину «Элементы и устройства систем автоматического управления (первичные преобразователи, исполнительные органы)» в 6 семестре.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

Введение

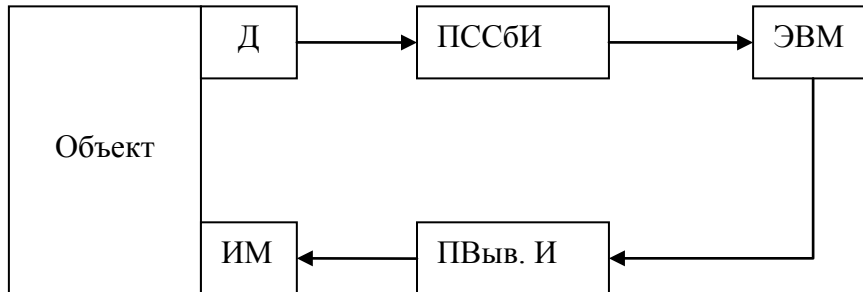
Цель курса – получить сведения и изучить измерительные преобразователи.

АСНИ – автоматизированные системы научных исследований.

АСУТП – автоматизированные системы управления технологическим процессом.

Во всех этих АСУ имеется объект исследований.

В общем виде можно представить:



Д – датчик

ПССБИ – подсистема сбора измеряемой

ПВыв. И – подсистема вывода информации.

В АСУТП эта структура является типовой

В АСНИ эта цепочка разорвана

Д – это самое «узкое» место

1. Датчики

Датчики – это устройства, которые устанавливаются непосредственно на объекте и преобразуют физические величины в электрические сигналы. (наиболее распространенные V, I)

Все датчики классифицируются:

- по входным величинам:

Датчики температуры;

Датчики давления;

Датчики, которые измеряют расход топлива, окислителя, воздуха и т.д.

Датчики оборотов;

Датчики усилий (датчик тяги);

Датчики скорости (велосиметры), ускорения (оксилерометры);

Датчики вибрации;

Датчики электрических величин.

- по выходным сигналам:

1) Генераторные (активные) – это датчики, которые вырабатывают на своем выходе сигналы V или I, или электрических импульсов.

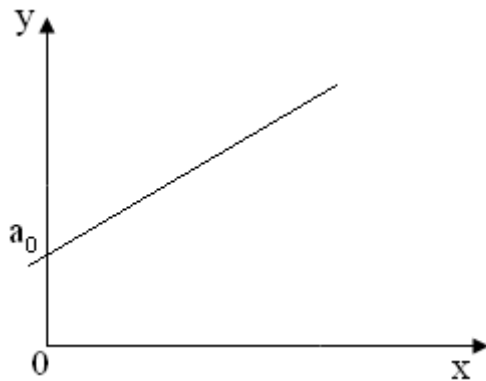
2) Параметрические (пассивные) – это датчики (резистивные, индуктивные, ёмкостные) сами не вырабатывают сигнал, у них меняется параметр R, L, C под действием входной величины.

Чтобы получить электрический сигнал, для этого параметрические датчики включаются в электрическую схему и на выходе электрический сигнал. Затем сигнал поступает в ПССБИ, и далее в ЭВМ.

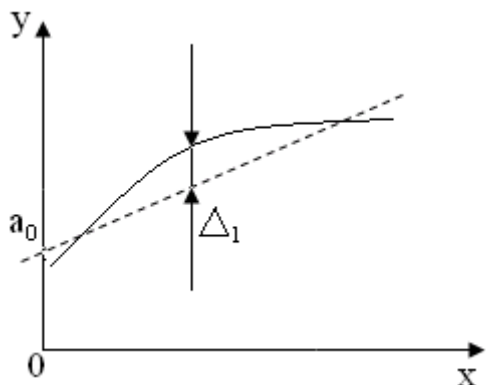
Все датчики и отдельные преобразователи, входящие в ПССБИ являются Измерительными преобразователями (ИП), главной характеристикой, которой является способность преобразовывать входную величину в выходную с заданной точностью

Основные характеристики ИП:

1. уравнение преобразования $y=f(x)$ или градуировочная характеристика ИП



$$y = a_0 + kx \text{ (линейный ИП)}$$



Задается полиномом 2, 3 и выше порядков

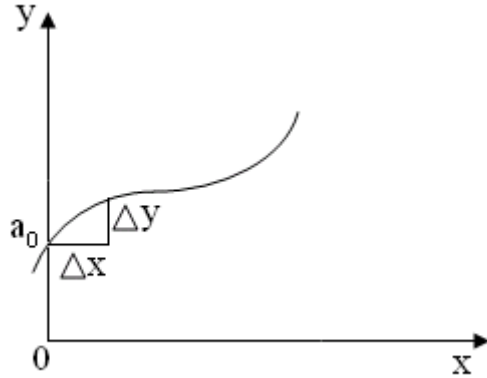
$$y = a_0 + kx + \underbrace{\alpha a_0^2 + \beta x^3 + \dots}_{\text{погрешность}}$$

Стараются аппроксимировать полиномом первого порядка, но из-за этого возникает погрешность. Но аппроксимируют, если эти погрешности не превосходят заданные.

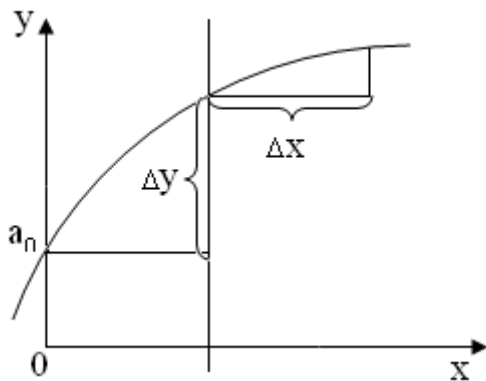
2. Чувствительность $S = \frac{dy}{dx}$

$$y=f(x)$$

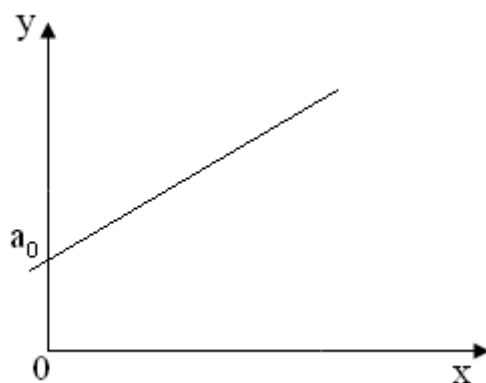
Если градуировочная характеристика является резко нелинейной, тогда:



$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$



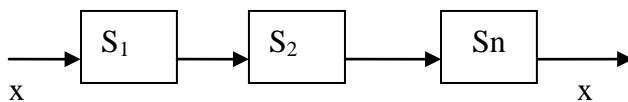
Если характеристика линейная:



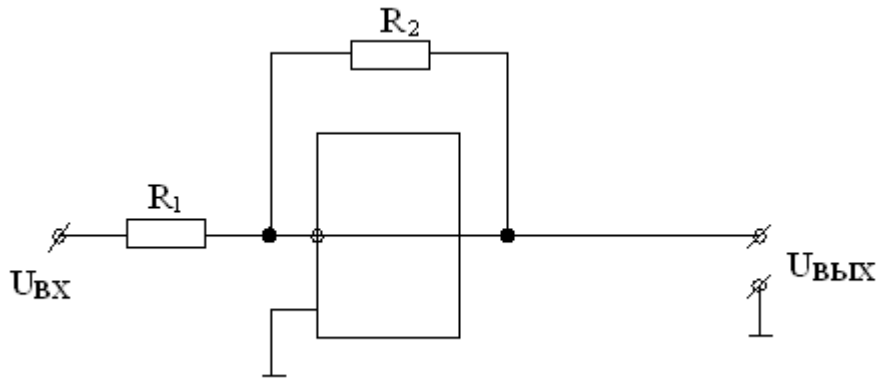
$$S = \frac{y}{x}$$

ИП часто соединяется последовательно.

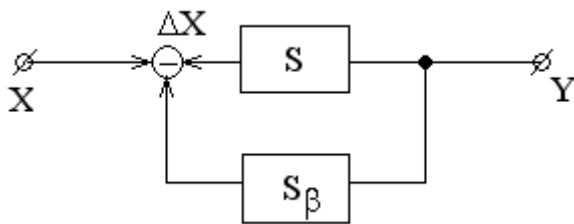
В этом случае суммарная чувствительность линейного преобразователя будет:



$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n$$



$$k = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = S = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Коэффициент усиления – это есть чувствительность для усиления.}$$



$$S = \frac{Y}{\Delta X}$$

$$S_{\beta} = \frac{X_{\beta}}{Y}$$

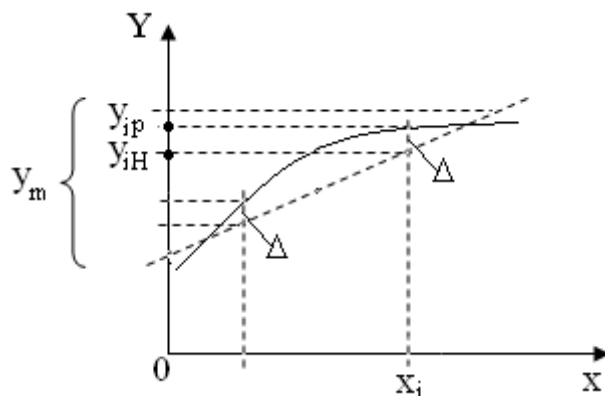
$$\Delta X = X - X_{\beta}$$

$$X = \Delta X + X_{\beta}$$

$$S_{оос} = \frac{Y}{X} = \frac{Y}{\Delta X + X_{\beta}} = \frac{1}{\frac{\Delta X}{Y} + \frac{X_{\beta}}{Y}} = \frac{1}{\frac{1}{S} + S_{\beta}} = \frac{S}{1 + SS_{\beta}} = S_{ос} \quad **$$

- 1) Чувствительность ИП с ООС меньше чувствительности ИП с разомкнутым ОС.
- 2) Если стабильность преобразования S_{β} в цепи ООС высокая, то тогда стабильность $S_{ос}$ выше, чем стабильность ИП S .

3. Погрешности ИП.



Y_m -диапазон

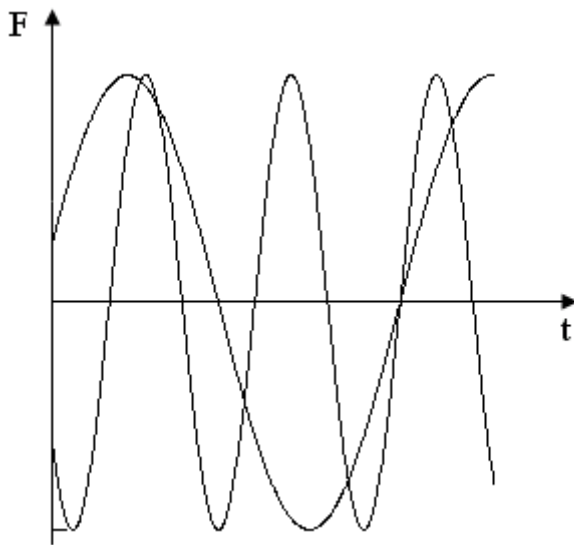
$$\Delta = y_p - Y_H$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta}{Y_i} \cdot 100\%$$

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{\Delta}{Y_m} \cdot 100\%$$

Погрешности делятся на:

- статические – это такие, которые возникают при неизменной входящей измеряемой величине.
- динамические – это погрешности, которые возникают при изменении измеряемой величины во времени.



Статические погрешности

Делятся на:

- основные погрешности ИП.
- дополнительные погрешности ИП.

Основные возникают при нормальных условиях эксплуатации ИП.

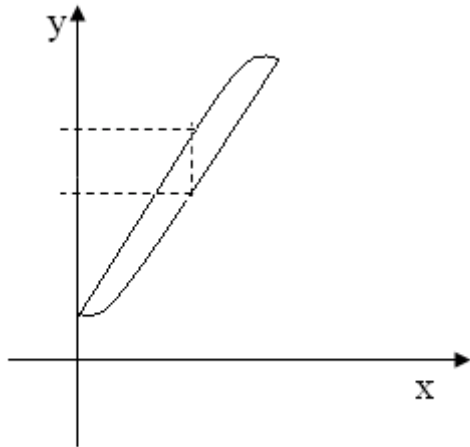
Дополнительные погрешности возникают когда изменяются нормальные условия эксплуатации.

Основная погрешность-погрешность нелинейности градуированной характеристики.

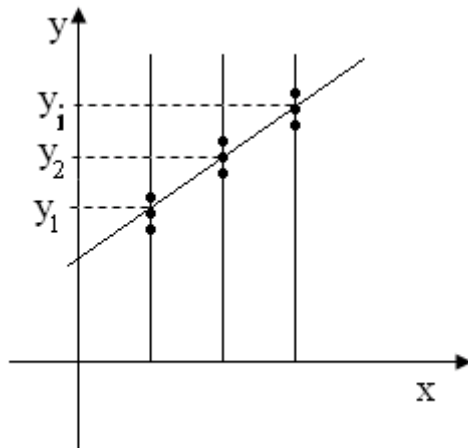
$$y = a_0 + a_1 x + a_2 \cdot x^2 + \dots$$

$$\Delta_H = a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + \dots$$

Для борьбы с этой погрешностью вводят нелинейную градуированную характеристику или погрешность отклонения реальной градуированной характеристики от номинальной – погрешность вариаций или Гистерезиса – Это погрешность, которая возникает между прямым и обратным ходом луча.



Предельная погрешность характеризует случайные отклонения выходной величины, возникающее под действием неконтролируемых внешних факторов.



$$\frac{y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}}{n} = \bar{y}_i$$

$$y_{i1} - \bar{y}_i = \Delta_1$$

$$y_{i2} - \bar{y}_i = \Delta_2$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n-1}}$$

В ИП говорят, что средне-квадратичное отклонение допустим составляет $p=0,99$; $p=0,997$; $P=0,97$.

Для того, чтобы определить основную погрешность, необходимо просуммировать погрешности вариационную, предельную и нелинейную.

Предельная погрешность $\delta_{пр} = 3\sigma = 3S$. При доверительной вероятности $P=0,99$ и $n \geq 10$ коэффициент Стьюдента $k \approx 3$. При той же P , но $n=2$ коэффициент Стьюдента > 30 .

Вывод: Чем больше измерений, тем с большей точностью может определена погрешность.

Суммирование погрешности

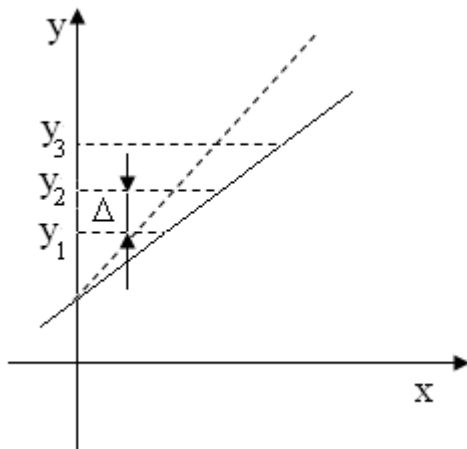
1. Когда несколько преобразователей связаны последовательно. Все зависит от того, каким образом между собой связаны погрешности.
2. Если погрешности отдельных ИП жестко коррелированы между собой.

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots}$$

Так можно определить основную погрешность ИП, сложить системную и случайную составляющие

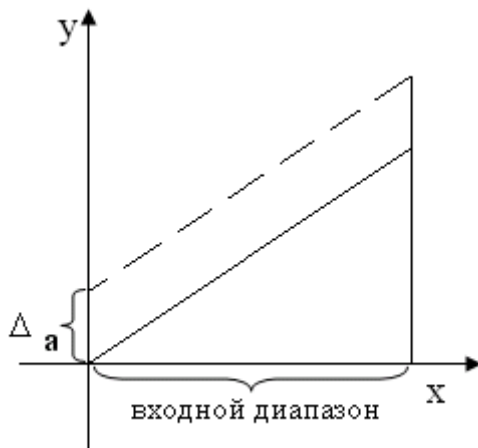
3. Когда ничего не известно как связаны между собой погрешности ИП. Погрешности складываются арифметически по модулю.

Кроме всего прочего погрешность возникает если изменить чувствительность.



$$\delta_m = \frac{\Delta}{y} \cdot 100\%$$

Аддитивная погрешность.

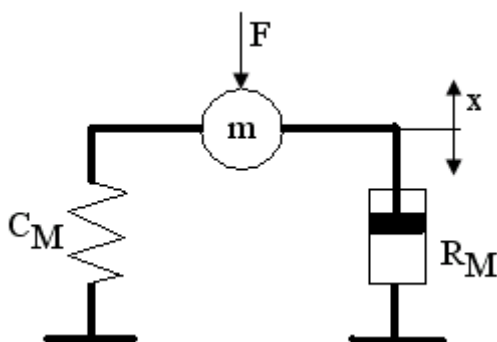


Как правило, она задается в абсолютных величинах приходится ко входу. В некоторых случаях величину аддитивной погрешности задают в %, тогда абсолютную величину привязывают ко входу, делят на входной диапазон. Обычно об аддитивной и мультипликативной погрешностях говорят, когда говорят о дополнительных погрешностях..

8.009; 8.011 – ГОСТ

ГОСТ говорит, что нужно задавать не погрешность, а функцию влияния.

Динамические погрешности.



$$F = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + R_M \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_M} \cdot x$$

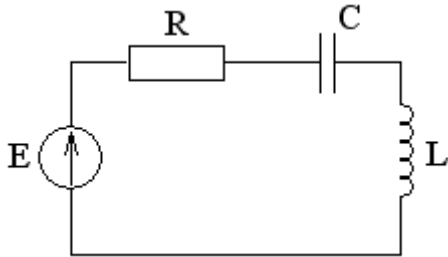
$$\frac{d^2 \cdot x}{dt^2} + \frac{R_M}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{1}{m \cdot C_M^2} = \frac{F}{m} \cdot \frac{C_M}{C_M}$$

$$\frac{R_M}{m} = 2\delta \quad \delta - \text{показатель затухания.}$$

$$\frac{1}{m \cdot C} = \omega_0^2 \quad \omega_0^2 - \text{собственная частота механического звена.}$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 \cdot x = \omega_0^2 \cdot F \cdot C_M \quad *$$

То же самое для колебательного контура.



$$E = U_R + U_C + U_L = i \cdot R + \frac{1}{C} \int i dt + L \cdot \frac{di}{dt} = R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} \cdot q + L \cdot \frac{d^2 q}{dt^2}$$

Если так же ввести обозначения, то

$$\frac{R}{L} = 2\delta$$

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2$$

$$Q = CU$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \omega_0^2 \cdot Q$$

Эти дифференциальные уравнения идентичны; следовательно механические колебания контура и электрические идентичны. Поэтому механические звенья часто моделируются с помощью электрических цепей, используя методы электро-механической аналогии. Таким образом, для того, чтобы исследовать погрешность необходимо исследовать дифференциальные уравнения.

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} + 2\delta \cdot \frac{dq(t)}{dt} + \omega_0^2 q(t) = \omega_0^2 Q(t)$$

$$p^2 q(p) + 2\delta p q(p) + \omega_0^2 q(p) = \omega_0^2 Q(p)$$

$$q(p) = \frac{\omega_0^2 Q(p)}{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2}$$

$$N(p) = \frac{q(p)}{Q(p)} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2} \quad \text{Передаточная функция ИП}$$

Компенсационная чувствительность получается при замене $p=j\omega$, $(j\omega)^2$

$$S(j\omega) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2\delta j\omega}$$

$$S(j\eta) = \frac{1}{1 - \eta^2 + 2 \cdot j \cdot \frac{\delta}{\omega_0} \cdot \frac{\omega}{\omega_0}} \quad \frac{\omega}{\omega_0} = \eta \quad \frac{\delta}{\omega_0} = \beta$$

$$S(j\eta) = \frac{1}{1 - \eta^2 + 2 \cdot j \cdot \beta \cdot \eta}$$

Модуль комплексной чувствительности

$$|S(j\eta)| = S(\eta) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta)^2 + (2\beta\eta)^2}}$$

Проанализируем этот модуль, как он меняется с изменением частоты при разных коэффициентах успокоения (ρ).

При $\eta=0$ $S(\eta)=1$

При $\eta=1$: $\beta=0$ $S(\eta)=\infty$

$\beta=1$ $S(\eta)=0$

$\beta=1$

$\eta=1$ $S(\eta)=1/2$

$\beta=0,5$ $S(\eta)=1$

При $\eta < 1$ всегда происходит падение чувствительности, исключением служит когда $\beta < 1$. Когда $\beta = 0 \dots 1$ есть участок в диапазоне $\eta = 0 \dots 1$ когда $|S(\eta)|$ превышает 1.

Нам нужно получить такой датчик, чтобы чувствовались как можно больше колебания (большой диапазон). В диапазоне частот от 0 до 1 получается меньше погрешность.

Для каждого конкретного ИП наибольшая область частот при наименьшей динамической погрешности получается при коэффициенте успокоения (β)=0,7.

Переходная характеристика ИП.

Два метода исследования динамики ИП.

$$\frac{d^2 \cdot q(t)}{dt} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{dq(t)}{dt} + \omega_0^2 q(t) = \omega_0^2 Q(t)$$

$$p^2 q(p) + 2\delta q(p) + \omega_0^2 q(p) = \omega_0^2 Q(p)$$

$$q(p) = Q(p) \cdot \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\delta p + \omega_0^2}$$

$$q(t) = Q(t) \cdot \left(1 - e^{-\delta t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot \sin(\omega t + \phi) \right)$$

Будем считать входное воздействие=1, тогда выходной сигнал $h(e)$ будет имеет характеристику:

$$h(t) = 1 - e^{-\beta\omega_0 t} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\beta^2} \cdot \omega_0 \cdot t + \arctg\left(\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}\right)\right)$$

1. $\beta < 1$ – колебательный режим
2. $\beta > 1$ – аperiodический режим
3. $\beta = 1$ – критический режим

$$\beta = 1 \quad h(t) = 1 - e^{-\omega_0 \cdot t} (1 + \omega_0 \cdot t)$$

эта характеристика позволяет определить как происходит периодический процесс.

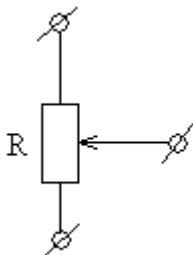
$$y(t) = \frac{1}{\omega_0^2} \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{2} \left(\frac{e^{\omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1} \cdot t}}{1 - \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta}} + \frac{e^{-\omega_0 \sqrt{\beta^2 - 1} \cdot t}}{1 - \frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta}} \right) \right]$$

$$y(t) = \frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\beta} \cdot \cos\left(\omega_0 \cdot \sqrt{1 - \beta^2} \cdot t + \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\beta}\right)\right) \right)$$

Резистивные датчики.

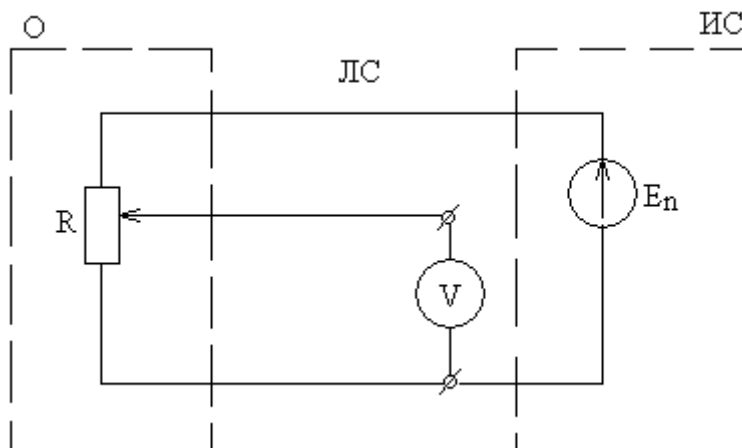
Среди резистивных можно выделить датчики с большим измерением сопротивления и с малым измерением сопротивления.

Потенциометрические датчики.



Основное назначение: измерение угловых и линейных перемещений. В некоторых случаях подложку выполняют в виде спирали.

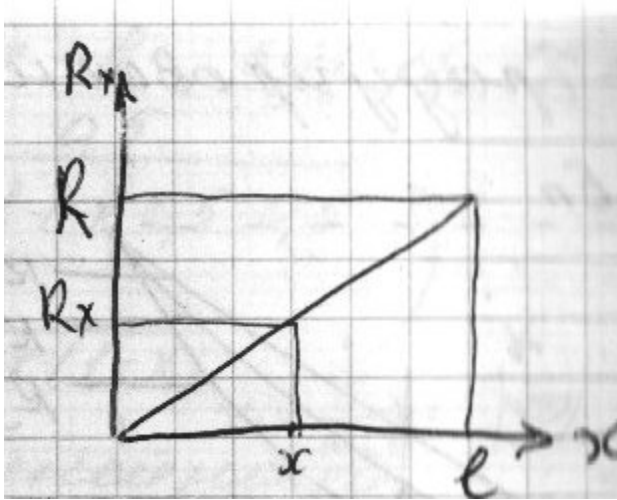
Схема включения:



$$U_x = \frac{R_x}{R} \cdot E_n$$

$X=0 \dots R$;
 $R_x=0 \dots R$;
 $U_x=0 \dots E_n$;
 x -ВХОД; U_x -ВЫХОД.

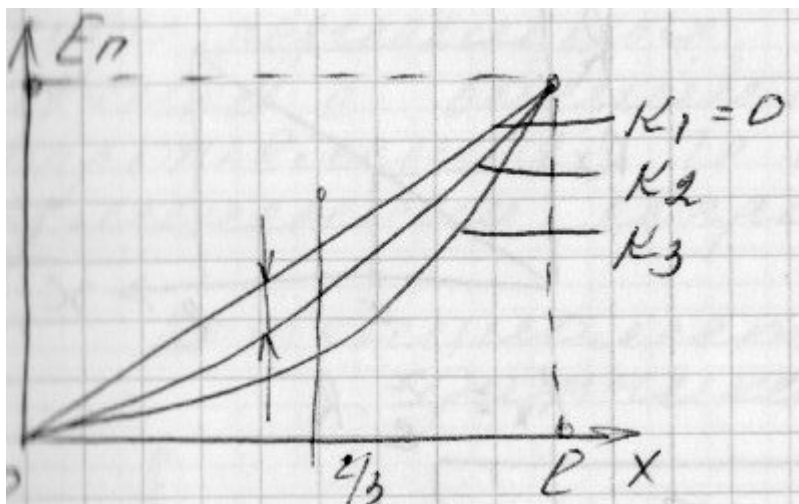
Чувствительность $S = \frac{U_x}{x} = \frac{E_n}{1}$



Для увеличения S надо увеличить E_n .
 Ограничение:

1. допустимая мощность, которую можно рассеивать датчиком.
 $P=IU$ $P_{\text{доп}}=E_n^2/R$
 Часто это ограничение даст возможность подавать до нескольких сотен вольт
2. условие электро- и искробезопасности. Поэтому > 40 В на датчики не подают, кроме того стандартный АЦП работает в диапазоне $0 \dots 10$ В.

Градуировочная характеристика.



$R_{\text{вх}}=R_n$ для нашей цепи.
 Можно записать:

$$\begin{aligned}
 U_x &= E_n \cdot \frac{(R_x // R_n)}{R - R_x + (R_x \cdot R)} = \\
 &= E_n \cdot \frac{R_x \cdot R}{(R_x + R) \cdot \left(R - R_x + \frac{R_x \cdot R}{R_x + R} \right)} = E \cdot \frac{R_x \cdot R}{RR_x + RR - R_x^2 - R_x \cdot R + R_x \cdot R} =
 \end{aligned}$$

$$= E_n \cdot \frac{x}{1 + kx - kx^2} *$$

Здесь ввели обозначения: $U_x = E_n \cdot x$ $x = 0 \dots 1$ $k = \frac{R}{R_H}$

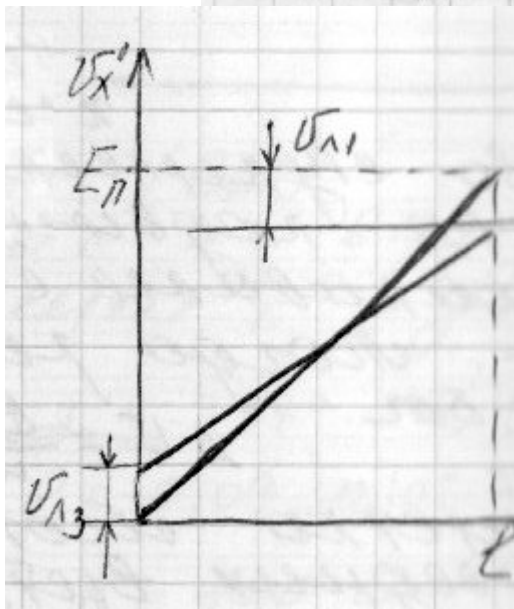
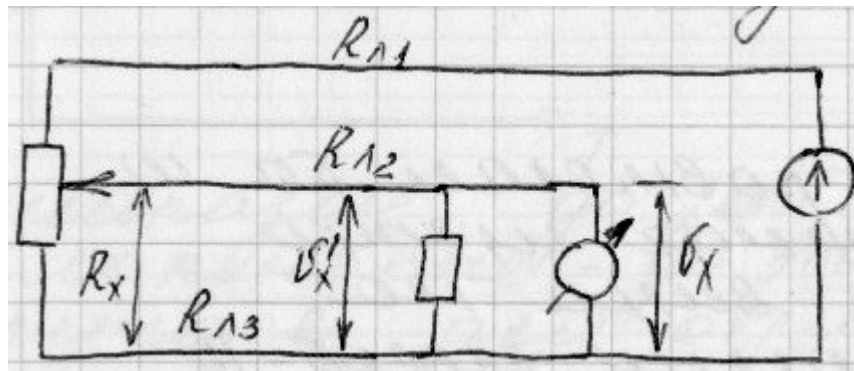
При $k \ll 1$ выражение * стремится к исходному, то есть сопротивление нагрузки не влияет на градуировочную характеристику, если оно намного больше сопротивления датчика.

Крайние точки $x=0$ и $x=L$ будут те же в середине диапазона:

$$U_x = E_n \cdot \frac{x}{1 + kx(1 - x)}$$

Это погрешность нелинейности. Её максимум при $x \approx 2/3$. Для снижения погрешности нелинейности надо повысить сопротивление нагрузки.

Влияние сопротивления линии связи.



Влияние л3 и л1

$$U_x = U_{л3} + U_{кд} + U_{л1}$$

Появляется аддитивная и мультипликативная погрешность

Влияние л2:

$$U_x = U_x^1 \cdot \frac{R_H}{R_H + R_{л2} + R_{л3}}$$

Бороться с этим можно увеличивая R_H , то есть увеличивая $R_{вх}$ измерительного прибора (в данном случае – вольтметра) для того чтобы снизить погрешность.

$$\text{Погрешность: } \delta_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{н}}} \cdot 100 \%$$

Разрешающая способность.

Количество ступеней равнялась бы ω , если бы подвижные щётки перескакивали с витка на виток.

$$\text{Тогда разрешающая способность была бы } \Delta U = \frac{E_n}{\omega}$$

Но щётка может замыкать 2 соседних витка. Это приводит к тому, что у датчика общее сопротивление уменьшается при этом, следовательно R_x осталось прежним следовательно на графике появилась его магнитная ступенька. Поэтому разрешающая способность будет:

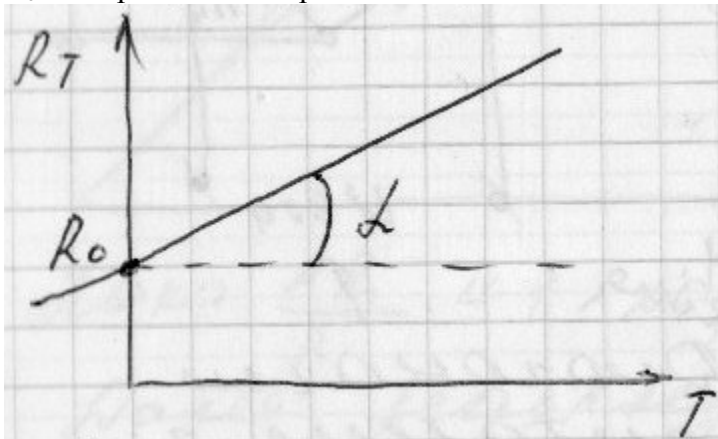
$$\Delta U = \frac{E_n}{2\omega - 2}$$

Термометры сопротивления.

Используют 2 типа термометров – медные и платиновые. Это металлические термометры. 2-ой тип – полупроводниковые. В металлическом термометре сопротивление изменяется по закону: $R=R_0(1+\alpha T)$, где

α – температурный коэффициент сопротивления.

R_0 – сопротивление при $t=0$ С.



Диапазон: до 200 С

Платиновые – до 500 С – и в ряде случаев для отрицательной t – до -200 С.

$\alpha \approx 0,004$ 1/град.

Итак, если $t=0$ С $R=100$ Ом

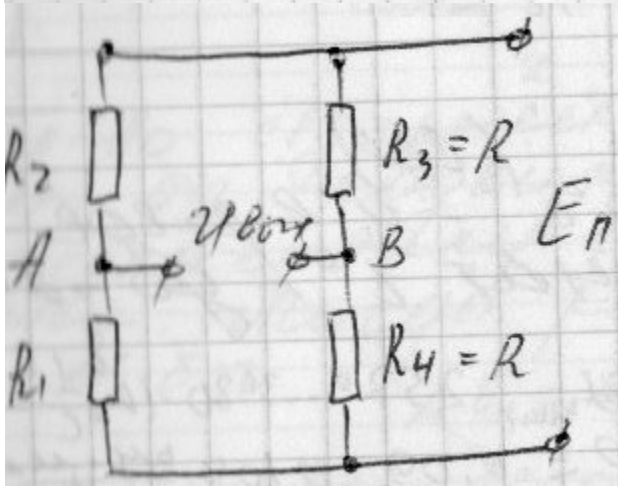
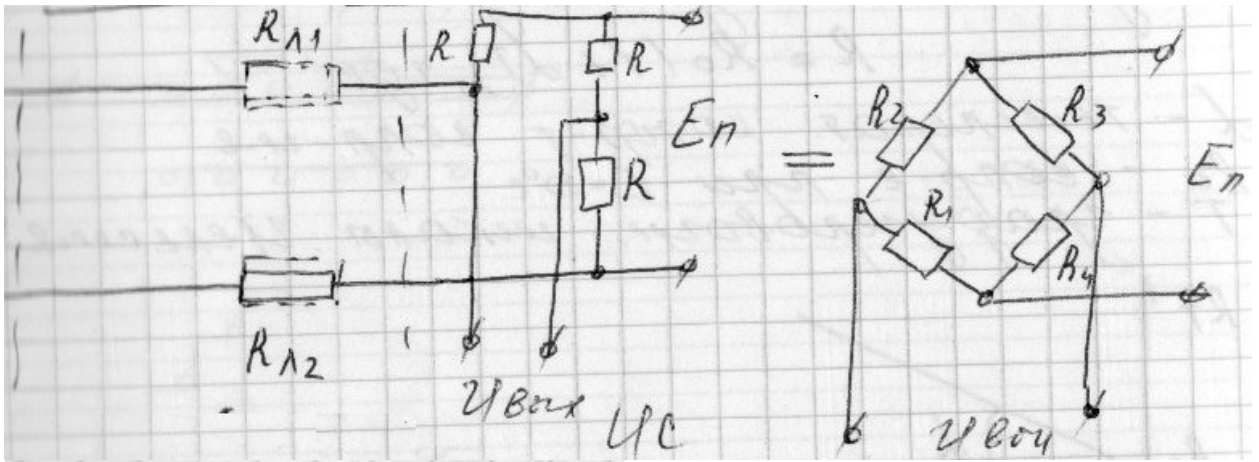
$t=100$ С $R=140$ Ом.

При выходе за линейный диапазон (если > 200 С)

$$R_T = R_0 \left(1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma (T - 100)^3 \right)$$

β дает повышение чувствительности, но незначительно (доли процента).

**Чувствительность.
Угол наклона.
Схема включения.**



$$U_{\text{ВЫХ}} = \phi_a - \phi_b$$

$$\phi_a = E_n \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\phi_b = E_n \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_n \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}$$

Основное уравнение преобразования мостовой схемы.

Свойства мостовых схем.

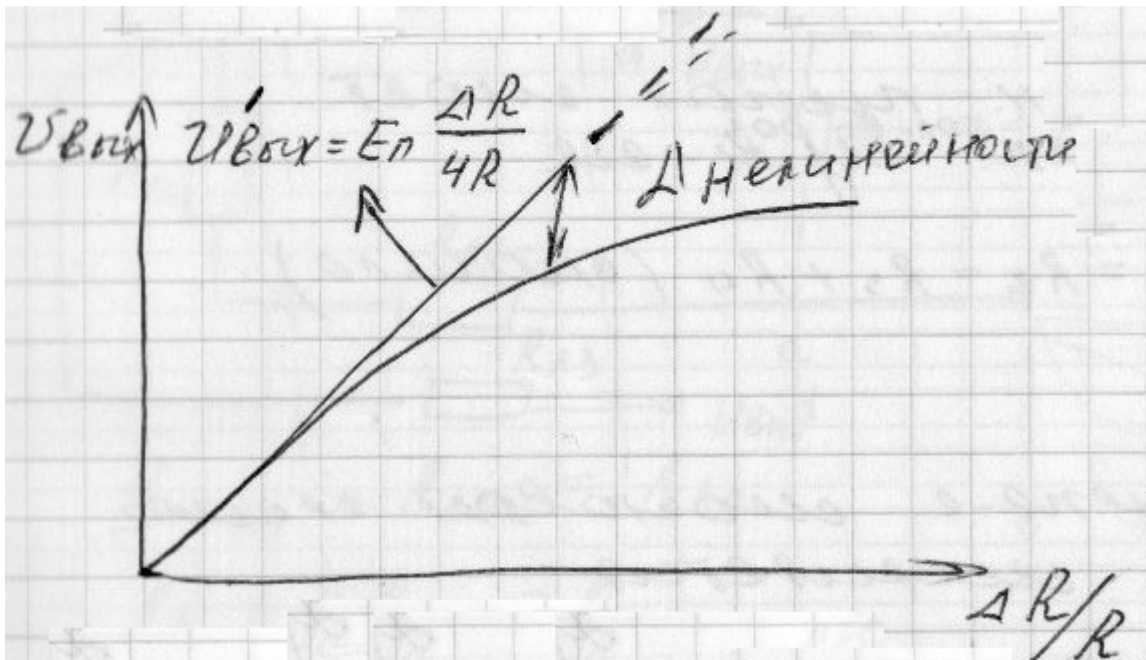
$$R_{тс} = R_0 + \Delta R$$

$$R_1 = R_{тс} + R_{л1} + R_{л2}$$

$$R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$R_1 = R + \Delta R$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_n \cdot \frac{(R + \Delta R) \cdot R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} = E_n \cdot \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} = E_n \cdot \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}}$$



Пока $\frac{\Delta R}{R} \ll 1$ характеристика линейна. Далее наблюдается нелинейность.

$$\delta_H = \frac{\Delta R \cdot 4R}{2R + \Delta R} \cdot 100\% \quad *$$

Следовательно, для уменьшения погрешности нелинейности необходимо увеличить R при том же значении ΔR .

Для уменьшения погрешности нелинейности последовательно с термическим сопротивлением включают добавочное сопротивление, которое является термо-стабильным.

$$R_1 = R_{тс} + R_{лс2} + R_{лс1} + R_{доб}$$

Чтобы не баланс мостовой схемы добавочные сопротивления включают во все плечи мостовой схемы. При этом чувствительность снижается, а погрешность нелинейности уменьшается.

Если в двух соседних плечах мостовой схемы в одинаковое количество раз изменятся сопротивления; $R_1 = R + \Delta R$; $R_2 = R + \Delta R$ то выходное напряжение мостовой схемы не меняется.

Другой случай:

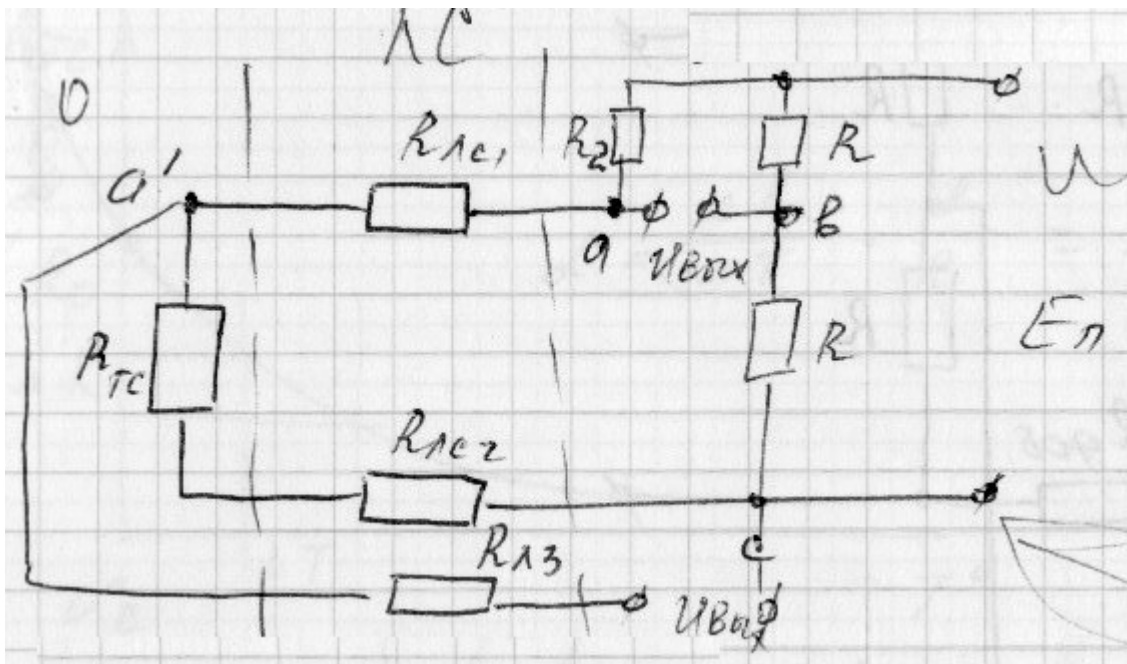
1. $R_2=R_3=R$
 $R_1=R+\Delta R$
 $R_4=R+\Delta R$,
 то $U_{\text{ВЫХ}}=0$
2. $R_2=R-\Delta R$
 $R_3=R$
 $R_1=R+\Delta R$
 $R_4=R$

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_n \cdot \frac{(R + \Delta R) R - (R - \Delta R) R}{(R - \Delta R + R + \Delta R) \cdot (R + R)} = E_n \cdot \frac{R^2 + \Delta R \cdot R - R^2 + \Delta R \cdot R}{2 R^2 - 2 R \Delta R + 2 R^2 + 2 R \Delta R} = E_n \cdot \frac{\Delta R}{2 R}$$

$$S_{\text{ОТН}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_n \cdot \frac{\Delta R}{R}}$$

1. при $\Delta R/R \ll 1$ $S_{\text{отн}}=1/4$
2. при $\Delta R/R \ll 1$ $S_{\text{отн}}=1/2$.

- $R_1=R+\Delta R$
-
- $R_2=R-\Delta R$
-
- $R_3=R+\Delta R$
-
- $R_4=R-\Delta R$



$$R_{\text{лс1}}=R_{\text{лс2}}=R_{\text{лс}}$$

$$R_0+2R_{\text{лс}}=R$$

$$R_1=R_0+\Delta R_{\text{тс}}+2R_{\text{лс}}+2\Delta R_{\text{лс}}=R+\Delta R_{\text{тс}}+2\Delta R_{\text{лс}}$$

$$\delta_{\text{лс}} = \frac{2 \Delta R_{\text{лс}}}{\Delta R_{\text{тс}}} \cdot 100 \%$$

Средством избавления является мостовая схема с трех проводной линией связи.

Если $R_{\text{тс}}+R_{\text{лс}}=R_0+\Delta R_{\text{тс}}+R_{\text{лс}}+\Delta R_{\text{лс}}$

$R_0+R_{\text{лс2}}=R_2+R_{\text{лс1}}=R$ то мостовая схема будет в равновесии и $U_{\text{ВЫХ}}=0$.

Если $\Delta R_{TC}=0$, а $R_{л1}=\Delta R_{лс2}$, то $U_{\text{вых}}=0$
 Если $\Delta R_{TC}\neq 0$, $\Delta R_{л1}=\Delta R_{л2}$, то $U_{\text{вых}}\neq 0$, $\delta_{лс}\neq 0$.
 Для двух проводной линии:

$$\delta_{2л} = \frac{2 \Delta R_1}{\Delta R_{TC}}$$

Для трех проводной линии:

$$\delta_{3л} = \frac{\Delta R_1}{4R_{TC}} \cdot 100 \%$$

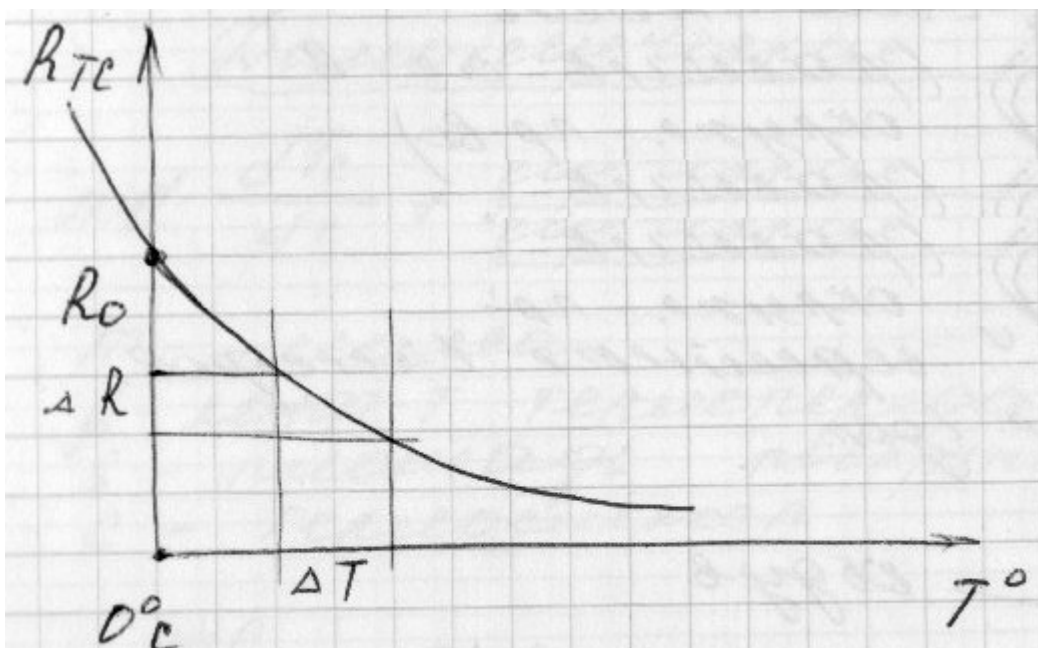
$$\delta_{3л} = \frac{\Delta R_1}{4 (R_{TC} + R_{\text{доб}})} \cdot 100 \%$$

$R=R_{TC}+R_{\text{доб}}$ (добавляют к третьим сопротивлениям R по схеме)

Полупроводниковые ТС

Уравнение преобразования:

$$R_{TC} = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$



$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR_{TC}}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

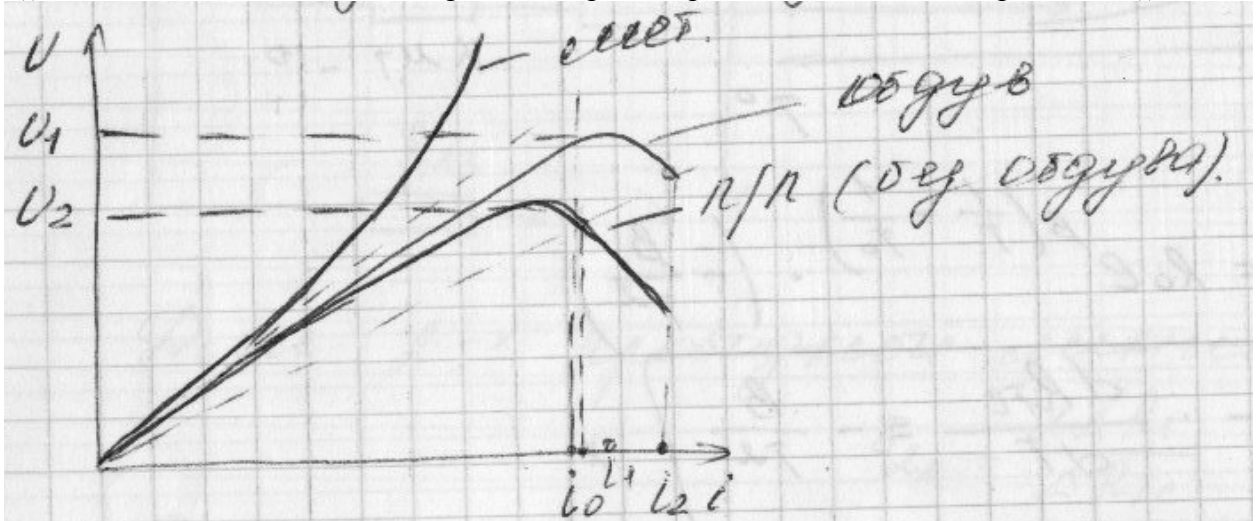
$$\alpha = -\frac{B}{T^2}$$

Чувствительность полупроводникового ТС выше на 1, 2 порядка, чем у металлических. Поэтому их применяют для измерения температуры узким диапазоне. Часто также применяют в биологическом диапазоне (для невысоких температур). По конструкции они также преобладают над металлическими, то есть могут быть довольно маленькими.

Вольт-амперная характеристика ТС.

$P_{\text{доп}} = i^2 R_{\text{ТС}}$ – мощность (рассеивается в окружающее пространство)

$P_{\text{доп}} = 10 \text{ нВт}$ для большинства серийных термометров. Отсюда можно определить $i_{\text{доп}}$.



С ростом I термометр разогревается, сопротивление увеличивается, поэтому U сначала увеличивается, потом уменьшается. Для металлического наоборот. Этот эффект нелинейности ВАХ используется в полупроводниковых термометрах. Поддерживая ток постоянным и обдувая, при этом меняя скорость обдува, будет меняться U .

1) i_0 – режим постоянного тока.

2) $R = \text{const}$.

Динамические характеристики ТС.

$$mc \cdot \frac{dT_c}{dt} + S\varepsilon T_{\text{ТС}} = S\varepsilon T_{\text{Ос}}$$

m – масса

ε – коэффициент теплопередачи

S – площадь поверхности.

c – теплоемкость.

mc

$$\tau \cdot \frac{dT_{\text{ТС}}}{dt} + T = T_{\text{Ос}}$$

$$\tau p T_{\text{ТС}}(p) + T_{\text{ТС}}(p) = T_{\text{Ос}}(p)$$

$$T_{\text{ТС}}(p) = \frac{T_{\text{Ос}}(p)}{\tau p + 1}$$

$$W(p) = \frac{T_{\text{ТС}}(p)}{T_{\text{Ос}}(p)} = \frac{1}{1 + \tau p}$$

$$S(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad \text{- комплексная чувствительность}$$

$$|S(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}}$$

С увеличением ω $|S(j\omega)|$ ω уменьшается и стремится к φ .

ω – частота изменения температуры окружающей среды.

Переходная характеристика:

$$T_{TC}(t) = T_{oc} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

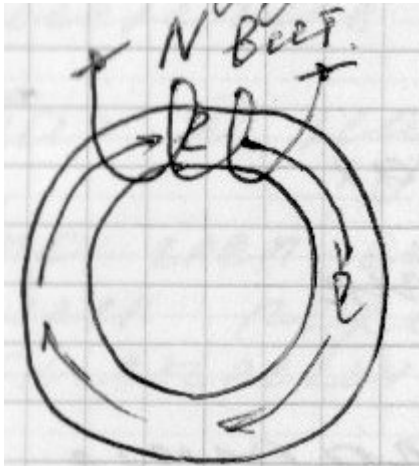
$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = \tau$$

$$h(t) = 1 - e^{-1} = 0,6$$

τ – постоянная времени, то есть это время, за которое сопротивление термометра изменится от начального состояния до значения 0,6 установившегося.

Индуктивный датчик.



L – длина

S – площадь поперечного сечения.

$\mu = \mu_0$

$$L_M = \frac{N^2 \cdot S \cdot \mu}{l} = \frac{N^2}{R_M}$$

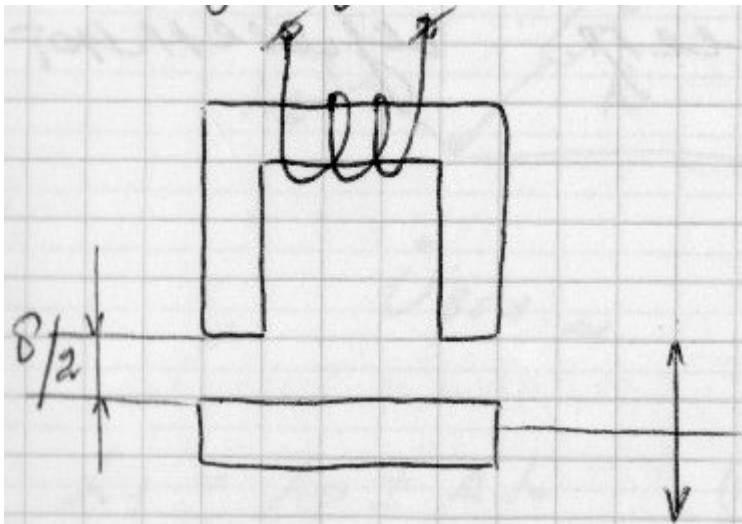
$$R_M = \frac{l}{S \cdot \mu}$$

Если изменяется μ , то такой датчик называется магнитоупругим.

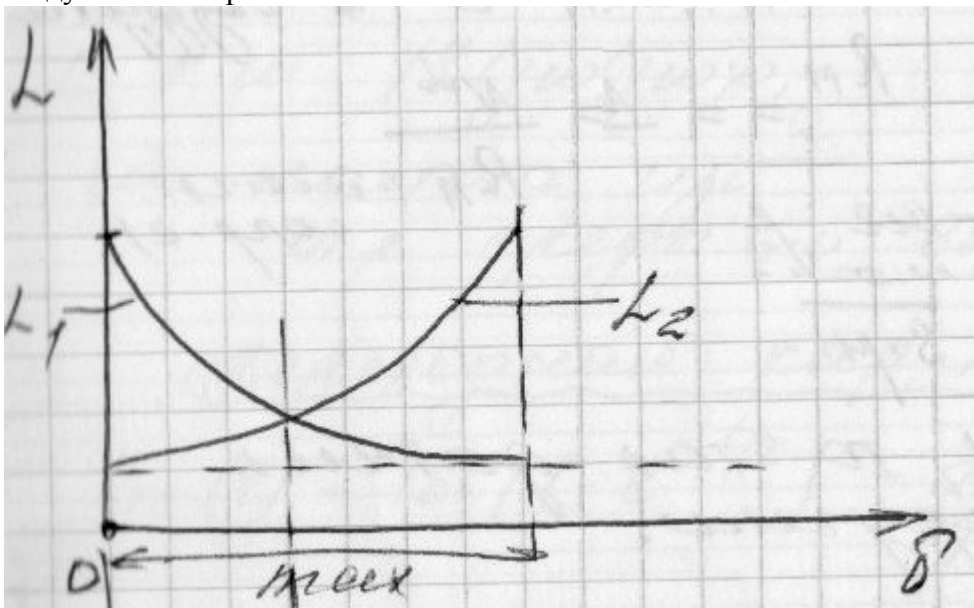
Индуктивный датчик с воздушным зазором.

$$R_M = R_{M_{стали}} + R_{M_{возд. \text{ зазора}}} = \frac{l_{ст}}{S \mu_0 \mu_a} + \frac{\delta}{S \mu_0} = \frac{1}{\mu_0 \cdot S} \left(\frac{l_{ст}}{\mu_a} + \delta \right)$$

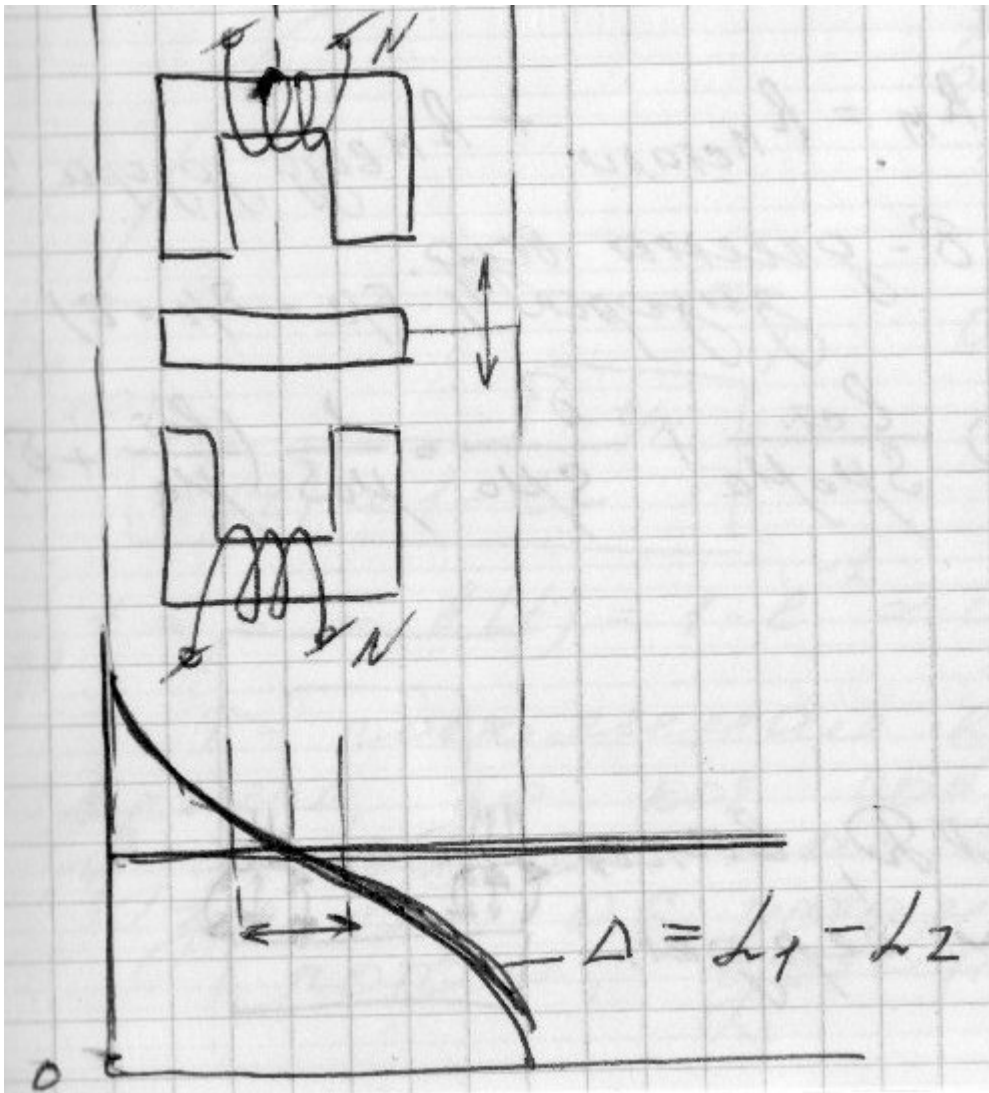
$$L = \frac{N^2 \mu_0 \cdot S}{\frac{l_{ст}}{\mu_a} + \delta}$$



Уравнение преобразования ИД, выполненного из ферро-магнитного сердечника с воздушным зазором.

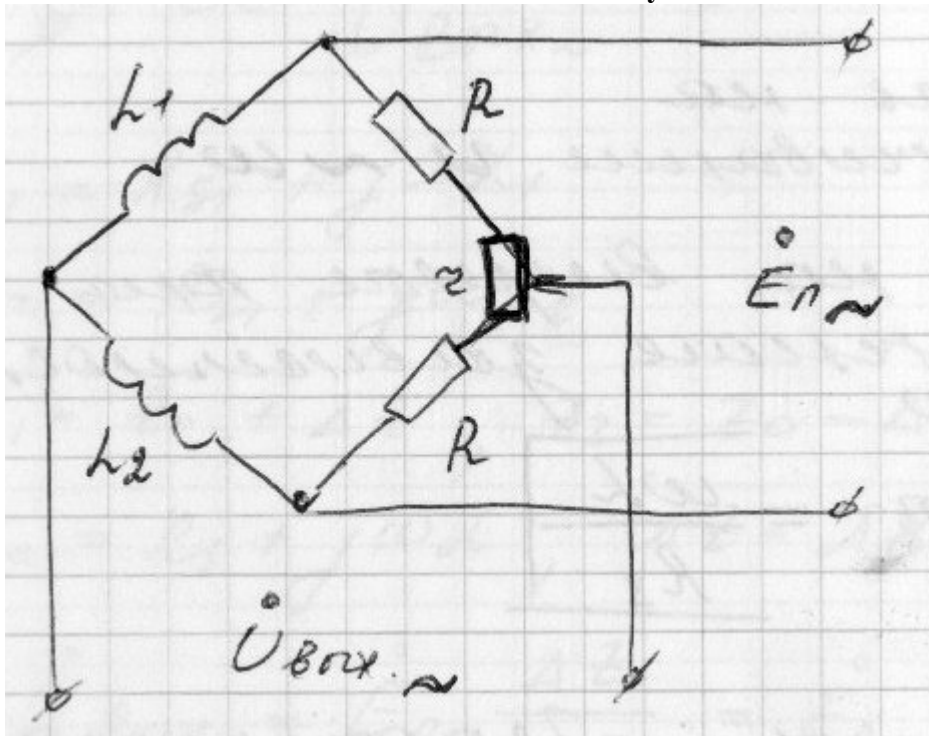


Недостаток – градуированная характеристика нелинейна. Чтобы сделать такой датчик более линейным его конструкцию изменяют.



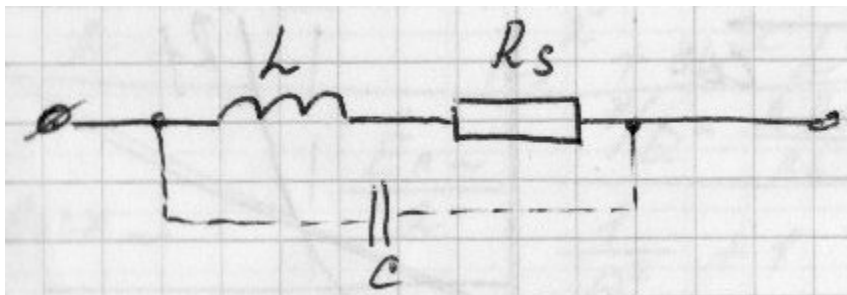
Можно найти такую область применений, в которой погрешность нелинейности была меньше заданной. Такой датчик называется дифференцируемо индуктивный. Это используется для измерения малых линейных перемещений, для измерения больших нужен датчик специальной конструкции.

Схема включения индуктивного датчика.



$$L_1 = L_0 + \Delta L$$

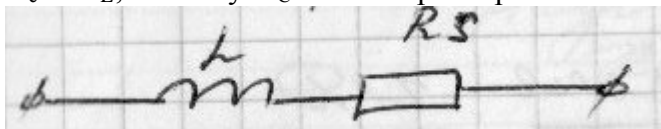
$$L_2 = L_0$$



$$X_L = j\omega L$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega L}$$

Частоты, на которых работает датчик обычно равны единицам или десяткам кГц.
 $X_C \gg X_L$, поэтому X_C можно пренебречь.

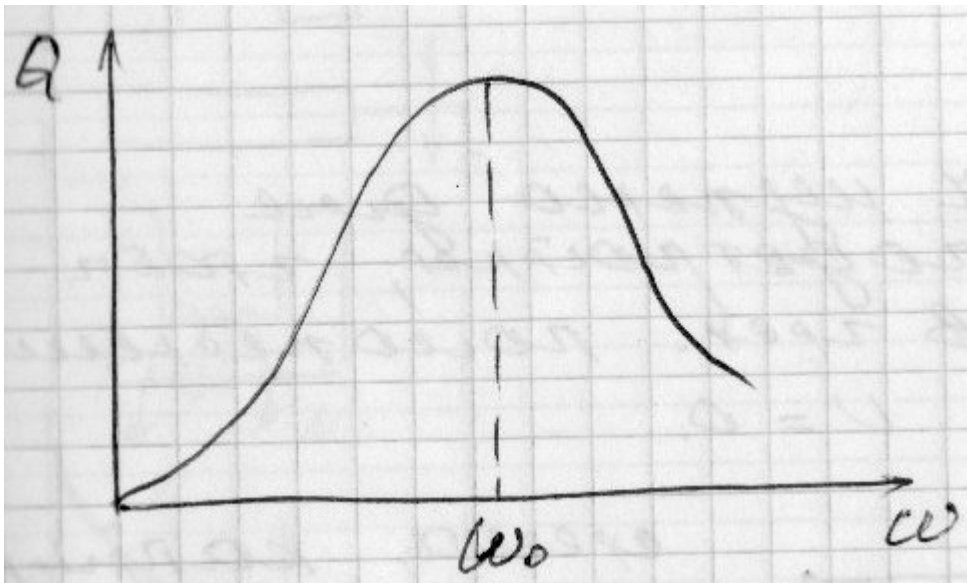


$$R_s = R_{\text{обмотки}} + R_h + R_f$$

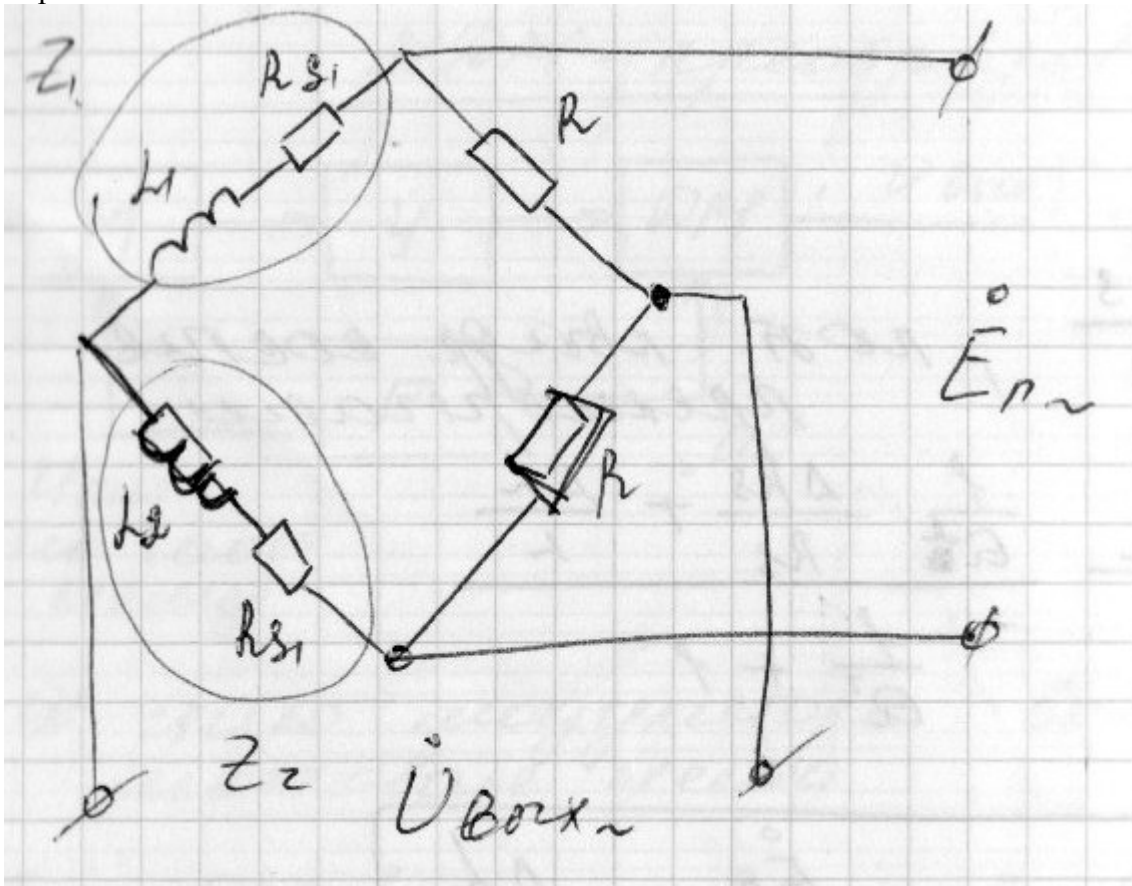
R_h – сопротивление потерь на перемагничивании.

R_f – сопротивление потерь на вихревые токи и квадратичная зависимость от частоты.

$$Q = \frac{\omega L}{R_s} \quad \text{- добротность.}$$



Вернемся к схеме



$$Z_1 = R_{s1} + j\omega L_1$$

$$Z_2 = R_{s1} + j\omega L_2$$

$$Z_1 = Z_0 + \Delta Z \quad Z_2 = Z_0 - \Delta Z$$

$$U = E_n \cdot \frac{\Delta Z}{2 \cdot Z_0} = \frac{E_n}{2} \cdot \frac{\Delta R_s + j\omega \Delta L}{R_s + j\omega L} = \frac{E_n}{2} \cdot \frac{(\Delta R_s + j\omega \Delta L) \cdot (R_s - j\omega L)}{R_s^2 + \omega^2 \cdot L^2} = \blacksquare$$

$$\frac{E_n}{2} \cdot \frac{\Delta R_s \cdot R_s + j\omega L R_s - j\omega \Delta R_s \cdot L + \omega^2 \cdot \Delta L \cdot L}{R_s^2 + \omega^2 L^2}$$

$$U = \frac{E_n}{2} \cdot \frac{\frac{1}{Q^2} \cdot \frac{\Delta R_s}{R_s} + \frac{\Delta L}{L} + j \cdot \frac{1}{Q} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta R_s}{R_s} \right)}{\frac{1}{Q^2} + 1}$$

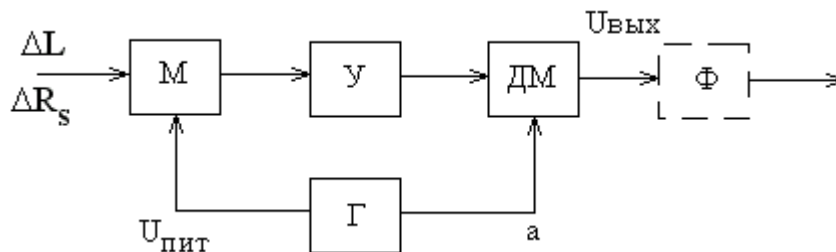
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R_s}{R}$$

$$U = \frac{E_n}{2} \cdot \frac{\frac{1}{Q^2} \cdot \frac{\Delta R_s}{R_s} + \frac{\Delta L}{L}}{\frac{1}{Q^2} + 1}$$

$$1) Q \gg 1 \quad U = \frac{E_n}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$2) Q \ll 1 \quad U = \frac{E_n}{2} \cdot \frac{\Delta R_s}{R_s}$$

Модулятор-демодулятор. МДМ – Преобразователь.

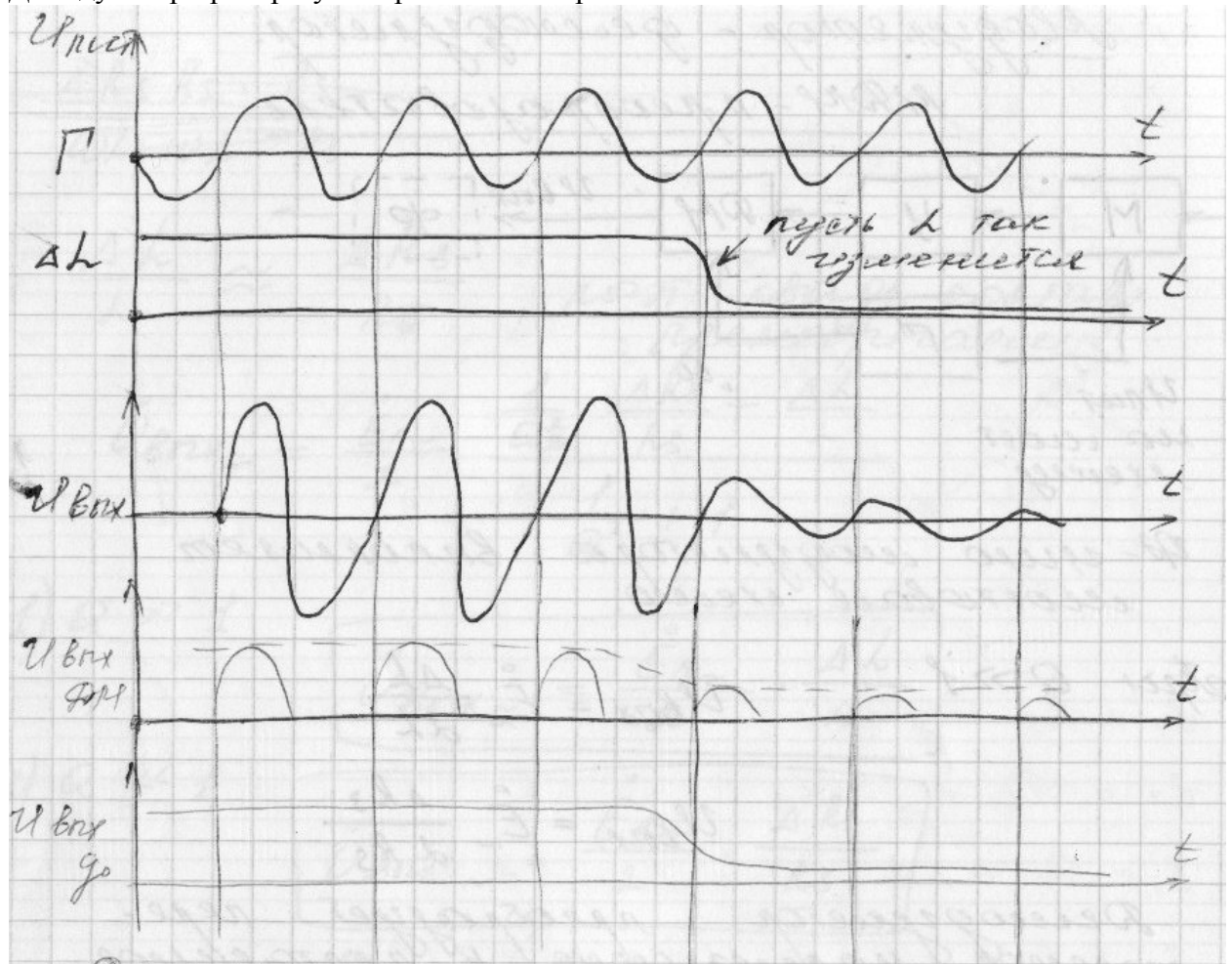


Функцию модулятора выполняет мостовая схема.
При $Q \gg 1$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot \frac{\Delta L}{2L}$$

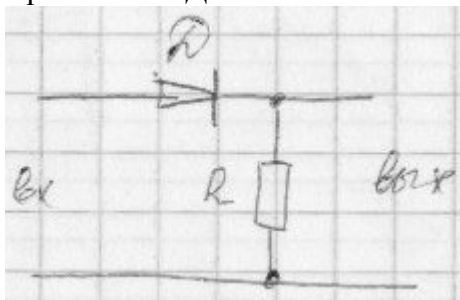
$$U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot \frac{\Delta R_s}{2R_s}$$

Демодулятор преобразует переменное напряжение в постоянное.

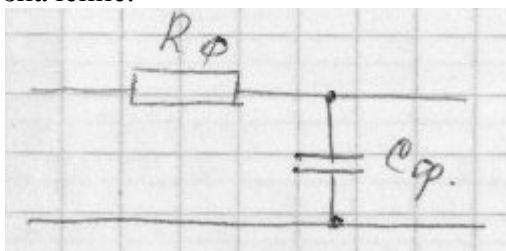


Демодуляторы могут быть самые разные.

Простейший ДМ:

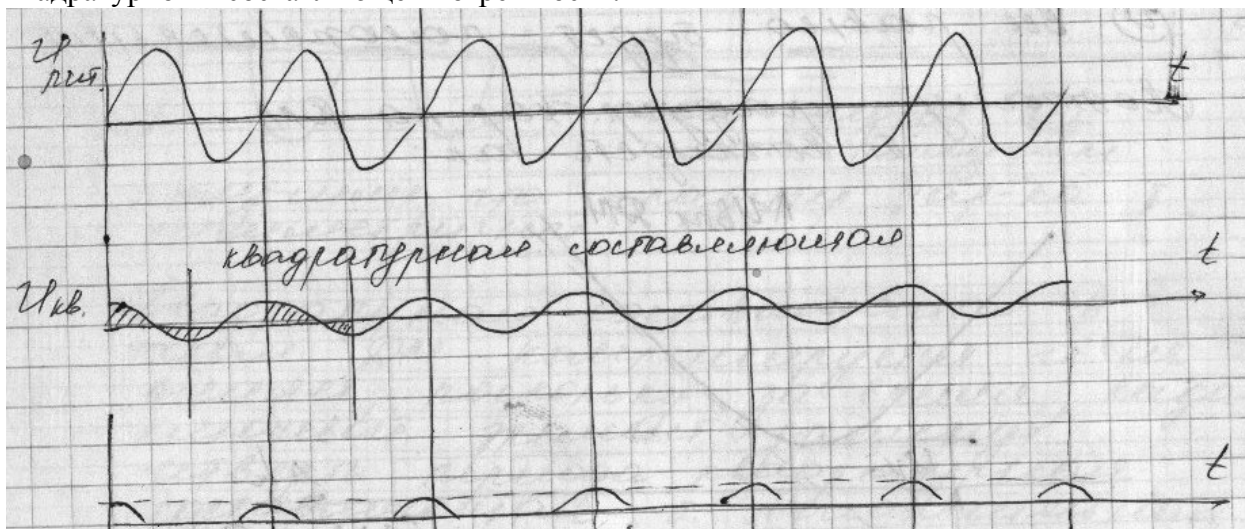


Если U с ДМ подадим на простейший фильтр, то на выходе будем иметь среднее значение.



Получаем повторение применения этого параметра, то есть меняющих ΔL .

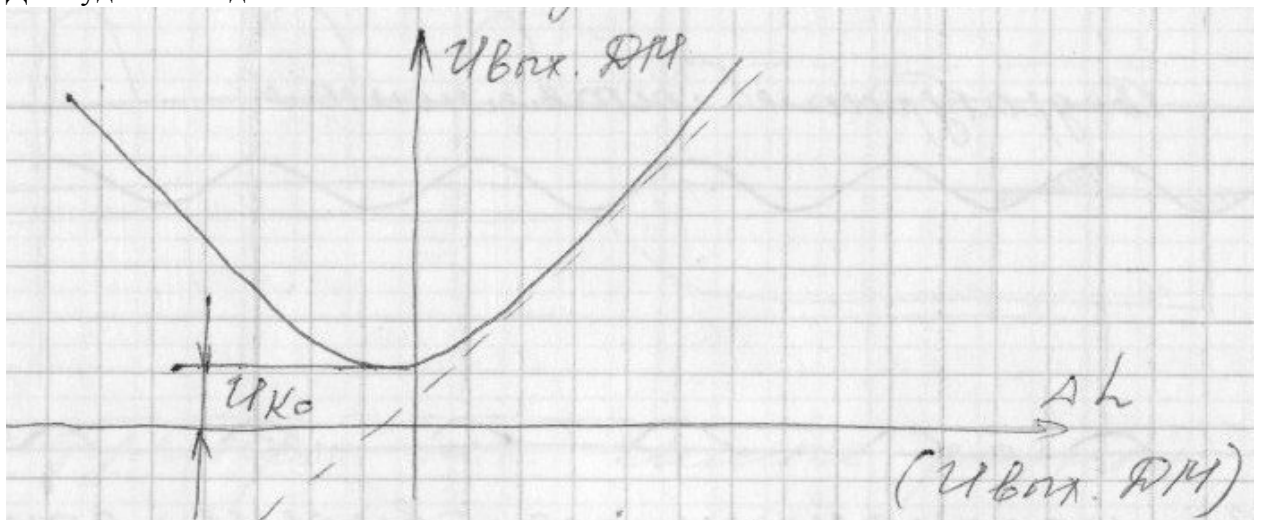
Стрелка «а» говорит о том, что некоторые схемы ДМ являются управляемыми. В более сложных ДМ есть ключи, которыми надо управлять. Принцип управления ДМ: наличие квадратурной и составляющей погрешности.



Это напряжение, которое вносит погрешность в результат измерений. Еще недостаток простейших ДМ: если входной параметр ΔL будет не положительный, а отрицательный, то изменится фаза – было +, стало – полупериода.

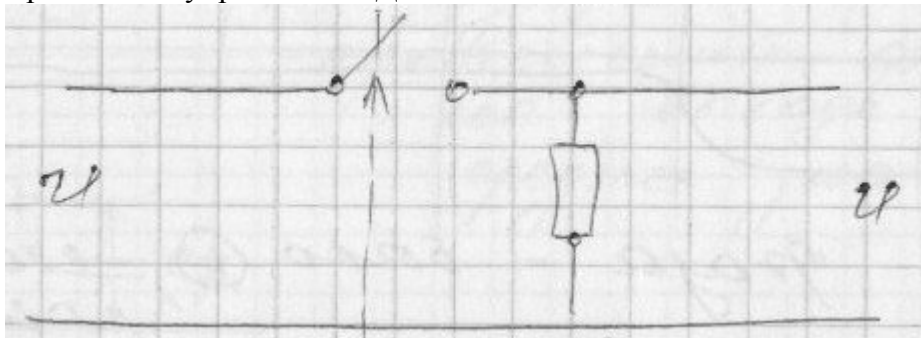


Напряжение все равно будет положительное. Поэтому градуировочная характеристика ДМ будет выглядеть так:



Знак ΔL не воспринимают; если зона чувствительности определяется квадратурной составляющей.

Простейший управляемый ДМ:



Формирование управляющего напряжения.

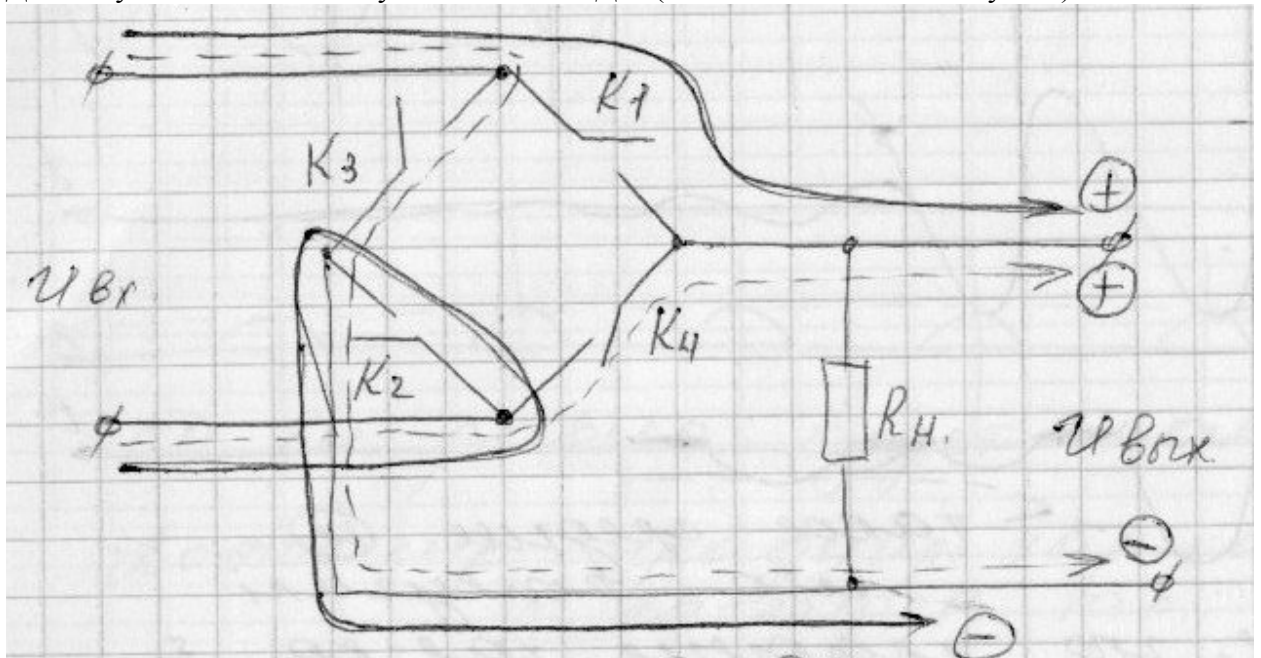
Получили, что градуировочная может быть симметричной.

Квадратурная составляющая в таком ДМ компенсируется и не влияет, поскольку за время, когда ключевой элемент замкнут, четверть периода квадратурная составляющая будет положительная и вторую четверть отрицательная. Поэтому квадратурная составляющая подавляется.

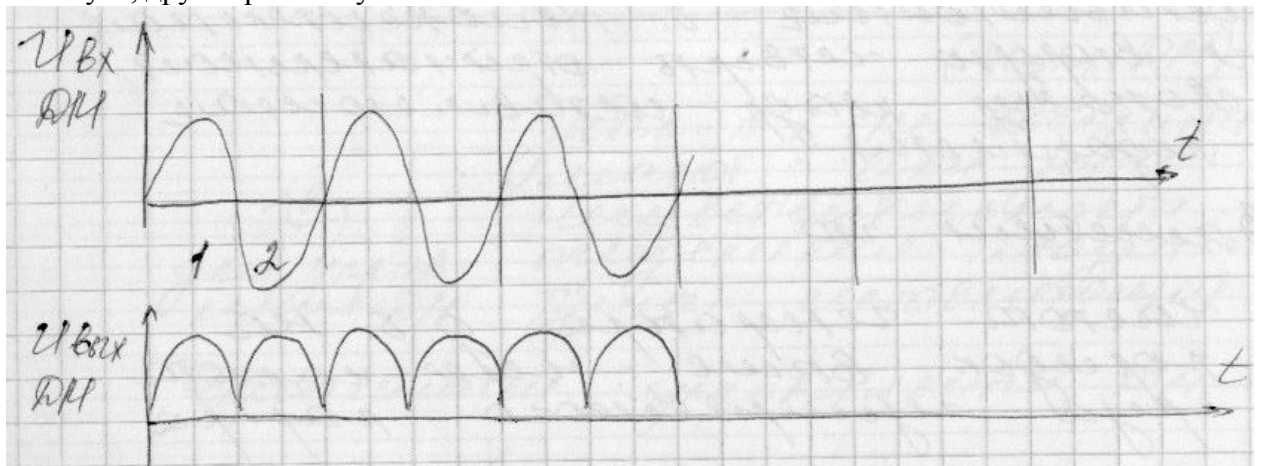
Заметим, что:

1. Частота генератора должна быть на порядок выше, чем частота среза измеряемого параметра.
2. хорошо бы иметь такой сигнал.

Для получения его используется мостовой ДМ (наиболее часто используется).

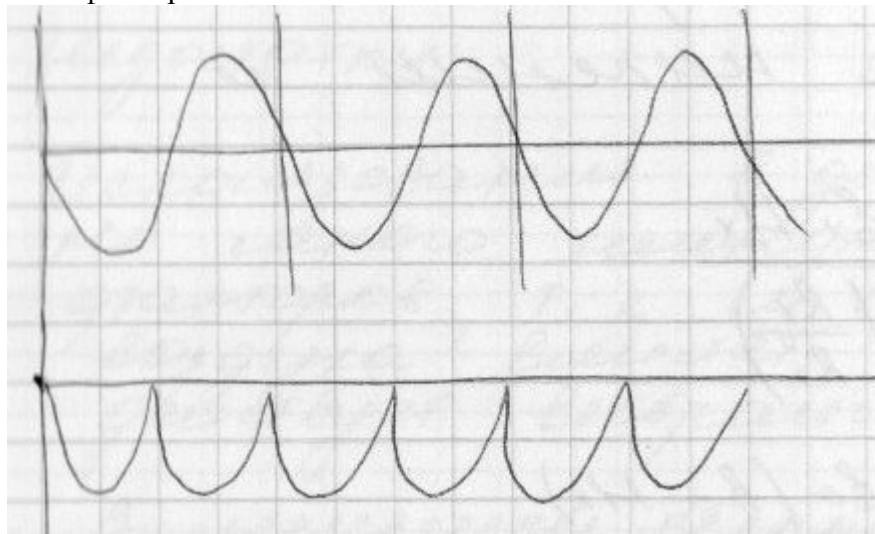


Ключи здесь работают попарно, первая пара $K_1 - K_2$, вторая пара $K_3 - K_4$. когда одна пара замкнута, другая разомкнута.



В первом полупериоде замкнуты $K_1 - K_2$. Во втором полупериоде – отрицательной волне – замкнуты ключи $K_3 - K_4$.

Если фаза противоположна:



Все зависит от ΔL .

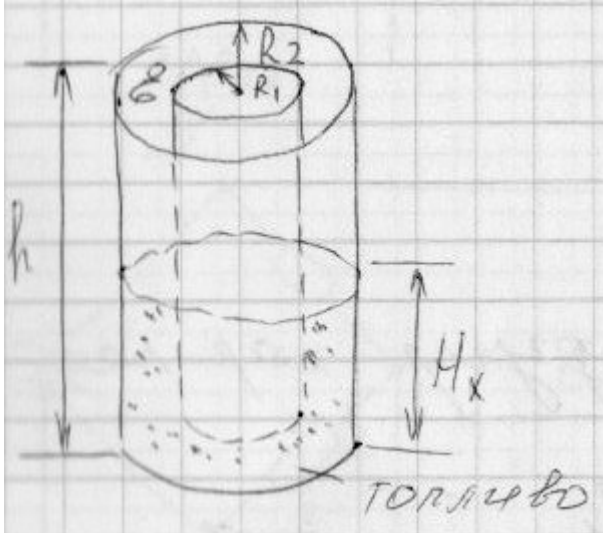
Такой сигнал проще фильтровать.

Емкостной датчик.

Емкость такого конденсатора: $C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$

Если пластины сдвигать относительно друг друга, тогда площадь – это площадь перекрытия.

Другая конструкция – коаксиальная.



$$\text{Емкость: } C = \frac{2\pi \varepsilon \cdot h}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$$

Применение: в качестве уровнемеров, в основном цилиндрические.

Емкость такого датчика равна:

(здесь 2 конденсатора: верхний и нижний)

$$\text{Нижнего: } C_1 = \frac{2\pi \varepsilon_x \cdot H_x}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$$

$$\text{Верхнего: } C_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot (h - H_x)}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$$

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} (\varepsilon_x \cdot H_x + \varepsilon_0 \cdot h - \varepsilon_0 \cdot H_x)$$

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$$

$$\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} (\varepsilon_x - \varepsilon_0) = K$$

Тогда $C_x = C_0 + KN_x$

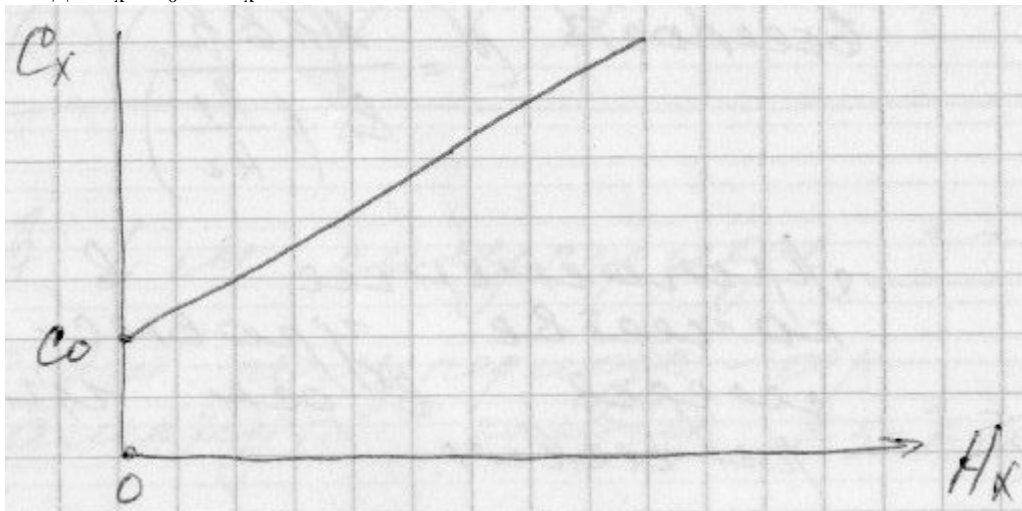
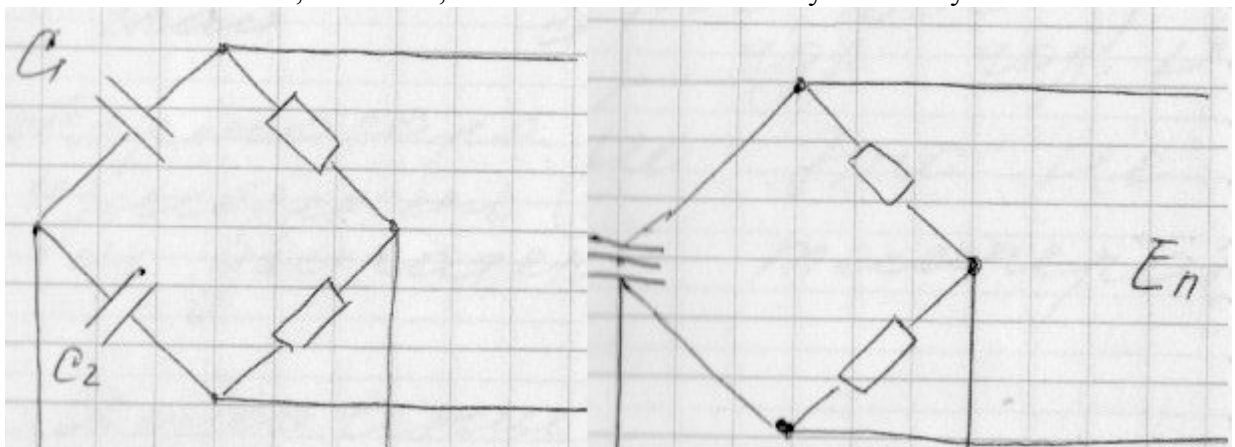


Схема включения чаще всего мостовая.

Недостатки:

Использование: в датчиках перемещения, но много неинформативных факторов, так как может быть влажность воздуха влияет очень сильно; действует вибрация на пластины. В меньшей степени это влияет на дифференцирующие датчики. В таком датчике эти явления ослабляются, особенно, если включается в мостовую систему.



Генераторные датчики.

Эти датчики сами вырабатывают электрический сигнал термопары, пьезодатчики, индукционные датчики.

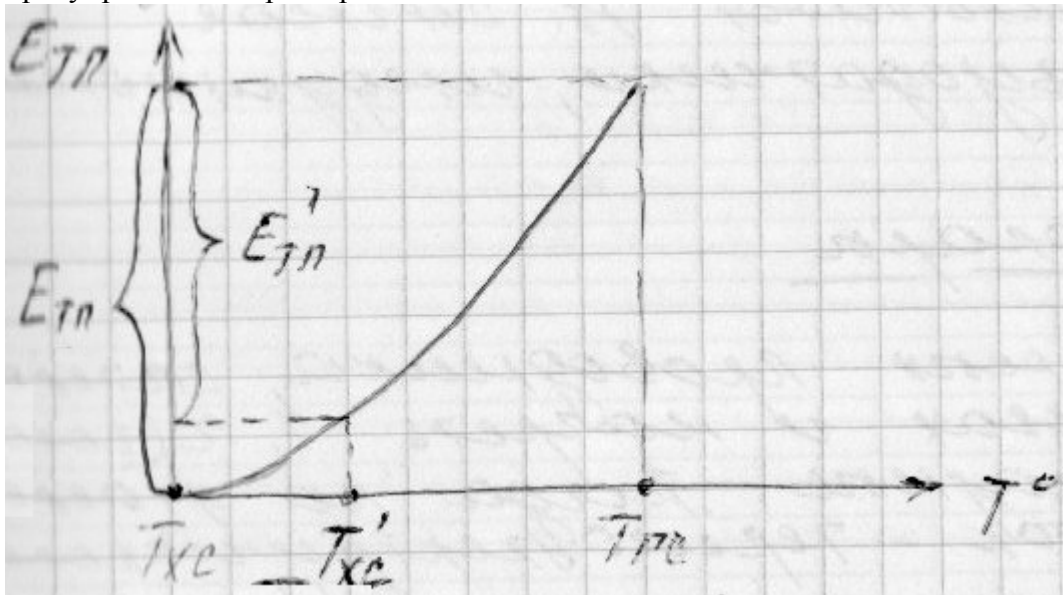
Термопары.

Два разнородных проводника, спаянные в двух точках и нагреть так, чтобы температура спаев были разные, тогда по этой цепи потечет ток — термоэлектрический. Если цепь разорвать, то в разрыве появится термоэлектродвижущая сила.

Термопара используется для измерения температуры на объекте самолета, их двигателя — тысячи термопар.

Это ЭДС — разность функции температур горячего и холодного спаев. Но это не функция разности температур.

Градуировочная характеристика нелинейна.



Пусть в исходном состоянии температуры холодного спая и горячего спая были такие, тогда получим такую же ЭДС термопары.

Если температура горячего спая повысилась; и стала T_{xc}^1 . В этом случае получим другую ЭДС.

Алгоритм определения измеряемой температуры:

1. Определяется температура холодного спая.
2. Измеряется ЭДС термопары.
3. По градуировочной характеристике определяется температура горячего спая.

Основные характеристики термопар:

(Применяемые в авиации)

ХГ хромель – копель; ГС: $-50\text{ C} \dots +600\text{ C}$ ($-3\text{ мВ} \dots +60\text{ мВ}$)

ХА хромель – алюмель $0\text{ C} \dots +1000\text{ C}$ ($0 \dots +50\text{ мВ}$)

ПП-1 Из благородных металлов, платина, платино-родиевый ($0\text{ C} \dots +1500\text{ C}$; $0 \dots +15\text{ мВ}$).

Есть еще высокотемпературная термопары – вольфрам, вольфрам-рений, но в авиации используется редко.

Для экономии термопары делают небольшими и их края помещают при одинаковой температуре.

Провода существуют компенсационные – их сплав с термопарой не вносит погрешности. Тогда термопару можно делать короткой.

$$E_x = E_{Tn} + U_M = E_{Tn} - \Delta E_{Tn} + U_M + \Delta E_{Tn}$$

U_M – напряжение мостовой схемы.

E_{Tn} уменьшаем на величину ΔE_{Tn} . Надо мостовую схему сделать такой, чтобы $t_{xc} = 0\text{ C}$,

$E_x = 0$. если же E_{Tn} уменьшить, то U_M должно возрастать, чтобы E_x в сумме были бы $= 0$.

Достоинство: простота

Недостаток: низкая чувствительность, нелинейность градуировочной характеристики.

В ряде случаев холодный спай помещают в активный термостат. Но плохо, что температуру в холодном спае поддерживать довольно высокую (выше, чем температура окружающей среды). Охлаждение – естественное, а подогрев искусственный. В этом случае нужно делать переградуировку. Градуировочные характеристики термопары задаются ГОСТом.

Индукционные датчики.

S – Площадь контура.

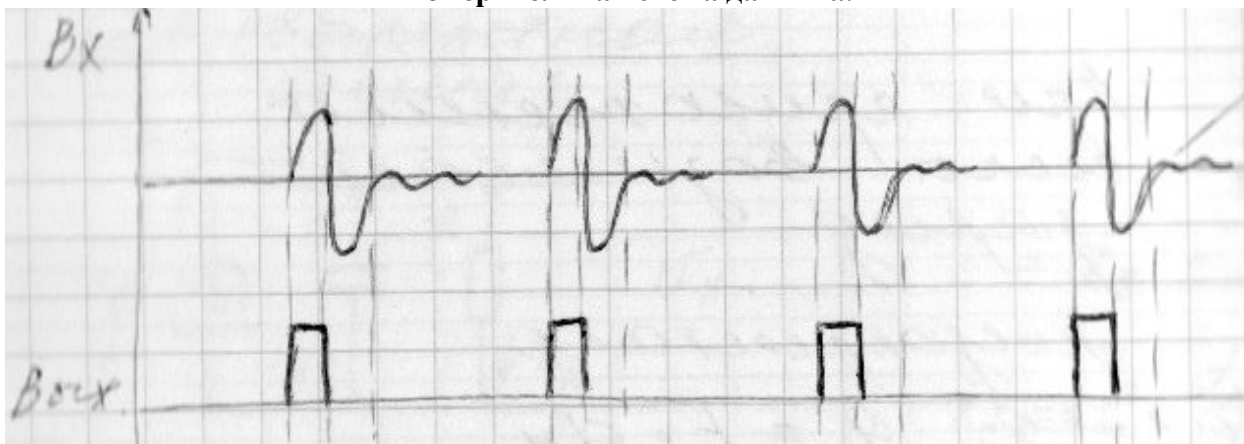
Поток – $\Phi = BS$

Если витков N , то потокосцепление $\Psi = \Phi N$.

Если происходит изменение B , либо S тогда на выходе контура образуется ЭДС, которое равняется производной потока по времени.

$$E = \frac{d\Phi}{dt}$$

Измерительная схема датчика.



Чтобы убрать помехи, нужен некоторый порог срабатывания. Иногда нужно точно знать фронт, или переход через поле. В этом случае используют следующую схему:

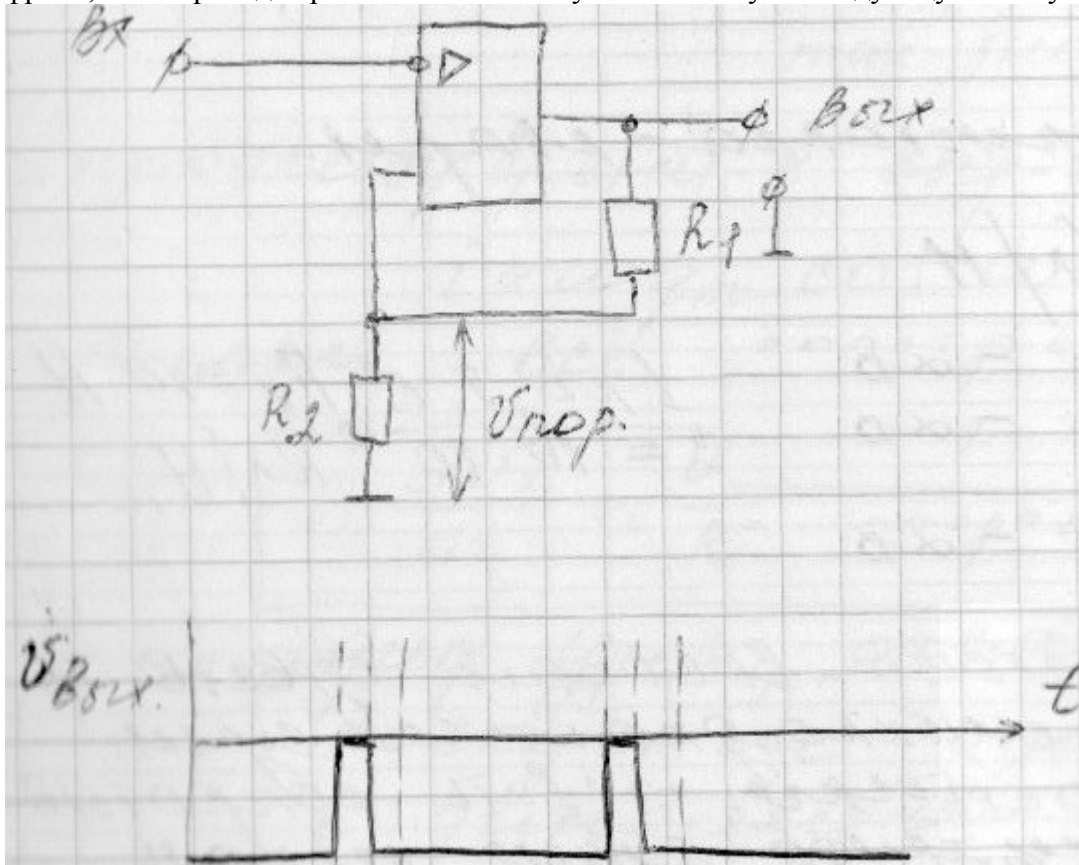


Схема с положительной обратной связью.

Пьезодатчики.

При приложении силы возникает заряд.

Пьезокристалл.

Заряд: $q = Fd_M$

d_M пьезомодуль.

Получаем устройство для изменения силы. Обкладки металлизуют и с них снимают напряжение U_x , фактически образуется емкость.

$$i = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad i \cdot dt = C \cdot dU$$

$$dq = CdU \quad q = CU$$

$$U = \frac{q}{C}$$

Пример пьезокристалла – кварц.

Основное достоинство – высокая чувствительность.

Недостаток: между обкладками существует проводимость утечки, следовательно усть сопротивление утечки, следовательно заряды будут стекать и исчезнут с обкладок, следовательно невозможность изменения статических сил.

Динамические характеристики пьезодатчиков.

$$i = i_c + i_r$$

$$i_c = C \cdot \frac{dV_x}{dt}$$

$$i_r = \frac{V_x}{R}$$

Предположим, что сила F меняется по гармоническому закону.

$$F = F_m \cdot \sin \omega t$$

Так:

$$q = d_m \cdot F_m \cdot \sin \omega t = q_m \cdot \sin \omega t$$

Продифференцировав выражение получим:

$$i = \omega q_m \cdot \cos \omega t$$

Теперь все представим в:

$$C \cdot \frac{dV_x}{dt} + \frac{V_x}{R} = \omega q_m \cdot \cos \omega t$$

Это дифференциальное уравнение, описывающее поведение пьезодатчика в динамическом режиме. Поделив на, C получим:

$$\frac{dV_x}{dt} + \frac{1}{T} \cdot V_x = \omega \cdot V_m \cdot \cos \omega t$$

$$T = RC \quad \frac{q_m}{C} = V_m$$

В операторной форме:

$$V_x \left(p + \frac{1}{T} \right) = \omega V_m$$

Отсюда $V_x = \frac{\omega V}{p + \frac{1}{T}}$

Передаточная функция пьезодатчика: $W(p) = \frac{V_x(p)}{V(p)} = \frac{\omega}{p + \frac{1}{T}}$

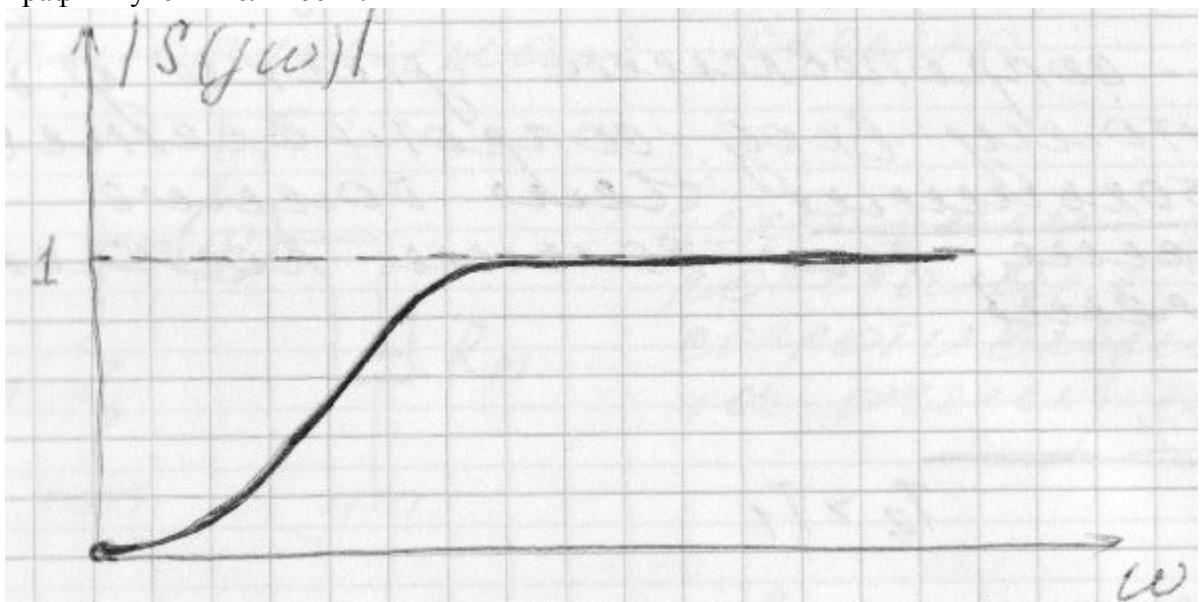
Комплексная чувствительность:

$$S(j\omega) = \frac{\omega}{j\omega + \frac{1}{T}} = \frac{1}{j + \frac{1}{T\omega}}$$

Модуль комплексной чувствительности:

$$|S(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{T\omega}\right)^2 + 1}}$$

График чувствительности:

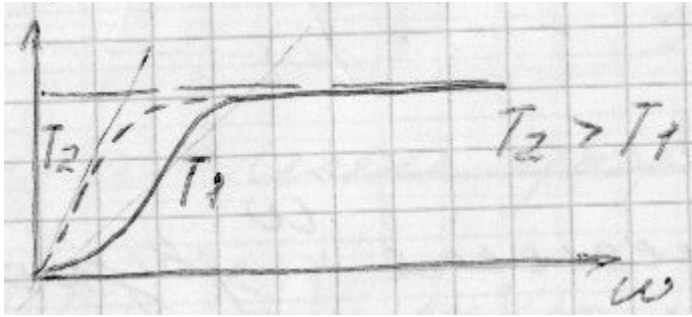


Область применения: звукоулавливатель; (десятки Гц – десятки сотен кГц).

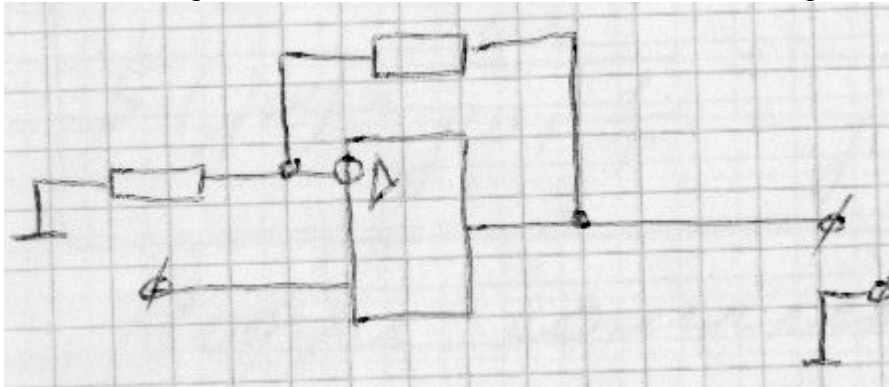
В авиации – акустические измерительные микрофоны для измерения параметров двигателей (шум).

Измерительные схемы для пьезодатчиков.

Требование – сопротивление утечки должно быть малое, поэтому входное сопротивление должно быть очень большим. Чем больше сопротивление, тем больше постоянная времени.



Постоянную времени нужно увеличивать, но только за счет сопротивления, а не емкости. Потому, что если увеличивать емкость, то уменьшается напряжение при том же заряде, то есть чувствительность датчика будет снижаться. Поэтому емкость искусственно никогда не увеличивают. Провода выполняются в виде кабеля. Поэтому на входе как правило ставится измерительный делитель с высоким входным сопротивлением.



Сигнал подают на неинвертирующий вход усилителя как у усилителя с разомкнутой ОС. Требование: входное сопротивление не менее 10 МОм.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

Датчики температуры

Цель работы: ознакомиться с измерительными преобразователями температуры, видами и методами повышения точности измерений, схемами включения в измерительные цепи, методами линеаризации измерения, и коррекции результата измерений для уменьшения влияния мешающих факторов и фильтрации помех.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Различного рода датчики в современной электронике играют исключительно важную роль. Любой разработчик в своей практической деятельности рано или поздно сталкивается с необходимостью использования этих устройств. Датчики температуры – самая многочисленная группа измерительных преобразователей. Спектр использования температурных датчиков чрезвычайно широк: от зарядных устройств до дорогостоящих портативных приборов. Везде, где характеристики системы так или иначе зависят от температурных факторов, применяются эти приборы.

1.1. Влияние температуры на электрические параметры материалов для измерительных преобразователей

Температура является одним из наиболее существенных факторов, от которых зависят физическо-статистические свойства материалов, входящих в конструкцию радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Изменение температуры приводит к изменению физико-химических и механических свойств материалов и элементов, что в свою очередь вызывает изменение электрических и механических параметров РЭА.

Изменение температуры электроизоляционных материалов приводит к изменению следующих основных электрических характеристик:

- диэлектрической проницаемости ϵ ;
- удельного, объемного и поверхностного сопротивления ρ ;
- угла диэлектрических потерь δ ;
- электрической прочности $U_{пр}$.

Зависимость величины удельного сопротивления диэлектрика определяется по

$$\text{формуле } \rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{B}{T}}, \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (1)$$

где ρ_0 , B — постоянные величины, характерные для данного диэлектрика;

T — абсолютная температура, К.

Зависимость $tg(\delta)$ от температуры описывается формулой

$$tg(\delta) = 1.8 \cdot 10^{10} \cdot \frac{\gamma_0}{\epsilon f} \exp\left(-\frac{A}{T}\right), \quad (2)$$

где f — частота, Гц;

γ_0 — удельная объемная проводимость, $(\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$;

A — константа, характерная для данного диэлектрика.

Величина пробивного напряжения в зависимости от температуры изменяется по экспоненциальному закону:

$$U_{пр} = k(f) \cdot d \cdot \exp\left(-\frac{a}{2} \cdot t\right), \quad (3)$$

где $k(f)$ — функция, характеризующая свойства данного диэлектрика;

f — частота;

a — температурный коэффициент электропроводности;

d — толщина диэлектрика;

t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

Изменение температуры металлов также приводит к изменению их электрических и физических параметров. Известно, что повышение температуры вызывает увеличение их сопротивления. Зависимость величины удельного сопротивления от температуры можно выразить следующим уравнением:

$$\rho_t = \rho_0 \left[1 + \alpha (t - t_0) \right], \quad (4)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре t_0 ;

ρ_t — удельное сопротивление при температуре t ;

α — температурный коэффициент удельного сопротивления.

Особенно сильно температура изменяет электропроводность полупроводниковых материалов. Описанные выше изменения свойств материалов используют при конструировании датчиков температуры.

1.2. Разновидности датчиков температуры.

К приборам, позволяющим контролировать температуру, относятся термометры, терморезисторы, термисторы, термопары, термокарандаши и термокраски, полупроводниковые датчики.

В аппаратуре старого образца чаще всего использовались жидкостные спиртовые и ртутные термометры из-за своей относительной простоты, высокой точности, удобству эксплуатации, долговечности и стабильности характеристик с течением времени. Основной недостаток, присущий спиртовым и ртутным термометрам — инерционность, так как в измерении температуры участвует значительный объем рабочего тела (жидкости). По функциональному назначению жидкостные термометры можно разделить на максимальные, минимальные, измерительные и контактные.

Максимальный термометр предназначен для регистрации наибольшей температуры за цикл измерения. Для этого в его резервуаре с жидкостью установлен конусный штифт, препятствующий движению жидкости из капилляра в резервуар при охлаждении, либо тонкий капилляр, в котором обратному движению жидкости препятствуют силы поверхностного натяжения.

Минимальный термометр служит для регистрации наименьшей температуры за цикл измерения. Это достигается введением в капилляр термометра подвижного штифта с утолщениями на концах, причем штифт обладает большой смачиваемостью рабочей жидкостью. При понижении температуры из-за небольшой силы трения штифта о стенки капилляра штифт будет перемещаться поверхностной пленкой жидкости. При повышении температуры жидкость свободно обтекает штифт, при условии что сила трения штифта о стенки превышает силу давления потока жидкости на штифт.

Измерительный термометр служит для контроля текущей температуры, причем это не мгновенное значение температуры в текущий момент, а интегральный (усредненный) показатель температуры за период времени, длительность которого определяется инерционными свойствами термометра.

На основе измерительного термометра изготавливается контактный термометр, который применяется в испытательных установках для поддержания постоянства температуры или выдачи сигнала при превышении/понижении температуры за установленный предел. При этом измерительный термометр входит в состав системы автоматического управления испытательной камерой. В капилляре такого термометра устанавливается один (или несколько) контактный

электрод, который можно перемещать по капилляру.

Из-за требований герметичности колбы термометра это перемещение выполняется бесконтактно, например с помощью двух магнитов, к одному из которых прикреплен электрод, а другой перемещается снаружи колбы термометра.

При достижении заданной температуры столбик ртути замыкает входную цепь регулятора температуры, который выполняет переключения нагревательных элементов.

Кроме жидкостных термометров также используются деформационные биметаллические и манометрические. Чувствительный элемент биметаллического термометра выполнен из двух металлических пластин с разными коэффициентами линейного температурного расширения, которые сварены между собой по плоскости контакта. Под действием температуры биметаллическая пластина изгибается, приводя в движение стрелку индикатора, самописца или замыкании/размыкании контактов терморегулятора. Манометрический термометр представляет собой трубчатую пружину, заполненную жидкостью. При повышении температуры жидкость расширяется, разгибая пружину.

Измерение температуры с помощью термокрасок и термокарандашей основано на свойстве веществ, входящих в их состав, изменять цвет под действием тепла. Этот способ применяется для измерения высоких температур 600...700 °С с погрешностью 6...30 °С.

В последнее время очень широко используются аналоговые и цифровые системы управления, датчики температуры в которых выполнены на основе терморезисторов (термометры сопротивления), полупроводниковых термодиодов и термопар. Измерение температуры терморезистором основано на зависимости его сопротивления от температуры. Термометры сопротивления (Resistance Temperature Devices, RTDs) точны, но для преобразования их сопротивления в электрический ток или напряжение, необходимые для дистанционной передачи измеренных значений температура, а также аппаратурной обработки результатов измерений, требуется, чтобы через них был пропущен электрический ток (excitation current, возбуждающий ток), и обычно включаются в плечо моста измерительной схемы. Погрешность измерения температуры не превышает ± 1 °С. Из-за малых размеров и массы термочувствительной области терморезисторы имеют малую термическую инерционность. Основной недостаток — склонность к старению¹.

Термисторы наиболее чувствительны, но при этом имеют высокую нелинейность. Они нашли наибольшее применение в «биологическом диапазоне температур», популярны в портативных приборах и используются при допусковом контроле температуры, а также других критических, в отношении температуры, узлов и системах. Для преобразования сопротивления термисторов в электрический ток или напряжение, используют схемы включения аналогичные схемам включения терморезисторов. В ряде случаев высокая термочувствительность термисторов позволяет существенно упростить электрические схемы их включения.

Современные полупроводниковые датчики температуры характеризуются высокой точностью и линейностью в диапазоне температур от -55 °С до +150 °С. Встроенные

¹ необратимому изменению параметров с течением времени

усилители позволяют подобрать усиление и смещение так, чтобы выходной сигнал имел заранее заданную температурную зависимость, например 10 мВ/°С. Они широко применяются в схемах компенсации напряжения на опорных спае широкодиапазонных термопар. Полупроводниковые датчики могут быть интегрированы в многофункциональные микросхемы, которые выполняют определенное количество аппаратных мониторинговых функций. Современные микропроцессоры, как правило, содержат встроенные полупроводниковые датчики температуры для контроля за перегревом кристалла.

Также как и для термосопротивлений и терморезисторов для преобразования измеренной температуры в электрический ток или напряжений через полупроводниковый датчик необходимо пропускать стабилизированный электрический ток.

Более простым в конструктивном отношении, надежным и удобным в эксплуатации средством измерения температуры является термопара. Термопары — маленькие, прочные и сравнительно недорогие устройства. Они выполнены из двух проводников различных металлов, сваренных между собой на концах. Кроме сварки, иногда применяется пайка и скрутка. Если место соединения двух разнородных металлов находится при какой-либо температуре, превышающей абсолютный нуль (-273,16 °С), то между ними будет разность потенциалов (так называемая, термоЭДС — Thermoelectric EMF, или «контактная разность потенциалов») (Рис. 1а), которая является функцией температуры.

Если соединить два провода из разнородных металлов в двух местах, а в разрыв одного из проводов подключить измерительную схему термопары, то сформируются два спае (рис. 1, б). Если эти спаи имеют разную температуру (холодный и горячий спаи) то термоЭДС холодного и горячего спае перестают компенсировать друг друга и на выводах появляется разностная термоЭДС, под действием которой по проводникам потечет ток. Величина тока определяется значением разностной термоЭДС и сопротивлением проводников. Горячий спае помещается в рабочую (контролируемую) зону, а холодный в нормальные условия или термостат (например в ванну с тающим льдом). Разорвав один из проводников, можно обнаружить, что напряжение в точках разрыва будет равным разностной термоЭДС, и если измерить это напряжение, то полученное значение можно использовать, для определения разности температур между двумя спаеями (рис. 1, в).

Термопары позволяют контролировать температуру в любом требуемом диапазоне с относительной погрешностью не более 1%. Вдобавок из всех температурных датчиков они работают в самом широком диапазоне температур. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до 2300 °С) в агрессивных средах. Выходное значение термоЭДС термопар невелико ((в диапазоне от микровольт до милливольт), поэтому требуются применять стабильное усиление для последующей обработки. К тому же необходимо применять компенсацию напряжения на холодном спае. Однако они гораздо более линейны, чем многие другие датчики, а их нелинейность на сегодняшний день хорошо изучена и описана в специальной литературе. Линеаризация, ком-

пенсация напряжения на опорном спае термопарных датчиков и другая обработка выполняются затем цифровыми способами, что позволяет снизить сложность и стоимость системы.

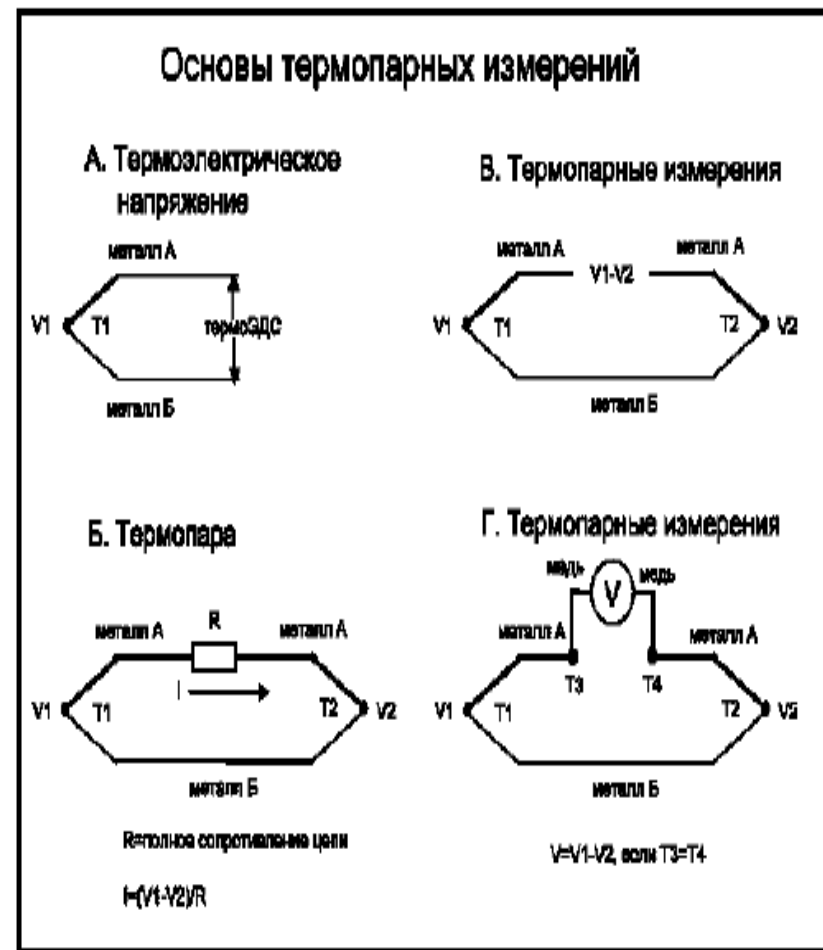


Рисунок 1

Все термодатчики, за исключением собранных на интегральных микросхемах (интеллектуальные датчики), имеют нелинейную зависимость выходного сигнала от

температуры. В прошлом для корректировки этой нелинейности был разработан широкий спектр аналоговых схемотехнических решений. Эти схемы зачастую требовали индивидуальной калибровки. Чтобы достичь заданной точности, в них использовались прецизионные резисторы. Сегодня, благодаря наличию АЦП с высокой разрешающей способностью, сигналы с датчиков могут быть оцифрованы непосредственно, без предварительного усиления и линеаризации.

В табл. 1 перечислены наиболее распространенные температурные датчики и их основные особенности.

Таблица 1

Термопара	Терморезистор (RDS)	Термистор	Полупроводниковый датчик
Широчайший диапазон от минус 184°C до плюс 2300°C	Диапазон от минус 200°C до плюс 850°C	Диапазон 0°C...+100°C	Диапазон от минус 55°C до плюс 150°C
высокая точность и воспроизводимость	Превосходная линейность	Сильная нелинейность	Линейность .5°C, точность 0,5°C
Требуется компенсация напряжения холодного спая	Необходимость токового возбуждения	Необходимость токового возбуждения	Необходимость токового возбуждения
Низкая чувствительность	Низкая стоимость	Высокая чувствительность	Чувствительность 2мВ/°C, 10 мВ/°C, 20 мВ/°C или 1мкА/°C

Принцип работы термопары и компенсация напряжения на холодном спая

При изготовлении термопар обычно применяют такие металлы, как железо, платина, родий, рений, вольфрам, медь, алюмель (сплав никеля с алюминием), хромель (сплав никеля с хромом) и константан (сплав меди и никеля). Свойства термопар такие как чувствительность, нелинейность характеристики термочувствительности, диапазон рабочих температур индивидуальны для каждого сочетания металлов.

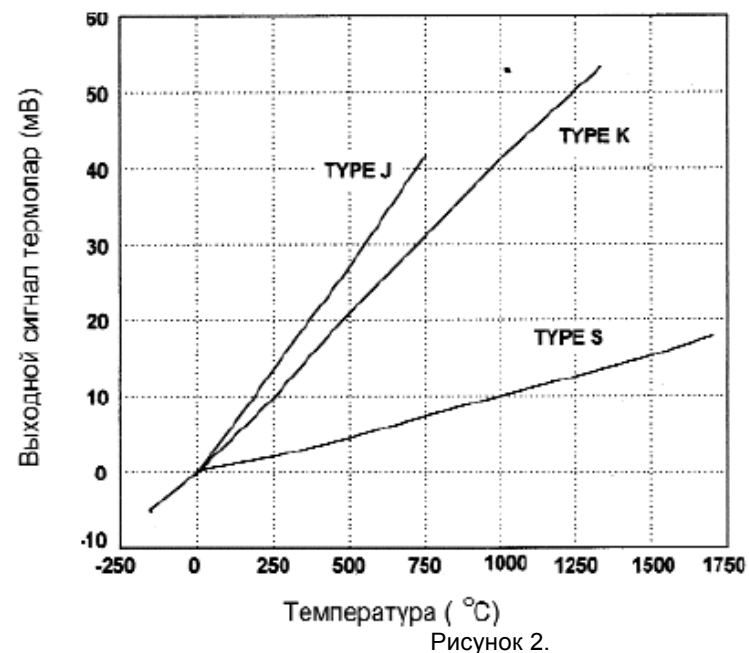
В табл. 2 приведены основные свойства (материалы проводников, температурный диапазон, чувствительность) и тип для наиболее распространенных термопар.

Таблица 2

Материал термопары	Диапазон температур	Чувствительность	Тип термопары
	°C	мкВ/°C	
Хромель - алюмель	-184...+1260	39	K
Платина(13%) \ родий(87%) - платина(100%)	0...+1593	11,7	R
Платина(10%) \ родий(90%) - платина(100%)	0...+1538	10,4	S
Медь - константан	-184...+400	45	T

На рис. 2 представлены зависимости ЭДС от температуры трех наиболее распространенных типов термопар, у которых температура опорного спая поддерживается равной 0 °C.

Выходные сигналы термопар типов J, K и S



Термопары типа J наиболее чувствительны и развивают наибольшее выходное напряжение при одном и том же изменении температуры. С другой стороны, термопары типа S являются наименее чувствительными. Как видно из приведенных характеристик, сигналы, развиваемые термопарами, очень малы и требуют малошумящих усилителей с большим коэффициентом усиления и малым дрейфом. Это необходимо учитывать при проектировании схем обработки сигналов с термопарных датчиков. Чтобы выяснить свойства термопар, рассмотрим, как изменяется их выходной сигнал при изменении температуры чувствительной части термопары (горячего спая). Рисунок 2 показывает связь между температурой горячего спая и выходным сигналом, развиваемым разными типами термопар (во всех случаях температура холодного спая поддерживается равной 0 °C). Очевидно, что зависимость термоЭДС термопар от температуры нелинейная, однако природа этой нелинейности до сих пор не вполне ясна.

Рисунок 3 показывает, как зависит от температуры горячего спая чувствительность термопар (коэффициент линейности), (Seebeck coefficient),

Зависимость коэффициента Сибэка от температуры для термопар типов J, K и S

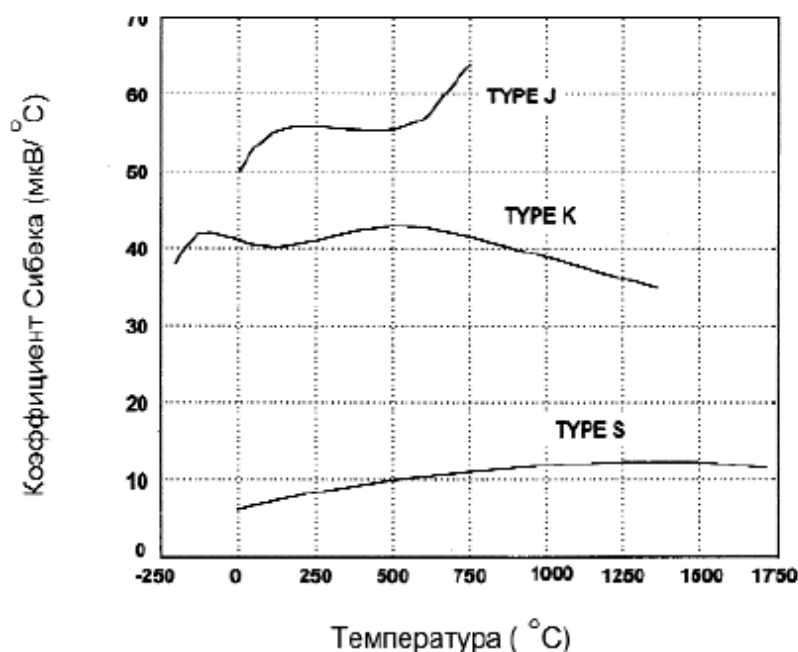


Рисунок 3.

то есть прирост выходного напряжения, соответствующий росту температуры горячего спая на 1 °C, иными словами, первая производная зависимости выходного сигнала от температуры. При этом предполагается, что температура холодного спая поддерживается равной 0 °C.

При выборе термопары для выполнения замеров температур в достаточно широком диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона. Например, для термопары типа J в диапазоне от 200 до 500 °C коэффициент линейности изменяется менее чем на 1 мкВ/°C, что делает ее идеальной для использования в этом диапазоне.

Приведенные на рис. 2 и 3 данные полезны вдвойне: во-первых, рис. 2 показывает диапазон и чувствительность трех типов термопар, так что разработчик может с одного взгляда определить, что термопара типа S имеет самый широкий диапазон измерений, но типа J — более чувствительная; во-вторых, знание коэффициента Сибэка (рис.3) позволяет быстро определить, какова линейность выбранной термопары. Используя рис. 3, разработчик для работы в диапазоне 400...800 °C выберет термопару типа K, коэффициент линейности которой в этой области минимальный, а для диапазона 900... 1700 °C — типа S. Поведение коэффициента линейности термопары оказывается определяющим в тех случаях, когда некоторое отклонение от заданной температуры критичнее, чем само значение заданной температуры. Эти данные также показывают, какими характеристиками должны обладать устройства, работающие в схеме управления совместно с той или иной термопарой.

Чтобы успешно использовать термопары, необходимо понимать основные принципы их работы. Рассмотрим схемы, изображенные на рис. 1.

Необходимо помнить, что термопара преобразует в ЭДС разницу температур между двумя спаями, а не абсолютную температуру в одном из них. Определить температуру в измеряемом спае мы можем лишь в том случае, если знаем температуру второго спая (часто называемого «опорным» или «холодным»). Но не так легко измерить напряжение, образуемое термопарой. Предположим, что мы подключили вольтметр в контур схемы (рис.1, г). Провода, подключенные к вольтметру, также образуют термопары в месте их присоединения. Если обе эти дополнительные термопары находятся под одинаковой температурой (не имеет значения, какой), то они не окажут воздействия на общую термоЭДС системы. Если же их температуры различаются, то могут возникнуть ошибки. Поскольку каждая пара находящихся в контакте разнородных металлов вырабатывает термоЭДС (включая медь/припой, ковар/медь (ковар — сплав, используемый для формирования подложки микросхемы), алюминий/ковар [в соединении внутри микросхемы]), очевидно, что в реальных рабочих контурах возникают гораздо более серьезные проблемы, чем описано выше. Поэтому необходимо постараться обеспечить, чтобы все контакты разнородных металлов в контуре вокруг термопары (естественно, помимо спаев самой термопары) находились при одинаковой температуре.

Термопары создают напряжение, хотя и очень маленькое, но не требующее токового возбуждения. Показанная на рис. 1, а термопара имеет два спая (T1 — температура измерительного спая, T2 — опорного). Если T2 = T1, тогда V2 = V1 и выходное напряжение V = 0. Выходное напряжение термопары обычно определено как значение, полученное при поддержании температуры холодного спая, равной 0 °C. Отсюда и

происхождение термина «холодный спай» или «спай при температуре тающего льда». Таким образом, если измерительный спай будет помещен в среду с нулевой температурой, на выходе термопары будет нулевое напряжение.

Чтобы проводить высокоточные измерения, необходимо тщательно поддерживать температуру холодного спая, которая должна быть строго определена (хотя не обязательно равна 0°C). Простая реализация этого требования представлена на рис. 4.

Классическая компенсация напряжения холодного спая с использованием тающего льда

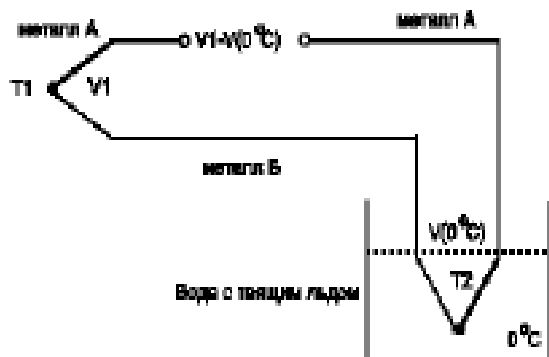


Рисунок 4.

На практике реализовать ванну с тающим льдом не всегда удобно.

Сейчас «спай при температуре тающего льда» с требуемой для его реализации ванной со льдом и водой успешно вытесняется электроникой. Температурный датчик другого типа (чаще полупроводниковый, а иногда и термистор) измеряет температуру холодного спая, а полученный результат используется для формирования дополнительного напряжения в цепи термопары, компенсирующего разницу между фактической температурой холодного соединения и его идеальным значением (обычно 0 °C), как показано на рис. 5.

В идеале напряжение компенсации должно подбираться строго в зависимости от разности напряжений. Корректирующее напряжение является функцией от температуры опорного спая T2, причем более сложной, нежели простая линейная зависимость, описываемая произведением $K \times T_2$, где K — простая константа. На практике, поскольку холодные спаи обычно находятся при температуре лишь на несколько десятков градусов выше 0 °C и ее значение колеблется в пределах ± 10 °C, линейная аппроксимация компенсирующего напряжения оказывается допустимой.

Использование термодатчиков для компенсации напряжения холодного спая

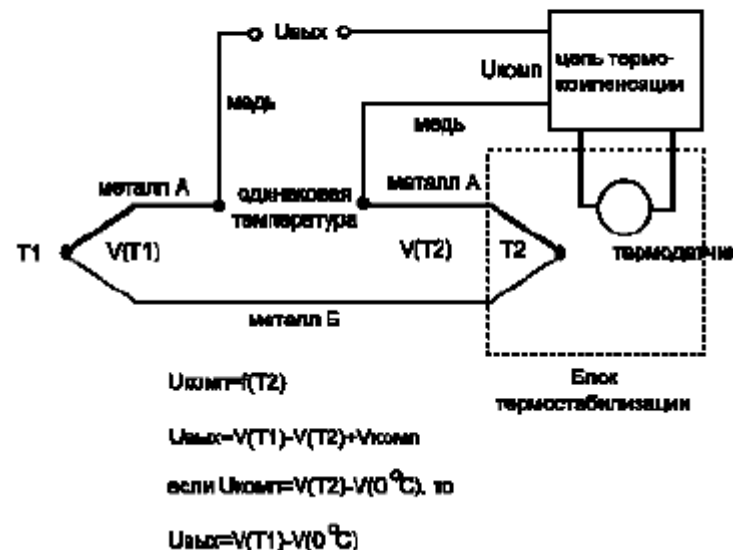


Рисунок 5.

Другими словами, хотя реальное значение корректирующего напряжения и определяется многочленом в соответствии с формулой $V = K_1 \times T + K_2 \times T^2 + K_3 \times T^3 + \dots$, но значения коэффициентов K_2 , K_3 и т. д. очень малы для всех известных типов термопар. Значения этих коэффициентов для всех термопар можно найти в справочной литературе.

Когда используется электронная компенсация напряжения на холодном спае, на практике соединение проводов с концами термопары заключают в изотермический блок, как показано на рис. 6.

Когда соединения металл А — медь и металл В — медь находятся при одной температуре, это эквивалентно спаю металл А — металл В, как показано на рис. 5.

Схема, приведенная на рис. 7, обеспечивает измерение температуры от 0 °C до 250 °C при помощи термопары типа К с компенсацией напряжения холодного спая.

Питание схемы осуществляется однополярным напряжением от 3,3 до 12 В.

Причем схема была спроектирована таким образом, чтобы коэффициент преобразования составлял 10 мВ/°C. Коэффициент передачи термопары типа К приблизительно равен 41 мкВ/°C.

Прямое измерение с термопарой и блоком термостабилизации

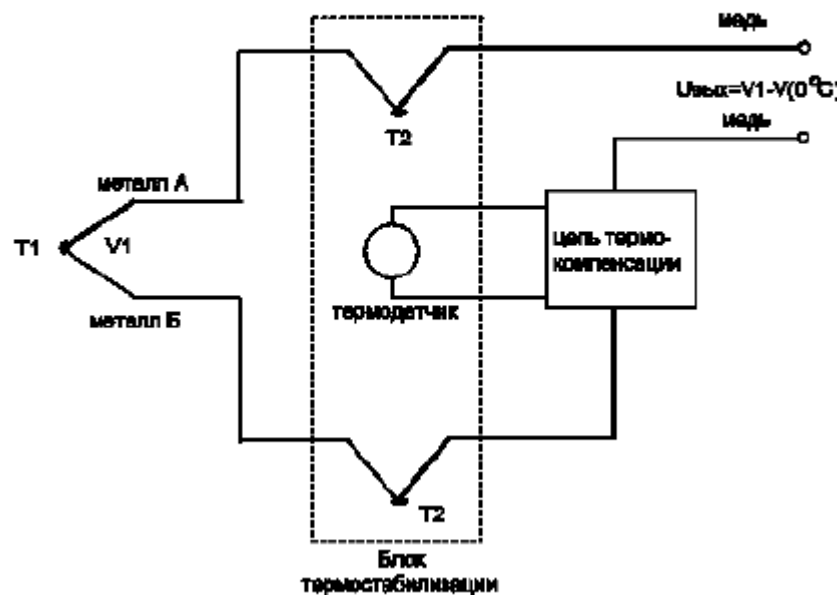


Рисунок 6.

Следовательно, примененный для компенсации датчик напряжения с температурным коэффициентом $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ TMP35 используется с делителем на R1 и R2, обеспечивающим требуемое значение $41 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. Ликвидация неизотермичности между дорожками печатной платы и проводами термопары предотвращает появление ошибок в процессе измерения при изменении температур. Такая компенсация подходит для схем, работающих при температуре окружающей среды от 20 до $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Если температура рабочего спае термопары достигла $250 \text{ }^\circ\text{C}$, ее выходное напряжение будет составлять $10,151 \text{ мВ}$. Поскольку при этом выходной сигнал схемы должен быть равен $2,5 \text{ В}$, то усилитель должен иметь коэффициент усиления, равный $246,3$. Выбор R4, равного $4,99 \text{ кОм}$, предопределяет для R5 значение $1,22 \text{ МОм}$. Наиболее близкое однопроцентное значение номинального сопротивления для R5 составляет $1,21 \text{ МОм}$, в связи с чем для точной настройки размаха выходного сигнала совместно с R5 используется потенциометр сопротивлением 50 кОм .

Использование термодатчика TMP-35 для компенсации напряжения холодного спае

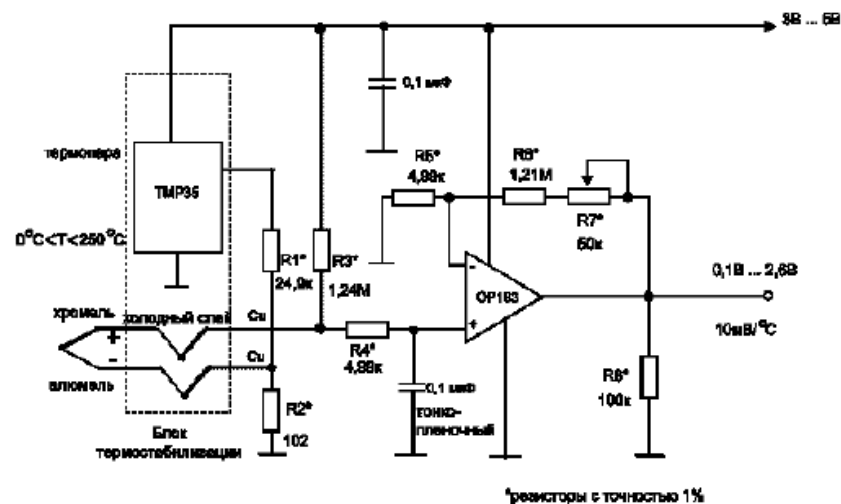


Рисунок 7.

Хотя OP193 допускает питание от одного источника, его выходные каскады не предназначены для работы в режиме rail-to-rail и минимальное значение сигнала на его выходе не должно быть ниже $+0,1 \text{ В}$. С этой целью резистор R3 добавляет ко входу ОУ небольшое напряжение, увеличивающее выходной сигнал на $0,1 \text{ В}$ для питающего напряжения 5 В . Это смещение (соответствующее $10 \text{ }^\circ\text{C}$) должно быть вычтено после обработки или считывания сигнала с выхода OP193. R3 также обеспечивает определение обрыва термопары: если термопара отсутствует, выходной сигнал становится больше чем 3 В . Резистор R7 балансирует входное сопротивление OP193 по постоянному току, а пленочный конденсатор емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ снижает помехи от термопары на его неинвертирующем входе.

AD594/AD595 — инструментальный усилитель и компенсатор напряжения холодного спае, выполненный в одном чипе (рис. 8). Эта микросхема осуществляет привязку к «точке таяния льда» и содержит предварительно откалиброванный усилитель, который обеспечивает получение выходного напряжения высокого уровня ($10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$) непосредственно с выхода термопары. AD594/AD595 может быть использована как линейный усилитель-компенсатор либо в качестве переключаемого контроллера, используемого для постоянного или мобильного управления и регулирования.

Два мультиплексируемых входа АЦП используются для прямой оцифровки сигнала с термопары и с теплового датчика, находящегося в контакте с ее холодным спаем. Вход PGA (программируемого усилителя) программируется на усиление от 1 до 128, и разрешающая способность АЦП лежит в пределах от 16 до 22 бит в зависимости от того, какая из микросхем выбрана пользователем. Микроконтроллер осуществляет как компенсацию напряжения холодного спая, так и линеаризацию характеристики.

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке, изображенной на рис. 10, повышенную и пониженную температуры относительно нормальной комнатной температуры создают с помощью элемента Пельтье, через который пропускают постоянный электрический ток.

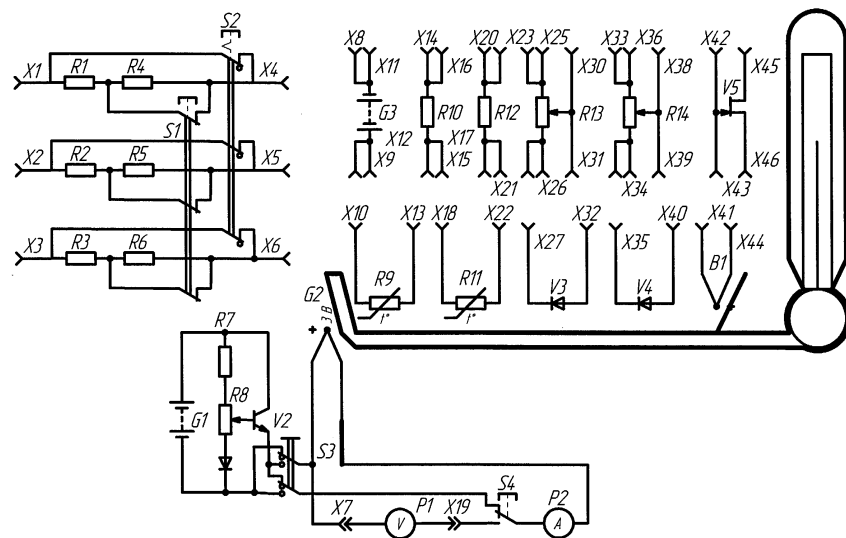


Рисунок 10.

На рис.10 приведена принципиальная электрическая схема лабораторной установки.

Рисунок 10 — Принципиальная схема лабораторной установки.

Направление тока, от которого зависит охлаждение или нагрев теплопередающих поверхностей элемента Пельтье G2, выбирают с помощью переключателя направления тока S3. Величину тока изменяют с помощью потенциометра R8, включенного в цепь базы транзистора V2, выполняющего функции усилителя тока и измеряют амперметром P2. Кнопка S4 позволяет кратковременно отключить элемент Пельтье G2 от источника тока и подключить к нему вольтметр P1 для измерения его термоЭДС по которой можно определить разность температур на его рабочих поверхностях. Одна из теплопередающих поверхностей элемента Пельтье имеет тепловой контакт с радиатором воздушного теплообмена, а другая находится в тепловом контакте со спиртовым термометром и исследуемыми датчиками температуры. В качестве испытуемых термодатчиков при экспериментальных исследованиях используются терморезистор R9, выполненный из медного проводника, полупроводниковый терморезистор R11, полупроводниковые термодиоды V3 и V4, а также термопара B1. Все термодатчики имеют тепловой контакт с элементом Пельтье G2 через теплопередающие алюминиевые пластины, температуру которых контролируют с помощью спиртового термометра. Измерительные цепи преобразования сопротивлений терморезисторов и термодиодов в напряжение составляют из резисторов R10, R12, R13 и R14, а также полевого транзистора V5, используемого в режиме генератора тока. Питание измерительных цепей осуществляют от источника напряжения G3. Для исследования влияния линии связи датчиков с измерительными цепями служат элементы схемы на резисторах R1...R6, коммутацию которых выполняют переключателем S2, а имитацию изменения сопротивления линии связи выполняют кнопкой S1.

В процессе выполнения работы необходимо исследовать, как изменяются свойства термодатчиков при изменении температуры, а также как влияют параметры элементов измерительных схем на температурную чувствительность и сделать выводы об оптимальных параметрах элементов измерительных схем, а также сравнить различные схемы включения датчиков в измерительные цепи по их чувствительности и устойчивости к изменениям параметров линий связи термодатчиков с измерительной схемой.

Для измерения выходных параметров испытуемых схем в лабораторной работе используется цифровой мультиметр.

В качестве датчиков температуры лабораторная установка содержит термосопротивление, выполненное из медного проводника, термистор, полупроводниковый термодиод и термопару. Все электрические выводы датчиков подсоединены к клеммам на лицевой панели лабораторной установки и могут быть подключены к измерительным приборам непосредственно или включены в измерительные цепи. В качестве измерительных приборов в лабораторной установке используется цифровой мультиметр. Для формирования измерительных цепей лабораторная установка содержит постоянные и переменные резисторы, а также многожильный кабель линии связи. Формировать измерительные цепи можно с помощью внешних проводников соединяя соответствующие клеммы на лицевой панели лабораторной установки, подключённые к выводам датчиков температуры и элементам измерительной цепи.

Задание

Измерить чувствительность датчиков с помощью цифрового мультиметра. Для этого измерить сопротивление датчиков и напряжение на их выводах при комнатной температуре, максимально пониженной и максимально повышенной температуре.

Методические указания. Сопротивления датчиков измерять для двух противоположных подключений мультиметра к датчикам для каждой температуры. Минимальную температуру установить пропуская ток величиной 2 А через элемент Пельтье в отрицательном направлении с последующей выдержкой в течении времени не менее 10 мин. Максимальную температуру установить пропуская ток величиной 2,5 А через элемент Пельтье в положительном направлении с последующей выдержкой в течение времени не менее 10 мин. Чувствительность датчиков определять как отношение изменения измеренных значений датчиков к соответствующим изменениям температуры.

Определить относительную чувствительность параметрических датчиков как отношение измеренных значений чувствительности датчиков к величине измеренного параметра датчика при комнатной температуре.

Определить инструментальную погрешность измерения абсолютной и относительной чувствительности датчиков.

Сравнить чувствительность датчиков.

Исследовать схему преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при запитке возбуждающим током через балластный резистор от источника постоянного напряжения. (Рис. 12).

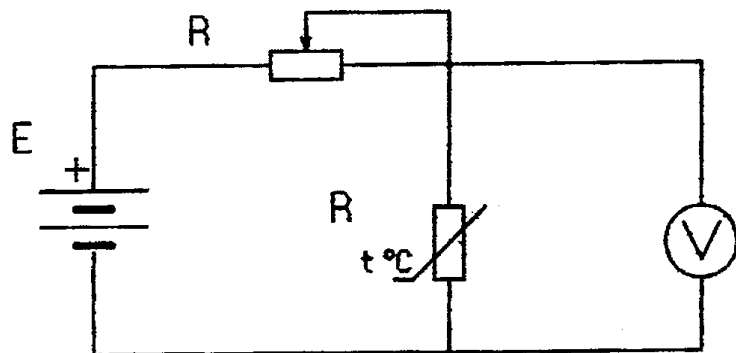


Рисунок 12. Схема преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при запитке возбуждающим током через балластный резистор от источника постоянного напряжения.

Определить сопротивление балластного резистора, при котором чувствительность датчиков и схемы преобразования сопротивления датчиков в напряжение максимальна. Определить погрешность определения чувствительности для оптимальной величины балластного резистора.

Исследовать схему преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при запитке стабилизированным возбуждающим током через нелинейный балластный резистор от источника постоянного тока. (Рис. 13).

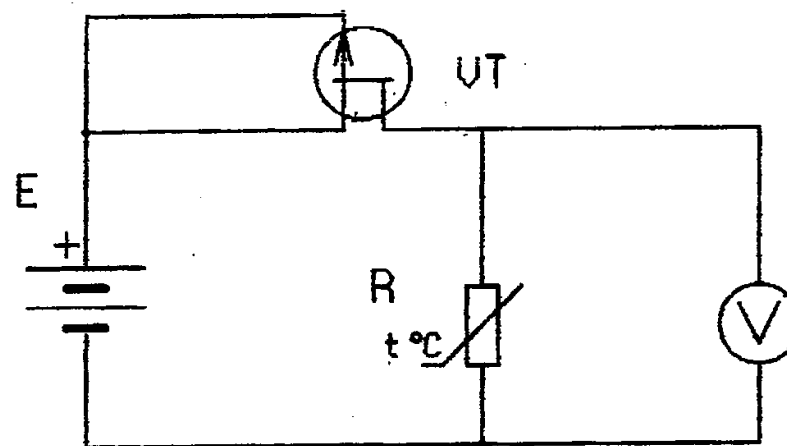


Рисунок 13. Схема преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при запитке стабилизированным возбуждающим током через нелинейный балластный резистор от источника постоянного тока.

Исследовать схему преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при их включении в мостовую схему. (Рис. 14).

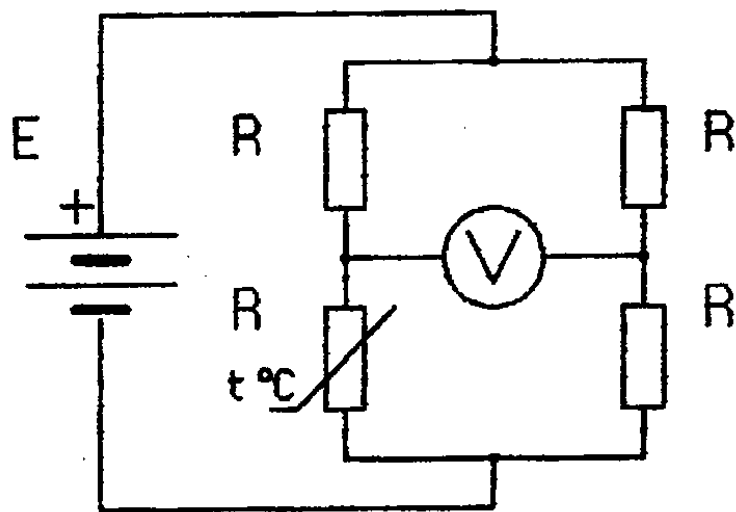


Рисунок 14. Схема преобразования сопротивления параметрического датчика в напряжение при его включении в мостовую схему.

Определить инструментальную погрешность определения чувствительности. Сравнить чувствительности и погрешность определения их чувствительности для различных датчиков и разных схем включения.

Исследовать влияние изменений параметров линии связи на температурную зависимость выходного напряжения параметрических датчиков, включенных в мостовую схему. (Рис. 15).

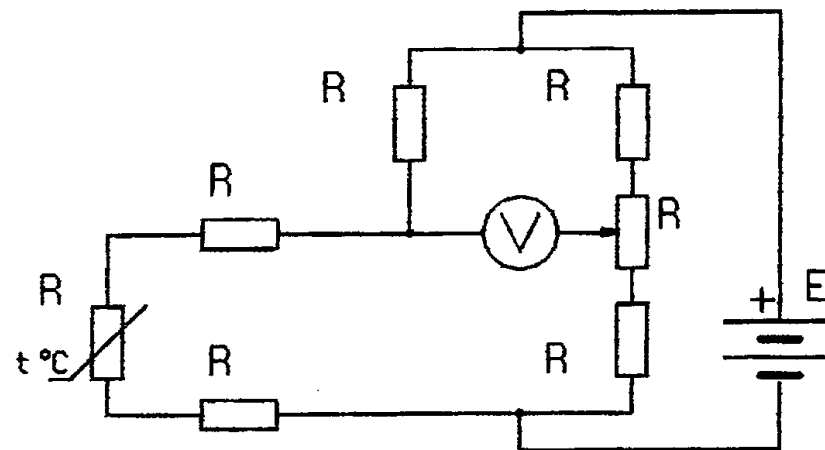
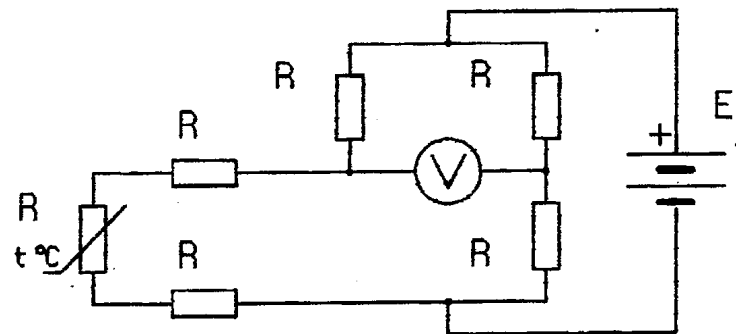
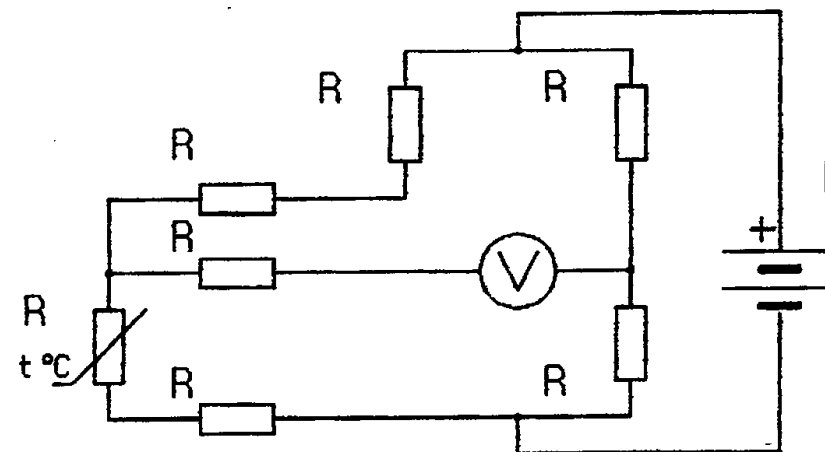


Рисунок 15. Схема преобразования сопротивления параметрического датчика в напряжение при его удалённом включении в мостовую схему.

Исследовать трех проводную схему включения параметрического датчика в мостовую схему. (Рис. 16).



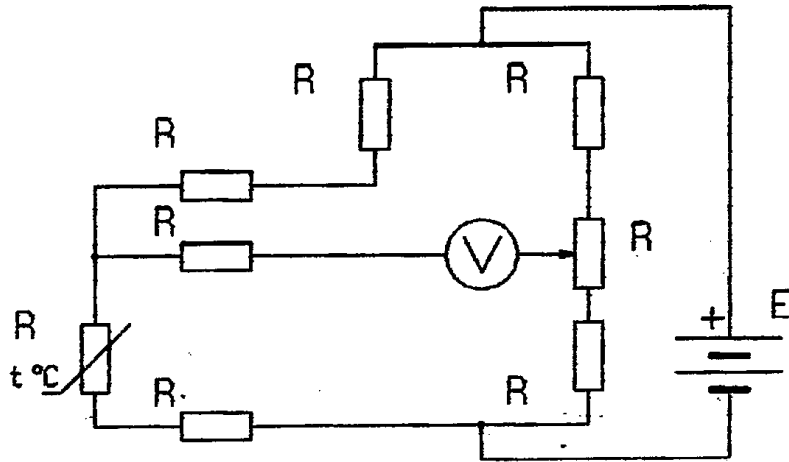


Рисунок 16. Трех проводная схема подключения параметрического датчика при его удалённом включении в мостовую схему.

Исследовать динамические характеристики параметрических датчиков, при включении их в мостовую схему по переходной характеристике и комнатной температуре (Рис. 17).

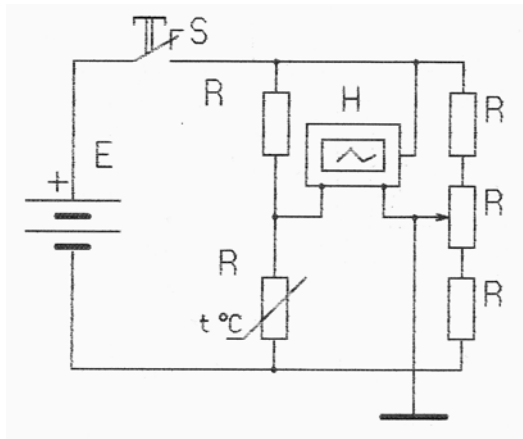


Рисунок 17. Схема для исследования переходной характеристики параметрического датчика.

Сформулировать выводы по результатам выполненных исследований.

Дать заключение по чувствительности, статической и динамической погрешности измерений для различных датчиков и схем их включения.

Дать рекомендации по использованию датчиков, схем их включения и повышению их метрологических свойств.

9. Вопросы для допуска к работе

- 1) Цель данной работы.
- 2) Разновидности температурных воздействий на РЭА.
- 3) Изменение параметров материалов, из которых изготавливаются элементы конструкции РЭА, при изменении температуры окружающей среды.
- 4) Вредные последствия для конструкции РЭА, которым приводят температурные изменения.
- 5) Виды датчиков температуры.
- 6) Измерительные схемы, используемое для включения параметрических датчиков.
- 7) Формирование необходимых температурных режимов.
- 8) Принципы работы приборов для измерения, контроля, регистрации и поддержания температуры.
- 9) Принципы определения оптимальных параметров измерительной схемы.
- 10) Состав лабораторной установки.

10. Порядок проведения испытаний

- 1) Измерить сопротивления и напряжения на выводах термодатчиков.
- 2) Измеряя мультиметром сопротивление R_{13} установить его величину равной сопротивлению термодатчика.
- 3) Включить питание элемента Пельтье G_2 и установить ток через него величиной 2А.
- 4) Подключить терморезистор R_9 к источнику питания G_3 через переменный резистор R_{13} , а цифровой мультиметр к выводам терморезистора.
- 5) После достижения установившегося значения температуры на спиртовом термометре измерить напряжения на термодатчике.
- 6) Повторить п. 2...5 терморезистора R_{11} .
- 7) Подключить термодиод V_3 к источнику питания G_3 через полевой транзистор V_5 и выполнить п. 5 и 6.
- 8) Повторить п. 7 для термодиода V_4 .
- 9) Повторить п. 2...5 терморезистора R_{11} .
- 10) Переключателем S_3 изменить полярность питания элемента Пельтье G_2 и установить ток через него величиной 2А.
- 11) Повторить п. 4...9.
- 12) Измеряя мультиметром сопротивление R_{13} установить его величину в два раза больше сопротивления термодатчика и повторить п. 4 и 5, а затем п. 3, 4 и 5.

13) Измеряя мультиметром сопротивление R13 установить его величину в два раза меньше сопротивления термодатчика и повторить п. 10 и 5, а затем п. 3... 5.

14) Собрать мостовую схему включения термодатчиков, используя резисторы R10 и R12 или R13 и R14, предварительно установив их сопротивления равным сопротивлению термодатчиков при нормальной температуре; для термодиодов использовать полевой транзистор V5.

15) Измерить напряжение в измерительной диагонали мостовой схемы.

16) Переключателем S3 изменить полярность тока питания элемента Пельтье G2 и установить ток через него величиной 2А.

17) После достижения установившегося значения температуры на спиртовом термометре измерить напряжения на измерительной диагонали мостовой схемы.

18) Подключить термодатчик к мостовой схеме через элементы линии связи и выполнить п. 15 при включении и выключении кнопки S1 (S2 должен находиться в разомкнутом положении).

19) Изменяя величину и полярность тока питания элемента Пельтье снять зависимость термоЭДС термопары В1 от температуры.

3. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». Сборник материалов XV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Под редакцией профессора В. Н. Азарова. [Текст] М.: МГИЭМ, 2003.-337 с.

11. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Краткое описание лабораторной установки.
- 3) Данные измерений, таблица, графики зависимости.
- 4) Выводы о характере полученных зависимостей.
- 5) Выводы по результатам исследований датчиков температуры и измерительных схем.

12. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И.Гуров. Аналоговая и цифровая электроника. [Текст] - М.: Горячая линия - Телеком, 2000.- 800с..
2. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи) [Текст]. Учеб. пособие для вузов. -Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. -320с., ил.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Тензорезистивные преобразователи

Цель работы: ознакомиться с измерительными преобразователями деформаций, видами и методами повышения точности измерений, схемами включения в измерительные цепи, методами линеаризации измерения, и коррекции результата измерений для уменьшения влияния мешающих факторов и фильтрации помех.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Различного рода датчики в современной электронике играют исключительно важную роль. Любой разработчик в своей практической деятельности рано или поздно сталкивается с необходимостью использования этих устройств.

Тензодатчик-измерительный преобразователь деформации твердого тела, вызываемой механическими напряжениями в электрический сигнал, предназначенный для последующей обработки. Тензодатчики – одна из самых многочисленных групп измерительных преобразователей.

Спектр тензодатчиков чрезвычайно широк: от измерений деформаций авиационно-космической техники до дорогостоящих весоизмерительных цифровых стационарных и портативных устройств и приборов. Большинство измеряемых параметров, характеризующих физико-химическое состояние контролируемых объектов деформации, силы, давления, вес и перемещения объектов контроля и управления преобразуют в деформацию чувствительного элемента измерительного преобразователя, которую с помощью тензодатчиков преобразуют в электрические параметры электрической цепи. Тензодатчик - измерительный преобразователь деформации твердого тела, вызываемой механическими напряжениями в электрический сигнал, предназначенный для последующей обработки.

Наиболее широкое применение, в силу простоты, доступности и надежности нашли тензодатчики, преобразующие деформацию в изменение электрического сопротивления. Такие тензодатчики носят название «Тензорезистивные преобразователи» или как их еще называют тензорезисторы.

1.1 Разновидности тензорезисторов

Тензорезисторы бывают металлические (проволочные, фольговые, пленочные) и полупроводниковые (пластинчатые).

1.1.1 Металлические тензорезисторы

В основе принципа работы металлических тензорезисторов лежит явление *тензоэффекта*, заключающееся в изменении электрического сопротивления проводящего материала при его механической деформации.

Основной характеристикой чувствительности материала к механической деформации является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины проводника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \quad (1)$$

Так как сопротивление проводника связано с удельным электрическим сопротивлением ρ материала, длиной l и площадью поперечного сечения S_q этого проводника зависимостью

$$R = \rho \frac{l}{S_q} \quad (2)$$

то относительное изменение сопротивления, вызванное деформацией проводника под действием равномерного механического напряжения,

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\sigma} - \frac{1}{S_q} \frac{\partial S_q}{\partial \sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \quad (3)$$

Из последнего выражения следует, что при конечном изменении напряжения относительное изменение сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S_q}{S_q} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4)$$

При деформации твердых тел изменение их длины связано с изменением объема. При этом изменение объема в зоне упругих деформаций для каждого материала является величиной постоянной и характеризуется коэффициентом Пуассона

$$\mu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l},$$

(5)

где $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$ (здесь d - диаметр проводника круглого сечения или поперечный размер проводника квадратного сечения).

Учитывая, что

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S_q}{S_q} = -\mu \frac{\Delta l}{l},$$

(6)

Получим выражение для коэффициента относительной тензочувствительности

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

(7)

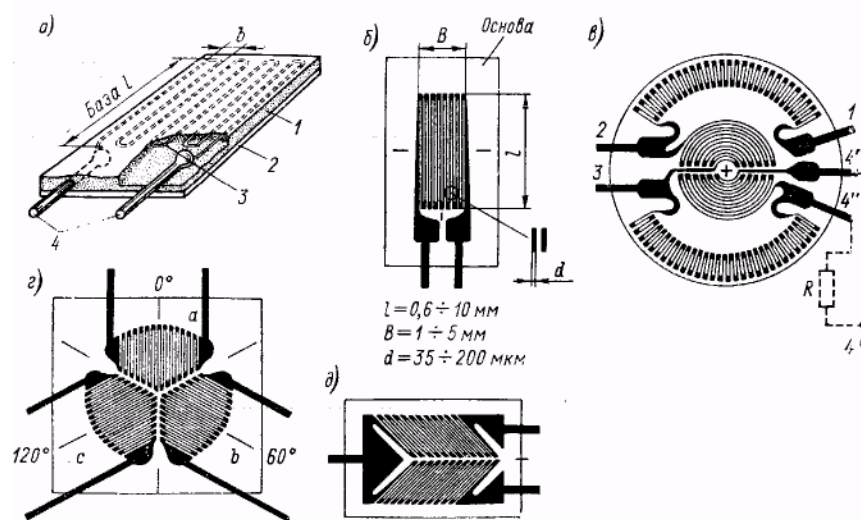
Свойства некоторых материалов металлических тензорезисторов приведены в таблице 1, а устройство наиболее распространенного типа наклеиваемого проволочного тензорезистора изображено на рисунке 1а.

Таблица 1 - Свойства материалов металлических тензорезисторов

Параметры	Значение параметров для сплавов		
	Константан 60Сн +40Ni	Манганин 84Cu+12Mn+4Ni	Нихром 80Ni+20Cr
Коэффициент тензочувствительности К	1,9.. .2,1	0,5	2,1.. .2,3
Удельное сопротивление ρ , Ом мм ² /м	0,46... 0,52	0,4... 0,45	0,9.. .1,7
Температурный коэффициент сопротивления $\times 10^{-6}$, град ⁻¹	«30 (до 100°С)	≈10	150.. .170

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. 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 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 . Наиболее часто используются преобразователи с базами 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом константан, нихром, элинвар, платинородий. Погрешность проволочных резисторов может быть сведена до 0,1...0,2%.



- а) проволочный тензодатчик;
- б) фольговый тензодатчик;
- в) тензодатчик деформации мембраны;
- г) тензодатчик плосконапряженного состояния;
- д) тензодатчик деформаций скручивания валов.

Рисунок 1. Конструкция тензодатчиков

Фольговые преобразователи представляют собой ленту из фольги толщиной 4...2 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. У фольговых тензорезисторов поперечная чувствительность значительно меньше за счет расширения поперечных участков. Характерные типы фольговых преобразователей показаны на рисунке 1б, 1в, 1г, 1д. Недостатком обычных фольговых преобразователей является сравнительно низкое сопротивление, не превышающее

обычно 50 Ом. 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. Для изготовления пленочных тензорезисторов применяются металлические сплавы (например, титаноалюминиевый сплав), коэффициент относительной тензочувствительности k проволочных, фольговых тензорезисторов имеет величину $\sim 2...2,5$.

На рисунке 1в. 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 рисунке 1г 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 рисунке 1д, состоит из двух тензорезисторов и используется при измерении деформации валов при их скручивании. Для тензорезисторов, работающих в диапазоне температур до 180 °С, в качестве тензочувствительного материала используется константан. Для более высоких температур (200...1000 °С) применяются специальные сплавы. Изготавливаются из константана, нихрома, сплава на основе Ni , Mo , Pt .

1.1.2 Пьезорезистивные тензодатчики

1.1.2.1 Пьезорезистивный эффект. Физические основы и математическое описание.

Сущность пьезорезистивного эффекта: электрическое сопротивление полупроводника изменяется под действием механических напряжений приложенных вдоль определенных кристаллических осей полупроводника.

Пьезорезистивный эффект описывается тензором 4 ранга. Для кубических кристаллов (Si и Ge) три компоненты этого тензора отличны от нуля. Это константы π_{11} , π_{12} , π_{44} .

π_{11} - для продольного эффекта (в направлении электрического тока).

π_{12} - для поперечного эффекта (в направлении перпендикулярном току).

π_{44} - для сдвигового напряжения.

Уравнения пьезорезистивного эффекта

$$\frac{\Delta \rho_{ik}}{\rho_{ik}} = \sum \pi_{iklm} U_{im} \quad (8)$$

Относительное изменение компонент тензора электросопротивления (отношение изменения сопротивления к его начальному значению) связано с тензором деформации U_{im} через тензор 4 ранга π_{iklm} .

Коэффициент $\pi_P = -(\pi_{11} + 2\pi_{12})$ - пьезорезистивный коэффициент для всестороннего сжатия.

Величина $\pi_P = (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})$ - мера анизотропии эффекта.

Основные свойства материалов пьезорезистивных тензорезисторов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры материалов пьезорезистивных тензорезисторов

Материал	ρ Ом•см	π_{11}	π_{12}	π_{44}	π_P	π_A
		$\cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин} = 10^{-11} \text{ н/м}^2$				
<i>n-Ge</i>	9, 9	-4, 7	-5	137, 9	+14, 7	+138, 2
<i>p-Ge</i>	1, 1	-3, 7	+3, 2	+96, 7	-2, 7	-103, 6
<i>n-Si</i>	11, 7	-102, 2	+53, 4	-13, 6	-4, 6	-142
<i>p-Si</i>	7, 8	6, 6	-1, 1	+138, 1	-4, 4	-130, 4

Знак "-" указывает на уменьшение сопротивления при наличии данного эффекта, знак "+" — на увеличение.

Тензочувствительность материалов пьезорезистивных тензорезисторов

G — отношение изменения сопротивления к произведению начального сопротивления на деформацию.

$$G = \frac{(\Delta \rho / \rho)}{(\Delta l / l)}$$

$$k = 1 + 2\sigma + \pi_{11} E_{10} \quad (9)$$

где σ - коэффициент Пуассона E_{10} - модуль Юнга.

Легирование полупроводников (добавление примесей)

а) Уменьшает тензочувствительность

б) Снижает температурную зависимость тензочувствительности, что важно при работе в широком диапазоне температур.

Пластинчатые полупроводниковые тензодатчики 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—10000 Ом, коэффициент тензочувствительности $K_m = 50 \dots 200$, погрешность 0,1... 0,2%.

Датчик жестко крепят на исследуемом объекте (приклеиванием). Упругий элемент воспринимает изменения исследуемого параметра χ (давление, деформация и т. д.) и преобразует их в деформацию полупроводника $\epsilon(\chi)$, приводит к изменению сопротивления.

$$\Delta\rho(\epsilon) = \pm G\rho_0\epsilon$$

$$G_{III} \approx 200$$

$$\Delta\rho(T) = \alpha\Delta TR_0,$$

(10)

где — T – температура, α - температурный коэффициент.

Для уменьшения погрешности необходимо вводить термокомпенсацию. Широко распространена схемная компенсация с использованием мостовых цепей.

Полупроводниковые тензодатчики (ППТ) обычно включаются в мостовые схемы, необходимые для компенсации начальной постоянной величины сопротивления.

$$\frac{v_0}{v_{ном}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

(11)

v_0 - напряжение разбаланса.

В общем случае $R = R_0 + r$;

где — R_0 - постоянная составляющая, r - переменная составляющая сопротивления.

1.2 Преобразование сопротивления тензорезисторов в напряжение

Преобразование сопротивления тензорезисторов в напряжение обычно выполняют с помощью мостовых схем.

Разновидности мостовых схем включения тензорезисторов приведены на рисунке 2 :

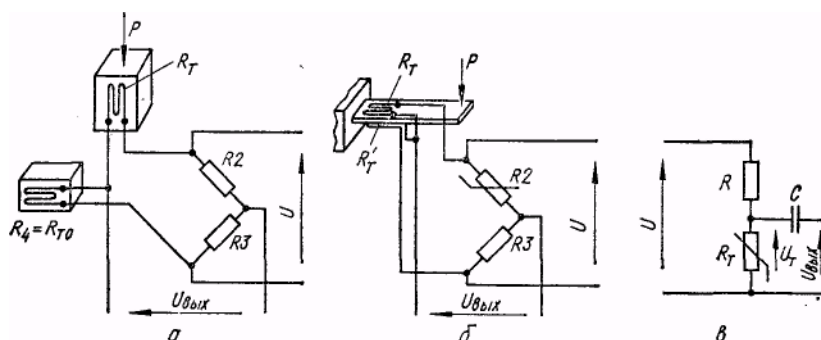
а) С одним активным плечом в соответствии с рисунком 2а, $r_1 \neq 0$; $r_2 = r_3 = r_4 = 0$.

Характеризуется значительным смещением характеристики $v_0/v_{ном}$ и нелинейностью.

б) С двумя активными (одинаковыми) плечами в соответствии с рисунком 2б, — чистый полумост, $r_1 = -r_2$; $r_3 = r_4 = 0$; Выходное напряжение $V_{вых}$ в 2 раза выше. Нет смещения и нелинейности.

в) С четырьмя активными одинаковыми плечами (чистый полный мост) в соответствии с

рисунком 2а, . $r_1=r_3=-r_2=-r_4$. Выходное напряжение $V_{\text{ВЫХ}}$ в 4 раза выше. Нет смещения и нелинейности.



- а) С четырьмя активными одинаковыми плечами;
- б) С двумя активными (одинаковыми) плечами;
- в) С одним активным плечом.

Рисунок 2. Измерительные цепи тензорезистивных преобразователей

1.3 Основные технико-метрологические характеристики тензорезисторов

К основным технико-метрологическим характеристикам тензорезисторов относятся тензочувствительность, ползучесть, механический гистерезис, температурная нестабильность, динамические характеристики.

1.3.1 *Тензочувствительность* определяется главным образом тензорезистивными свойствами материала чувствительного элемента, однако в значительной степени зависит от конструкции преобразователя, материала основы, вида и условий полимеризации клея и других факторов. Тензочувствительность тензорезистора, как и самого тензорезистивного материала, определяется коэффициентом относительной тензочувствительности $k = \epsilon_R / \epsilon_l \dots$

1.3.2 *Ползучесть* проявляется в виде изменения выходного сигнала при заданном и неизменном значении деформации и определяется обычно как

$$\delta_{\text{П}} = \frac{\Delta \epsilon_l}{\epsilon_l} \dots$$

(12)

где $\Delta \epsilon_l$ - приведенное к входу изменение выходного сигнала при заданной относительной

деформации ε_l . Причиной ползучести является упругое несовершенство основы и клея. В пределах упругого диапазона деформаций ползучесть большинства тензорезисторов не превышает 1...1,5% за 6 ч.

1.3.3 *Механический гистерезис*, как и ползучесть, обусловлен упругим несовершенством основы и клея и численно определяется как приведенная к входу разность значений выходного сопротивления для одного и того же значения деформации при условии, что данное значение деформации достигается при плавном ее возрастании и плавном уменьшении. Для различных типов тензорезисторов механический гистерезис лежит в пределах 0,5...5%.

1.3.4 *Температурная нестабильность*, или влияние температуры окружающей среды на основные параметры тензорезисторов, заключается, с одной стороны, в изменении сопротивления тензорезистора за счет изменения свойств его материала, которые учитывают с помощью температурного коэффициента сопротивления (ТКС), а с другой - в появлении дополнительных механических напряжений вследствие различия в температурных коэффициентах линейного расширения материала тензорезистора и исследуемой детали.

Если β_d и β_{Π} ... - температурные коэффициенты линейного расширения исследуемой детали и подложки тензорезистора, то относительная деформация тензорезистора, обусловленная изменением окружающей температуры на $\Delta\theta$.

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = (\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta \quad (13)$$

Изменение его сопротивления при этом

$$\Delta R = kR \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta \quad (14)$$

Так как изменение сопротивления тензорезистора, обусловленное наличием ТКС материала чувствительного элемента, равно $\Delta R_{\alpha} = R\alpha_{\theta}$, то общее изменение сопротивления тензорезистора, вызванное изменением температуры окружающей среды на $\Delta\theta$,

$$\Delta R_{\theta} = R\alpha_{\theta} + kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta = R[\alpha + k(\beta_d - \beta_{\Pi})]\Delta\theta \quad (15)$$

1.3.5 Основной динамической характеристикой тензорезисторов является их *собственная частота*, значение которой для наклеенных тензорезисторов лежит в пределах 100... 300 кГц. Собственная частота тензорезистора определяет предельную частоту исследуемого процесса, при которой частотными погрешностями можно пренебречь. Для исследований переменных деформаций обычно выбирают тензорезистивный преобразователь, собственная частота которого хотя бы в 5... 10 раз превышала частоту деформаций.

1.3.5 Важным параметром тензорезисторов является *допустимая мощность*, которая может рассеиваться в тензорезисторе при условии, что его перегрев не превысит допустимого значения. Допустимая мощность тензорезистора находится в определенной зависимости от его геометрических размеров, что может использоваться при определении геометрических размеров проектируемых преобразователей, исходя из заданной допустимой мощности или допустимого значения измерительного тока:

$$\Delta\theta = PR_T = \frac{P}{S_0\alpha_T} = \frac{P_{yd}}{\alpha_T} \quad (16)$$

где R_T - тепловое сопротивление;

S_0 - площадь поверхности теплоотдачи материала резистора;

$\alpha_T l$ - коэффициент теплоотдачи;

$P_{yd} = P/S_0$ - удельная тепловая нагрузка.

Отвод теплоты от тензорезистора до исследуемой детали через слой клея и подложку значительно превышает теплоотдачу в окружающий воздух. Поэтому можно считать, что практически все тепло отводится в исследуемую деталь, а за площадь S_0 принимают для пленочных и фольговых тензорезисторов поверхность резистора, обращенную к исследуемой детали, а для проволочных - половину цилиндрической поверхности проволоки чувствительного элемента.

Удельная мощность используемых в настоящее время проволочных, фольговых и полупроводниковых тензорезисторов независимо от рассеиваемой в них мощности и полной поверхности, занимаемой чувствительным элементом, обычно колеблется в незначительных пределах: $P_{yd} = 26 \dots 28$ кВт/м².

Допустимое значение измерительного тока через тензорезистор может быть определено из соотношения $P = I^2 R = P_{yd} S_0$.

Для проволочных тензорезисторов с базой l , количеством проводов в решетке чувствительного элемента n и диаметром провода d

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} nl \quad R = \frac{4nl\rho}{\pi d^2} \quad (17)$$

Отсюда

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{P_{yd} S_0}{R}} = \sqrt{\frac{P_{yd} \pi^2 d^3}{8\rho}} \quad (18)$$

1.4 Тензочувствительность тензопреобразователей

Особенностью приклеиваемых тензорезистивных преобразователей является то обстоятельство, что они представляют собой преобразователи разового действия, т. е. не могут быть переклеены из объекта на объект. Поэтому функция преобразования рабочего тензорезистора не может быть определена, а для ее оценки определяют функцию преобразования аналогично, так называемого градуировочного, преобразователя из той же партии. Естественно, что такой способ оценки характеристик рабочих тензопреобразователей применим лишь в том случае, когда свойства преобразователей всей партии совершенно идентичны, а остаточные деформации, вызываемые затвердеванием клея при приклейке рабочих и градуировочных преобразователей, так же одинаковы. Опыт показывает, что погрешность от неидентичности при тщательной приклейки тензорезисторов и хорошем качестве клея обычно не превышает 1,5%.

Следует отметить, что для приклеивания тензорезисторов к исследуемой детали применяются специальные клеи, для работы в нормальных температурных условиях - ацетатно-целлулоидные и бакелито-фенольные (БФ) клеи, для работы при высоких температурах (до 600... 800°С) - кремнийорганические цементы (например, Б-56, ВН-12) и специальные цементы на основе жидкого стекла или полисилоксанов.

Тензочувствительность готовых тензопреобразователей практически не поддается точному расчету, так как она может существенно отличаться от тензочувствительности исходного материала. Кроме влияния технологических факторов на воспроизводимость тензорезистивных свойств материала существенное влияние на значение коэффициента тензочувствительности преобразователя оказывают изогнутости в местах закругления проволоки, особенно в петлевых преобразователях. В этих местах образуются участки, не воспринимающие деформацию в направлении оси базы. Уменьшение чувствительности, вызванное этим фактором, тем больше, чем меньше измерительная база (в двухслойных преобразователях с уменьшенной базой чувствительность может уменьшиться на 20...30%). Существенное влияние на результирующую чувствительность оказывает поперечный тензо-эффект, обусловленный наличием участков проволоки, перпендикулярных оси базы преобразователя и воспринимающих поперечную деформацию. Этому недостатка практически полностью лишены фольговые и пленочные преобразователи, у которых сечение проводящего слоя в месте изгиба может быть значительно увеличено.

1.5 Источники погрешностей измерения тензопреобразователями

- влияние сопротивления изоляции;
- паразитные электрические напряжения;
- термо-ЭДС (на соединении различных материалов);
- плохое закрепление тензорезистора на объекте измерения.

Эти источники погрешностей связаны с характером поведения самого тензорезистора. Они связаны с нелинейностью мостовых схем включения и самого тензоматериала тензорезисторов.

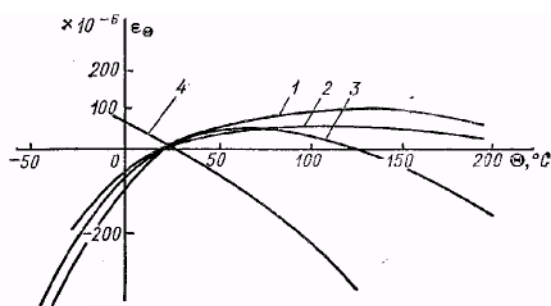
1.5.1 Влияние температуры на объект измерений и тензорезистор.

Величина «кажущейся» деформации при воздействии температуры определяется формулой:

$$\Delta\varepsilon\theta = (\alpha\theta/Km + (\beta\delta - \beta m))\theta, \quad (18)$$

где $\alpha\theta$ — температурный коэффициент сопротивления (ТКС); $\beta\delta$ и βm — коэффициенты линейного расширения (КЛР) материалов детали и тензорезистора.

ТКС константана в зависимости от примесей в сплаве может иметь любое значение в пределах $\pm 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, причем в относительно небольшом интервале температур заданное значение ТКС обеспечивается с погрешностью $\pm (0,5 \dots 1) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Это позволяет для многих материалов объектов измерения (сталь, нержавеющая сталь, сплавы алюминия) изготавливать термокомпенсированные тензорезисторы. Кажущаяся деформация изменяется с температурой примерно так, как показано на рисунке 3 для термокомпенсированных тензорезисторов, наклеенных на сталь (кривая 1), алюминий (кривая 2) и нержавеющую сталь (кривая 3); здесь же для сравнения приведена кривая 4 температурной погрешности тензорезистора, предназначенного для наклейки на нержавеющую сталь, а наклеенного на сталь. Для термокомпенсированных тензорезисторов величина кажущейся деформации в диапазоне температур 20... 100 °С не превышает в $\Delta\varepsilon\theta = 1, 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что при измеряемой деформации $\varepsilon_l = 10^{-2}$ приводит к температурной погрешности нуля 0,00015 K^{-1} . Подобная самокомпенсация кажущейся деформации невозможна для дискретных полупроводниковых тензорезисторов. Действительно, КЛР кремния очень мал (около $2, 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) по сравнению с КЛР металлов (сталь — $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, алюминий — $22,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ТКС тензорезистора из кремния p-типа положителен ($\alpha\theta = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).



- 1 – стальная подложка
- 2 - алюминиевая подложка
- 3 – подложка из нержавеющей стали
- 4 – температурная погрешность тензорезистора,

предназначенного для наклейки на нержавеющей сталь, а наклеенного на сталь

Рисунок 3. Температурная погрешность тензорезисторов

1.5.2 Погрешности за счет соединительной линии делятся на:

- а) Температурная зависимость сопротивления проводов.
- б) Сопротивление изоляции между проводами и экранной оплеткой.
- в) Емкость кабелей.

Изменение температуры воздействует на

- дрейф нуля моста,
- изменение коэффициента чувствительности.

Тепловое расширение объекта измерения приводит к изменению длины базы тензорезистора, что эквивалентно деформации контролируемого объекта, изменение температуры тензорезистора изменяет сопротивление тензорезисторов, что вызывает дрейф нуля моста (свойственно ПП тензорезисторам).

На Чувствительность влияет температурная зависимость коэффициента тензочувствительности. Поэтому для уменьшения влияния температуры на тензочувствительность оба тензорезистора полумостовой схемы их включения размещают в одинаковых условиях, наклеивая их на один тот же материал по возможности ближе друг к другу.

Сопротивление изоляции - между наклеенным тензорезистором и металлической контролируемой поверхностью объекта измерения зависит от:

- связующего или подложки,
- свойств клея,
- толщины слоя,
- влажности окружающей среды.

Проволочные тензодатчики имеют сопротивления изоляции или $R_{из} > 10^8$ Ом, а фольговые - $R_{из} > 3 * 10^{10}$ Ом

1.6 Область применения тензодатчиков

1.6.1 Приборы для измерения прямого артериального давления.

В крупные сосуды вводят катетер. Перед введением заполняют физиологическим раствором (без пузырьков). Этот столб жидкости передает давление на мембрану, преобразующую изменения давления крови в деформацию.

Колебания столба жидкости воздействуют на мембрану, деформируя и смещая ее.

Движения мембраны преобразуют в электрические параметры тензорезистором: движение

мембраны вызывает растяжение или укорочение тензодатчика. Конструкция такого датчика выполнена так, что с обратной воздействию давления стороны мембраны крепятся 2 или 4 тензорезистора.

2 Описание лабораторной установки

В лабораторной установке, которая изображена на рисунке 2.1, четыре тензодатчика попарно размещены на противоположных сторонах упругой плоской пластины, в непосредственной близости от ее консольной заделки. Перемещение (балки) выполняется с помощью микрометрического винта. При перемещении свободного конца пластины На рисунке 2.2 приведена принципиальная электрическая схема лабораторной установки.



Рисунок 2.1 Лабораторная установка

В процессе выполнения работы необходимо исследовать, как изменяются свойства тензодатчиков при изменении положения свободного конца измерительной пластины, а также как влияют параметры элементов измерительных схем на тензочувствительность и сделать выводы об оптимальных параметрах элементов измерительных схем, а также сравнить различные схемы включения датчиков в измерительные цепи по их чувствительности и устойчивости к изменениям параметров линий связи тензодатчиков с измерительной схемой.

Для измерения выходных параметров испытываемых схем в лабораторной работе используется цифровой мультиметр. Все электрические выводы датчиков подсоединены к клеммам на лицевой панели лабораторной установки и могут быть подключены к измерительным приборам непосредственно или включены в измерительные цепи. В качестве измерительных приборов в лабораторной установке используется цифровой мультиметр. Для формирования измерительных цепей лабораторная установка содержит постоянные и переменные резисторы, а также многожильный кабель линии связи. Формировать измерительные цепи можно с помощью внешних проводников соединяя соответствующие клеммы на лицевой панели лабораторной установки, подключённые к выводам тензодатчиков и элементам измерительной цепи.

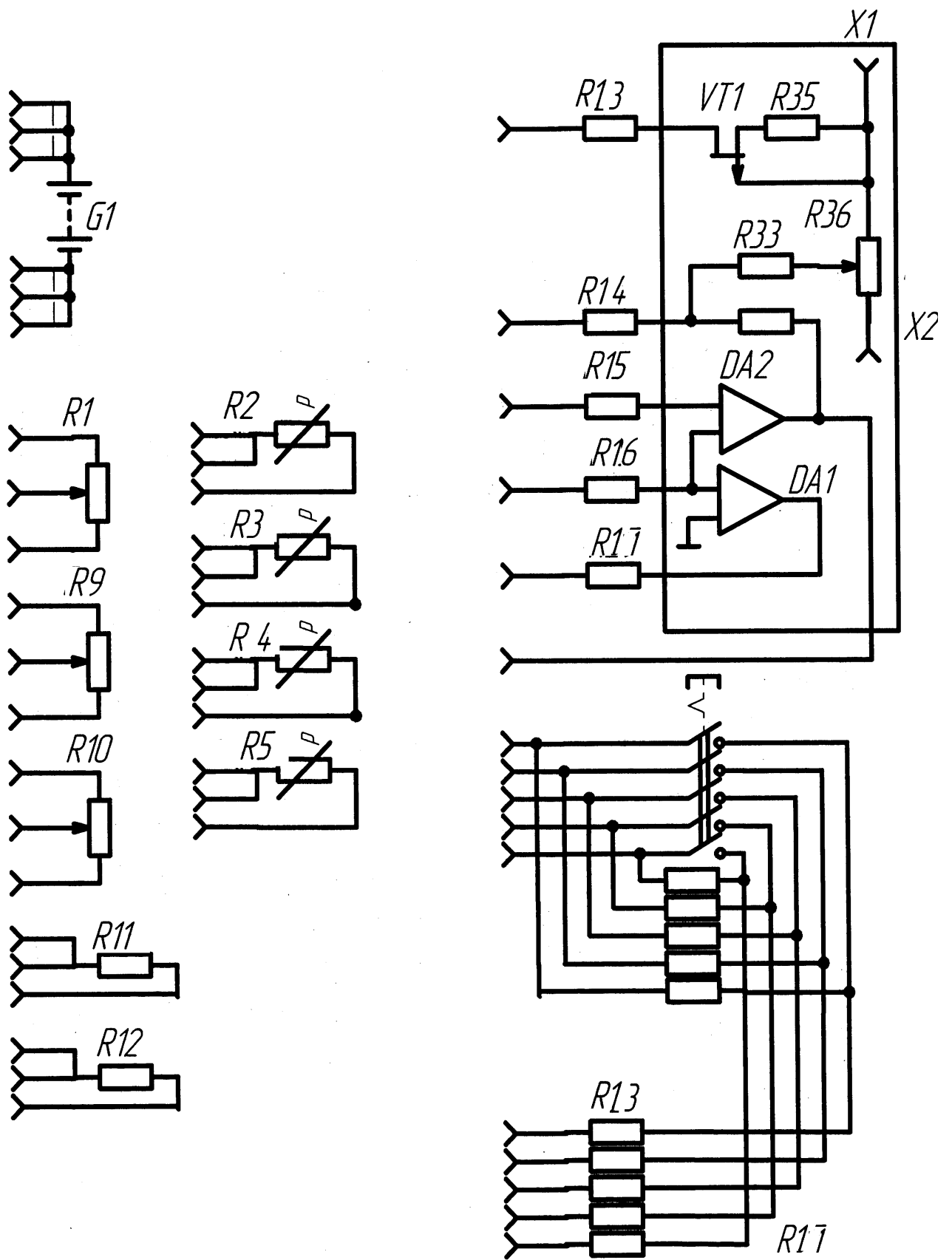


Рисунок 2.2 Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

3 Рабочее задание

Измерить чувствительность датчиков с помощью цифрового мультиметра. Для этого измерить сопротивление датчиков и напряжение на их выводах при отсутствии деформации и максимальной деформации.

Методические указания. Чувствительность датчиков определять как отношение изменения измеренных значений датчиков к соответствующим изменениям положениям свободного конца пластины.

Определить относительную чувствительность параметрических датчиков как отношение измеренных значений чувствительности датчиков к величине измеренного параметра датчика.

Определить инструментальную погрешность измерения абсолютной и относительной чувствительности датчиков.

3.1 Исследовать схему преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при запитке возбуждающим током через балластный резистор от источника постоянного напряжения, так как это показано на рисунке 3.1. Определить сопротивление балластного резистора, при котором чувствительность датчиков и схемы преобразования сопротивления датчиков в напряжение максимальна. Определить погрешность определения чувствительности для оптимальной величины балластного резистора.

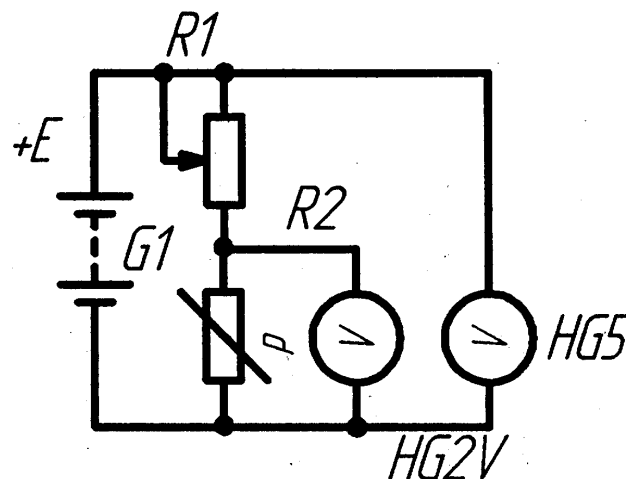


Рисунок 3.1. Схема преобразования сопротивления параметрических датчиков в напряжение при запитке возбуждающим током через балластный резистор от источника постоянного напряжения.

3.2 Исследовать схему преобразования сопротивления двух тензодатчиков в напряжение при их включении так как это показано на рисунке 3.2. Определить инструментальную погрешность определения чувствительности.

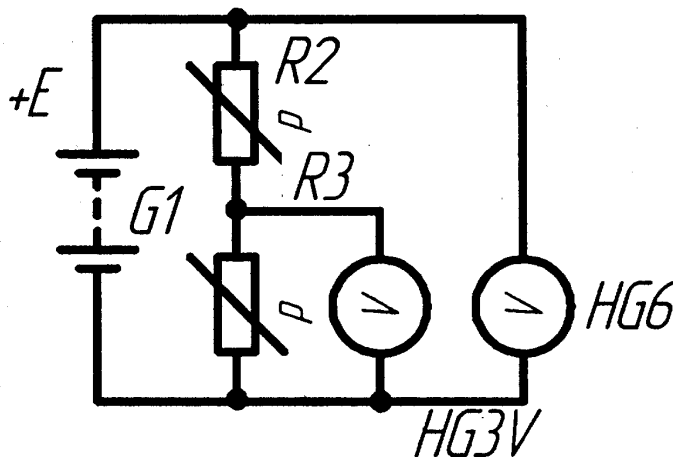


Рисунок 3.2. Принципиальная электрическая схема включения двух тензорезисторов

3.3 Исследовать схему преобразования сопротивления двух тензодатчиков в напряжение при их включении в мостовую схему так как это показано на рисунке 3.3. Определить инструментальную погрешность измерения абсолютной и относительной чувствительности датчиков.

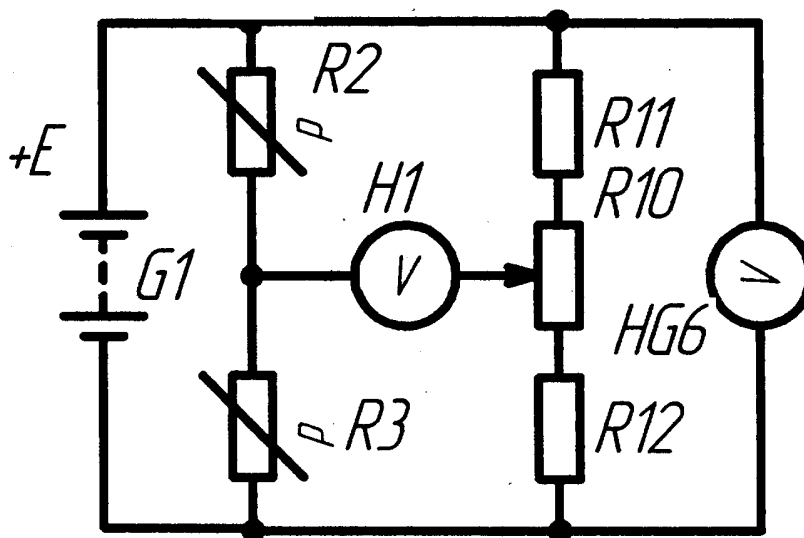


Рисунок 3.3 Мостовая схема включения двух тензорезисторов

3.4 Исследовать схему преобразования сопротивления четырех тензодатчиков в напряжение при их включении в мостовую схему так как это показано на рисунке 3.3. Определить инструментальную погрешность измерения абсолютной и относительной чувствительности датчиков. Сравнить чувствительность датчиков для всех схем включения.

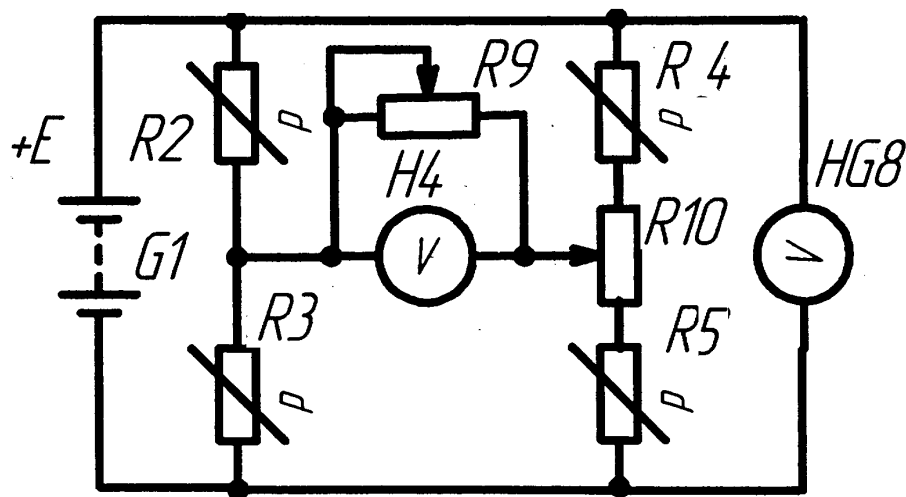


Рисунок 3.4 Мостовая схема включения четырех тензорезисторов

3.5 Исследовать влияние изменений параметров линии связи на тензозависимость выходного напряжения тензодатчика, включенного в мостовую схему.

3.6 Исследовать трех проводную схему включения одного тензодатчика в мостовую схему так как это показано на рисунке 3.5.

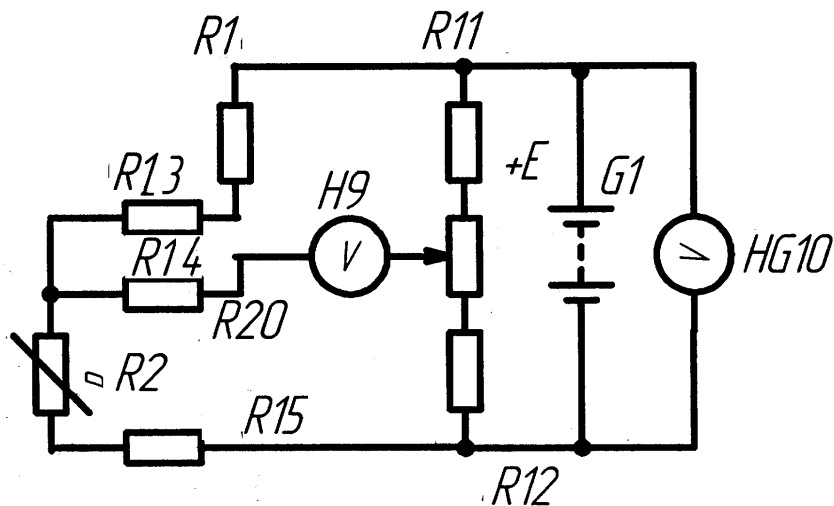


Рисунок 3.5 Мостовая трехпроводная схема включения одного тензорезистора

3.7 Исследовать проводную схему включения четырех тензодатчиков по схеме квазиуравновешенного моста так как это показано на рисунке 3.6. Дать заключение по чувствительности, статической погрешности измерений, а также влияния изменений параметров линии связи для различного количества датчиков и схем их включения.

Дать рекомендации по использованию датчиков, схем их включения и повышению их метрологических свойств.

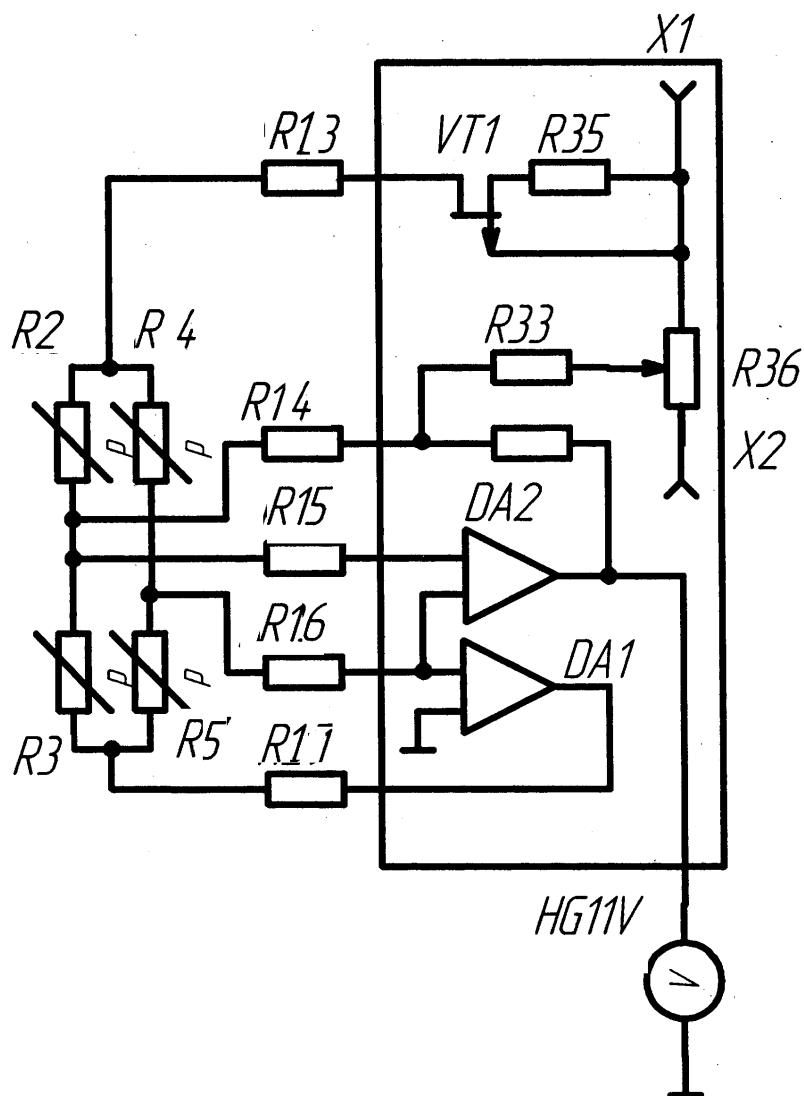


Рисунок 3.6 Включение четырех тензорезисторов по схеме квазиуравновешенного моста

4 Вопросы для допуска к работе

- 1) Цель данной работы.
- 2) Разновидности механических воздействий на РЭА.

3) Изменение параметров материалов, из которых изготавливаются элементы конструкции тензодатчиков.

4) Виды тензодатчиков.

5) Измерительные схемы, используемые для включения параметрических датчиков.

6) Формирование необходимых деформаций.

8) Принципы работы приборов для измерения, контроля, регистрации сопротивлений тензодатчиков и напряжений.

9) Принципы определения оптимальных параметров измерительной схемы.

10) Состав лабораторной установки.

5 Порядок проведения испытаний

1) Измерить сопротивления и напряжения на выводах тензодатчиков.

2) При выполнении задания 3.1, измеряя мультиметром сопротивление R_1 установить его величину равной сопротивлению тензодатчиков, в два раза больше и в два раза меньше.

6 Содержание отчета

1) Цель работы.

2) Краткое описание лабораторной установки.

3) Данные измерений, таблица, графики зависимости.

4) Выводы о характере полученных зависимостей.

5) Выводы по результатам исследований тензодатчиков и измерительных схем.

7 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И.Гуров. Аналоговая и цифровая электроника. [Текст] - М.: Горячая линия - Телеком, 2000.- 800с..

2. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи) [Текст]. Учеб. пособие для вузов. -Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. –320с., ил.

3. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». Сборник материалов XV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Под редакцией профессора В. Н. Азарова. [Текст] М.: МГИЭМ, 2003.-337 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

Исследование тахометрического датчика

Цель работы: ознакомиться с измерительными преобразователями угловой скорости вращения валов объектов контроля и управления, видами и методами повышения точности измерений, схемами включения в измерительные цепи, методами линеаризации измерения, и коррекции результата измерений для уменьшения влияния мешающих факторов и фильтрации помех.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Различного рода датчики в современной электронике играют исключительно важную роль. Любой разработчик в своей практической деятельности рано или поздно сталкивается с необходимостью использования этих устройств. В промышленности измерение скорости сводится в большинстве случаев к измерению скоростей вращения крутящихся деталей и узлов, когда за ними приходится наблюдать в целях безопасности либо для создания условий их работы в желательном режиме. В случае прямолинейного движения измерение скорости часто также может быть сведено к измерению скорости вращения. Поэтому тахометрические датчики являются в своем большинстве датчиками угловой скорости.

Промышленные датчики, предназначенные специально для измерения скорости, базируются на законе Фарадея, согласно которому электродвижущая сила e , наводимая в электропроводящем контуре, пропорциональна скорости изменения потокосцепления Ψ магнитного поля в нём: $e = -d\Psi/dt$, Поэтому всякое относительное перемещение между источником потока (индуктором) и контуром наводит в этом последнем э. д. с, амплитуда которой пропорциональна скорости перемещения, вследствие чего на выходе такого датчика формируется сигнал

$$e = -\psi_0 (dF(x)/dx)(dx/dt), \quad (1)$$

где x — переменная линейного или углового положения. Поэтому всякое относительное перемещение между источником потока (индуктором) и контуром наводит в этом последнем э. д. с, амплитуда которой пропорциональна скорости перемещения, вследствие чего на выходе такого датчика формируется сигнал

Этот вид тахометрии называется **электродинамическим**.

Когда исследуемое движущееся тело осуществляет периодическое движение, например вращение, определение его скорости может быть заменено измерением частоты: так, датчик близости, расположенный рядом с объектом, расстояние до которого изменяется периодически, выдает сигнал, частота которого равна или кратна, в зависимости от конфигурации объекта, частоте движений. Так, для измерения угловой скорости вращающегося вала можно использовать насаженный на него диск, снабженный чередующимися прозрачными и непрозрачными частями, которые при вращении будут прерывать поток лучей, регистрируемый с помощью оптического детектора. Таким образом будет формироваться последовательность электрических импульсов с частотой, пропорциональной угловой скорости вращающегося вала. Тахометры этого типа называют **импульсными**.

В случае очень медленного вращения, например, менее одного градуса в час, описанные выше методы становятся непригодными, и в этом случае измерение скорости может быть эффективно осуществлено с помощью лазерного гиromетра. Принцип его действия основан на существовании разности хода двух волн, излучаемых одним лазером и распространяющихся в противоположных направлениях в одной и той же вращающейся среде. Эта разность хода, пропорциональная угловой скорости, выявляется с помощью оптического интерферометра. Отношения, которые связывают скорость и положение, с одного направления, и скорость и ускорение, с другого, позволяют определять скорость путем обработки сигналов датчиков каждой из этих двух величин.

Величину скорости можно определять и по производной по времени от сигнала аналогового датчика положения. Однако этот метод связан с появлением помех (например, из-за дискретности проволочного потенциометра, являющегося датчиком положения) и увеличением высокочастотного шума скользящих контактов.

Интегрирование сигнала датчика ускорения представляет другой метод определения скорости; используемый в навигации, он требует сложного оборудования (инерциальная платформа).

1.1 Электромагнитные тахометры угловой скорости

1.1.1 Тахометрический генератор постоянного тока

Тахогенератор (от греч. *táchos* — быстрота, скорость и генератор), микромашинка генераторного типа, предназначенная для преобразования мгновенных значений частоты вращения вала (ротора) какой-либо машины или механизма в электрический сигнал

Тахогенераторы постоянного тока служат для измерения частоты вращения по значению выходного напряжения, а также для получения электрических сигналов, пропорциональных частоте вращения вала в схемах автоматического регулирования.

Устройство. Принцип действия.

Тахогенератор постоянного тока - это машина постоянного тока с независимым возбуждением или возбуждением постоянными магнитами, работающая в генераторном режиме. По конструкции он почти не отличается от машин постоянного тока.

Элементами устройства генератора являются, как это изображено на рисунке 1. а) статор 3 (индуктор), представляющий собой ферромагнитный каркас, который несет 2 магнитных полюса, направляющих поле магнитной индукции, образуемое током через катушки (электромагниты) или постоянными магнитами; б) ротор 4 (якорь), который представляет собой многослойный цилиндр из листового железа, вращающийся между полюсами статора, причем его ось совпадает с осью статора; на его периферии параллельно оси расположены в углублениях (пазах) медных проводников; эти проводники, называемые активными, соединены попарно своими концами с другими, которые расположены

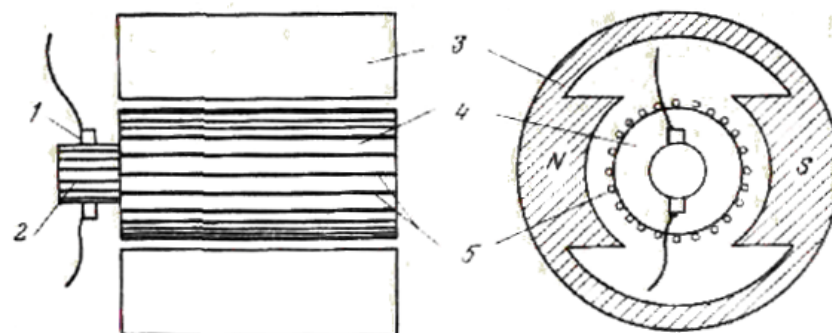


Рисунок 1. Принципиальная схема генератора постоянного тока, 1-щетка; 2-коллектор; 3- статор; 4 - ротор; 5-проводники

диаметрально противоположно на роторе. в) коллектор 2 — цилиндр с той же осью, что и у ротора, но значительно меньшего диаметра, несущий изолированные между собой медные пластинки, каждая из которых связана с активным проводником;

г) две щетки 1, связанные с клеммами генератора и прижимаемые к коллектору, которые закрепляются на двух диаметрально противоположных пластинках; щетки расположены вдоль средней линии перпендикулярно направлению индукции, так, чтобы снимать максимальную Э.д.с.

Основными требованиями, предъявляемыми к тахогенераторам, являются:

- а) линейность выходной характеристики;
- б) большая крутизна выходной характеристики;
- в) малое влияние на выходную характеристику изменения температуры окружающей среды и нагрузки;
- г) минимум пульсаций напряжения на коллекторе.

На рисунке 2 представлены различные типы тахометрических генераторов постоянного тока (документация фирмы С.Е.М.).

На рисунке 3 показаны принципиальные схемы тахогенераторов постоянного тока с электромагнитным возбуждением (а) и возбуждением постоянными магнитами (б). В случае электромагнитного возбуждения обмотку возбуждения ОВ подключают к источнику постоянного тока (рисунке 3, а). Тахогенератор возбуждается и если его якорь привести во вращение с частотой n , то на выходе генератора появится постоянное напряжение $U_{вых}$.

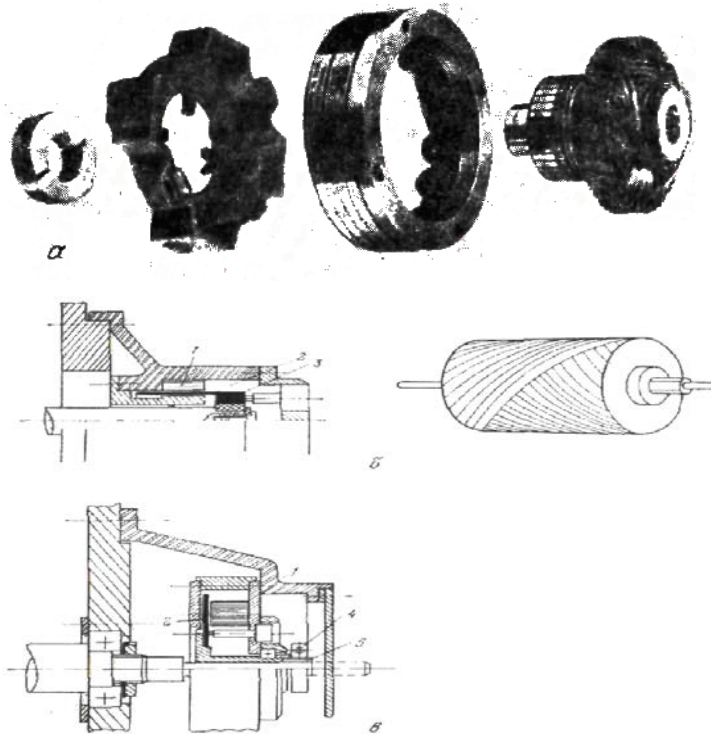


Рисунок 2. Различные типы тахометрических генераторов постоянного тока (документация фирмы С.Е.М.).

а — с катушечным ротором; б — с колоколообразным ротором (пример выполнения обмотки фирмы Muiniotor S. A.); в — с дискоаксиальным ротором (деталь конструкции якоря фирмы С. Е. У. 1 — магнит; 2 — якорь; 3 — коллектор; 4 — фиксирующее кольцо; 5 — разрезная ступица.

Уравнение выходной характеристики тахогенератора имеет вид

$$U_{\text{вых}} = \frac{C_e \Phi_e n}{1 + r_a / R_H} - \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{1 + r_a / R_H} \quad (2)$$

где r_a - сопротивление обмотки якоря, Ом; R_H - внутреннее сопротивление прибора, подключенного к тахогенератору, Ом.

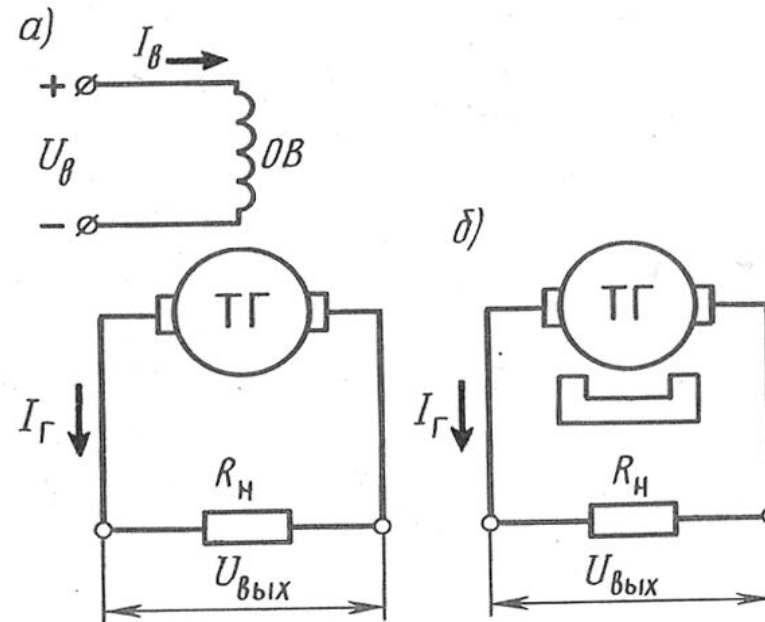


Рисунок 3. Принципиальные схемы включения тахогенераторов постоянного тока

Из (2) следует, что чем больше сопротивление прибора R_H тем больше крутизна выходной характеристики C_u . Наибольшая крутизна у выходной характеристики, соответствующей режиму холостого хода тахогенератора, когда обмотка якоря разомкнута ($R_H = \infty$). С ростом тока нагрузки (уменьшением R_H) крутизна выходной характеристики уменьшается (рисунок 3, а). У современных тахогенераторов постоянного тока $C_u = (6 \div 260) \cdot 10^{-3}$ В/(об/мин), что превышает крутизну асинхронных тахогенераторов.

Выходная характеристика тахогенератора постоянного тока - прямая линия. Однако опыт показывает, что выходная характеристика прямолинейна только в начальной части (при малых относительных частотах вращения), а с ростом частоты вращения она становится криволинейной (рисунок 4, а).

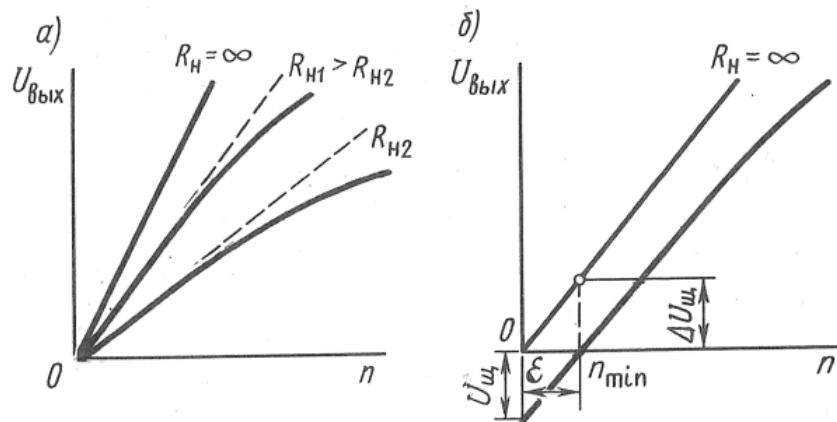


Рисунок 4. Выходные характеристики тахометрических генераторов постоянного тока.

Криволинейность характеристики усиливается при уменьшении сопротивления нагрузки R_H и увеличении частоты вращения n . Это объясняется размагничивающим действием реакции якоря в тахогенераторе. Для уменьшения криволинейности выходной характеристики не следует использовать тахогенератор на его предельных частотах вращения и применять в качестве нагрузки прибор с малым внутренним сопротивлением.

В реальных условиях существует падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}$, поэтому выходная характеристика тахогенератора выходит не из начала осей координат, а из точки на оси ординат, отстоящей от начала координат на

$$U_{щ} = -[\Delta U_{щ}/(1 + \Gamma a/R_H)] \quad (3)$$

Это приводит к появлению у тахогенераторов постоянного тока зоны нечувствительности $\epsilon = \pm n_{min}$, в пределах которой он не создает на выходе напряжения (рисунок 4, б). Для уменьшения зоны нечувствительности в тахогенераторах применяют щетки с небольшим значением $\Delta U_{щ}$, т. е. с малым сопротивлением (медно-графитные или серебряно-графитные). В тахогенераторах высокой точности (прецизионных) используют щетки с серебряными или золотыми напайками.

В тахогенераторах постоянного тока технологическая неточность установки щеток на геометрической нейтрали вызывает еще один вид погрешности-асимметрию выходного напряжения. Она заключается в том, что величина выходного напряжения различна при вращении якоря с одинаковой частотой, но в противоположных направлениях. При сдвиге щеток с геометрической нейтрали возникает продольная составляющая потока якоря, которая при одном направлении вращения совпадает с потоком возбуждения, а при другом-противоположна ему. Следовательно, результирующий поток машины при обоих направлениях вращения будет различным, при этом различными будут э. д. с., индуцируемые в якоре.

Асимметрию выходного напряжения вычисляют как отношение разности выходных напряжений при вращении якоря с номинальной частотой в обоих направлениях к полусумме этих напряжений. В зависимости от класса точности тахогенератора скоростная амплитудная погрешность при номинальной частоте вращения составляет $\pm(0,05-3)\%$, а ошибка асимметрии равна $\pm(1-3)\%$. Источником погрешности является также непостоянство магнитного потока обмотки возбуждения Φ_v . При электромагнитном возбуждении тахогенератора причиной этого может быть колебание напряжения U_B , подводимого к обмотке возбуждения, нагрев этой обмотки. В обоих случаях изменяется ток возбуждения I_B что ведет к изменению потока Φ_v . Для уменьшения возможных колебаний потока Φ_v магнитную систему тахогенератора выполняют с сильным магнитным насыщением, т.е рабочую точку 1 на кривой намагничивания принимают за «коленом» насыщения магнитной системы. Из построений (рисунок 5, а) видно, что изменение тока возбуждения I_B на $\Delta I_B 1$ в зоне точки 1 вызывает изменение потока возбуждения на $\Delta \Phi_B 1$, значение изменений здесь намного меньше, чем в зоне точки 2, лежащей на прямолинейном участке кривой намагничивания, расположенном до «колена» насыщения ($\Delta \Phi_B 1 \ll \Delta \Phi_B 2$).

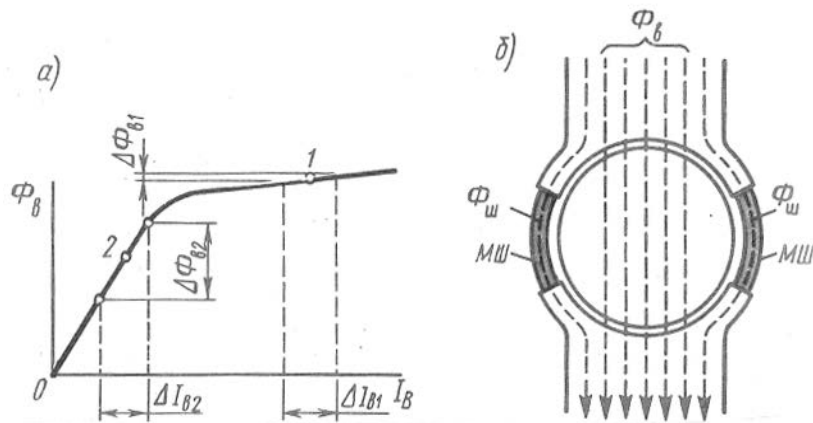


Рисунок 5. Кривая намагничивания (а) тахометрических генераторов постоянного тока и магнитопровод с магнитными шунтами (б).

Сильное магнитное насыщение магнитной цепи тахогенератора не всегда целесообразно, потому что увеличивается объем обмотки возбуждения, а следовательно, габаритные размеры тахогенератора. В тахогенераторах с ненасыщенной магнитной системой для ограничения колебаний потока возбуждения Φ последовательно в цепь обмотки возбуждения включают терморезистор, компенсирующий изменение сопротивления обмотки при колебаниях температуры, или применяют магнитные шунты МШ (рисунок 9.7,б), изготовленные из сплава, изменяющего свое магнитное сопротивление при изменении температуры нагрева. Например, при нагреве обмотки возбуждения ее сопротивление увеличивается, ток I_B и поток Φ_B уменьшаются. Но при этом магнитное сопротивление шунтов увеличивается, что уменьшает поток $\Phi_{ш}$ через шунты и увеличивает поток Φ_B через полюс и якорь на величину, компенсирующую его уменьшение от изменения тока возбуждения. При снижении температуры процессы идут в обратном направлении. В итоге происходят лишь незначительные колебания потока возбуждения.

Все причины, вызывающие отклонение выходной характеристики тахогенератора от прямолинейной, ведут к амплитудной погрешности. Тахогенераторы постоянного тока имеют амплитудную погрешность от 0,5 до 3%.

В тахогенераторах постоянного тока возможна пульсация выходного напряжения, обусловленная рядом причин: зубчатой поверхностью сердечника якоря; неравномерностью воздушного зазора или неодинаковой магнитной проводимостью сердечника якоря по разным радиальным направлениям; вибрацией щеток и замыканием секций обмотки якоря в процессе коммутации; небольшим количеством секций в обмотке якоря из-за малых габаритных размеров машины. Пульсации напряжения могут вносить помехи в работу автоматических устройств, элементом которых являются тахогенераторы. Пульсации напряжения можно ослабить за счет более качественной технологии изготовления тахогенератора с применением веерной сборки листов сердечника якоря (листы укладывают в пакет со сдвигом на однозубцовое деление), а также подключением сглаживающего фильтра на выход тахогенератора. Однако полностью избавиться от пульсаций не удастся. Амплитуды пульсации выходного напряжения тахогенераторов постоянного тока составляют 0.1-3 % от среднего значения выходного напряжения.

На работу тахогенератора оказывают влияние также пульсации выходного напряжения, обусловленные: 1) зубчатым строением якоря (зубцовые пульсации); 2) изменением магнитного потока за время одного оборота вследствие эллиптичности, эксцентриситета якоря или магнитной анизотропии его материала (якорные пульсации); 3) периодическим изменением числа секций в параллельных ветвях якоря; особенно при малом числе коллекторных пластин; 4) вибрацией щеток и замыканием накоротко части секций.

Тахогенераторы постоянного тока в схемах автоматики. Применение тахогенераторов постоянного тока в различных системах управления объясняется тем, что входным сигналом для большинства регуляторов в схемах автоматики является напряжение постоянного тока; Индикаторами выходных напряжений тахометров с равномерными шкалами являются вольтметрами магнитоэлектрической системы и по существу измеряют напряжение постоянного тока, пропорциональное частоте вращения.

В замкнутой системе регулирования тахогенераторы являются основным звеном контура обратной связи по частоте вращения. Часто считают, что тахогенератор — это безынерционное звено или (при наличии RC-фильтра для сглаживания пульсаций повышенной частоты) инерционное звено первого порядка с небольшой постоянной времени, определяемой RC-цепочкой фильтра. Более глубокие исследования, однако, показывают, что с учетом $\Delta U_{щ}$ и люфтов в подвижной передаче (муфты, зубчатые пары) узел тахогенератора становится нелинейным звеном, вызывающим автоколебания системы управления. При этом наиболее вредные низкочастотные пульсации напряжения на выходе узла тахогенератора в большей степени зависят от органических недостатков применяемых передач, чем от собственно тахогенератора как электрической машины.

В системе автоматического управления под тахогенератором (ТГ) принято понимать комплекс устройств или узел между валом двигателя и входом усилителя. В приводах с тахогенераторами этот узел включает в себя устройство сочленения (муфту, зубчатую передачу), собственно тахогенератор, проводку до панели управления, а иногда также выходной трансформатор, фильтр и потенциометр.

На рисунке 6 в качестве примера приведена простейшая структурная схема управляемого электропривода с обратной связью по частоте вращения. Схема управления предназначена для того, чтобы обеспечить частоту вращения механизма M пропорциональной неизменному эталонному напряжению или изменять ее пропорционально напряжению программного устройства $ПУ$. Для этого напряжение $ТГ$ в устройстве сравнения $УС$ сопоставляется с напряжением источника эталонного напряжения или программного устройства и их разность подается на усилитель, где она усиливается, как правило, двумя последовательными каскадами — предварительным усилителем $У$ и усилителем мощности $УМ$, к которому подключен двигатель $Д$. Нетрудно заметить, что чем выше коэффициент усиления по напряжению и по мощности усилителей, тем меньшими должны быть разность напряжений и мощность,

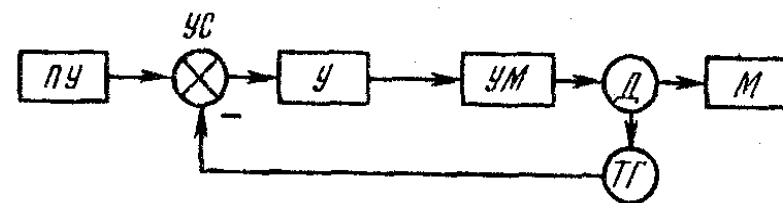


Рисунок 6. Структурная схема управляемого электропривода

отдаваемая $ТГ$, которые необходимо подавать на вход $У$, чтобы обеспечить заданную частоту вращения, и тем точнее будет выдерживаться пропорциональностью между частотой вращения и напряжением $ПУ$.

Достоинства и недостатки. Достоинства тахогенераторов постоянного тока по сравнению с асинхронными тахогенераторами: меньшие габаритные размеры и масса (в 2-3 раза) при большей выходной мощности; отсутствие фазовой погрешности; возможно возбуждение постоянными магнитами, что позволяет обойтись без источника питания для цепи возбуждения.

Наряду с этим тахогенераторы постоянного тока имеют недостатки, ограничивающие их применение: сложность конструкции, высокую стоимость, наличие скользящего контакта между щетками и коллектором, что приводит к снижению надежности тахогенератора и к нестабильности выходной характеристики; наличие зоны нечувствительности; пульсация выходного напряжения; помехи радиоприему, для подавления которых в некоторых случаях приходится применять специальные меры. Для подавления электромагнитных излучений применяют экранирование двигателя. В качестве экрана используют заземленный корпус двигателя. Если в подшипниковом щите со стороны коллектора имеются окна, то их закрывают металлической сеткой, соединенной с заземленным корпусом двигателя. Если корпус двигателя или его передний подшипниковый щит (со стороны коллектора) изготовлены из пластмассы, то неметаллическую часть двигателя закрывают сеткой и заземляют. Для подавления радиопомех, проникающих в электросеть, применяют симметрирование обмоток и включение фильтров. Симметрирование состоит в том, что каждую обмотку, включаемую последовательно в цепь якоря

(обмотку возбуждения, обмотку добавочных полюсов и т. п.), разделяют на две равные части и присоединяют симметрично обмотке якоря, подключая к щеткам разной полярности. В качестве фильтров используют конденсаторы, включенные между каждым токнесущим проводом и заземленным корпусом двигателя. Значение емкости конденсаторов подбирают опытным путем. Конденсаторы должны быть рассчитаны на рабочее напряжение двигателя. Предпочтительнее применять проходные конденсаторы типа КБП, у которых один из зажимов металлический корпус, прикрепляемый непосредственно к статору двигателя и заземляемый вместе с ним. Часто конденсаторы фильтра располагают в коробке выводов двигателя.

Таким образом, любой вид тахогенератора имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому при выборе тахогенератора необходимо исходить из конкретных условий его работы и требований, предъявляемых к тахогенератору со стороны автоматического устройства, для которого он предназначенся.

Широкое применение получили тахогенераторы постоянного тока, возбуждаемые постоянными магнитами. Эти тахогенераторы не имеют обмотки возбуждения, и поэтому они проще по конструкции и имеют меньшие габариты. В таблице 1 приведены технические данные некоторых тахогенераторов постоянного тока, изготавливаемых серийно отечественной промышленностью.

1.1.2 Тахометрические генераторы на переменном токе

Такой тип генераторов интересен отсутствием коллектора и щеток, что способствует заметному увеличению срока службы, а также отсутствию флуктуации падения напряжения на щетках и подавлению паразитных сигналов при коммутациях. Однако схемы включения таких генераторов обычно более сложны, так как измерение амплитуды требует выпрямления и фильтрации выходного напряжения. Синхронный тахогенератор, устройство которого поясняет рисунок 7, представляет собой небольшой генератор переменного тока. Ротор несёт постоянные магниты и связан с осью, приводимой во вращение контролируемым объектом.

Таблица 1. Технические характеристики тахогенераторов постоянного тока

Тип	Параметры				
	n_{\max} , об/мин	c_U , В/(об/мин)	I_r , А	U_B , В	G , кг
ТД-101	1500	0,021	0,10	110	0,70
ТД-103	1500	0,100	0,10	110	0,70
ТГ-1	1100	0,100	0,01	27	1,85
ТГ-3	4000	0,015	0,10	27	0,50
ТД-201	1100	0,13	0,20	110	—
ТД-103ПМ	1000	0,100	0,10	—	—
ТД-201ПМ	1000	0,260	0,20	—	—
ТГП-1	7000	0,006	—	—	0,15

Примечание: Тахогенераторы типов ТД-103ПМ, ТД-201ПМ, ТГП-1 выполнены с постоянными магнитами.

Статор несет обмотку (одно- или многофазную), в которой возникает синусоидальная э.д.с; её амплитуда и частота пропорциональны угловой скорости вращения ротора, т. е.

$$e = E \cdot \sin(\Omega t), \quad (4)$$

где $E = k_1 \cdot 2\pi \cdot f$, $\Omega = k_2 \cdot 2\pi \cdot f$; k_1, k_2 — константы генератора.

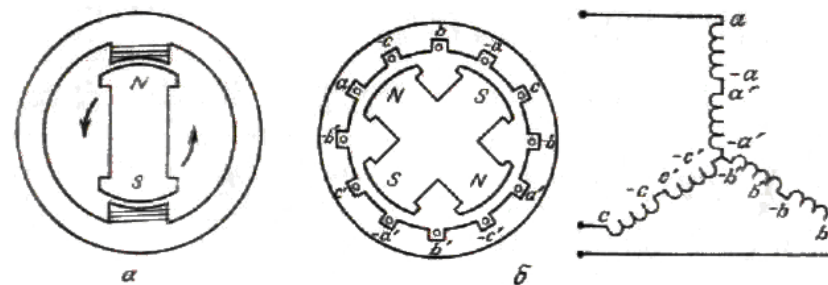


Рисунок 7. Синхронный тахогенератор а — однофазный двухполюсный; б — трехфазный с 4 полюсами с соединением обмоток в звезду. Ротор, представляет собой магнит или совокупность магнитов.

Таким образом, величина угловой скорости Ω может быть определена по амплитуде э.д.с E , или по ее частоте f .

Примерами таких тахометров могут служить генераторы с магнето (фирма-изготовитель Chauvin — Arnoux), имеющие однофазный статор и ротор в виде постоянного магнита с тремя парами полюсов. Тахометр типа 64 имеет максимальную угловую скорость 3000 об/мин, напряжение $24\text{В} \pm 1\%$ и частоту 50 Гц при 1000 об/мин. У тахометра типа 64GV максимальная частота вращения составляет 6000 об/мин, напряжение $24\text{В} \pm 1\%$, частота 200 Гц при 4000 об/мин.

Определение скорости по величине э.д.с.

Импеданс обмоток определяется выражением $Z_i = R_i + j \cdot L_i \cdot \Omega$, где R_i и L_i — соответственно его сопротивление и индуктивность.

Напряжение на клеммах ротора, нагруженного сопротивлением R , по абсолютной величине равно U .

$$U = \frac{RE}{\sqrt{(R + R_i)^2 + (L_i \Omega)^2}} = \frac{Rk_i 2\pi f}{\sqrt{(R + R_i)^2 + (k_2 L_i 2\pi f)^2}}. \quad (5)$$

Импеданс обмоток определяется выражением $Z_i = R_i + j \cdot L_i \cdot \Omega$, где R_i и L_i — соответственно его сопротивление и индуктивность.

Напряжение на клеммах ротора, нагруженного сопротивлением R , по абсолютной величине равно U . Как видно, напряжение U в общем случае не является линейной функцией. Использование генератора в тахометрии требует, чтобы сопротивление нагрузки R оставалось много больше импеданса обмотки даже при максимальных скоростях n ; при этом U практически равно E .

Выходное напряжение выпрямляется и фильтруется для получения постоянного пропорционального напряжения; оно не зависит от направления вращения. Эффективность фильтра падает с уменьшением частоты, поэтому степень биения напряжения возрастает при малых скоростях вращения, определяя нижний предел применимости. Кроме того, наличие фильтра вносит постоянную времени, которая снижает быстродействие.

Определение скорости по частоте сигнала. Частотное измерение представляет интерес, когда создаваемый синхронным генератором сигнал необходимо передать на расстояние; в этом случае потери в линии не влияют на измерение.

В качестве примера опишем тахометр с электрической передачей, выпускаемый фирмой Jaeger.

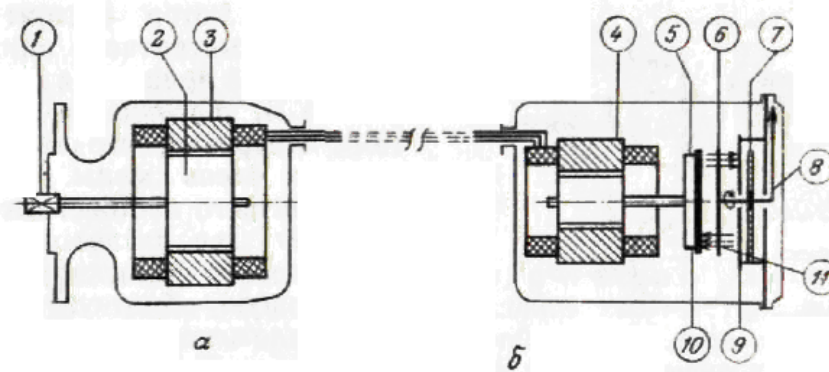


Рисунок 8. Тахометр с синхронной электрической передачей (документация фирмы Jaeger). а — задающий генератор переменного тока; б — индикатор. 1 — квадрат; 2 — постоянный магнит; 3 — статор; 4 — двигатель; 5 — измерительный магнит; 6 — измерительный диск; 7 — регулируемая спиральная пружина; 8 — игла; 9 — экранирующая пластин; 10 — узел термокомпенсации; 11 — магнитное поле.

Его задающий генератор — трехфазный, причем каждая обмотка его ротора соединена с одной из обмоток синхронного мотора. Поэтому в моторе возникает поле, которое вращается с той же скоростью, что ротор генератора, и увлекает синхронно ротор мотора, представляющий собой магнит. Ротор мотора связан со вторым магнитом (измерительным), который вращается перед металлическим диском; в последнем возникают токи Фуко, пропорциональные скорости вращения измерительного магнита, и вращающий момент S_m , пропорциональный скорости. Этот вращающий момент, согласно закону Ленца, стремится повернуть диск в сторону движения измерительного магнита; он уравновешивается противоположной парой сил спиральной пружины, так что отклонение а диска пропорционально скорости вращения.

Тахометрический асинхронный генератор. Его конструкция подобна конструкции двухфазного асинхронного мотора

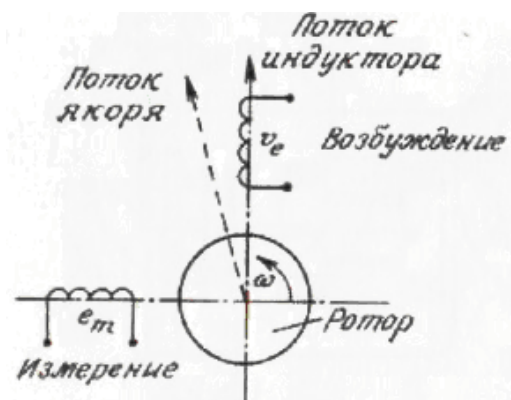


Рисунок 9. Принцип действия асинхронного тахометрического генератора.

Ротор состоит из тонкого немагнитного цилиндра, который вращается со скоростью (являющейся объектом измерения; его масса и инерция очень малы). Статор из магнитного листового железа несет две расположенные квадруально обмотки: а) возбуждающую обмотку, к которой приложено напряжение v_e с амплитудой V_e и стабильной частотой). б) измерительную обмотку, в которой наводится э.д.с. Последняя формирует тахометрический сигнал f — постоянная данного прибора.

Разность фаз ϕ меняется на несколько градусов во всем диапазоне изменения скоростей генератора, но испытывает скачок на π при смене направления вращения. При нулевой скорости на клеммах измерительной обмотки возникает небольшое остаточное напряжение; оно вызвано несовершенством конструкции — асимметрией ротора, неоднородностью магнитного контура, неточной установкой обмоток по углу.

Порядок величин метрологических параметров прибора следующий: диапазон измерений от 10 об/мин до $2 \cdot 10^4$ об/мин; измеряемое напряжение при 1000 об/мин — от 1 до 10 В; отклонение от линейности — от 0,1% до 0,2% диапазона измерений; остаточное напряжение — от 10 до 100 мВ; момент инерции ротора —

несколько г·см². За исключением очень малого момента инерции, характеристики генераторов этого типа не слишком примечательны; кроме того, их использование требует очень стабильного возбуждающего источника. Однако такие генераторы представляют интерес, поскольку легко могут быть включены в регулирующие или командные комплексы, в которых информация передается амплитудой синусоидальных токов фиксированной частоты, содержащие, к примеру, такие приборы, как двухфазный мотор с управляющей обмоткой, синхродетектор, резольвер, индуктивный потенциометр.

1.1.3 Электромагнитные тахометры линейной скорости

Когда перемещение изучаемой детали значительно (свыше метра), ее линейную скорость можно определить путем измерения угловой скорости, например, с помощью ролика либо иной вращающейся детали, являющейся частью того же устройства, скорость вращения которой пропорциональна линейной скорости перемещения; так, скорость вращения стального листа на выходе прокатного стана определяется скоростью вращения валков. В случае малых перемещений датчик скорости изготавливается из магнита и катушки.

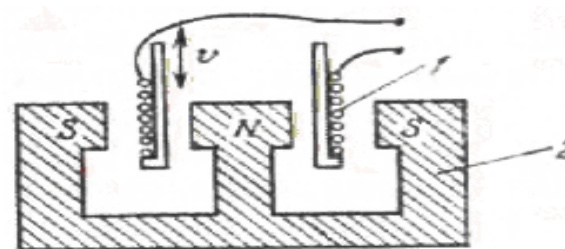


Рисунок 10. Принцип действия датчика с подвижной катушкой.

1 — катушка; 2 — постоянный магнит.

Поскольку один из этих элементов фиксирован, а другой связан с движущейся деталью, их относительное перемещение наводит в катушке э.д.с, пропорциональную скорости. Когда подвижна катушка, она перемещается в радиальном поле индукции тороидального возникающая в ней э.д.с. описывается выражением

$$e = 2\pi n B v = l B v . \quad (6)$$

где r и n — соответственно радиус витков и их число, $l = 2\pi rn$ — длина проволоки катушки, B — величина индукции, v — скорость перемещения.

Максимальное перемещение для таких конструкций составляет несколько миллиметров, чувствительность — порядка одного вольта на метр и секунду, а отклонение от линейности — около $\pm 10\%$. Для перемещений более значительных (достигающих 0,5 м) используют магнит, укрепленный на движущейся детали, который перемещается вдоль оси тандема из двух катушек (см. рисунок 11).

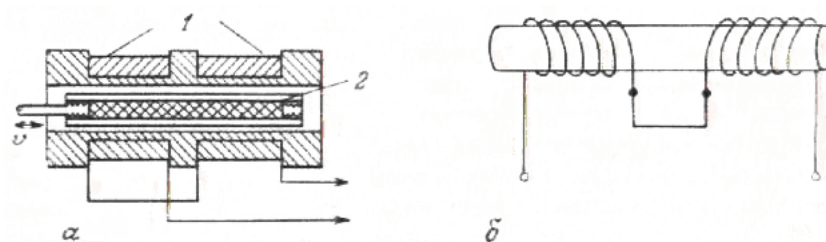


Рисунок 11. Датчик скорости с подвижным магнитом (документация фирмы Schaevitz); а — конструкция; б — соединение измерительных катушек.

Э.д.с. наведенная в катушке перемещением магнита, пропорциональна его скорости; э.д.с. катушек имеют противоположный знак, поскольку в них перемещаются противоположные полюса; поэтому обе катушки соединены последовательно и встречно по знаку, так что в этом случае получается ненулевая суммарная э.д.с.

Примером такого измерительного прибора может служить датчик линейной скорости 7L20VT.Z (фирма-изготовитель Schaevitz), имеющий максимальный ход 500 мм, чувствительность 4,8 мВ/мм/с и линейность $\pm 1\%$ от выходного напряжения.

1.1.4 Импульсные тахометры угловой скорости

Часто приходится измерять скорость вращения диска на валу. Поверхность такого диска состоит из p равных секторов, каждый из которых имеет характерную от-

метку (отверстие, щель, зуб). В качестве образца можно использовать любое вращающееся тело с периодической структурой: шестерню, ось с выемками, колесо с лопатками и т. д. Соответствующий (например, оптический) датчик, помещенный напротив образца, обнаруживает прохождение отметок и каждый раз выдает импульсный сигнал (рисунок 12). В наиболее простой форме он состоит из источника света и оптического приемника — фотодиода или фототранзистора.

Вращающееся тело либо снабжают отражающими метками расположенными регулярно по окружности, на которые направляется световой пучок, либо соединяют с диском, имеющим попеременно прозрачные и непрозрачные сектора, который располагают между источником и приемником света. Получая модулированный скачкообразными изменениями отражения или пропускания поток, фотоприемник выдает электрический сигнал с частотой, пропорциональной скорости вращения, и с амплитудой, не зависящей от этой скорости. Диапазон измеряемых скоростей зависит, с одной стороны, от числа скачков оптических свойств (риски, щели, прозрачные сектора, нанесенные на диск или на вращающееся тело), а с другой — от полосы пропускания приемника и связанных с ним электрических схем

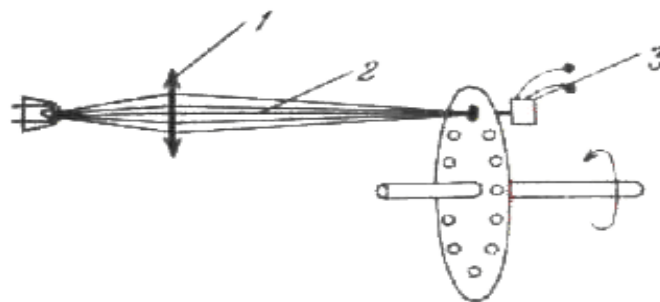


Рисунок 12. Принцип действия оптического тахометра. 1 — линза; 2 — световой пучок; 3 — оптический приемник.

. Для измерений малых скоростей, например ОД об/мин, используются диски с большим числом щелей (от 500 до нескольких тысяч); в измерениях больших скоростей, например 10^5 -г-- 10^6 об/мин в случае ультрацентрифуг, диск имеет только одну щель, и максимальная измеряемая скорость определяется верхней граничной частотой электрической цепи. Применение диска с двумя дорожками, сдвинутыми на четверть периода по пространству (оптический генератор приращений, позволяет определять направление вращения.

Частота импульсов датчика имеет величину f :

$$f = pN \text{ Гц,}$$

где N — число оборотов образца в секунду, p — число регулярных меток, на него нанесенных. Выбор подходящего датчика связан с природой вращающегося тела и нанесенных на него меток; в зависимости от обстоятельств используют или один из различных датчиков близости или оптический датчик. Датчик изменяющегося магнитного сопротивления должен быть размещен вблизи вращающегося ферромагнитного тела, метки на котором представляют собой резкие изменения его магнитных свойств. Датчик на токах Фуко и индуктивный датчик чувствительны к изменениям расстояния до проводящего тела вращения. Для датчиков, основанных на использовании эффекта Холла или магнитного сопротивления, требуется, чтобы на вращающемся теле находились в движении один или несколько магнитов и обеспечивалось периодическое экранирование датчика от магнитного поля. Оптический датчик и источник света позволяют регистрировать последовательность меток, образуемых разрывами оптических свойств вследствие наличия отверстий, щелей, отражающих поверхностей. Достоинства импульсной тахеометрии обусловлены, с одной стороны, ее простотой, надежностью, совместимостью с агрессивной средой (например, измерения при ядерном облучении) а, с другой стороны, тем фактом, что носителем информации является частота, что обеспечивает определенную защищенность от различного рода помех (шумов, паразитных сигналов, ослабления в линиях связи) и упрощает преобразование в цифровую форму. Устройством формирования сигнала служит либо цифровой частотомер, либо преобразователь частота — на-

пряжение; последний состоит из а) каскада согласования импедансов и формирования сигналов, например триггера Шмитта; б) одностабильной схемы, которая каждый импульс, поступивший с выхода предыдущей ступени, преобразует в импульс постоянной амплитуды и постоянной длительности T_0 (очевидно, величина T_0 должна быть меньше минимального периода повторений); в) низкочастотного фильтра, выходное напряжение которого дает постоянную составляющую сигнала, равную среднему значению напряжения импульсов, сформированных одностабильной схемой, и пропорциональную T_0 . Снижение граничной частоты фильтра уменьшает пульсации на выходе, но увеличивает постоянную времени и, следовательно, время измерения.

Датчики с переменным магнитным сопротивлением

Принцип действия датчика с переменным магнитным сопротивлением показан на рисунке 13. Измерительная катушка 2 снабжается магнитным сердечником 1;

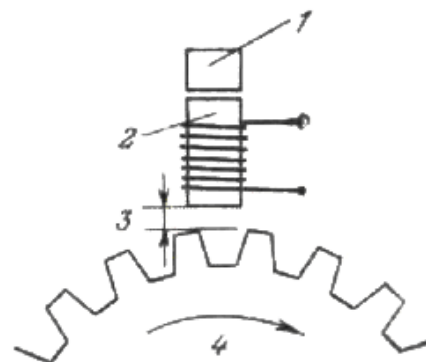


Рисунок 13. Принцип действия датчика с переменным магнитным сопротивлением

катушка помещена перед диском (полюсное колесо) или перед вращающимся ферромагнитным телом 4. Последовательность скачков магнитных свойств (зубья, щели, отверстия) диска или вращающегося тела вызывает периодическое изменение магнитного сопротивления в магнитной цепи катушки, которое наводит в ней э.д.с. с частотой, про-

порциональной скорости вращения Амплитуда этой э.д.с. зависит: а) от расстояния z между катушкой и вращающимся телом; она быстро падает с увеличением этого расстояния); (которое обычно не может превышать нескольких миллиметров б) от скорости., увеличение потерь с повышением скорости ведет к ограничению амплитуды.

Диапазон измерений зависит от числа p скачкообразных изменений магнитных свойств вращающегося тела, например, от числа зубьев колеса. Минимальная измеряемая скорость тем меньше, чем больше p , тогда как максимальная измеряемая скорость тем выше, чем меньше p . Типичные диапазоны измерения составляют от 50 до 500 об/мин для колеса с 60 зубьями и от 500 до 10 000 об/мин для колеса с 15 зубьями. Датчик рассматриваемого типа позволяет определять скорость диска, вращающегося внутри кожуха, при условии, стенка кожуха немагнитная и расстояние между катушкой и диском остается не большим.

1.1.6 Датчики на токах Фуко

Этот тип датчиков применим, когда вращающееся тело металлическое, но не ферромагнитное. Катушка, представляющая собой чувствительный элемент, образует индуктивность резонансного контура синусоидального генератора. При приближении металлического проводника изменяются характеристики L и R катушки, вследствие чего генерация прекращается. При прохождении каждого зуба вращающейся шестерни перед катушкой происходит прерывание колебаний, что обнаруживается, например, по изменению тока питания генератора. Частота соответствующего сигнала пропорциональна скорости вращения, а его амплитуда не зависит от последней, поскольку определяется в данном случае не законом Фарадея. Отсюда следует, что этот тип датчика не имеет «мертвой зоны» и поэтому применим к измерению очень малых скоростей.

1.1.7 Гиromетры

Гиromетры — это приборы, устанавливаемые на движущихся объектах для определения их угловой скорости.

В зависимости от природы используемого физического явления различают:

- а) механические гиromетры, основанные на свойствах гироскопа;
- б) оптические гиromетры на лазерах или волоконной оптике, использующие свойства распространения волн.

Гироскопический измеритель скорости. Гироскоп состоит из ротора, смонтированного в кардановом подвесе, который, будучи раскрученным мотором до большой скорости ($\sim 10^4$ об/мин), вращается вокруг оси $Y'Y'$ (рисунок 14.).

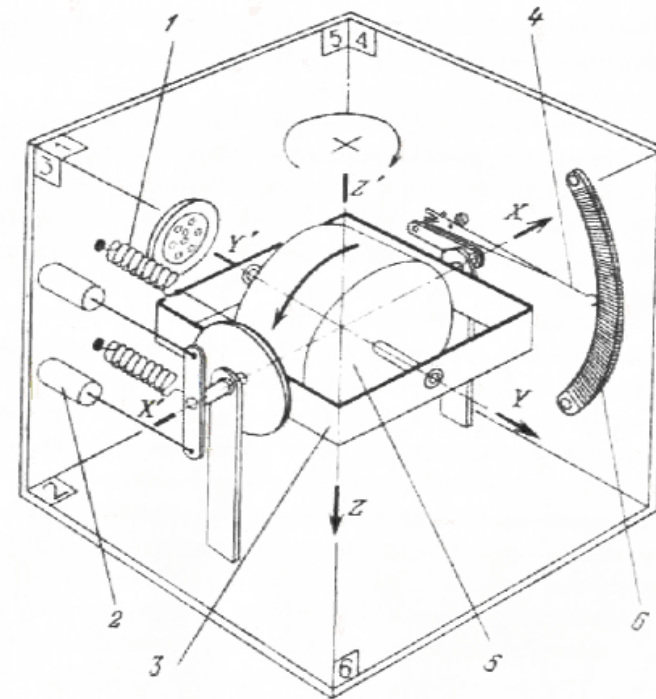


Рисунок 14. Конструкция гироскопа (документация фирмы SFIM).

- 1 — пружина; 2 — амортизатор; 3 — карданов подвес; 4 — курсор; 5 — ротор; 6 — потенциометр.

Измеряемая скорость вращения ω должна быть направлена по оси $Z'Z$, перпендикулярной оси $Y'Y$; из-за этой скорости появляется гироскопический момент сил C_g пропорциональный ω и направленный по $X'X$ перпендикулярно осям $Y'Y$ и $Z'Z$; он стремится повернуть подвес гироскопа. Момент C_g уравновешивается моментом упругих сил C_r , создаваемым двумя пружинами; он пропорционален углу α поворота подвеса. В условиях равновесия имеем

$$Cr = C_g$$

где $Cr = k \cdot \alpha$, k — коэффициент упругости пружины, $C_g \sim \omega \cdot H$;

H — кинетический момент инерции ротора. Отсюда получаем

$$\alpha = \omega \cdot H / k$$

Угол α поворота подвеса гироскопа пропорционален измеряемой скорости ω ; с помощью потенциометра угол α преобразуется в пропорциональный ему электрический сигнал.

Порядок величин метрологических характеристик типового гироскопического измерителя скорости (докум. SFIM) следующий: диапазон измерений (Д. И.) от $\pm 7^\circ/\text{с}$ до $\pm 360^\circ/\text{с}$; чувствительность средняя от $57 \text{ Ом}/^\circ/\text{с}$ до $1,11 \text{ Ом}/^\circ/\text{с}$; отклонение от линейности $\leq \pm 1,5\%$ от Д. И.; порог чувствительности $\leq \pm 1$ от Д. И.; ошибка гистерезиса $0,5\%$ от Д. И.; собственная резонансная частота заключена между 6 и 25 Гц.

Оптические гироскопы. Принцип действия (рисунок 15). Когда световая волна распространяется в движущейся среде, преодолеваемое ею расстояние зависит от того, происходит распространение в направлении движения или в противоположном ему. Пусть, например, между двумя зеркалами M и M_2 , расположенными на расстоянии L друг от друга, распространяется световая волна. Если зеркала расположены неподвижно в неподвижной среде, то преодолеваемое волной расстояние от M_1 до M_2 , т. е. $d_{12} = L$ равно пути волны d_{21} от M_2 до M_1 т. е. $d_{12} = d_{21} = L$. Во вращающейся среде, образующей кольцевой резонатор лазера, две волны, распространяющиеся в противоположных направ-

лениях, создают эффект разности их хода, проявляющийся в двух лазерных пучках различной частоты.

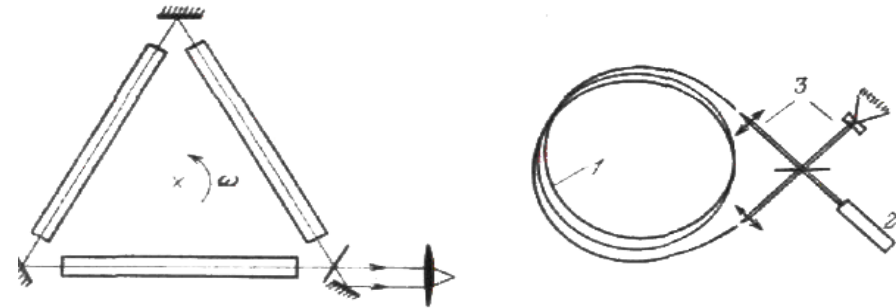


рис 15. Оптический гироскоп.

а) — лазерный гироскоп с зеркалами; б) — лазерный гироскоп с оптическим волокном, 1 — оптическое волокно; 2 — лазер; 3 — интерференционные полосы.

Когда оба зеркала перемещаются как целое со скоростью V , направленной, например, от M_1 к M_2 , то путь d_{12} увеличивается, потому что M_2 удаляется от фронта волны,

$$d_{12} = L \cdot (1 + V/c)$$

$$d_{21} = L \cdot (1 - V/c)$$

Суперпозиция этих двух пучков порождает биение, частота Δf которого пропорциональна скорости вращения: $\Delta f = 4A \cdot \omega / L \cdot \lambda$, где A — площадь, охватываемая кольцевым резонатором, L — его периметр, λ — средняя длина волн излучения. Разность этих путей пропорциональна скорости

$$V d_{12} - d_{21} = 2 L(V/c)$$

Такой прибор — лазерный гироскоп — позволяет измерять очень малые угловые скорости, порядка 10^{-2} град/ч. В гироскопе другого типа два пучка, выходящие из одного и того же лазера, распространяются в противоположных направлениях по оптическому волокну, вращающемуся с измеряемой скоростью. На выходе из волокна два пучка ин-

терферируют; подсчет числа ΔZ смещенных из-за вращения интерференционных полос позволяет измерить скорость: $\Delta Z = 2L\omega/\lambda c$ где L — длина волокна, λ — длина волны излучения лазера; c — скорость распространения световой волны в оптическом канале гиromетра. Гиromетр этого типа на оптическом волокне, благодаря увеличению длины пути L при многовитковой намотке, позволяет измерять угловые скорости примерно в 100 раз меньшие, чем измеряемые обычным лазерным гиromетром с зеркалами.

2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В лабораторной установке, изображенной на рисунке 16, исследуемый тахогенератор 1 постоянного тока возбуждается магнитным полем постоянных магнитов 2 статора. Ротор тахогенератора 1, а также ротор электрогенератора 3 приводится во вращение трёхфазным асинхронным электродвигателем 4 посредством ременной передачи 5.

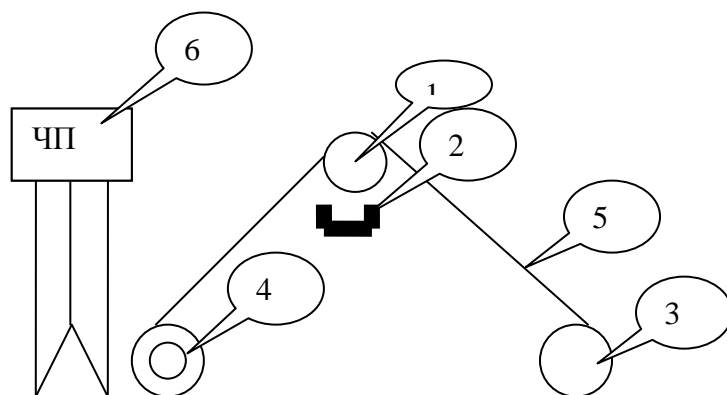


Рисунок 16. Схема лабораторной установки.

Управление частотой вращения электродвигателя 4 выполняется с помощью преобразователя частоты питающей сети 6. Повышенную и пониженную частоту вращения ротора электродвигателя задают с помощью потенциометра, расположенного на лицевой панели лабораторной установки. Все электрические выводы тахогенераторного датчика подсоединены к клеммам на лицевой панели лабораторной установки и могут быть подключены к измерительным приборам непосредственно или включены в измерительные цепи. В качестве измерительных приборов в лабораторной установке используется цифровой мультиметр и электронный цифровой осциллограф, с помощью которого выполняется статистическая обработка сигнала тахогенератора. О частоте вращения ротора трёхфазного асинхронного электродвигателя судят по частоте его питания. Цифровой частотомер встроен в частотный преобразователь.

3 РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Измерить чувствительность тахометрического преобразователя с помощью цифрового мультиметра, осциллографа и частотомера. Для этого нагрузка электродвигателя должна быть отключена (нагрузкой является генератор постоянного тока, приводимый во вращение этим же электродвигателем посредством ременной передачи, в свою очередь нагрузкой генератора являются электрические лампочки, включённые в цепь генератора).

Методические указания. Для управления установкой загрузить программу управления в цифровой регулятор. Снять градуировочную характеристику тахометрического преобразователя. Аппроксимировать градуировочную характеристику тахометрического преобразователя линейным уравнением методом наименьших квадратов. Построить график погрешности нелинейности от частоты питающей сети. Определить наибольшую абсолютную и относительную погрешность. Определить среднеквадратическое отклонение значения результата измерений определить доверительные границы

4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) Цель работы.
- 2) Краткое описание лабораторной установки.
- 3) Данные измерений, таблица, графики зависимости.
- 4) Выводы о характере полученных зависимостей.
- 5) Выводы по результатам исследований тахогенератора и измерительных схем.

5 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И.Гуров. Аналоговая и цифровая электроника. [Текст] - М.: Горячая линия - Телеком, 2000.- 800с.
2. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи) [Текст]. Учеб. пособие для вузов. -Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. – 320с., ил.
3. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». Сборник материалов XV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Под редакцией профессора В. Н. Азарова. [Текст] М.: МГИЭМ, 2003.-337 с.
4. СТО СГАУ 02068410-00902007 ОБРАБОТКА И ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ [Текст]., Самара 2007

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный
аэрокосмический университет
имени академика С.П.КОРОЛЕВА» (СГАУ)

Исследование тахометрического датчика

Составитель *В.А. Медников*
УДК 621.396.6.001.4 (075)

Исследование тахометрического датчика [Текст]. Методические указания к лабораторным работам/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. **В.А. Медников. Самара, 2009, 26 с.**

Методические указания содержат подробное описание лабораторной работы. Предназначены для студентов дневного отделения по специализации 210201.10 «Технология автоматизированного производства РЭС» при изучении методов и технических средств измерения угловой скорости вращения валов объектов контроля и управления, ознакомления со схемами измерений и принципами их действия, а также для получения студентами практических навыков в проведении измерений угловой скорости вращения валов и анализе результатов исследований.

Методические указания подготовлены на кафедре «Электронные системы и устройства». Лабораторная работа рассчитана на два академических часа.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

Рецензент: **А. В. Зеленский**

Самара 2009

Учебное издание

**Исследование тахометрического датчика
Методические указания к лабораторной работе**

Составитель: *Медников Валерий Александрович*

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение**

**высшего профессионального образования
«Самарский государственный
аэрокосмический университет имени академика С.П.КОРОЛЕВА»
(СГАУ)**

Исследование тахометрического датчика

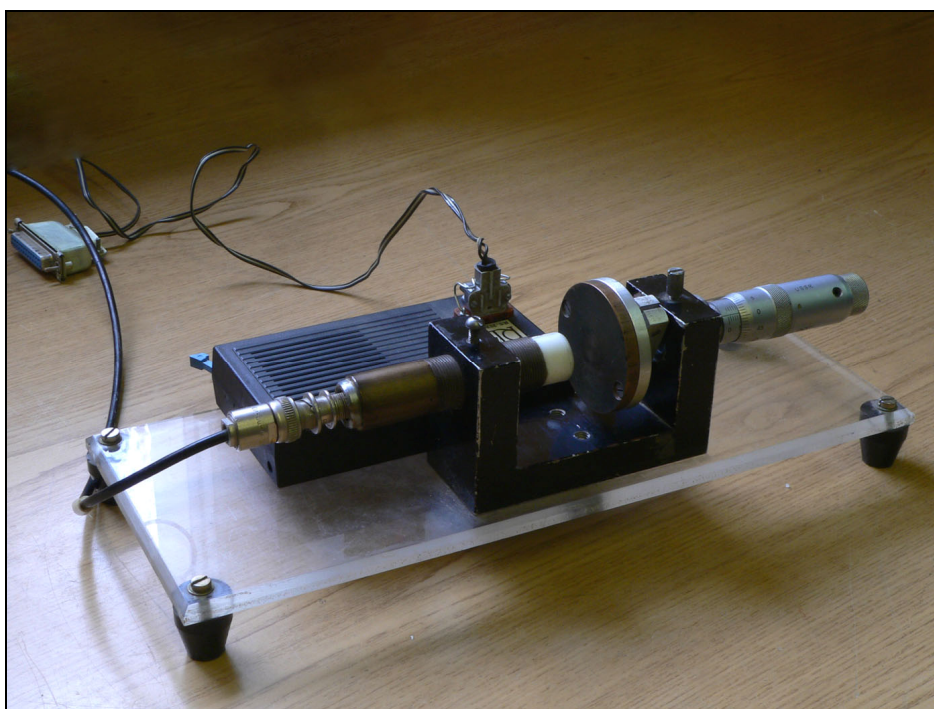
Методические указания к лабораторной работе

Самара 2009

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 6

«Исследование вихретокового датчика накладного типа»

Цель работы: ознакомление с принципом действия преобразователей вихретоковых локационных систем и способами построения на их основе датчиков близости.



1. Теоретическая часть

Работа *вихретокового датчика* основана на взаимодействии внешнего магнитного поля с электромагнитным полем вихревых (замкнутых) токов, наводимых возбуждающей катушкой в любом электропроводящем объекте. Синусоидальный или импульсный ток, действующий в катушке возбуждения датчика, создает электромагнитное поле, которое вызывает вихревые токи в материале объекта. Электромагнитное поле этих токов воздействует на сигнальную катушку, наводя в ней ЭДС. В простейших схемах вихревые токи воздействуют непосредственно на катушку возбуждения. Сила I вихревых токов, возбужденных в изделии, определяется уравнением Максвелла $\operatorname{rot} I = -\frac{1}{\rho} \frac{d\mathbf{B}}{dt}$ и зависит от частоты тока обмотки возбуж-

дения, материала объекта (его удельного электросопротивления ρ и магнитной проницаемости μ), а также расстояний между катушками и объектом. Она максимальна на поверхности объекта в контуре, диаметр которого близок к диаметру катушки возбуждения (рис. 6.1).

В настоящее время выпускают большое количество различных вихретоковых датчиков, размером от долей миллиметра до 0,5 м в диаметре и массой от нескольких граммов до сотен килограммов. В зависимости от взаимного положения катушек датчика и объекта контроля вихретоковые датчики разделяют на три типа: проходные, накладные и комбинированные.

Катушки *проходного* датчика устанавливают с двух сторон объекта (например, катушку возбуждения внутри, а сигнальную снаружи трубы). *Накладной* датчик может содержать как одну, так и две катушки, но

их размещают с одной стороны объекта. Наконец, в *комбинированном* датчике используют несколько катушек, расположенных с двух сторон объекта.

Во всех случаях между катушками возникает взаимовлияние. Так, наводимая в сигнальной катушке ЭДС вызывается не только полем вихревых токов в объекте, но и непосредственно полем катушки возбуждения, а, в свою очередь, ток в сигнальной катушке вызывает противоЭДС в катушке возбуждения. Для уменьшения взаимного влияния катушек часто используют несколько дифференциально включенных сигнальных катушек — так называемые катушки с восьмеркообразной намоткой, а также схемы с коаксиальным и ортогональным расположением катушек. В первом случае ЭДС в каждой половинке восьмерки при отсутствии объекта компенсируются. Во втором случае при коаксиальном расположении катушек выходной сигнал в сигнальной катушке образуется совместным действием потока возбуждения и вихревых токов объекта контроля, что требует устранения постоянной составляющей, обусловленной катушкой возбуждения. При ортогональном же расположении катушек ток в сигнальной катушке наводится только вихревыми токами, однако и уровень выходного сигнала при этом будет ниже, чем в первом и втором случаях.

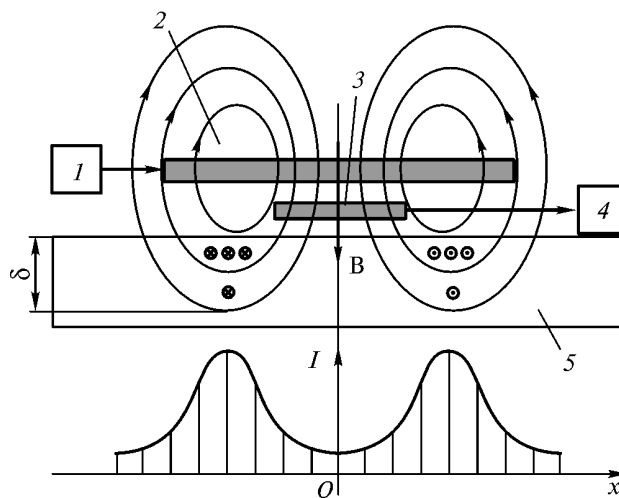


Рис. 6.1. Схема образования и эпюра вихревых токов:

1 — генератор; 2 — катушка возбуждения; 3 — сигнальная катушка; 4 — измеритель; 5 — металлический объект

Расчет вихревых токов достаточно сложен, поэтому в большинстве случаев используют эмпирические зависимости, полученные для разных частных случаев. Например, для вихретокового датчика с накладным преобразователем глубину δ проникновения вихревых токов определяют по приближенной формуле

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\rho}{\omega_b \mu \mu_0}},$$

где $\omega_b = 2\pi f$ — круговая частота тока возбуждения; ρ — удельное электросопротивление материала.

Значение δ глубины проникновения вихревых токов тем ближе к реальному, чем больше диаметр катушки возбуждения. При работе в диапазоне частот 0,1...10 кГц для большинства металлов $\delta \leq 0,5...5$ мм и уменьшается с увеличением частоты.

В дефектоскопии с помощью вихревых токов удастся обнаружить трещины наружного и внутреннего залегания длиной 1...2 мм и глубиной 0,1...0,3 мм, раковины с глубиной залегания до 6 мм, неметаллические включения. Вихретоковые датчики позволяют измерять толщину покрытий в диапазоне 0,001...1,0 мм. Для увеличения глубины проникновения вихревых токов применяют специальные меры. Например, создавая в материале магнитное насыщение (уменьшая его магнитную проницаемость), увеличивают глубину проникновения вихревых токов до 10 мм.

Особенностью вихретоковых датчиков является их *многопараметричность*, так как ЭДС преобразователя зависит от разных характеристик объекта контроля и окружающей среды, неявно влияющих на выходной сигнал. Это обстоятельство определяет как достоинства, так и недостатки таких систем. Существенным недостатком всех многокомпонентных вихретоковых датчиков является высокий коэффициент влияния информационных каналов ($\Lambda_j^i \approx 12...20$ %). Для компенсации интегрального влияния внешних факторов, вызывающих дополнительную погрешность системы, в ее состав включают компенсационную катушку, на которую действуют те же факторы, что и на рабочие катушки, кроме непосредственно измеряемого параметра. Суммируя сигналы с катушек с помощью дифференциального усилителя можно существенно уменьшить дополнительную погрешность.

2. Практическая часть

В практической части необходимо построить функцию преобразования вихретокового датчика.

2.1. Лабораторная установка

Лабораторная установка включает в себя:

1. вихретоковый датчик с чувствительным элементом, закрепленным в струбине,
2. набор испытуемых образцов материала,
3. микрометр,
4. цифровой вольтметр В7-27,
5. источник питания +15 В.

Схема вихретокового датчика представлена на рис.6.2.



Рис. 6.2. Функциональная схема вихретокового датчика

Чувствительным элементом является *катушка индуктивности*, которая включена в *LC* цепь и образует резонансный контур. Резонансному режиму соответствует минимальное значение индуктивности системы «чувствительный элемент – металлический объект», что соответствует максимальному удалению катушки от поверхности материала.

При приближении катушки к проводящему материалу электромагнитное поле катушки начинает взаимодействовать с электромагнитным полем наведенных в материале вихревых токов, в результате чего, приведенная индуктивность катушки увеличится, параметры контура отстроятся от резонанса и амплитуда на его выходе уменьшится пропорционально изменению расстояния. Пройдя через детекторный фильтр, сигнал принимает вид уровня напряжения, который подается на нелинейный усилитель-нормализатор, выполняющий функцию преобразования в определенных пределах. Далее, нормализованный и усиленный сигнал поступает на следующий каскад или АЦП.

2.2. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Закрепить один из испытуемых образцов в струбине напротив чувствительного элемента вихретокового датчика.
2. Подключить вихретоковый датчик к цифровому вольтметру В7-27.
3. Включить вольтметр и источник питания в сеть с напряжением 220 В 50 Гц.
4. Подать на датчик напряжение + 15 В от источника питания.
5. Вращая микрометр и наблюдая изменение напряжения на вольтметре установить нулевое значение отсчета.
6. Увеличивая расстояние до образца наблюдать изменение выходного сигнала преобразователя.

7. Заполнить табл. 6.1 для образцов из стали, меди и алюминия.

Таблица 6.1.

Таблица записи результатов эксперимента

L , мм	$U_{\text{вых}}$, В; сталь	$U_{\text{вых}}$, В; медь	$U_{\text{вых}}$, В; алюминий
0			
0,1			
0,2			
1,5			

8. Построить в одной системе координат графики функций преобразования датчика для трех образцов.
9. Определить чувствительность датчика и погрешность для каждого типа образцов.
10. Сделать выводы и ответить на контрольные вопросы.

3. Контрольные вопросы

1. Принцип действия и область применения вихретокового датчика.
2. Тип датчика в данной работе.
3. Структурная схема построения датчика.
4. Влияние материала контролируемых образцов на показания датчика.