

# ЧТО ТАКОЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ»?

**Электрические аппараты (ЭА)** – это электротехнические устройства, применяемые при использовании электрической энергии на этапах ее производства, многократного преобразования, передачи, распределения и потребления. ЭА управляют потоками информации и энергии разной природы

Вид энергии	Аппарат управления потоком энергии
поток электрической энергии	контакторы, реле, выключатели, ...
поток механической энергии	электромагнитная муфта, ...
поток тепловой энергии	электромагнитные клапана, заслонки, ...
поток аналоговой информации	реле, контакторы, ...
поток цифровой информации	реле
Цели, изменения режимов работы и защита электрического оборудования от аварийных режимов; контроль, регулирование и измерение параметров электрического тока.	регулирование и измерение параметров

**Область применения ЭА:** быт, транспорт, промышленность, энергетика (электрические станции и сети).

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## **Коммутационные аппараты распределительных устройств**

служат для включения и отключения электрических цепей. Для этих аппаратов характерно относительно редкое срабатывание.

## **Ограничивающие (защитные) аппараты**

предназначены для ограничения токов короткого замыкания и перенапряжений. Эти аппараты редко подвергаются нагрузкам, так как режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными.

## **Пускорегулирующие аппараты**

служат для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин и других потребителей электрической энергии. Для них характерны частые срабатывания.

## **Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров**

## **Аппараты для измерений**

изолируют измерительные и защитные приборы от цепи главного

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

<b>По областям применения</b>	<b>Аппараты распределительных устройств</b> низкого и высокого напряжения.	
	<b>Аппараты управления</b> предназначены для автоматического управления электроприводами и для автоматизации технологических процессов.	
<b>По типу коммутирующего элемента</b>	<b>Контактные аппараты</b> имеют контактную систему с различными типами приводов, с помощью которой осуществляется физический разрыв электрической цепи.	
	<b>Бесконтактные аппараты</b> имеют коммутирующий элемент который представляет собой электрическое сопротивление, величина которого меняется от минимального до максимального значения.	
<b>По величине</b>	<b>напряжение</b>	<b>Электрические аппараты низкого напряжения (до 1000 В)</b>
		<b>Электрические аппараты высокого напряжения (свыше 1000 В).</b>
	<b>тока</b>	<b>Слаботочные аппараты (до 10 А)</b>
		<b>Сильноточные аппараты (свыше 10 А)</b>
<b>По</b>	<b>Открытого исполнения</b>	

# ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## Основные параметры ЭА

**Номинально  
е  
напряжение**

напряжение, на которое рассчитан электрический аппарат с точки зрения выполнения им функций и изоляции его токоведущих частей

**Номинальн  
ый ток**

ток, длительное протекание которого не вызывает нагрева токоведущих частей выше допустимых значений, определяемых классом изоляции

**Номинальн  
ый рабочий  
ток**

ток в цепи, где эксплуатируется аппарат

**Категория  
применения**

определяет область применения электрического аппарата в зависимости от характера нагрузки и условий эксплуатации

**Режим  
работы**

учитывает режим работы оборудования, в котором работает ЭА

**Степень  
защиты**

Степень защиты обозначается буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра - степень защиты аппарата от проникновения внутрь инородных тел и от соприкосновения обслуживающего персонала с деталями аппарата, вторая цифра - защита аппарата от проникновения воды

**Климатическо  
е исполнение**

подразделяются на 2 группы: изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, озерах, реках, и изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с морским климатом

**Категория  
размещения**

выделены 5 категорий размещения изделий исходя из условий их эксплуатации: рабочая и предельная температуры, влажность, наличие пыли и т.д.

Технические

эксплуатационные

# ПРИМЕРЫ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## ПО КЛИМАТИЧЕСКОМУ ИСПОЛНЕНИЮ

### И КАТЕГОРИЯМ РАЗМЕЩЕНИЯ

Климатические исполнения электрических аппаратов, предназначенных для эксплуатации на суше, озерах, реках

Исполнение электрического аппарата	Обозначение		
	рус.	лат.	цифр.
Для микроклиматических районов с умеренным климатом	У	(М)	0
С умеренным и холодным климатом	УХЛ	(ИР)	1
С влажным тропическим климатом	ТВ	(ТН)	2
С сухим тропическим климатом	ТС	(ТА)	3
С сухим и влажным тропическим климатом	Т	(Т)	4
Для всех макроклиматических районов (общеклиматическое)	О	(и)	5

## Категории размещения электрических аппаратов

Категория размещения электрического аппарата	Обозначение
На открытом воздухе	1
Под навесом или в помещениях со свободным доступом воздуха	2
В закрытых помещениях с естественной вентиляцией	3
В помещениях с искусственно регулируемыми условиями	4
В помещениях с повышенной влажностью	5

# ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ

Основные  
требования  
к ЭА

Минимально  
возможная

Термическая стойкость

Динамическая  
стойкость

Высокая механическая  
износостойкость

Высокая электрическая  
износостойкость

Технологичность

масса

габаритные размеры

стоимость

время установки

время обслуживания

обеспечение  
простоты  
изготовления

обеспечение  
удобства  
изготовления

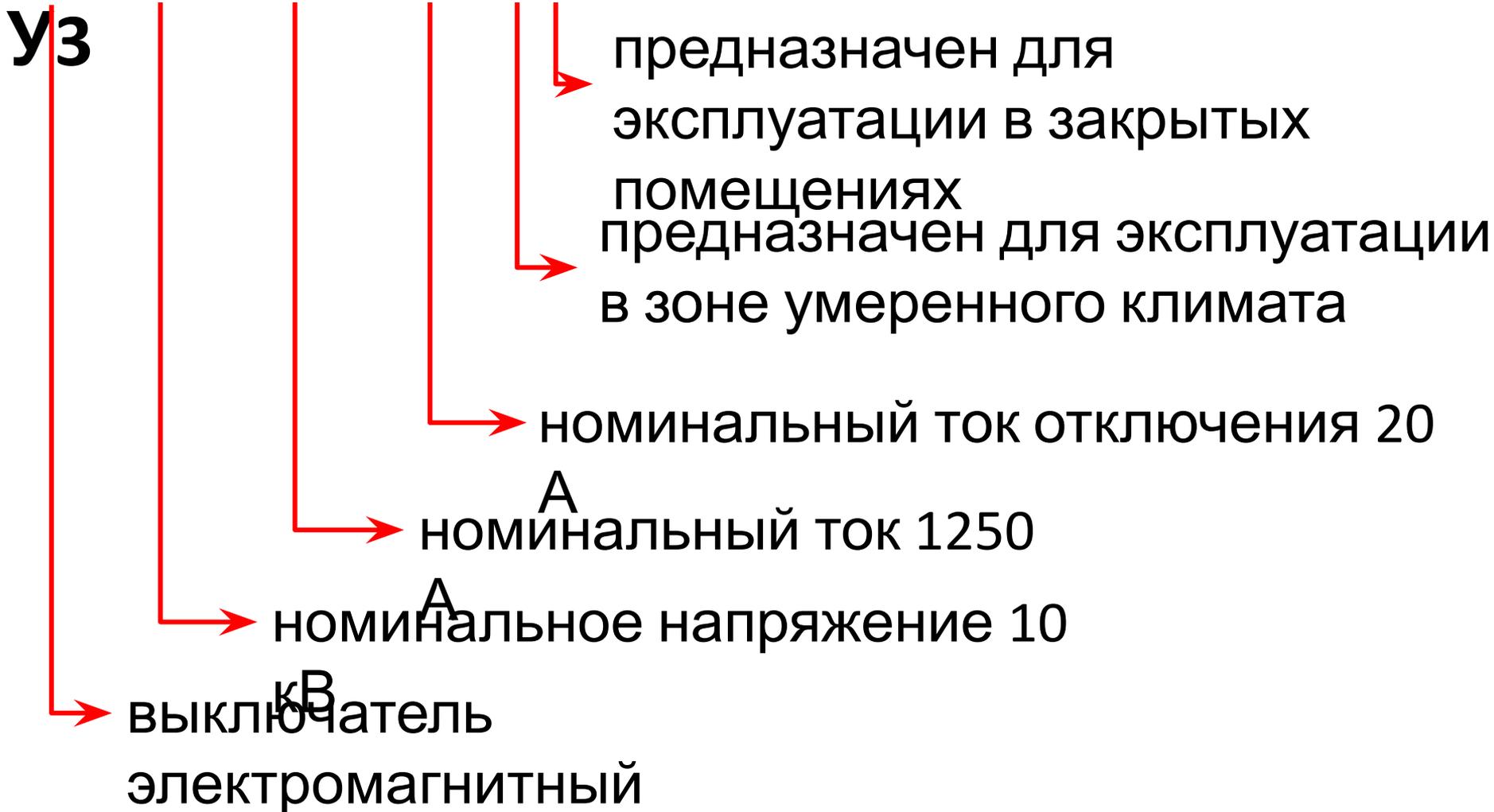
обеспечение  
удобства сборки  
деталей

обеспечение  
удобства  
регулировки деталей

обеспечение  
преимственности в  
производстве

# ПРИМЕР РАСШИФРОВКИ УСЛОВНОГО ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА

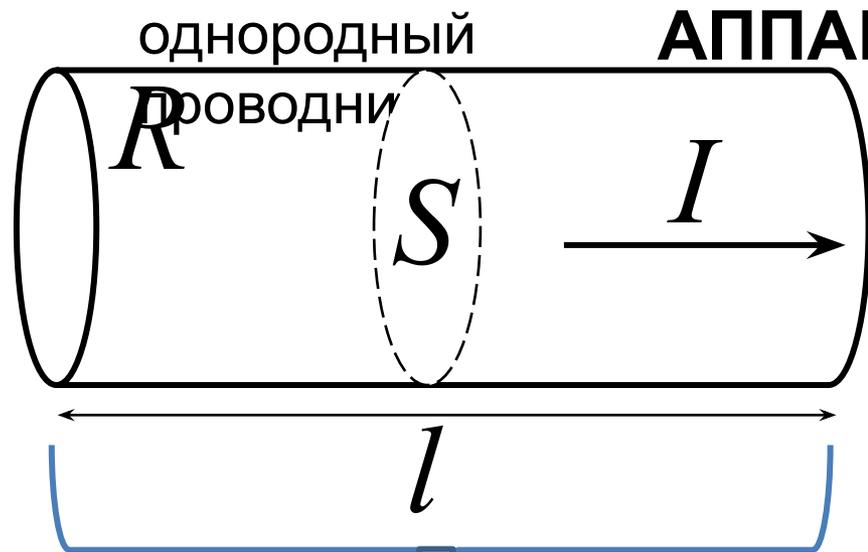
## ВЭ-10-1250-20-



# ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

## ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

### АППАРАТАХ



$$\rho \text{ при } \theta = 0^{\circ}\text{C}$$

температурный коэффициент  $\alpha$  температур  $\theta$

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_{\theta} \cdot \theta)$$

$$P = I^2 \cdot R$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

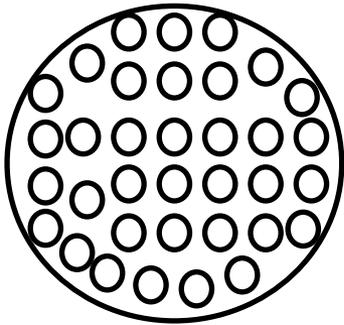
постоянный ток, плотность равномерная

выделяемая мощность в единицу времени

# ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Явление неравномерного распределения плотности переменного тока по поперечному сечению одиночного проводника

$$f = 0 \text{ Гц}$$

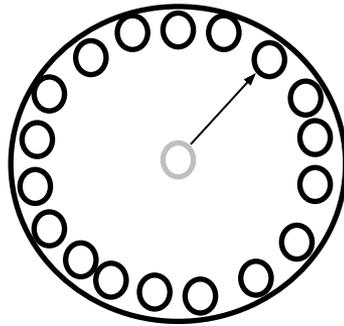


$$S = \text{Const}$$

$$R = \text{Const}$$

$$P = \text{Const} = P_{\text{н}}$$

$$f \uparrow$$



$$S \downarrow$$

$$R \uparrow$$

$$P \uparrow, P_{\text{п}} > P_{\text{н}}$$

Возникновение дополнительных потерь мощности (учитываются коэффициентом поверхностного эффекта)

$$k_{\text{п}} > 1$$

форма проводника

геометрические размеры проводника

материал проводника

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}}$$

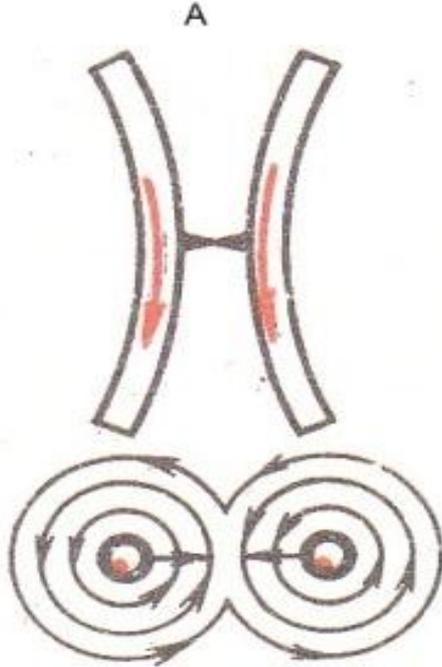
$$R \text{ при } f = 0 \text{ Гц, } l = 100 \text{ м}$$

# ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Явление неравномерного распределения плотности переменного тока, обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с током

$$f = 0 \text{ Гц}$$

Положение проводников  
статично



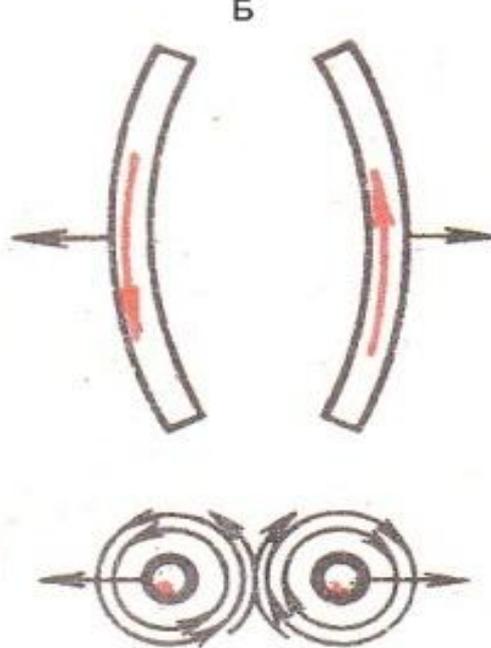
$$S = Const$$

$$R = Const$$

$$P = Const = P_{\text{н}}$$

$$f = Var$$

Положение проводников  
динамично



$$S = Var$$

$$R = Var$$

$$P = Var, P_{\sim} \geq P_{\text{н}}$$

Возникновение  
дополнительных потерь  
мощности (учитываются  
коэффициентом близости)

$$k_{\text{б}} \geq 1$$

форма  
проводник  
а

геометрически  
е размеры  
проводника

расстояние  
между  
проводниками

материал  
проводник  
а

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}}$$

$R$  при  $f = 0 \text{ Гц}$ ,

$l = 100 \text{ м}$

# ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА И ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ НА ВЫДЕЛЯЕМУЮ МОЩНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

$$k_{\text{п}} > 1$$

$$k_{\text{б}} \geq 1$$

$$k_{\text{доб}} = k_{\text{п}} \cdot k_{\text{б}}$$

$$R_{=} = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$R_{\sim} = k_{\text{доб}} \cdot R_{=}$$

$$P_{\sim} = k_{\text{доб}} \cdot P_{=}$$

$$P_{=} = I^2 \cdot R_{=}$$

$$P_{\sim} = I^2 \cdot R_{\sim}$$

$$P_{\sim} > P_{=}$$

# ДРУГИЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Эмпирическая формула определения потерь мощности при протекании переменного тока по незамкнутым ферромагнитным проводникам или токопроводам, помещенным внутрь кольца из ферромагнетика

(профессор Н.Е. Лысов)<sup>5/3</sup>

$$P = (2,9 - 3,25) \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{I}{\dot{I}} \right) \cdot S_{\text{охл}} \cdot \sqrt{f}$$

периметр  
поперечного сечения  
проводника

площадь  
поверхности  
охлаждения

Эмпирическая формула определения потерь мощности при протекании переменного тока по сплошному замкнутому ферромагнитопроводу

(профессор Н.Е. Лысов)<sup>5/3</sup>

$$P = (2,9 - 3,25) \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{I \cdot N}{l_{\text{ср}}} \right) \cdot S_{\text{охл}} \cdot \sqrt{f}$$

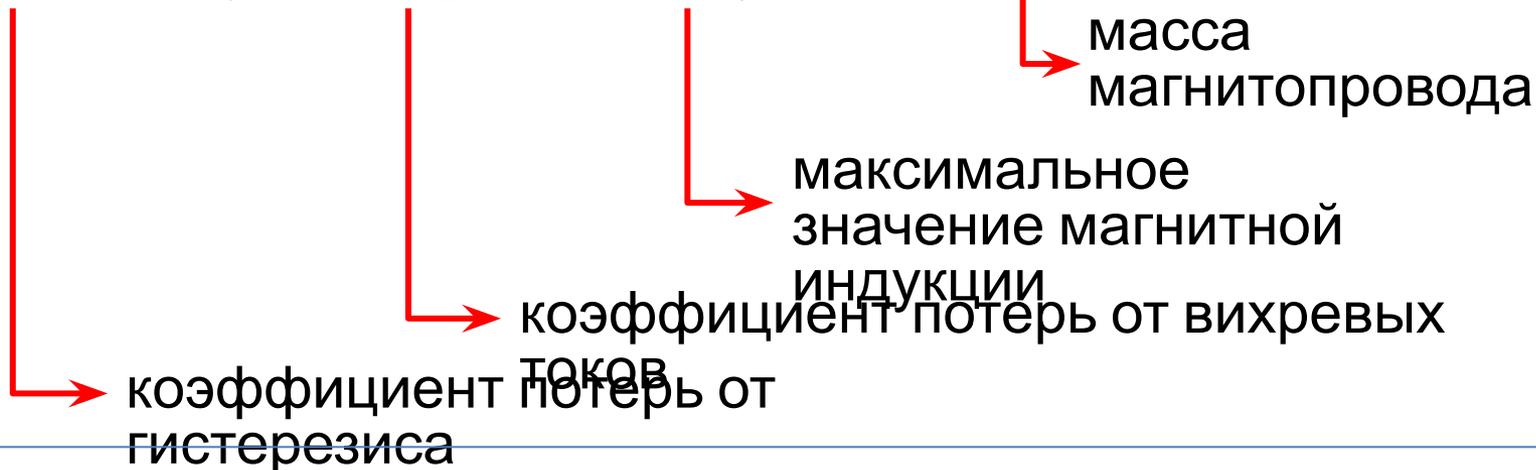
средняя длина  
магнитопровода

магнитодвижущая  
сила,  $N$  – число витков

# ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НЕТОКОВЕДУЩИХ ДЕТАЛЯХ

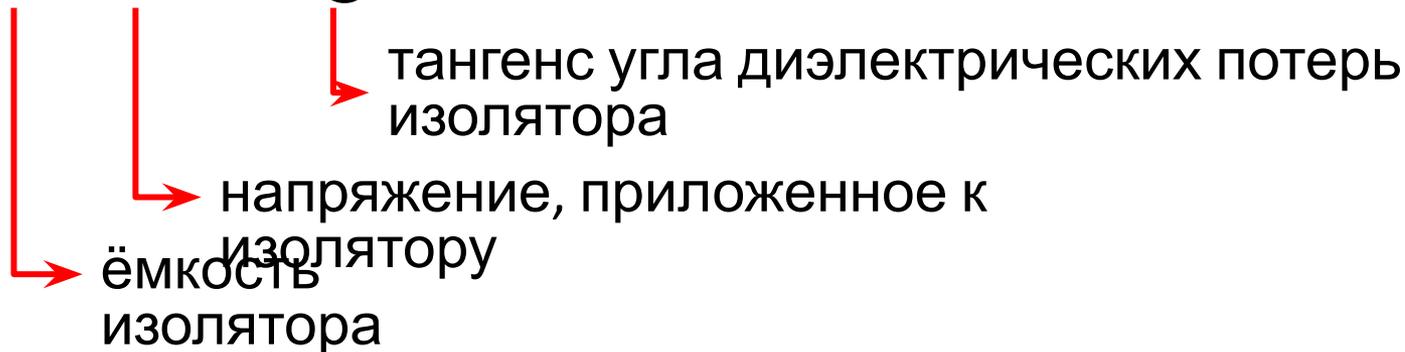
Мощность потерь в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи Фуко

$$P = (\chi_{\Gamma} \cdot B_m^{1,6} + \chi_{\text{В}} \cdot f \cdot B_m^2) \cdot f \cdot M$$



Мощность потерь в изоляции проводов и изолирующих деталях в ЭА высокого напряжения

$$P = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg} \delta$$



# НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ



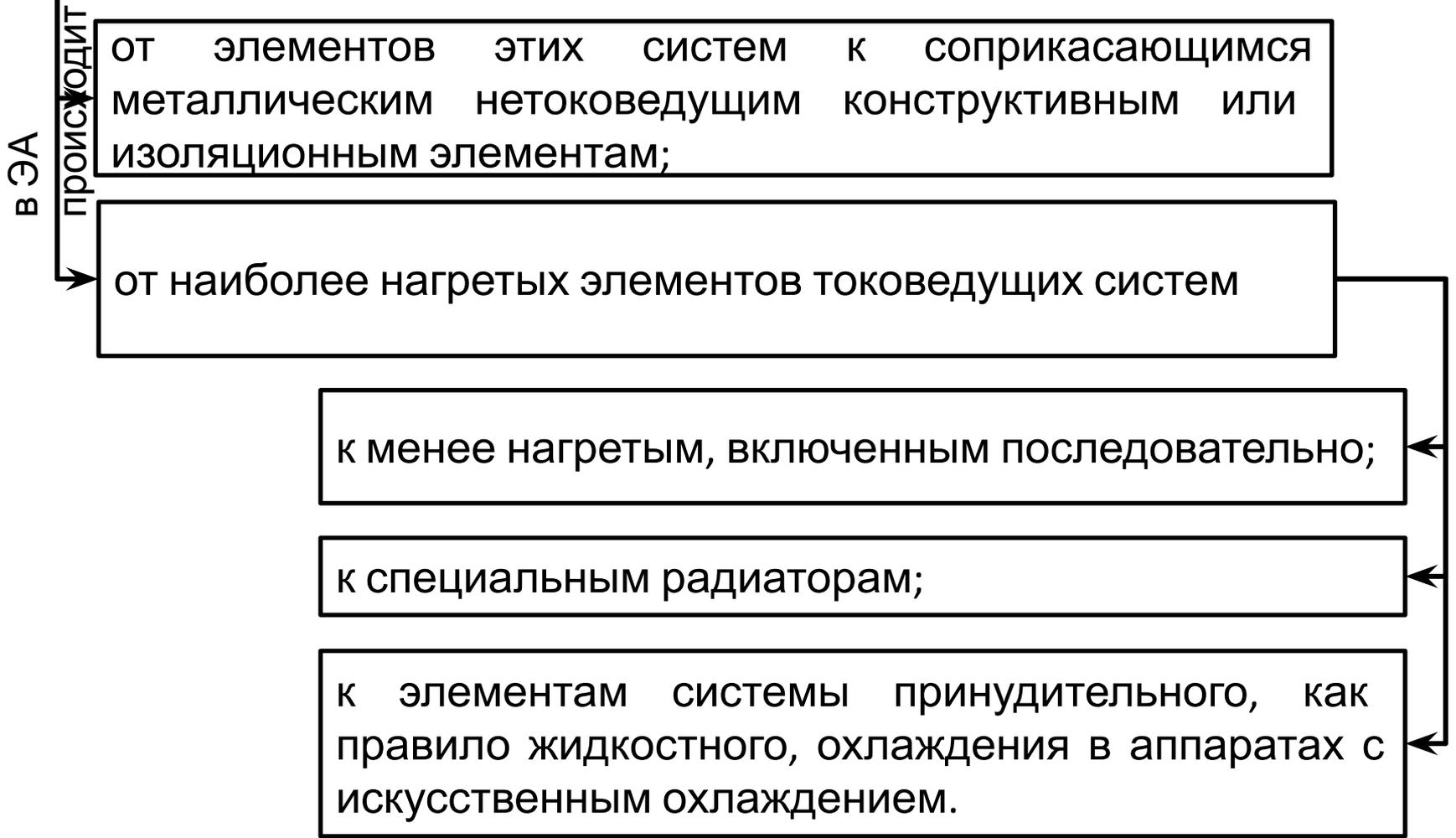
# ОГРАНИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



# СПОСОБЫ ТЕПЛООБМЕНА.

**ТЕПЛООБМЕН** – распространение теплоты в электрических аппаратах

**ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ** – распространение тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц или тел, имеющих разную температуру.



# УРАВНЕНИЕ ФУРЬЕ – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЛОПРОВОДНОСТИ

$$d^2 Q = -n_0 \lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} dS dt$$

количество теплоты

промежуток

элементарная площадка изотермической поверхности

градиент температуры – производная от температуры вдоль нормали к площадке

коэффициент

единичный вектор нормали к элементарной площадке

«-» - теплопроводность распространяется от точек с большей температурой к точкам с меньшей температурой, т.е. в направлении, противоположном направлению градиента.

$$p = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} \quad , \quad \text{где}$$

$$p = P/S$$

изотермическая поверхность

мощность

плотность теплового потока в какой-либо точке на поверхности

$$\lambda = \lambda_0 \cdot [1 + \beta \cdot (\theta - \theta_0)] \quad - \text{ для большинства веществ или табл}$$

$\lambda$  при  $\theta = \theta_0$  температурный коэффициент теплопроводности

# СПОСОБЫ ТЕПЛООБМЕНА. ТЕПЛОВОЕ

**ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** - распространение внутренней энергии тела путем электромагнитных волн.

**ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ** - совокупность процессов взаимного излучения, поглощения, отражения и пропускания энергии в системе различных тел, сопровождающийся двойственным превращением энергии: тепловой в лучистую и лучистой в тепловую, при этом тепло передается через вакуум в наибольшей степени инфракрасными лучами и в меньшей – световыми.

В теплоотдаче от токоведущих систем с температурой порядка 100–120 °С теплоотдача путем излучения может составлять 40–50 %.

## ПЛОТНОСТЬ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОДЧИНЯЕТСЯ ЗАКОНУ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

$$P = 5,67 \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

плотность теплового потока

коэффициент излучения тела  $\varepsilon$   $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$

температура, К

# СПОСОБЫ ТЕПЛООБМЕНА. КОНВЕКЦИЯ

**КОНВЕКЦИЯ** – распространение теплоты при перемещении объемов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой.

**Естественная  
(свободная)**

Движение происходит за счет выталкивающих (Архимедовых) сил, возникающих из-за различных плотностей холодных и горячих (нагретых) частиц жидкости или газа.

**Вынужденная  
(принудительная)**

Жидкость или газ движутся за счет внешних сил под действием посторонних возбудителей (под действием ветра, насоса, вентилятора и т.д.)

**Движение  
жидкости**

**Ламинарное**

Частицы жидкости движутся параллельно стенкам канала. При этом движении происходит наилучшая теплоотдача от труб с жидкостью, при относительно больших скоростях.

**Турбулентное**

Частицы жидкости движутся хаотически, неупорядоченно.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

конвекции при инженерных расчетах

Система уравнений при  
аналитическом описании  
процесса конвекции в общем  
виде

Уравнение  
теплопроводности

Уравнение энергий  
(учет массообмена)

Уравнение движения жидкости  
(уравнение Навье-Стокса)

Уравнение неразрывности  
жидкости или газа

Условия однозначности  
(начальные и граничные  
условия)

мощности, отдаваемой телом  
за счет конвекции и  
излучения окружающей  
среде, используют  
упрощенную формулу

$$P = k_{\text{то}} \cdot S_{\text{охл}} \cdot (\theta - \theta_0)$$

Ньютона

температура среды

температура поверхности тела

поверхность пропорциональная площади охлаждающей поверхности тела (поверхности соприкосновения твердого тела со средой)

коэффициент теплоотдачи

тепловой поток (количество теплоты в ед. времени)

# КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ

## Параметры среды, окружающей

удельный  
теплопроводнос  
вязкост  
теплоемкост  
скорости  
движения  
температуропроводнос

**Коэффициент  
теплоотдачи**

## Параметры

форма  
расположения тела  
в среде  
состояние  
поверхности  
размер  
температура

## Эмпирические формулы для расчета коэффициента теплоотдачи

Конструкция	Формула
Окрашенная прямоугольная шина, находящаяся в спокойном воздухе, большая сторона сечения которой расположена вертикально	$k_{\text{то}} = 9,2 \cdot [1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)]$ , Вт/(м <sup>2</sup> •°С)
Горизонтальные цилиндрические окрашенные проводники, находящиеся в спокойном воздухе	$k_{\text{то}} = k_1 \cdot [1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)]$ , Вт/(м <sup>2</sup> •°С)

С целью увеличения точности теплового расчета отдельно учитывают конвекцию и тепловое излучение, поэтому уравнение Ньютона заменяют тепловым законом (Фомин):

$$P = \frac{(\theta - \theta_0)}{1/(k_{\text{то}} \cdot S)} = \frac{(\theta - \theta_0)}{R_T}, \text{ где } R_T = \frac{1}{k_{\text{то}} \cdot S} - \text{тепловое сопротивление.}$$

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ И НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## Режимы нагрева ЭА

**Установившиеся режимы**  
за 1 час нагрева температура элементов ЭА возрастает не более чем на 1 °С

Расчет температуры проводится по ранее рассмотренным выражениям. решение

$$\begin{aligned} P &= Const, \\ C &= Const, \\ \theta_0 &= Const, \\ k_{TO} &= Const \end{aligned}$$

## Переходные режимы

Расчет температуры проводится по уравнению теплового баланса:

$$P dt = k_{TO} \cdot S_{\text{тела}} \cdot (\theta - \theta_0) dt + C d\theta$$

теплоемкость

подводимая мощность

количества тепла, отдаваемого телом в окружающую среду за время  $dt$

количества тепла, воспринимаемого телом при изменении его температуры на  $d\theta$

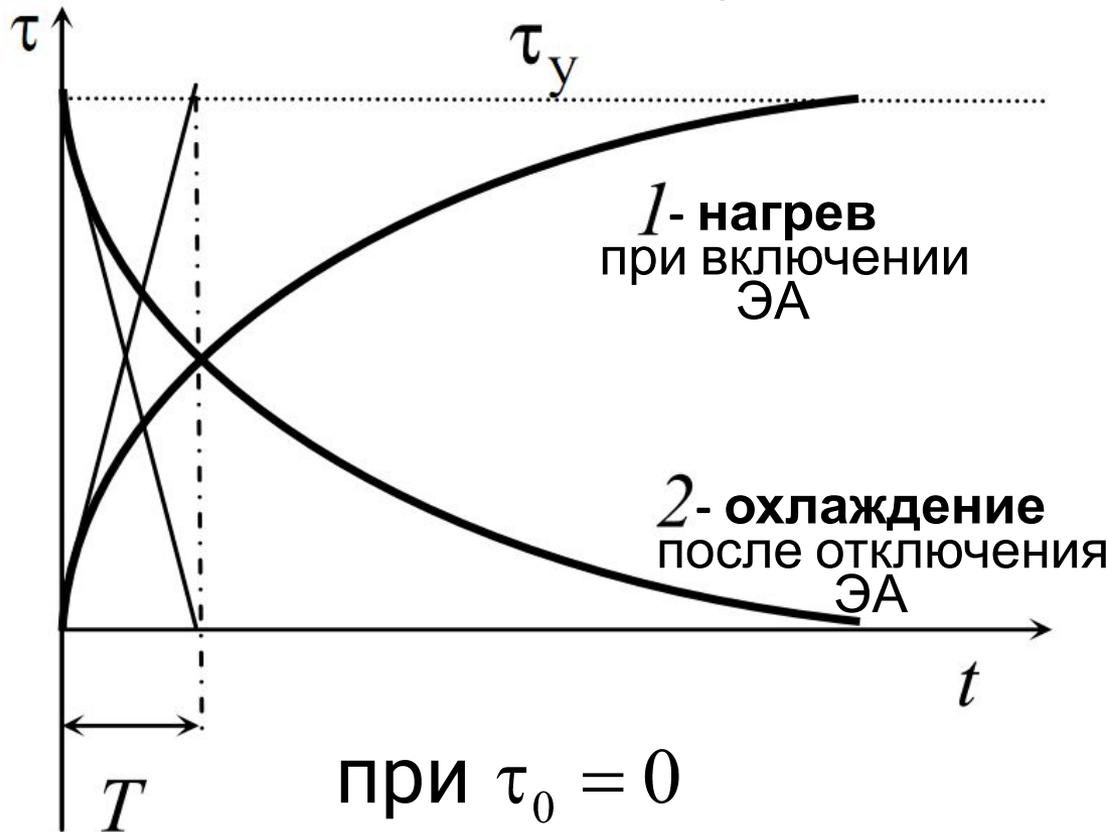
# НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-t/T} + \tau_y \cdot (1 - e^{-t/T})$$

$T = C / (k_{\text{то}} \cdot S)$  - постоянная времени нагрева

$\tau_y = \theta_y - \theta_0$  - установившееся превышение температуры

$\tau_0 = \theta - \theta_0$  - превышение температуры в начале процесса



$T$  - время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду.

С точностью до 1 % можно считать, что процесс установления температуры происходит за время, равное  $(4-5)T$ .

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## Режимы работы ЭА

### Длительный

Время действия нагрузки (время работы) в 4–5 раз превышает постоянную времени нагрева  $t_p > 4T$ . Температура достигает установившегося значения.

### Кратковременный

Время действия нагрузки не превышает постоянную времени нагрева. Температура не достигает установившегося значения, а при отключении (пауза) аппарат охлаждается до температуры окружающей среды.

### Повторно-кратковременный

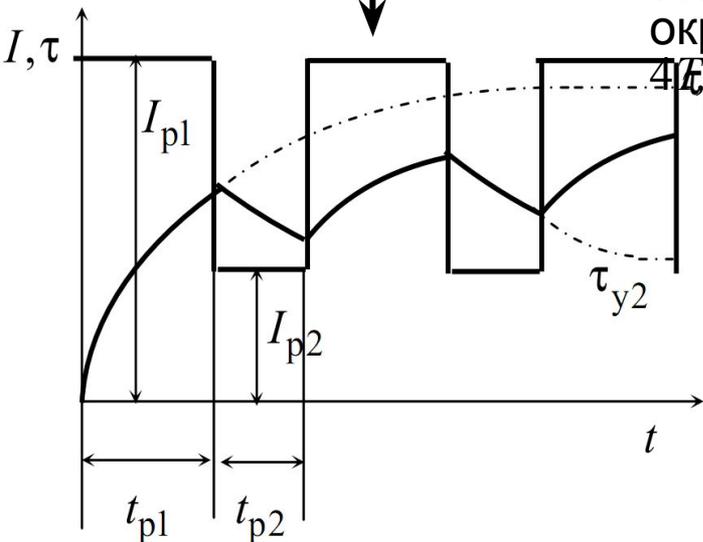
Время действия нагрузки не превышает постоянную времени нагрева. При отключении аппарат не успевает охладиться до температуры окружающей среды, а за время работы  $t_p$  не достигает  $\theta_y$  ( $t_p < 4T$ ,  $t_{II} < 4T$ ).

### Переключающийся

Ток циклически меняется, не спадая до нулевого значения. Поскольку  $I_{p1} > I_{p2}$ , то в течение времени  $t_{p2}$  аппарат охлаждается.

### Циклический

Интервалы работы  $t_p$  и паузы  $t_{II}$  постоянны в следующих друг за другом циклах работы и отключения ( $t_{II} = t_p + t_{II}$ )



# ОСОБЕННОСТИ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1. При кратковременном и повторно-кратковременном режимах величина тока может быть принята больше, чем при длительном.

---

2. Максимальное превышение температуры в таких режимах не должно превосходить допустимых значений.

---

3. Для работы в повторно-кратковременном режиме нормируется продолжительность включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_c} \cdot 100\% \quad \text{и обычно составляет} \quad ПВ = 15, 25, 40, 60\%$$

---

4. Для работы в повторно-кратковременном режиме нормируется допустимое число включений в единицу времени (обычно в час)  $n$ :

$$n = 6, 30, 150, 600, 1200, 2400, 3600 \text{ вкл./час}$$

---

5. Коэффициент перегрузки по току рассчитывается в соответствии с ПВ и частотой включений  $n$ :

$$k_I = \frac{I_{кр}}{I_{дл}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{3600}{T \cdot n}}}{1 - e^{-\frac{3600 \cdot ПВ}{T \cdot n \cdot 100\%}}}}$$

# ПРОЦЕСС НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Время действия токов короткого замыкания значительно меньше постоянной времени нагрева токоведущих частей ( $t_{кз} < 0,05T$ ), т.к. процесс нагрева является адиабатическим (тепло не отдается в окружающую среду, а все идет на нагрев), значит **уравнение теплового баланса** примет вид:

$$\int_0^{t_{кз}} j^2 dt = \int_{\theta_{нач}}^{\theta_{кз}} \frac{c \cdot \gamma}{\rho} d\theta = B(\theta_{кз})$$

Annotations for the equation:

- $t_{кз}$ : температура в конце короткого замыкания
- $\theta_{кз}$ : удельная теплоемкость материала проводника
- $\theta_{нач}$ : начальная температура
- $\rho$ : плотность материала проводника
- $c \cdot \gamma$ : удельная теплоемкость материала проводника
- $\int_0^{t_{кз}} j^2 dt$ : плотность тока

Строятся по известным зависимостям удельной теплоемкости, плотности и удельного сопротивления от температуры для широко распространенных материалов (сталь, алюминий, медь).  
Позволяют найти  $\theta_{кз}$

## Допустимые температуры в конце КЗ

$\theta_{кз}$ :

- для медных неизолированных проводников или проводников с изоляцией органического происхождения – 250 °С,
- для медных проводников с неорганической изоляцией – 350 °С

Определяется по кривой изменения тока короткого замыкания во времени или заменой реального процесса КЗ фиктивным, эквивалентным реальному по тепловому действию.

# ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА

Это способность выдерживать кратковременное тепловое действие токов короткого замыкания без повреждений. Оценивается током термической стойкости.

При расчете берется наиболее тяжелый случай – к моменту начала короткого замыкания элемент нагрет длительным током до предельно допустимой температуры номинального режима.

Термическая стойкость аппарата и его токоведущих частей определяется действующим значением тока термической стойкости, протекание которого в течение времени термической стойкости (1, 3, 5 и 10 секунд) не вызывает нагрева выше допустимых температур. Связь между токами термической стойкости для различных времен выражается равенством

$$I_1^2 \cdot 1 = I_3^2 \cdot 3 = I_5^2 \cdot 5 = I_{10}^2 \cdot 10 = I_t^2 \cdot t$$

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ

**Электродинамические силы (электродинамические усилия - ЭДУ) - это механические силы, возникающие в контуре с электрическим током или между несколькими контурами с токами.**

Они определяют необходимую механическую прочность токоведущих и поддерживающих их элементов.

**Полезны  
е**

Используют их для построения аппаратов (например: в электродинамических приводах, быстродействующих автоматических выключателях)

**Вредные**

Приводят к разрушению аппаратов при аварийных режимах (в КЗ режимах ЭДУ = сотни килоньютон). Они определяют необходимую механическую прочность токоведущих и поддерживающих их элементов.

ТОК

магнитные  
свойства  
окружающей  
среды

длина  
токоведущих  
элементов

конфигурация  
токоведущих  
элементов

взаимное  
расположение  
токоведущих  
элементов

**Электродинамическая сила**

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ

Расчет ЭДУ  
базируется на  
уравнении  
Ампера (по  
закону Ампера)

Метод удобен, если известна индукция в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу.

$$F = \int_0^l B \cdot i \cdot \sin \beta dl$$

элемент проводника с

током  
угол между элементом  
проводника и вектором

ИНДУКЦИИ  
индукция магнитного поля, создаваемого  
другими проводниками

Расчет ЭДУ  
базируется на  
энергетическом  
методе

Метод используется при расчете электродинамических сил токоведущих контуров, выполненных в виде витков или катушек (дугогасительные обмотки контакторов, автоматов, обмотки трансформаторов тока, реакторов)

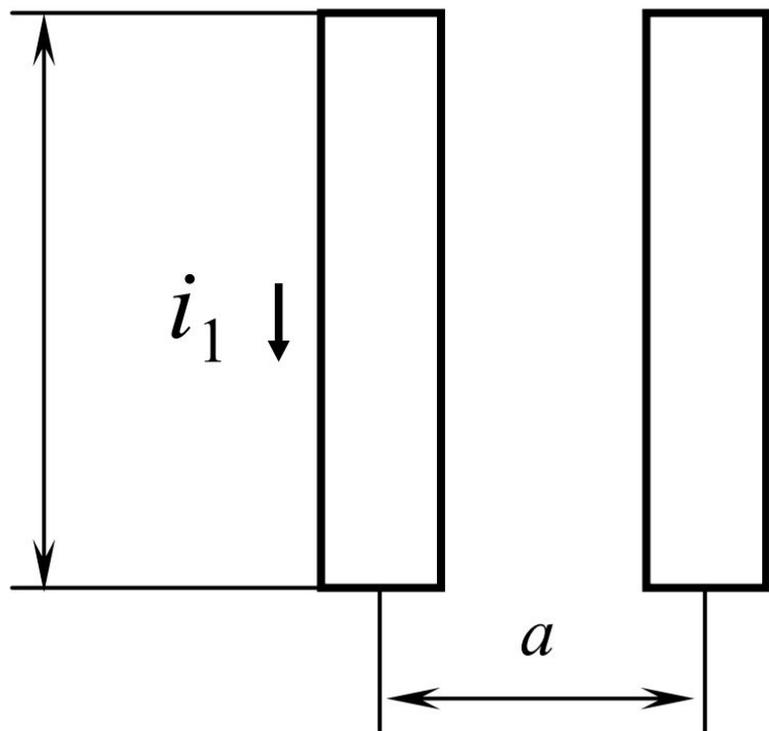
$$F = \frac{\partial W}{\partial x}$$

электромагнитная энергия  
координата, в направлении которой действует определяемая сила (обобщенная координата)

Изменение магнитной энергии находится при изменении лишь той координаты, которую стремится изменить определяемая электродинамическая сила.



# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРОВОДНИКАМИ



$S_{\text{поперечное}} \rightarrow 0$  ТОК ПО ОСИ

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 i_2 k_{\text{д}} = 10^{-7} \cdot i_1 i_2 k_{\text{д}}, \text{ Н}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ ГН/М}$   
магнитная проницаемость воздуха

Параллельные проводники одинаковой длины

$$k_{\text{д}} \approx \frac{2l}{a}$$

$$l \rightarrow \infty$$

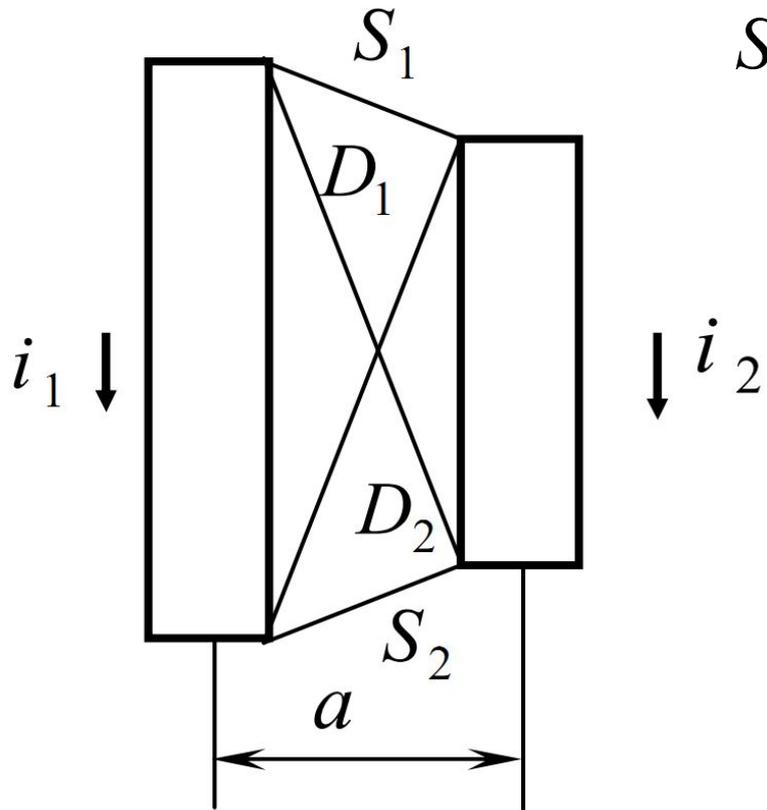


$$\frac{a}{l} \ll 1$$

$$k_{\text{д}} = \frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$$

геометрический фактор (коэффициент контура электродинамических сил), зависящий только от размеров

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРОВОДНИКАМИ



$S_{\text{поперечное}} \rightarrow 0$   ток по оси

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 i_2 k_{\text{д}} = 10^{-7} \cdot i_1 i_2 k_{\text{д}}, \text{ Н}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}$   
магнитная проницаемость воздуха

Параллельные проводники разной длины

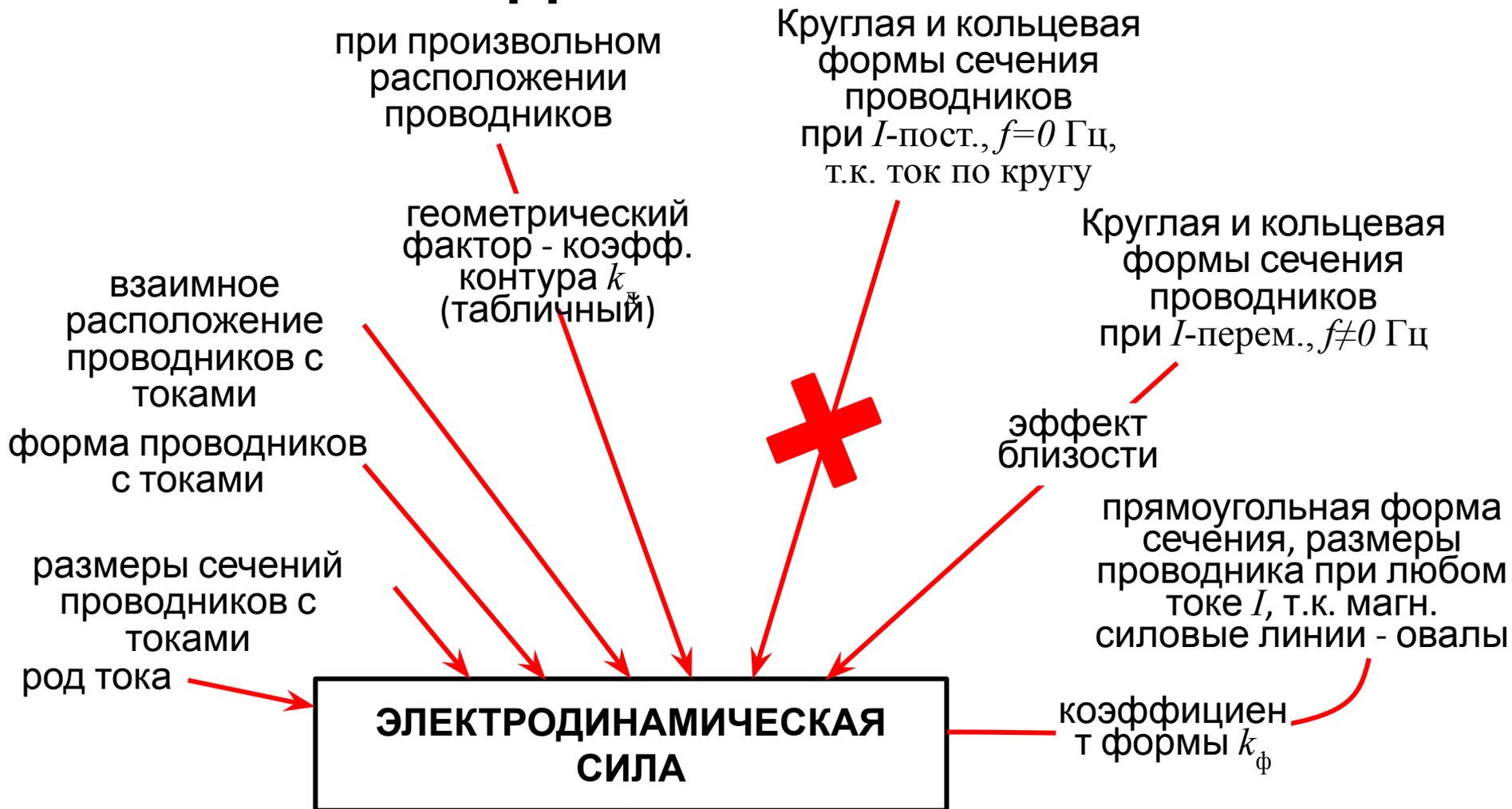
$$k_{\text{д}} = \frac{\sum D - \sum S}{a}$$

геометрический фактор (коэффициент контура ЭДУ)

$\sum D$  – сумма диагоналей трапеции, построенной на взаимодействующих проводниках

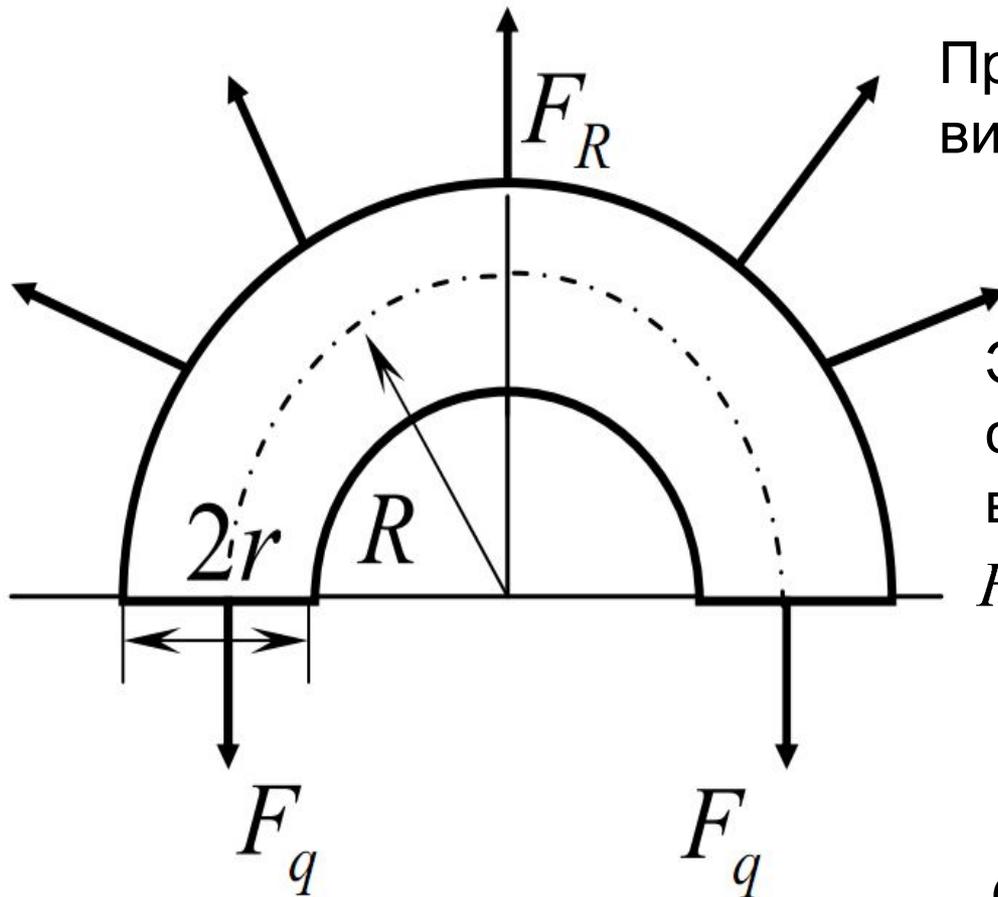
$\sum S$  – суммарная длина боковых сторон этой трапеции

# ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ СИЛУ



$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 i_2 k_d k_\phi = 10^{-7} \cdot i_1 i_2 k_d k_\phi, \text{ Н}$$

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА КРУГОВОГО ВИТКА С ТОКОМ



При  $r/R \leq 0,25$  индуктивность витка

$$L = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right), \text{ Гн}$$

ЭДУ, приложенная к окружности витка  $2\pi R$  стремится увеличить радиус витка

$$F_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} = \frac{\mu_0}{2} i^2 \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) =$$

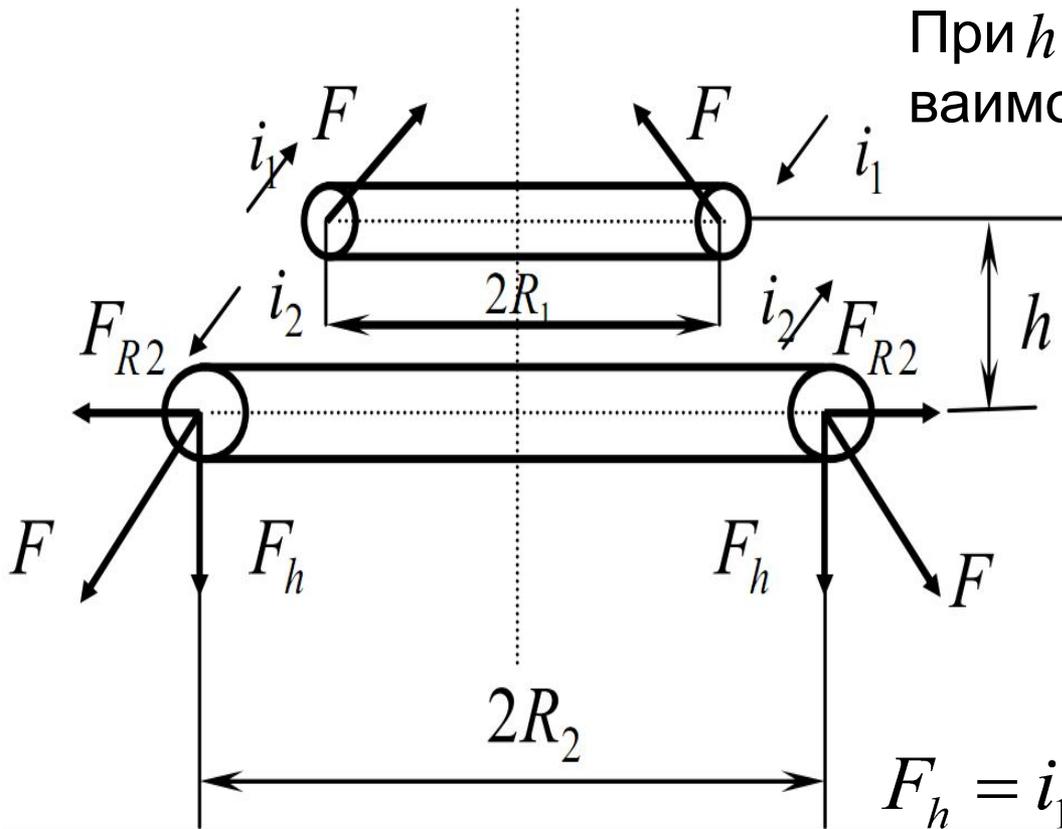
$$= 2\pi i^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н}$$

Сила, разрывающая виток (сила в сечении витка), - механическое напряжение растяжения

$$F_q = i^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н}$$

Если круговой виток находится в равномерном магнитном поле, создаваемом другими проводниками, то необходимо учитывать дополнительную силу, обусловленную взаимодействием тока витка с внешним полем.

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА МЕЖДУ ВИТКАМИ КАТУШКИ



При  $h \approx 2R_1 \approx 2R_2$

взаимоиндуктивность

$$M = \mu_0 R_1 \left( \ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + c^2}} - 2 \right), \text{ Гн}$$

Вертикальная составляющая электродинамической силы  $F_h$  витка: если потоки, создаваемые токами, направлены в одну сторону, то витки притягиваются, если в разные стороны – отталкиваться.

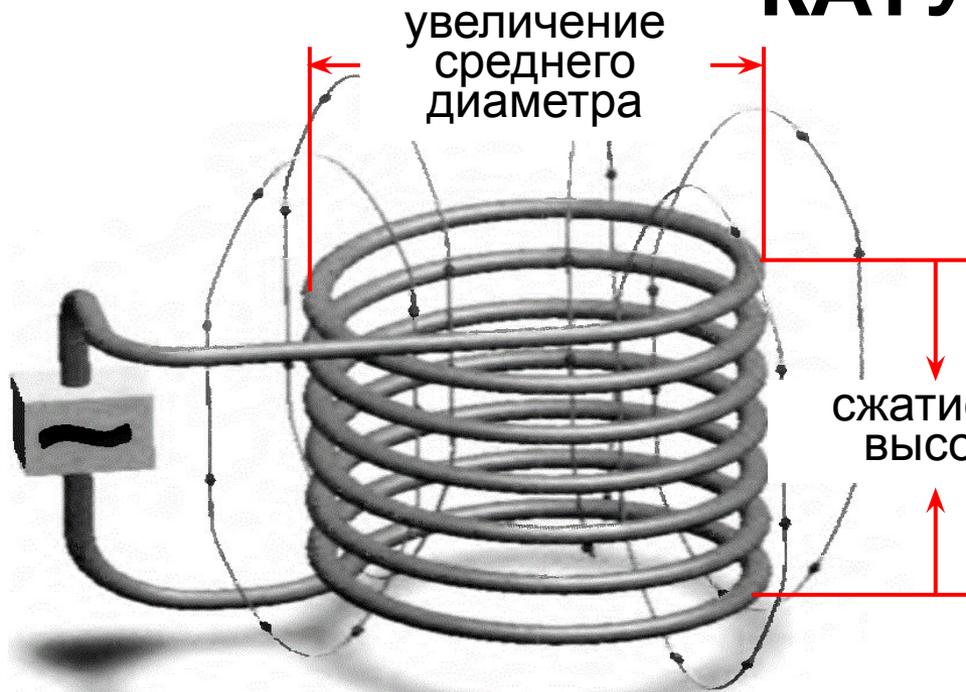
$$F_h = i_1 i_2 \frac{dM}{dh} = i_1 i_2 \frac{4\pi R_1 h}{h^2 + c^2} 10^{-7}, \text{ Н}$$

Радиальная составляющая силы от собственного тока и от взаимодействия этого тока с продольной составляющей поля другого витка

$$F_R = \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} + i_1 i_2 \frac{dM}{dR}, \text{ Н}$$

$R = R_1$  для первого  
витка  
 $R = R_2$  для второго

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА КАТУШКИ



Для катушки, имеющей  $w$  витков, электродинамическая сила, разрывающая виток

$$F_q = (iw)^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н}$$

Проводники катушки обтекаются током одного направления, при этом возникают силы притяжения между отдельными витками. В результате катушка подвергается действию ЭДУ, сжимающих ее по высоте и увеличивающих средний диаметр.

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА МЕЖДУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАТУШКАМИ

$$F = i_1 i_2 \frac{dM}{dh}, \text{ Н}$$

Производную  $dM/dx$  определяют с помощью семейства кривых Двайта или Хака в зависимости от величины  $h/D$  (отношения высоты к среднему диаметру катушки)

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Для однофазного переменного тока  $i(t) = I_m \sin \omega t$

$$F = 10^{-7} k_d k_\phi I_m^2 (\sin \omega t)^2 = c I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t$$

$$c = 10^{-7} k_d k_\phi; \quad F_m = c I_m^2$$

Расчет электродинамических сил на переменном токе проводят по максимальному значению тока для наиболее тяжелого случая (короткое замыкание при наличии апериодической составляющей тока)

$$F_{\max} = c k_{\text{уд}}^2 I_m^2$$

Ударный коэффициент  $k_{\text{уд}}$  зависит от мощности установки, расположения аппарата и вида цепи и обычно  $k = 1,8$ .

Для трехфазной системы переменных токов, в которой токи сдвинуты на  $120^\circ$ , сила меняет знак и достигает в определенные моменты времени равные по модулю максимальные значения отталкивания и притягивания, имеющих место в средней фазе

$$F = 0,87 c I_m^2$$

С учетом апериодической составляющей максимальная электродинамическая сила, действующая на провод средней фазы

$$F_{\max} = 0,87 c k_{\text{уд}}^2 I_m^2$$

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

- это способность противостоять без повреждений и нарушений функционального состояния механическим силам, возникающим при протекании токов.

Характеризуется током электродинамической стойкости - наибольшим значением тока, который аппарат может выдержать во включенном состоянии без механических или электрических повреждений и без произвольного отключения.

Ток электродинамической стойкости электрического аппарата должен быть больше ударного тока короткого замыкания для данных условий работы. Электродинамическая стойкость выражается либо амплитудным значением тока, при котором механические напряжения в элементах аппарата не выходят за пределы допустимых величин, либо кратностью тока относительно амплитуды номинального тока.

При оценке электродинамической стойкости необходимо учитывать степень защиты аппарата, так как для аппаратов открытого исполнения существуют дополнительные нагрузки от воздействия внешних факторов. В этом случае результирующая нагрузка на изоляторы и изоляционные детали берется в 3 раза меньше разрушающей, для аппаратов герметичного исполнения – в 1,5–1,7 раза. В случае когда частота переменной составляющей электродинамической силы близка к собственной частоте механических колебаний, даже при сравнительно небольших силах возможно разрушение аппарата вследствие явлений

# МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Магнитная цепь - совокупность тел и сред, создающая ориентированный магнитный поток при наличии магнитодвижущей силы.

## Применени

- электромагнитные устройства
- автоматы
- приводы выключателей
- тормозные электромагниты
- тяговые электромагниты
- подъемные электромагниты
- реле
- датчики
- электромагнитные муфты
- дросселя
- и др.

магнитные цепи с большим потоком рассеяния: пренебрегать нельзя – учитывается всегда

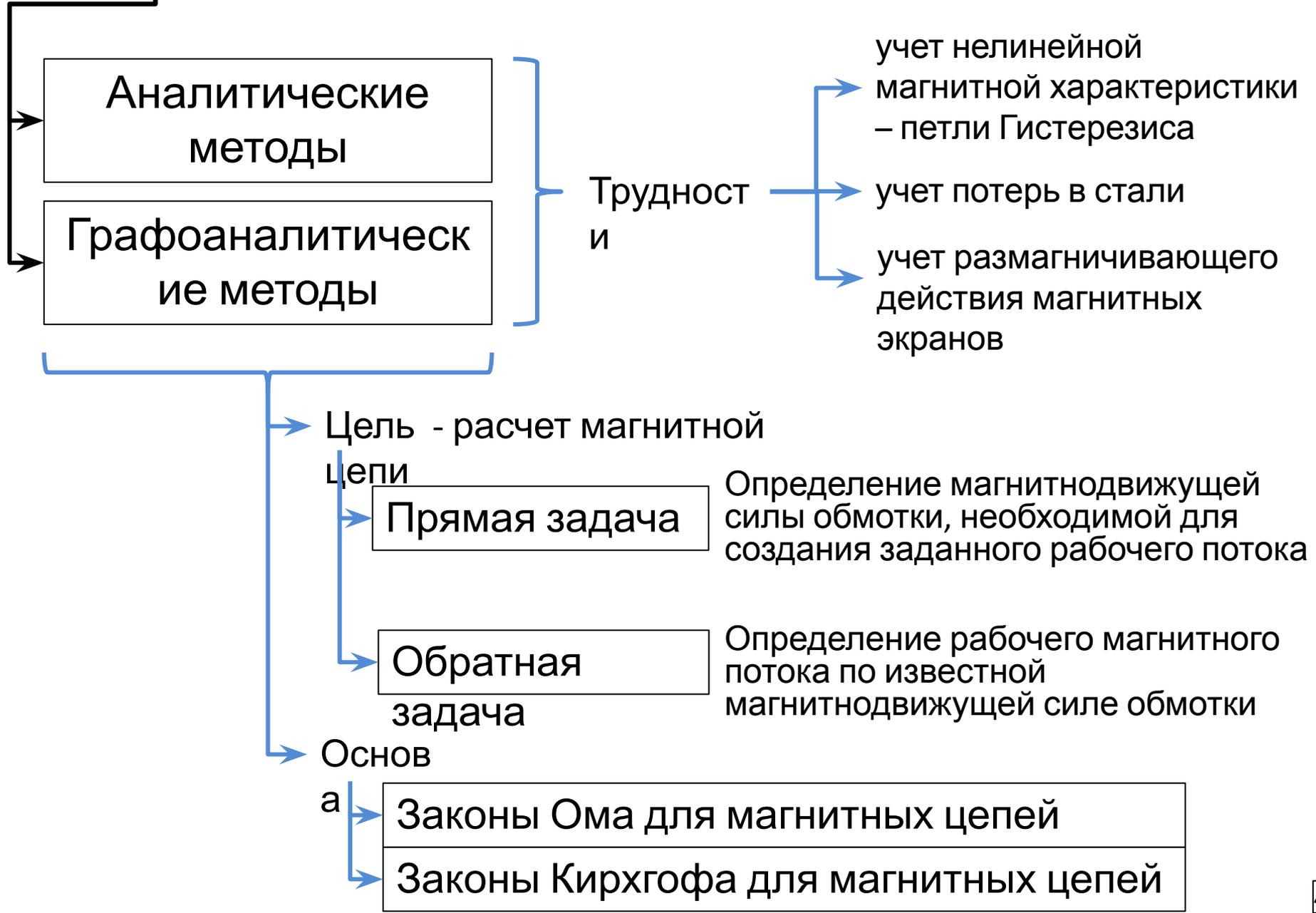
магнитные цепи с малым потоком рассеяния: можно пренебречь, если поток рассеяния мал по сравнению с основным потоком, когда

магнитопровод замкнут

на пути основного потока имеется воздушный зазор сравнительно малой величины, а магнитная цепь насыщена незначительно

размагничивающее действие вторичной обмотки сравнительно невелико

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



# ЗАКОНЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

## ЗАКОН КИРХГОФА

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей – алгебраическая сумма потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0$$

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей следует из известного закона полного тока – падение магнитного потенциала по замкнутому контуру равно сумме МДС, действующих в этом контуре

$$\oint H dl = \sum iw = \sum F_j$$

алгебраическая сумма МДС, действующих в контуре  
число витков обмотки, по которой протекает ток

элементарный участок контура

напряженность магнитного поля

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ГН/М-}$$

магнитная

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

$$\oint \frac{BS dl}{\mu_r \mu_0 S} = \sum iw$$

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость

$S$  – сечение данного участка

$$dR_m = dl / (\mu_r \mu_0 S)$$

магнитной цепи

$$\oint \Phi dR_m = \sum iw$$

$\Phi = Var$

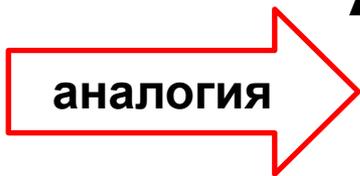
$$BS = \Phi$$

$\Phi = Const$

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j R_{mj} = \sum F_j$$

# ЗАКОНЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

$$R = \rho \frac{l}{S}$$



$$R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0} \cdot \frac{l}{S} = \rho_m \frac{l}{S}$$

магнитное сопротивление единицы длины магнитной цепи при сечении, равном единице, м/Гн

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu_r \mu_0 S}{l}$$

ферромагнетик: сложная нелинейная функция

простой малый воздушный зазор: простая аналитическая зависимость

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{S}{\delta}$$

простой большой воздушный зазор: необходимо учитывать выпучивание, применять эмпирические формулы

сложные формы воздушного зазора: применяют графический метод – метод вероятных путей потока

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j R_{mj} = \sum F_j$$

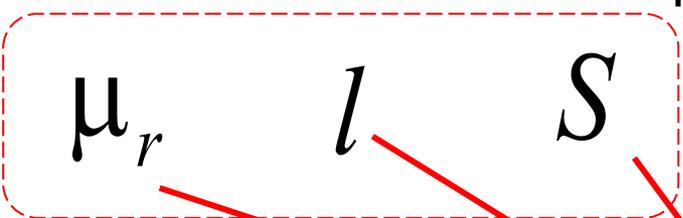
$$\sum_{j=1}^n \Phi_j \frac{1}{\Lambda_j} = \sum F_j$$

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Переменное напряжение

индуктивное сопротивление обмотки, меняющееся при перемещении якоря

Переменный ток



всегда

Магнитное сопротивление магнитопровода

Потери в стали на вихревые токи

Потери в стали на гистерезис

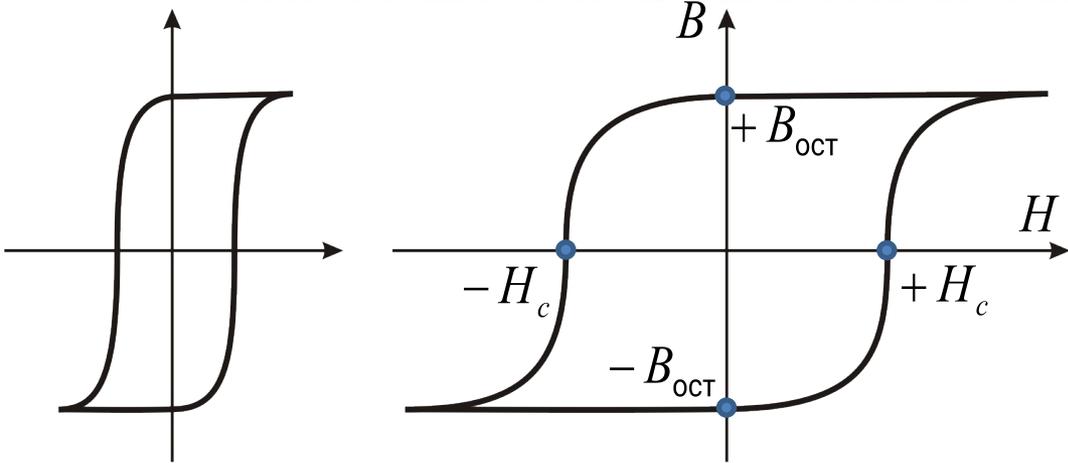
Наличие короткозамкнутых витков

Расчет магнитной цепи при переменном токе

С помощью законов Кирхгофа в комплексной форме методом последовательных приближений (итерационный метод)

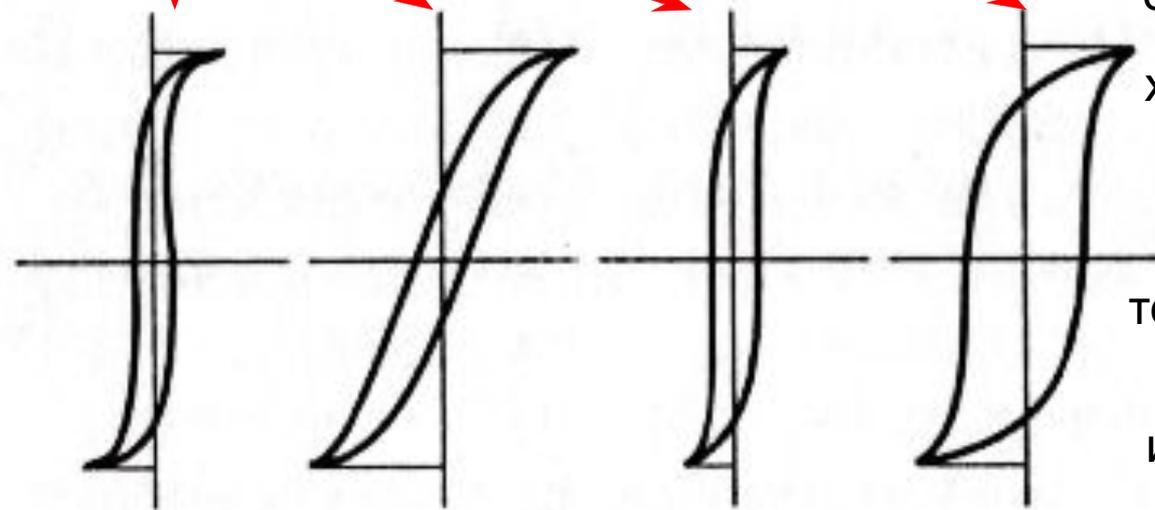
По первой гармонике (если же магнитная цепь работает при сравнительно больших индукциях (за коленом кривой намагничивания))

# МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ



а) магнитомягкие

б) магнитотвёрдые



а

б

в

г

высокая магнитная проницаемость (малые габариты)

малая коэрцитивная сила (против залипания)

стабильность магнитных характеристик (не зависят от  $t^{\circ}\text{C}$ , мех. возд.)

технологичность (простота и легкость изготовления)

высокая индукция насыщения (большое тяговое усилие)

малые удельные потери на вихревые токи

малые удельные потери на гистерезис

низкая стоимость

**Магнитные материалы**

# ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Электромагнитные устройства служат для создания магнитного поля с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током.

**Электромагнитные механизмы (ЭММ)** – электромагнитные устройства, в которых магнитное поле используют для создания электромагнитных сил, вызывающих перемещение подвижных частей и совершающих механическую работу, при которой подвижные части движутся по заданной траектории и преодолевают силы сопротивления, определяемые механической характеристикой.

**Электромагниты (ЭМ)** – электромагнитные механизмы, имеющие магнитную систему из ферромагнитных материалов

## Применение электромагнитов

электромагнитные  
устройства

автоматы

приводы выключателей

тормозные электромагниты

тяговые электромагниты

подъемные электромагниты

реле

датчики

электромагнитные муфты

дросселя

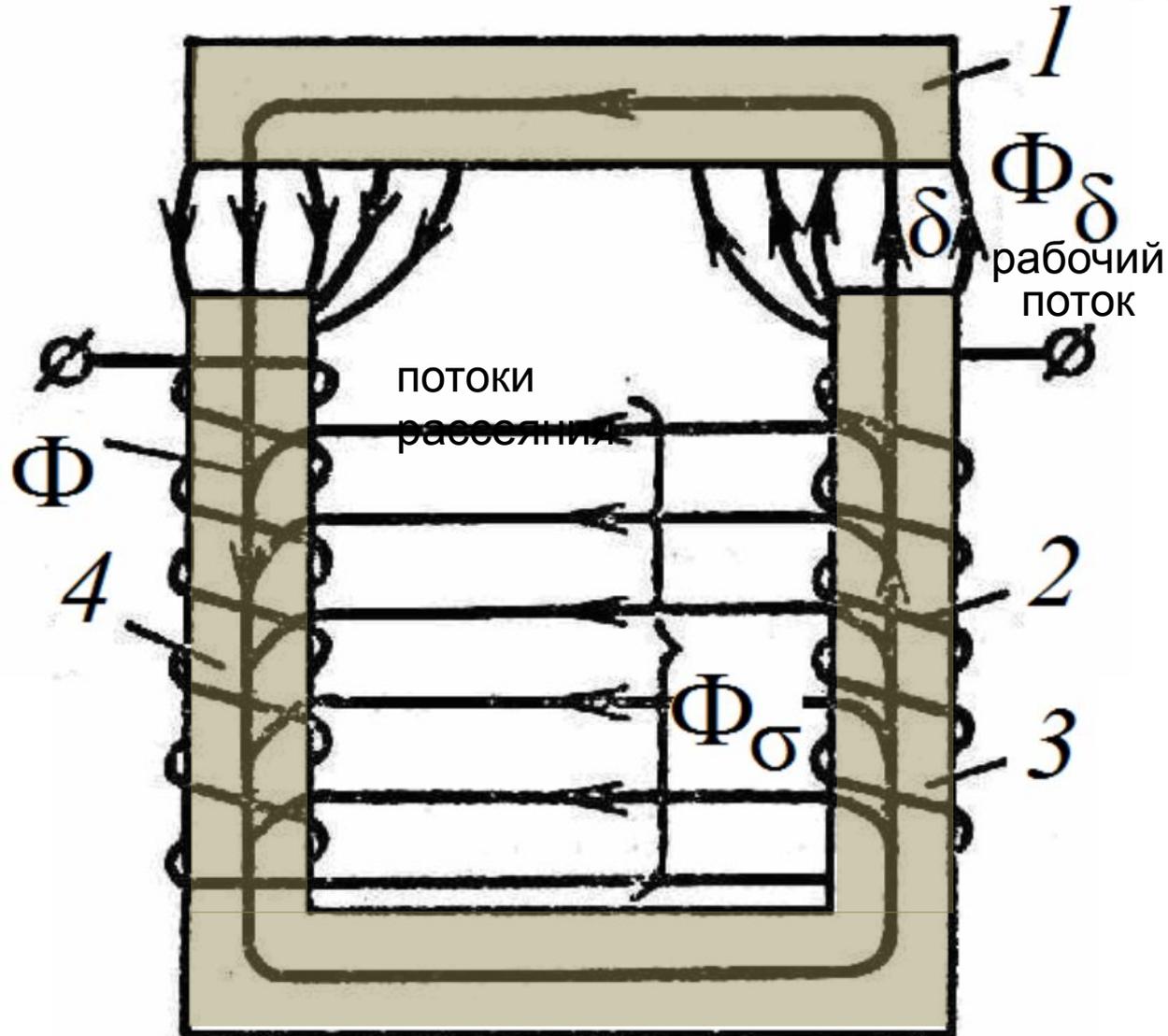
и др.

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

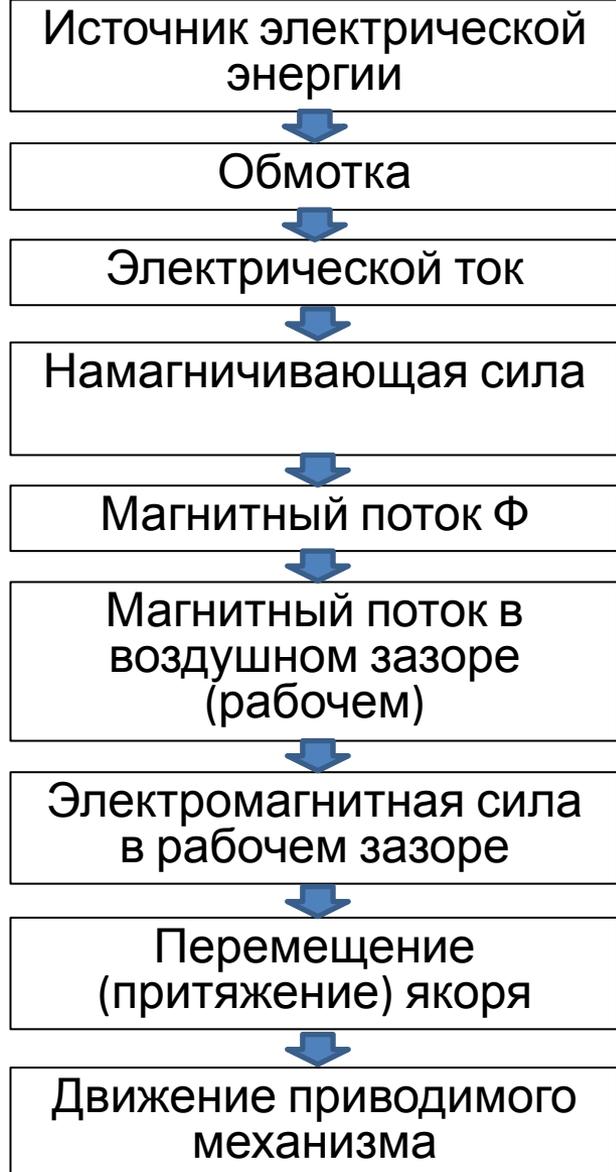
**ЭЛЕКТРО-  
МАГНИТ  
Ы**



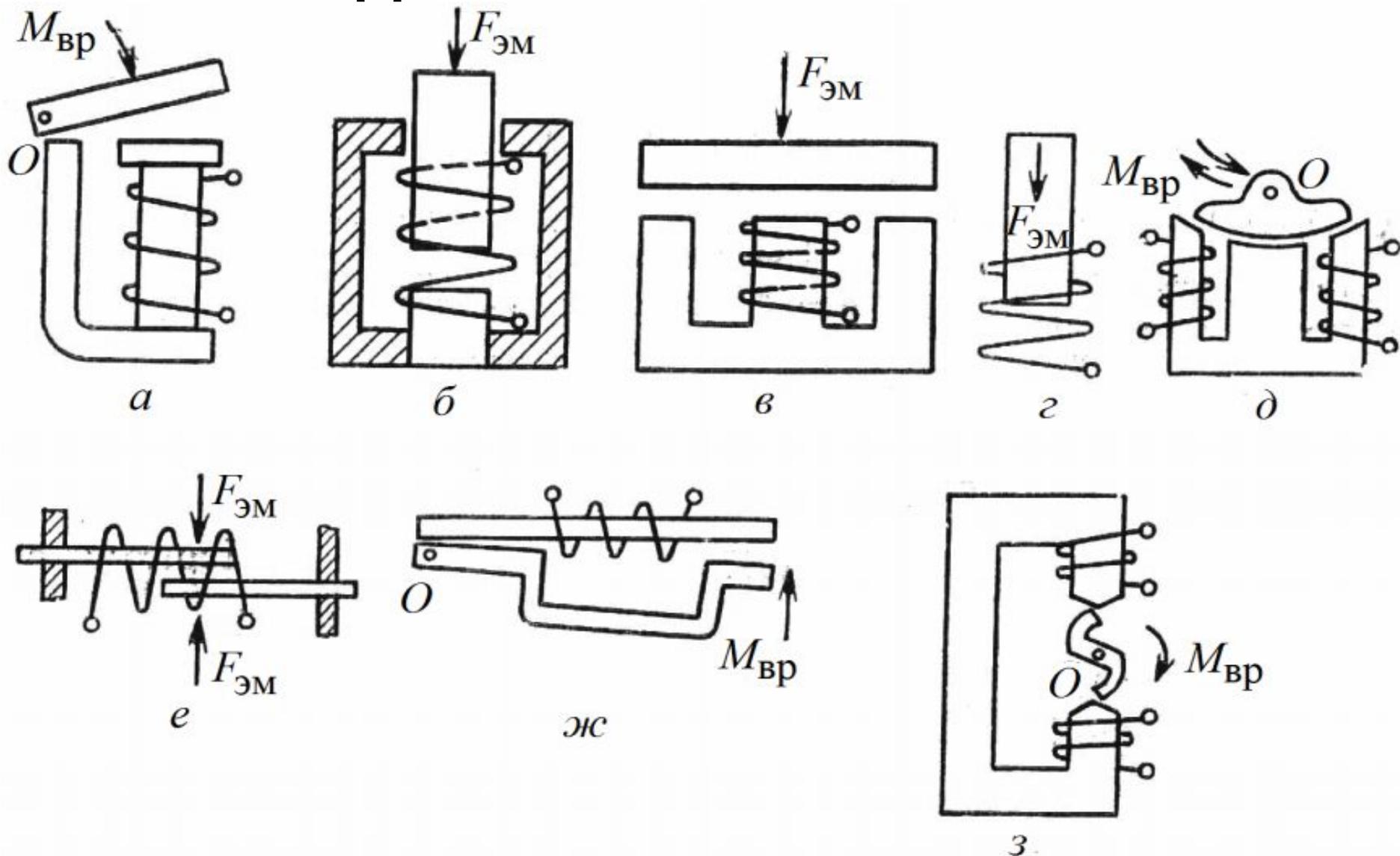
# УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА



1 – якорь – подвижная часть магнитной цепи;  
2 – обмотка;  
3,4 – стержни (сердечники) магнитопровода;  
1,3,4 – магнитная цепь.



# РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ

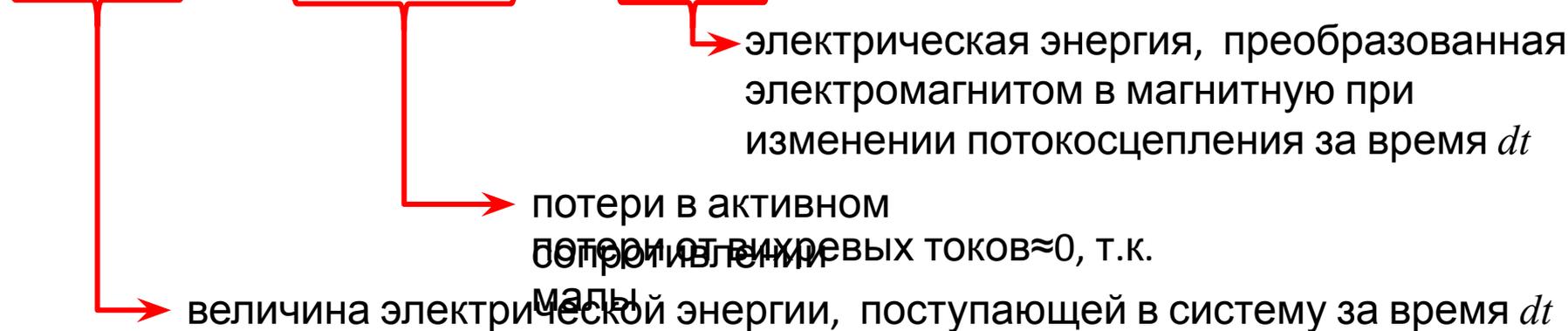


клапанная (а); броневая (б); Ш-образная (в); соленоидная (г); с поворотным якорем (д); для герконов (е); плоская для многоконтактных реле (ж); с Z-образным якорем для реле защиты с высоким коэффициентом возврата (з)

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА

Расчет электромагнитной силы, развиваемой электромагнитом постоянного тока, базируется на уравнении энергетического баланса электромагнита

$$U idt = i^2 R dt + id\psi$$



## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ

Аналитические методы

Графоаналитические методы

значение потокосцепления к моменту времени

$$\int_0^t U idt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^{\psi} id\psi$$

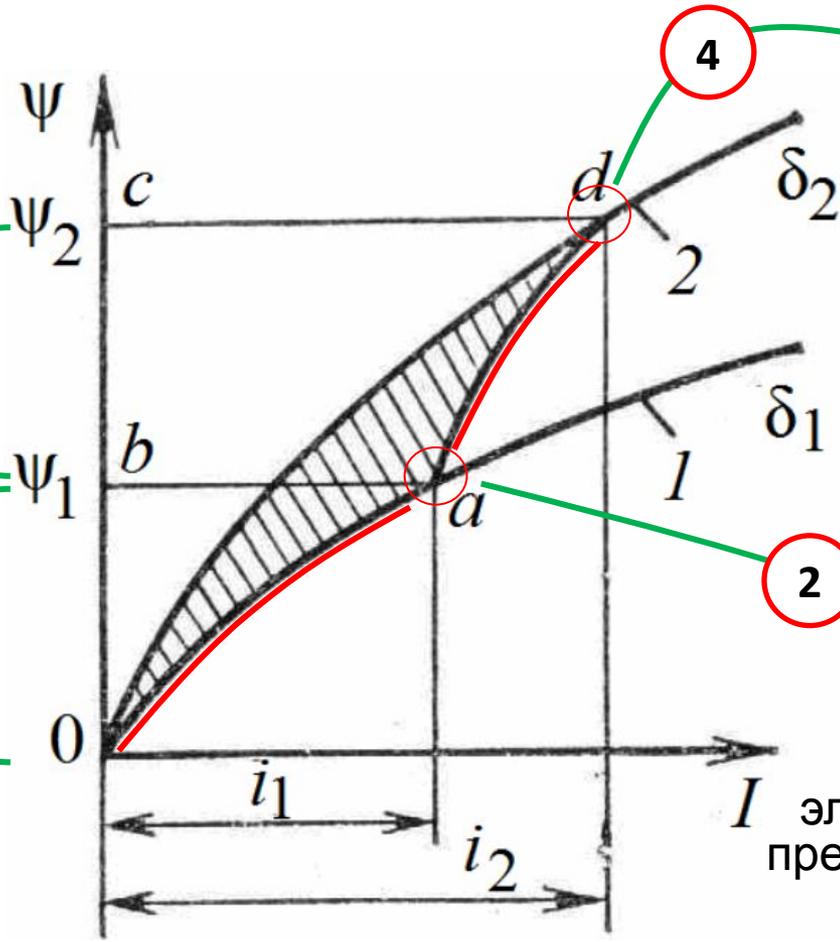
# АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ

под действием силы возвратной пружины якорь переместится в положение, при котором рабочий зазор станет другим

3

электромагнитная сила электромагнита меньше силы возвратной пружины, якорь неподвижен и потокосцепление нарастает при неизменном значении начального рабочего зазора

1



новый зазор  $\delta_2$  больше потокосцепление  $\Psi_2$  при большем токе  $i_2$

4

при определенном значении потокосцепления электромагнитная сила превысит силу возвратной пружины

2

# АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ

Энергия магнитного поля, запасенная в цепи

$$A_1 = \int_0^{\psi_1} i d\psi = m_i m_\psi S_{0ab}$$

После перемещения якоря ток энергия магнитного поля возрастет на величину  $\psi_2$

$$A_2 = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i d\psi = m_i m_\psi S_{abcd}$$

Энергия, накопленная в магнитном поле к концу хода якоря

$$A_4 = \int_0^{\psi_2} i d\psi = m_i m_\psi S_{0cd}$$

На основании закона сохранения

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \Rightarrow A_3 = A_1 + A_2 - A_4$$

# АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ

$A_3$  – механическая работа, совершаемая якорем при изменении зазора от  $\delta_1$  до  $\delta_2$

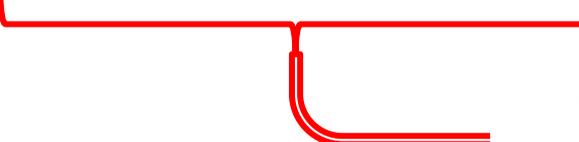
$$A_3 = m_i m_{\psi} (S_{0ab} + S_{abcd} + S_{0cd}) = m_i m_{\psi} S_{0ad}$$

Средняя электромагнитная сила при перемещении якоря от  $\delta_1$  до  $\delta_2$

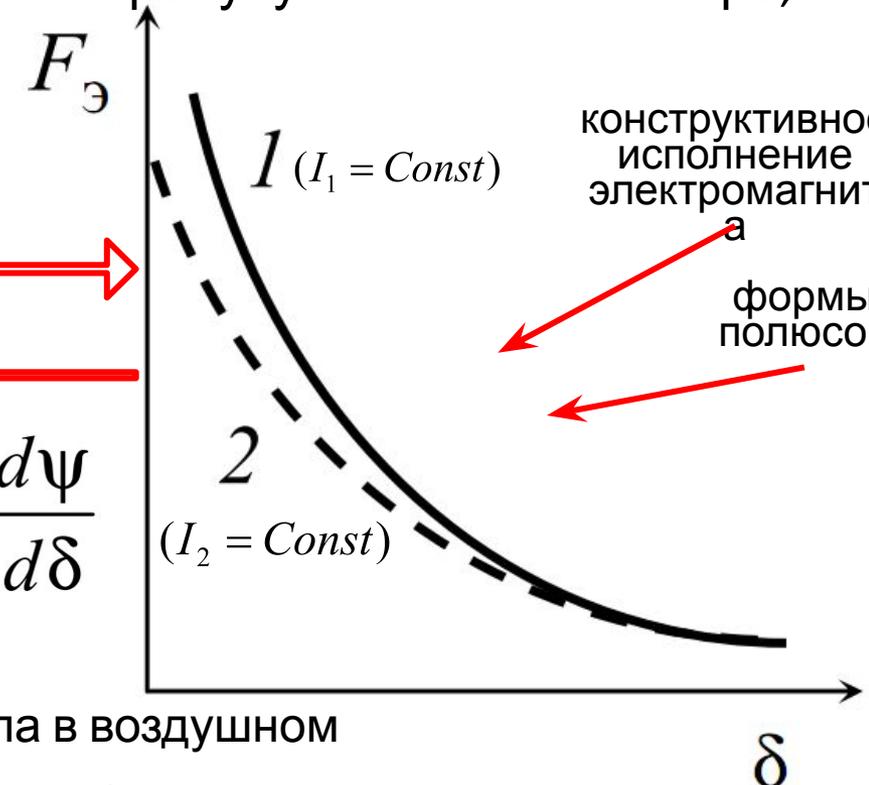
$$F_{\text{эср}} = A_3 / \Delta x = -A_3 / \Delta \delta = -A_3 / (\delta_2 - \delta_1)$$

Электромагнитная сила, действующая в сторону уменьшения зазора, в дифф-виде

$$F_{\text{э}} = -dA_3 / d\delta$$



статическая тяговая характеристика электромагнита



если пренебречь влиянием потоков рассеяния и насыщения стали

$$F_{\text{э}} = -\frac{1}{2} F_{\delta}^2 \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta}$$

или

$$F_{\text{э}} = -\frac{1}{2} I \frac{d\psi}{d\delta}$$

падение магнитного потенциала в воздушном

$$F_{\text{э}} = \frac{1}{2\mu_0} B_{\delta}^2 S = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\delta}^2}{\mu_0 S}$$

Формула Максвелла (для электромагнита с одним рабочим зазором) для расчета электромагнитной силы при равно-мерном поле в рабочем зазоре и ненасыщенных полюсах

# РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

$i \rightarrow \sin \rightarrow \Phi \rightarrow \sin$

$$F_{\text{э}} = F_{\text{э max}} \sin^2 \omega t = \frac{F_{\text{э max}}}{2} - \frac{F_{\text{э max}}}{2} \cos 2\omega t$$



$$F_{\text{э max}} = \frac{\Phi_{\text{max}}^2}{2\mu_0 S}$$

Амплитудное значение силы для однофазных систем без экранирующего витка при равномерном поле в рабочем зазоре и ненасыщенной магнитной системе (формула Максвелла)

площадь полюса

$$F_{\text{э ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{\text{э}} dt = F_{\text{э max}} / 2$$

Среднее значение электромагнитной силы за период обычно принимается за расчетное значение полезной силы

Электромагнитные силы негативно влияют на работу электромагнита. Если сила возвратной пружины больше электромагнитной, то якорь отрывается от сердечника. При нарастании электромагнитной силы якорь вновь притягивается к сердечнику, поэтому якорь непрерывно вибрирует - нарушается работа контактов, создается шум, расшатывается магнитная система. Для устранения вибраций в однофазных электромагнитах используются короткозамкнутые витки из меди или

# ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТА

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Статический режим

Работа тормозных и удерживающих электромагнитов

Динамический режим

Процесс срабатывания имеет динамический характер

## ДИНАМИКА ПРОЦЕССА СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

включения обмотки  
электромагнита



нарастание магнитного  
потока, пока  
электромагнитная сила не  
равна противодействующей



электромагнитная сила равна  
противодействующей



якорь начинает двигаться



ток продолжает изменяться по  
закону, определяемому  
параметрами электромагнита  
и противодействующей силой

магнитный поток продолжает  
изменяться по закону,  
определяемому параметрами  
электромагнита и  
противодействующей силой



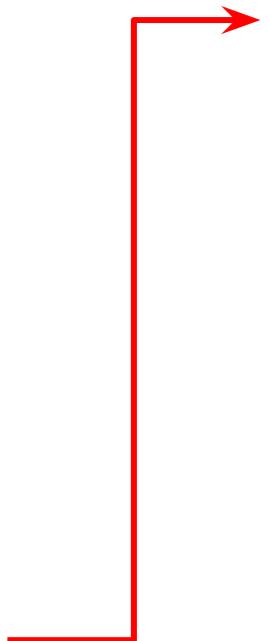
якорь достигает конечного  
положения



ток и магнитный поток  
изменяются, пока не достигнут  
установившихся значений



ток и магнитный поток  
достигают установившихся  
значений



# ДИНАМИКА ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Время срабатывания электромагнита – это время с момента подачи сигнала срабатывания на обмотку электромагнита до момента остановки якоря.

Время срабатывания при включении – промежуток времени с момента включения обмотки до момента полного притяжения

$$t_{\text{ср.вкл}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}$$

время движения (время перемещения якоря из положения при начальном зазоре  $\delta_{\text{н}}$  до положения при конечном зазоре  $\delta_{\text{к}}$ )

время трогания (время с момента включения обмотки до момента начала движения якоря)

$$U = iRdt + d\psi / dt$$

В начальном положении якоря рабочий зазор относительно велик. Магнитную цепь можно считать ненасыщенной, а индуктивность об-

$$U = iRdt + Ldi / dt$$

решение

мотки – неизменной.

# ДИНАМИКА ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

$$i = I_y (1 - e^{-t/T})$$

$$T = L / R \quad \text{постоянная времени цепи}$$

$$I_y = U / R \quad \text{установившееся значение тока}$$

$$i_{\text{тр}} = I_y (1 - e^{-t_{\text{тр}}/T}) \quad \text{ток обмотки, при котором начинается движение якоря, - ток трогания (для момента трогания)}$$

$$t_{\text{тр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{\text{тр}} / I_y}$$

Начало движения якоря  $\Rightarrow$

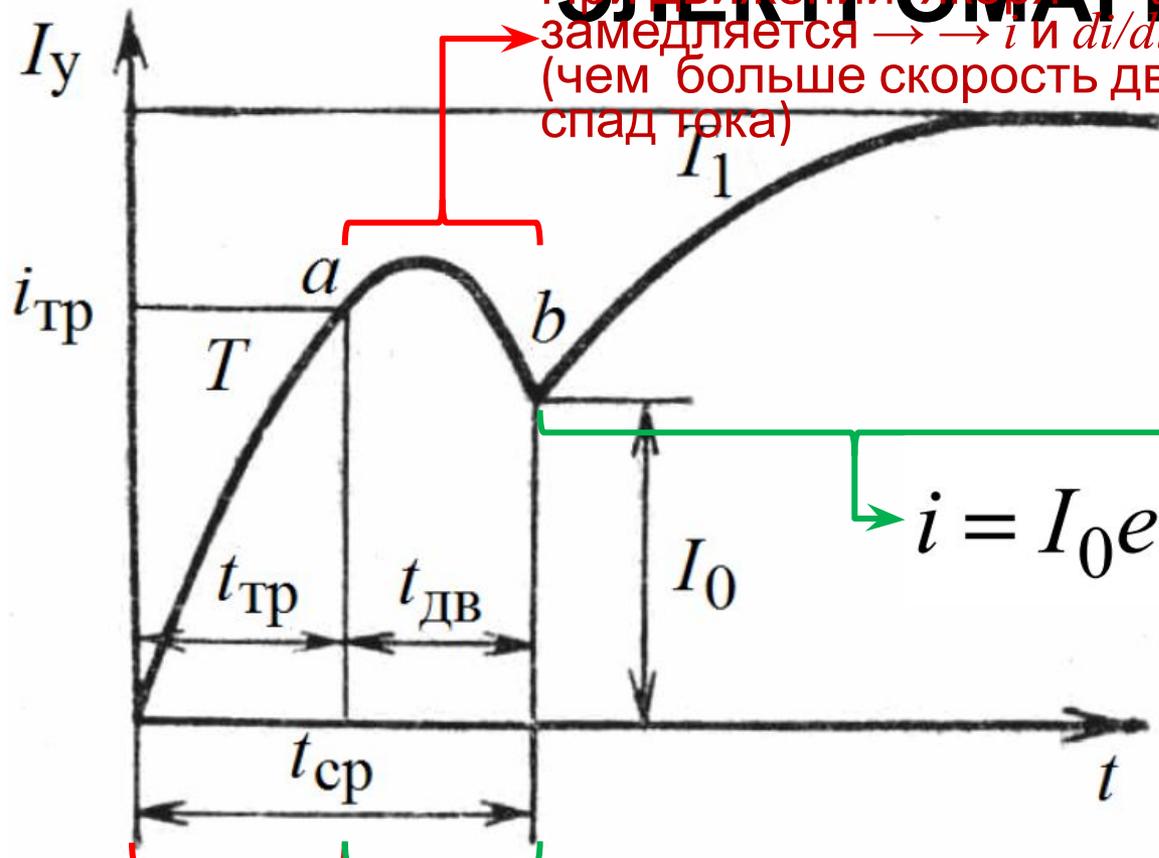
$$\delta \downarrow \Rightarrow \Lambda_\delta \uparrow \quad \text{и} \quad L \uparrow = w^2 \Lambda_\delta \uparrow$$

$$U = iR + d\psi / dt$$

$$U = iR + L di / dt + i dL / dt$$

# ДИНАМИКА ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

При движении якоря  $\rightarrow dL/dt > 0 \rightarrow$  рост  $i$   
 замедляется  $\rightarrow \rightarrow i$  и  $di/dt$  начинают уменьшаться  
 (чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока)



$$i = I_0 e^{-t/T_1} + I_y (1 - e^{-t/T_1})$$

$$T_1 = L_K / R_K$$

постоянная времени при конечном зазоре  $\delta = \delta_K$

Ток растёт, якорь трогается

$$i < I_y \rightarrow F_{дин} < F_{стат}$$

уравнения, описывающие физические процессы в электромагните

$$U = iR + d\psi / dt;$$

кинетическая энергия подвижных частей якоря

$$F_3 dx = d(mv^2) / 2 + F_{пр} dx,$$

энергия сил противодействия

работа, произведенная электромагнитом масса подвижных частей, приведенная к зазору

скорость перемещения якоря, приведенная к зазору

противодействующая сила пружины, приведенная к зазору

путь, пройденный якорем

# ДИНАМИКА ОТКЛЮЧЕНИЯ

## ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Время срабатывания — промежуток времени с момента отключения обмотки (или ее закорачивания) до момента возврата якоря в первоначальное положение.

$$t_{\text{ср.откл}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{дв}}$$

$t_{\text{сп}}$  — время спада тока от установившегося значения  $\Phi_y$  до потока отпускания  $\Phi_{\text{отп}}$   
 $t_{\text{дв}}$  — время движения якоря

Процесс отпускания описывается уравнением

$$U = iR_{\text{д}} + iR + L_{\text{к}} \frac{di}{dt} \quad \boxed{R_{\text{д}} \gg R} \quad \Rightarrow \quad i = \frac{U}{R} e^{-t/T_{\text{к}}}$$

$R_{\text{д}}$  — сопротивление дуги (искры)

$$\boxed{R_{\text{д}} = \text{const}}$$

$$i = \left( \frac{U}{R} + \frac{U}{R + R_{\text{д}}} \right) e^{-t/T_{\text{к}}} + \frac{U}{R + R_{\text{д}}}$$

$$T_{\text{к}} = L_{\text{к}} / (R_{\text{д}} + R)$$

# ДИНАМИКА ОТКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Процесс спада тока и магнитного потока протекает очень быстро. Если сердечник сплошной и имеет большое сечение, то спад магнитного потока замедляется из-за вихревых токов, поле которых стремится поддерживать спадющий поток.

Движение якоря его движение происходит за счет силы противодействующей пружины. Если эта сила постоянна и равна среднему значению ( $F_K$  и  $F_H$  – сила пружины при конечном и начальном зазорах, то движение описывается уравнением)

$$F_{\text{пр.ср}} = (F_K + F_H) / 2 \implies F_{\text{пр.ср}} = ma = m dv / dt$$

$$a = F_{\text{пр.ср}} / m$$

$$t_{\text{дв}} = \sqrt{2(\delta_H - \delta_K) / a} \implies t_{\text{дв}} = \sqrt{2(\delta_H - \delta_K)m / F_{\text{пр.ср}}}$$

Переходный процесс при включении обмотки электромагнита переменного тока описывается уравнением

$$\Phi = \Phi_{\text{max}} (e^{-tR/L} - \cos \omega t) \quad U_{\text{max}} \sin(\omega t + \alpha) = iR + wd\Phi / dt$$

$$\Phi_{\text{max}} = \frac{U}{4,44 fw}$$

Кривая изменения магнитного потока во времени аналогична кривой изменения тока при коротком замыкании – наибольшие пиковые значения магнитного потока (и силы) имеют место в начале включения (примерно через 0,01 с после начала включения при частоте тока  $f=50$  Гц), чем обеспечивается малое время тропиния

# УСКОРЕНИЕ И ЗАМЕДЛЕНИЕ СРАБАТЫВАНИЯ

## ЭЛЕКТРОМАГНИТ

**ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ ЭА**

- Изменение конструкции электромагнита
- Изменение параметров электромагнита
- Применение специальных схем

Уменьшение времени срабатывания ЭА

уменьшение вихревых токов в магнитопроводе

применение магнитных материалов с высоким электрическим сопротивлением

Замедление срабатывания ЭА

изменение конструкции

в массивных частях делают специальные прорезы, пересекающие пути вихревых токов

демпфирование: короткозамкнутая (экранирующая) обмотка - медная или алюминиевая гильза размещается на магнитопроводе

уменьшают ход якоря

уменьшают массу якоря

уменьшают массу связанных с якорем подвижных частей

демпфирование с присоединением якоря электромагнита к демпфирующему устройству, создающему противодействующую силу, пропорциональную скорости перемещения

уменьшают трение в осях якоря

уменьшают трение в опорах якоря

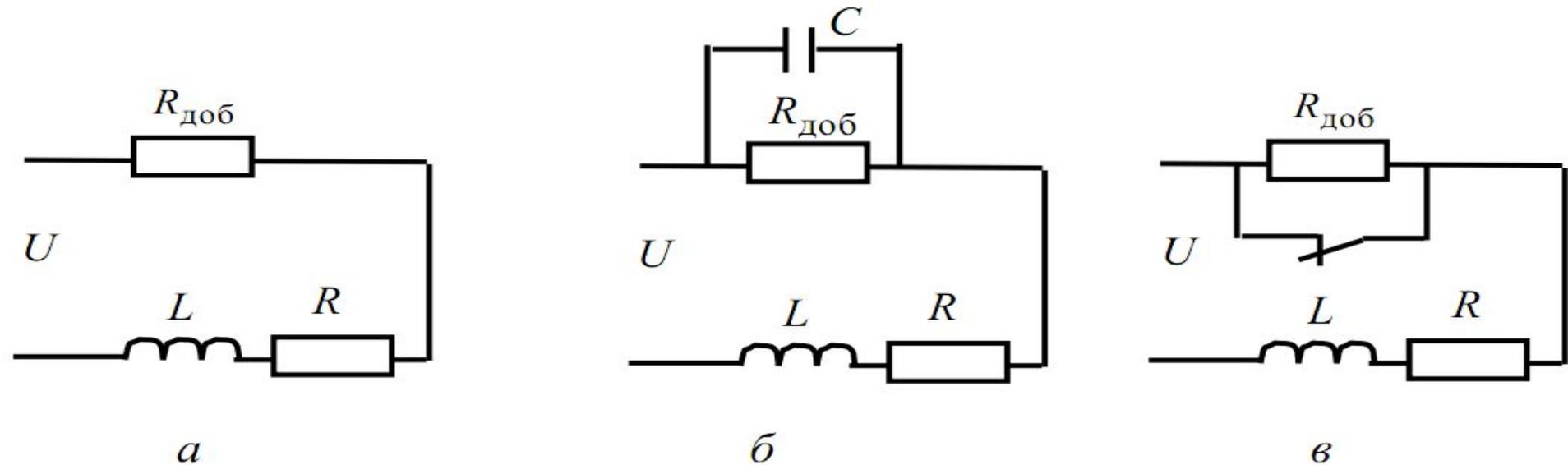
Применение устройств, замедляющих срабатывание

гидравлически  
пневматически  
механическими

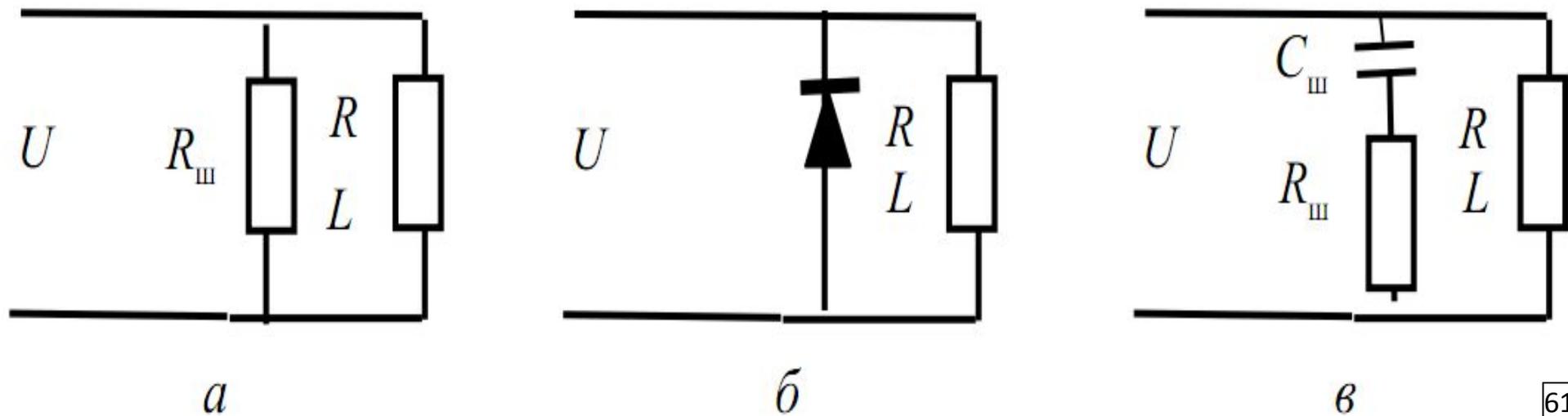
анкерные часовые механизмы

# УСКОРЕНИЕ И ЗАМЕДЛЕНИЕ СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА. ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СХЕМ

Схемы ускорения срабатывания электромагнита при



Схемы замедления срабатывания электромагнита при



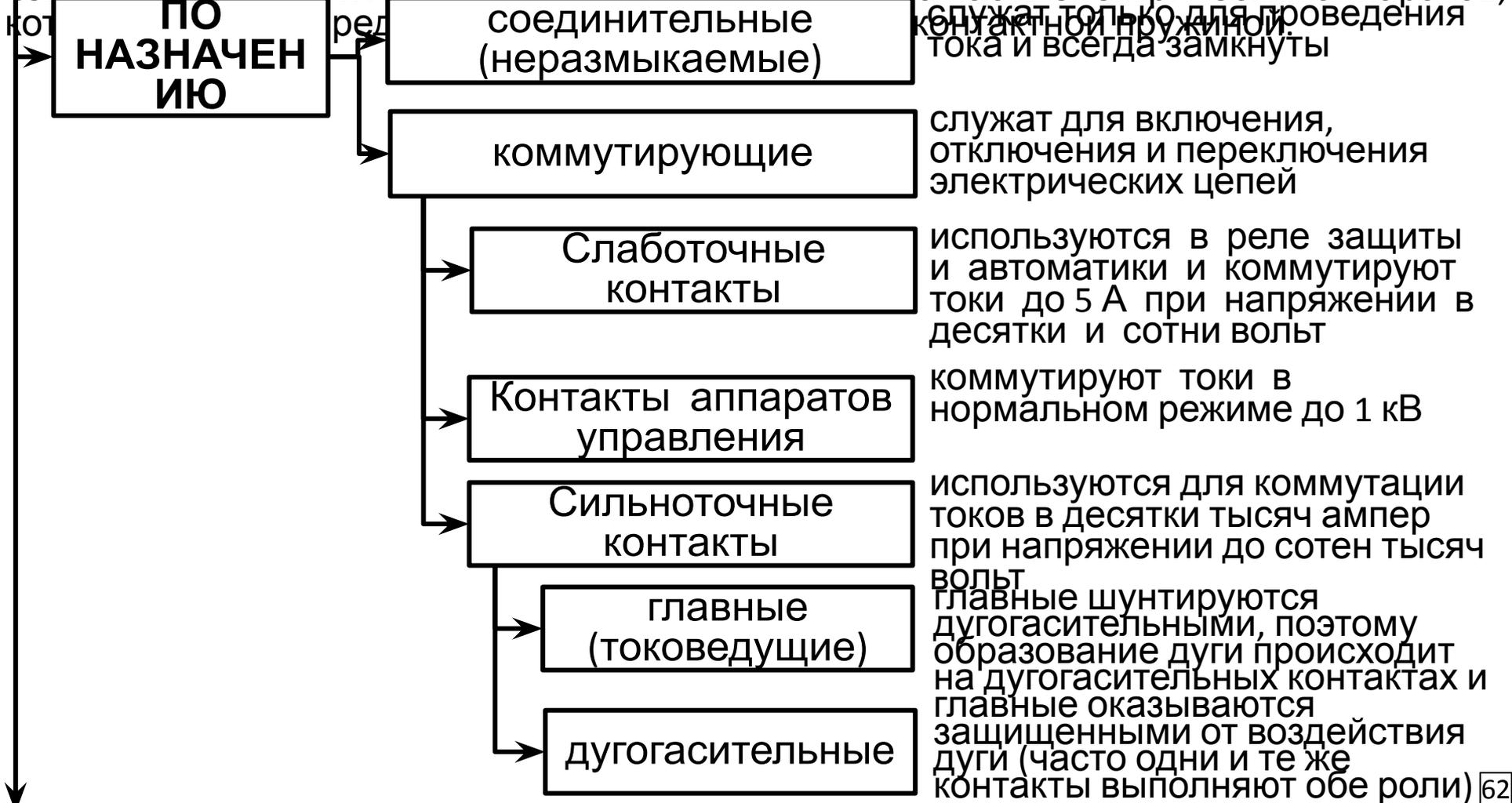
# КОНТАКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Электрический контакт предназначен для соединения элементов электрической цепи.

Электрический контакт – место перехода тока из одного токоведущего элемента в другой.

Электрический контакт (контакт-деталь) – соприкасающиеся (контактирующие) проводники.

Электрический контакт в замкнутом положении - та часть электрических аппаратов, контактной пружиной.



# КОНТАКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

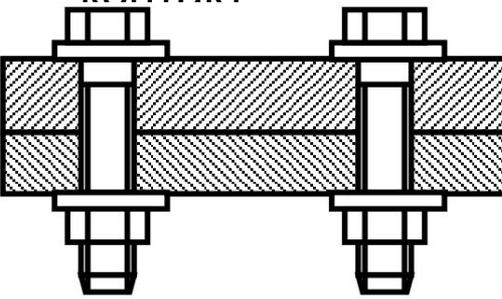
ПО

**КОНСТРУКТИВНОМУ  
ИСПОЛНЕНИЮ**

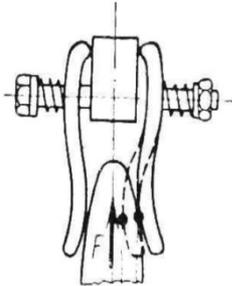
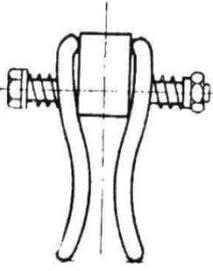
соединительные (неразмыкаемые)	неподвижные	неразъемные (сварные)
	подвижные	разъемные (болтовые)
		скользящие
		щеточные
		роликовые
жидкометаллические		
коммутирующие	рычажные	
	рубящие	
	торцовые	
	щеточные	
	пальцевые	
	розеточные	
	с плоскими пружинами для реле	
	и т.д.	



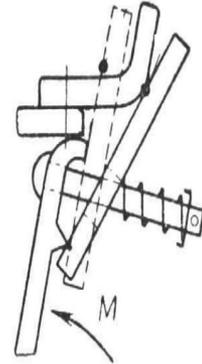
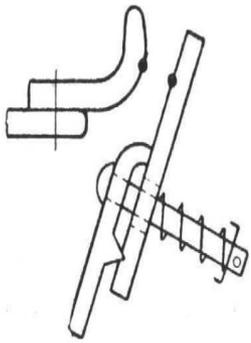
Сварной контакт



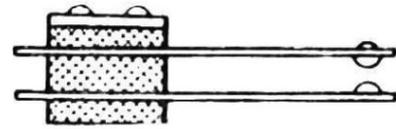
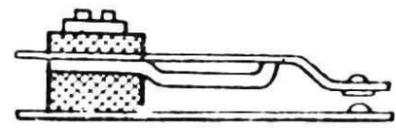
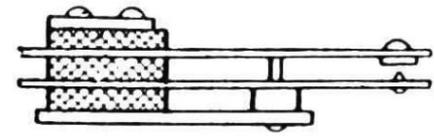
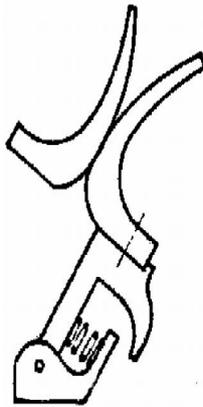
Болтовой контакт



Пальцевые контакты



Рычажные



Контакты с плоскими



# СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА

Сопротивление  
контакта  
(переходное  
сопротивление)

$$R_K = R_C + R_{ПЛ}$$

## Сопротивления

обусловлено стягиванием линий тока к местам истинного касания контактирующих проводников

## стягивания

материал контактирующих проводников  
обработка контактирующих проводников  
число площадок касания  
сила сжатия  
электрическое поле

Эффект

стягивания линий тока

Сопротивления пленок обусловлено загрязнением или окислением поверхностей контактирующих проводников и может меняться в процессе эксплуатации

материал контактов

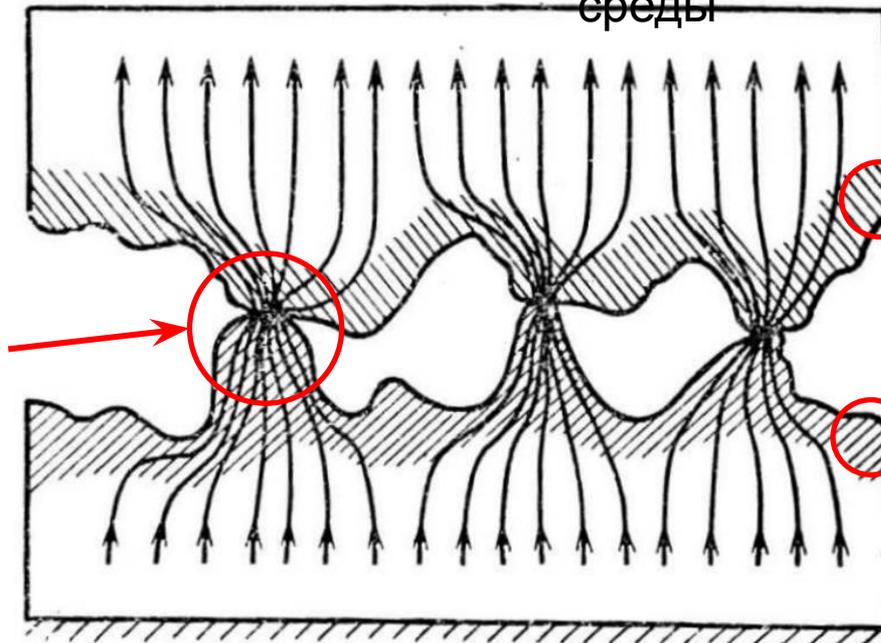
температура среды

влажность среды

среды

Борьба с пленками

Конструкции контактов разрушает пленку при их размыкании или замыкании используются специальные смазки контакты на малые токи делают из драгметаллов (Au, Pt и др.) Пленки на поверхности



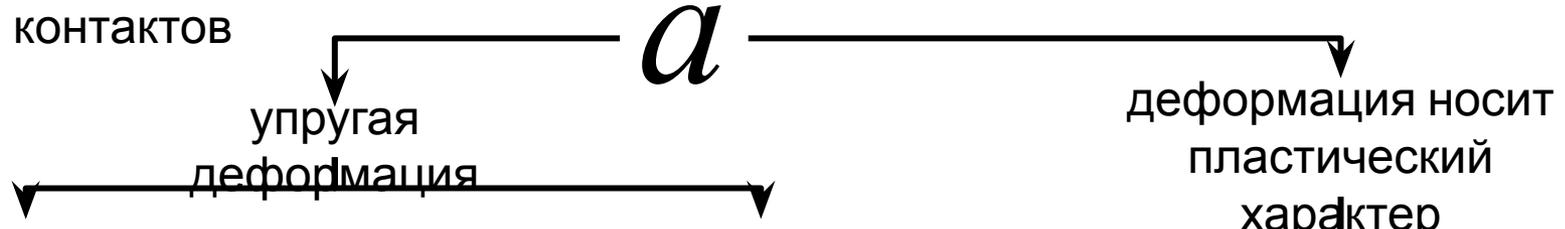
# РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТЯГИВАНИЯ

## КОНТАКТА

Для расчета сопротивления стягивания разработаны различные упрощающие модели контактирования. Простейшая модель Хольма: площадка касания – круг

$$R_c = \rho / (2na)$$

$\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала контактов  
 $n$  — число одинаковых площадок касания  
 $a$  — радиус круга площадки касания



при сжатии контактов силой  $F$  гладких поверхностей шар-плоскость из одинаковых материалов определяется формулой Герца

$$a_{шп} = 1,11 \sqrt[3]{Fr / (En)}$$

$a_{шп}$  — радиус шарика  
 $E$  — модуль упругости

при сжатии двух одинаковых шаровых поверхностей

$$a_{шш} = 0,86 \sqrt[3]{Fr / (En)}$$

деформация носит пластический характер

$$a = \sqrt{F / (\pi \sigma_{см})}$$

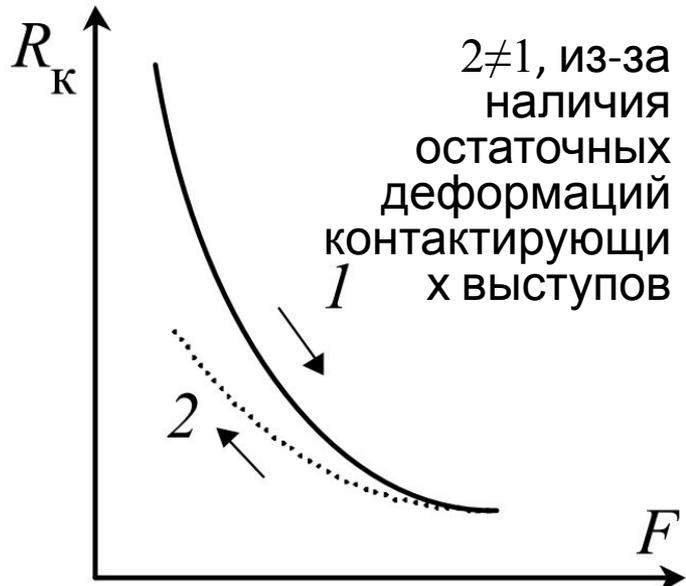
$\sigma_{см}$  — временное сопротивление смятия материала

# ПРАКТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА

Для практических расчетов сопротивления контакта часто используют эмпирическую формулу

$$R_K = K_0 / F^m$$

Характеристика переходного сопротивления



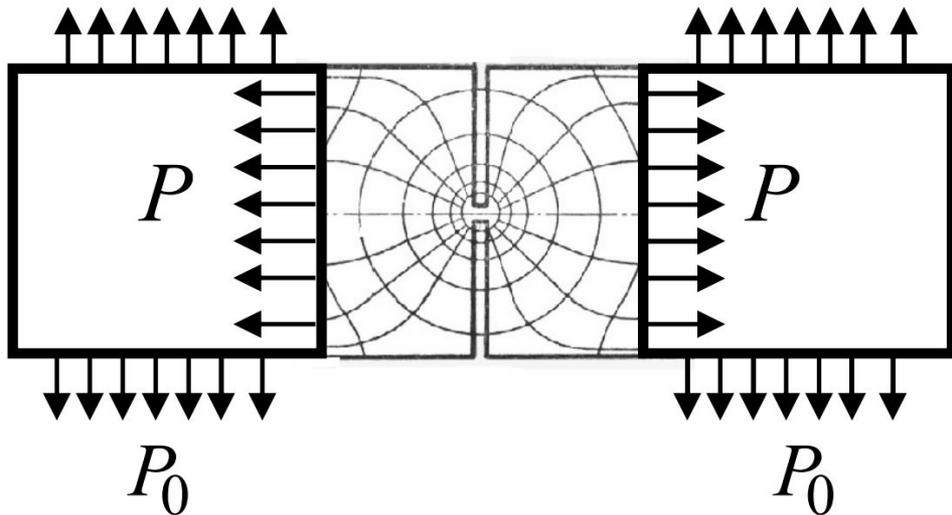
сила сжатия контакта

- точечный контакт (n=1) – 0,5;
- линейный контакт (n=2) – 0,5-0,8;
- плоскостной контакт (n≥3) – 1.

Материал контактов	Тип контакта	Условия	Значения $K_0, \text{мкОм} \cdot \text{Н}^m$
Медь – медь		Сильноточные	400
Латунь – сталь		Сильноточные	$3 \cdot 10^3$
Медь – медь	Плоскостной	Слаботочные	$(90 - 280) \cdot 10^3$
Медь – медь	Точечный	Слаботочные	$(140 - 170) \cdot 10^3$
Медь – медь	Щеточный	Слаботочные	$100 \cdot 10^3$

# НАГРЕВ КОНТАКТА

Распространение теплоты в контактном соединении



Уравнение распределения превышения температуры вдоль проводника с контактом

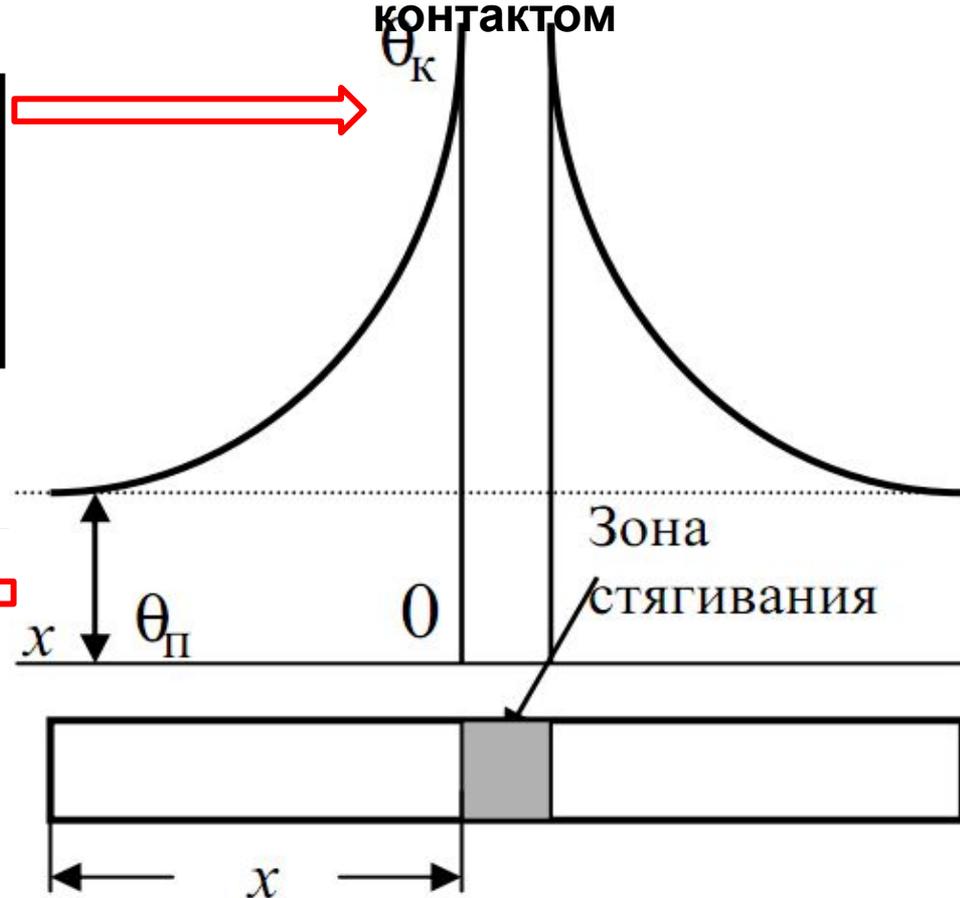
$$\tau(x) = \tau_{\Pi} + \frac{1}{2} I^2 R_{\text{к}} \frac{1}{p \lambda q} e^{-px}$$

превышение температуры проводника над температурой окружающей среды при  $x \rightarrow \infty$

$$p = \sqrt{k_{\text{ТО}} \Pi_0 / (\lambda \cdot q)}$$

коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности

Кривая распределения превышения температуры вдоль проводника с контактом



площадь поперечного сечения проводника  
теплопроводность материала  
периметр боковой поверхности проводника

# НАГРЕВ КОНТАКТА



Превышение температуры тела контакта (превышение температуры границы области стягивания  $x=0$ )

Если расстояние между двумя соседними контактами удовлетвор

$$l > 5\sqrt{\lambda q / (k_{\text{ТО}} \Pi_0)}$$

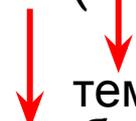
то взаимным тепловым влиянием контактов можно пренебречь.

$$\tau_{\text{к}} = \tau_{\text{п}} + \frac{1}{2} I^2 R_{\text{к}} \frac{1}{p \lambda q}$$

Согласно теореме Кольрауша и Диссельхорста для идеализированной модели контактирования (в симметричной области стягивания все эквипотенциальные поверхности являются изотермическими) выводится **уравнение, связывающее падение напряжения на контакте  $U_{\text{к}}$  с температурой площадки касания**

$$U_{\text{к}}^2 / 4 = L (\theta_a^2 - \theta_{\text{к}}^2)$$

для материала существуют определенные падения напряжения на контакте, при которых температура площадки касания достигает значений, определяющих фазовое состояние материала (размягчения, плавления, кипения)



температура на границе зоны стягивания

температура площадки касания



постоянная, для большинства металлов близкая к  $L=24 \cdot 10^{-8}$

$\text{В}^{-2} \text{К}^{-2}$

**Температура площадки касания**  
связана с температурой тела контакта

$$\theta_a = \theta_{\text{к}} \sqrt{1 + \text{tg}^2 \left( \frac{I}{4a} \sqrt{\frac{\lambda \rho_0}{\alpha}} \right)}$$



температурный коэффициент

Материал	Напряжение размягчения, В	Напряжение плавления, В
Серебро	0.09	0,37
Медь	0.12	0,43
Никель	0.22	0,65
Платина	0,25	0,65
Вольфрам	0,4	1,1

# НАГРЕВ КОНТАКТА

Для слабых контактов принимают, что **допустимое падение напряжения** не должно превосходить напряжения размягчения

$$U_{\text{к.доп}} \leq (0,5 - 0,8)U_p$$

Если известен ток  $I$ , который должны пропускать контакты, то можно найти **допустимое сопротивление контакта**

$$R_{\text{к.доп}} = U_{\text{к.доп}} / I$$

При выбранном материале контактов знание сопротивления контактов позволяет отыскать необходимую **силу сжатия контактов (сила контактного нажатия)**

число Лоренца  $F = I_N^2$       твердость по Виккерсу  $B_{\pi HV}$

$$F = I_N^2 \frac{B_{\pi HV}}{16\lambda^2 \left( \arccos \frac{\theta_k}{\theta_a} \right)^2}$$

Токи короткого замыкания и длительные токи перегрузки могут привести к расплавлению материала контактов и их свариванию, поэтому **минимальный плавящий ток** определяется величинам взятым при температуре плавления площадки касания при температуре

$$I_{\text{ПЛ}\infty} = a_{\text{ПЛ}} \sqrt{\frac{32\lambda_{\text{ПЛ}} \theta_k}{\rho_{\text{ПЛ}}}}$$

$$a_{\text{ПЛ}} = 1,5a$$

**Минимальный плавящий ток**, с учетом изменения температуры во времени

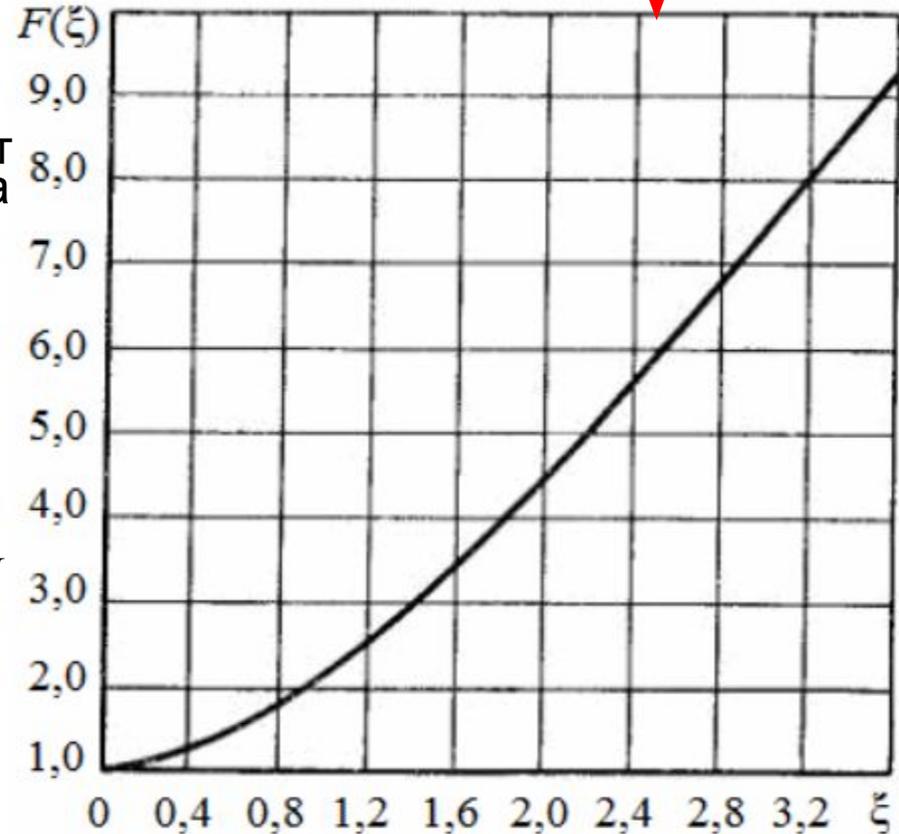
$$I_{\text{ПЛ}}(t) = I_{\text{ПЛ}\infty} F(\xi)$$

# НАГРЕВ КОНТАКТА



$F(\xi)$  эмпирическая функция,  
зависящая от  $\xi = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{c\gamma}{\lambda t}}$

удельная теплоемкость материала  
плотность материала



При практических расчетах используют эмпирическую зависимость между минимальным током сваривания  $I_{\text{св.мин}}$  и силой сжатия контактов

$$I \leq I_{\text{св.мин}} = k \sqrt{F}$$

Тип контакта	Материал	$k, \text{А/кГ}^{0,5}$
Щеточный	Медь - латунь	3000-4000
Пальцевый несамоустанавливающийся	Медь - медь	4100
	Латунь - латунь	5050
Пальцевый самоустанавливающийся	Медь - латунь	5750
Розеточный (на 1 элемент розетки)	Медь - латунь	5500
	Медь - медь	6000

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОНТАКТОВ

## СТАТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ

Условия работы контактов определяются их возможными состояниями (контакты замкнуты или разомкнуты).

**Замкнутое состояние** характеризуется протеканием номинальных и аварийных токов, а также процессами нагрева контактов.

**Разомкнутое состояние** характеризуется максимальным напряжением, которое выдерживает изоляционный межконтактный промежуток без пробоя. Напряжение пробоя межконтактного промежутка в целях надежности должно быть выше максимального напряжения при разомкнутых контактах.

Расстояние между ближайшими точками контакт-деталей в разомкнутом состоянии называется **раствором контактов**. Раствор контактов выбирается из условий электрической прочности межконтактного промежутка и гашения дуги. Установлены соответствующие испытательные напряжения, воздействие которых должны выдерживать межконтактные промежутки

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОНТАКТОВ

## ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ

Работоспособность коммутирующих контактов характеризуется также процессами замыкания (включения) и размыкания (отключения) цепи.

**Включение цепи.** При включении электрических аппаратов в их контактах могут иметь место следующие процессы: вибрации, эрозия на поверхности контактов в результате образования электрического разряда между ними. При достижении некоторого расстояния между контактами создаются условия для электрического пробоя, в результате которого между электродами загорается дуга замыкания. При соприкосновении контактов дуга гаснет. Если соприкосновение контактов носит ударный характер, то возможен неоднократный отброс подвижного контакта (вибрация). Не исключено повторное возникновение дуги или искры, которые ведут к износу контактов.

**Отключение цепи.** В процессе размыкания сила сжатия контактов уменьшается, переходное сопротивление увеличивается, за счет чего растет температура площадок касания. В момент разъединения контакты нагреваются до температуры плавления и между ними возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и, в зависимости от параметров отключаемой цепи, возникает дуговой или тлеющий разряд. Разрыв жидкометаллического мостика, проскакивание искры или горение дуги являются причинами износа контактов (электрической эрозии). Высокая температура приводит к интенсивному окислению и распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок. Перенос материала с одного контакта на другой наиболее вреден при постоянном токе, так как направление переноса в этом случае постоянно. Эрозия контактов под действием малых токов определяется мостиковой стадией и стадией искрового разряда. Для уменьшения эрозии применяются искрогасительные схемы. Для борьбы с эрозией контактов

# МАТЕРИАЛЫ КОНТАКТОВ

**Материалы контактов должны иметь характеристики:**

- ✓ высокие электрическую проводимость и теплопроводность,
- ✓ стойкость против образования пленок и коррозии,
- ✓ малую твердость для уменьшения силы сжатия,
- ✓ высокую твердость для уменьшения механического износа,
- ✓ малую эрозию,
- ✓ высокую дугостойкость,
- ✓ простоту обработки,
- ✓ низкую стоимость.

---

**В качестве материалов контактов используют:**

- ✓ чистые металлы (медь, алюминий, серебро, вольфрам и др.),
- ✓ сплавы (латунь, бронза и др.),
- ✓ неметаллы (углерод),
- ✓ композиции взаимно не сплавляемых металлов (вольфрам-серебро, вольфрам-медь),
- ✓ композиции металлов с оксидами металлов (серебро – оксид кадмия, серебро – оксид меди, медь – оксид меди),
- ✓ композиции металлов с карбидами (вольфрам – карбид вольфрама),
- ✓ композиции металлов с углеродом (серебро – графит, медь – графит)
- ✓ многочисленные тройные композиции.

***Выбор материала контактов определяется условиями их***

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ДУГОГАШЕНИЕ

Электрическая дуга является одним из видов газового разряда (явление прохождения тока через газ).

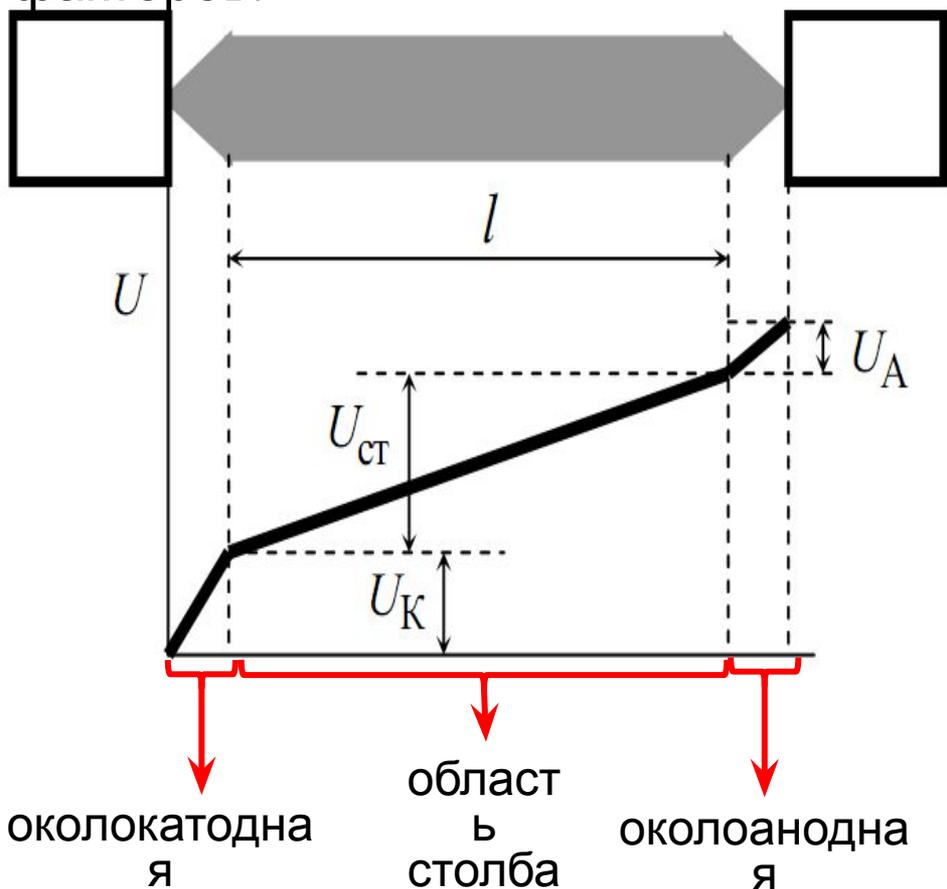
**Дуга (дуговой разряд)** возникает при размыкании (замыкании) электрических цепей с помощью контактов электрических аппаратов (выключателей, автоматов, контакторов, пускателей, рубильников, реле), если величины токов и напряжений превосходят некоторые критические значения. Эти значения зависят от **материала контактов, параметров цепи, свойств среды и т.д.** Дуговой разряд имеет место при относительно больших токах (для металлов – примерно 0,5 А) и при напряжении в цепи не менее 15 В. При меньших значениях тока и напряжения размыкание контактов сопровождается образованием **искр**.

Дуговой разряд в газовой среде относительно высокой плотности характеризуется **ясно очерченной границей между столбом дуги и окружающей средой, высокой плотностью тока в столбе дуги** (десятки-сотни ампер на миллиметр), **высокой температурой газа внутри столба дуги** (5000–25000 К), **высокой плотностью тока на катоде и малым напряжением у катода** (10–20 В).

Дуга приводит к значительному износу аппарата, но, с другой стороны, играет положительную роль. При отключении постоянного тока значительная часть электромагнитной энергии, запасенной в цепи, преобразуется в тепловую энергию дуги, которая отводится в окружающую среду. Это ведет к **снижению перенапряжений**, опасных для изоляции оборудования. При переменном токе процесс гашения дуги проходит вблизи нулевой паузы тока, когда электромагнитная энергия цепи близка к нулю. В результате этого вероятность появления опасных перенапряжений

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ

В обычных условиях воздух является хорошим изолятором. Чтобы воздух стал хорошим проводником, необходимо создать в нем определенную концентрацию заряженных частиц – **отрицательных (свободные электроны)** и **положительных ионов**. Процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов и образования свободных отрицательных электронов и положительных ионов называется **ионизацией**. Ионизация газа может происходить под действием света, рентгеновских лучей, температуры, электрического поля и других факторов. Для дуговых процессов два из них имеют наибольшее значение:



- ✓ у электродов:
  - **термоэлектронная эмиссия** (явление испускания электронов из накаливаемой поверхности),
  - **автоэлектронная эмиссия** (явление испускания электронов из катода под воздействием сильного электрического поля);
- ✓ в дуге (дуговом промежутке):
  - **термическая ионизация** (процесс ионизации под действием высокой температуры),
  - **ионизация толчком** (явление выбивания свободным электроном другого свободного электрона при столкновении с атомом или молекулой,

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ

Катодная область имеет особое значение в процессе формирования дуги. Средняя напряженность электрического поля у катода составляет  $10^5$  В/см и выше. При таких напряженностях выход электронов с поверхности катода может осуществляться за счет автоэлектронной эмиссии. Если температура кипения материала катода превышает 2500 К, эмиссия электронов с поверхности катода может происходить и за счет термических процессов (термоэлектронная эмиссия). Возможно совместное существование **термической и автоэлектронной эмиссии** при нагретом катоде.

**Анодное падение напряжения не является необходимым условием существования дуги.** Анод принимает идущий к нему из зоны плазмы дуги электронный поток. Повышение напряженности электрического поля у анода объясняется образованием у анода пространственного отрицательного заряда из-за недостатка ионов. Величина анодного напряжения зависит от температуры анода, рода металла и пр. Часто температура анода бывает выше температуры катода.

Область столба дуги занимает большую часть пространства между катодом и анодом. **Столб дуги – это квазинейтральная высокоионизированная среда.** Он является газовым проводником, соединяющим приэлектродные области. Основным источником ионов и электронов в столбе дуги является термическая ионизация. **С ростом давления степень ионизации уменьшается.** В связи с этим во многих дугогасящих устройствах (ДГУ) электрических аппаратов создается повышенное давление газа, которое способствует гашению дуги. Так как **степень ионизации определяется температурой,** во всех ДГУ стремятся отводить тепло от дуги либо за счет охлаждения движущимся

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ

В столбе дуги происходят также процессы **деионизации** (образование нейтральных частиц, т.е. воссоединение заряженных частиц) за счет **рекомбинации** (процесс образования нейтральных частиц при взаимном соприкосновении заряженных частиц) и **диффузии** (процесс выноса заряженных частиц из дугового промежутка в окружающее пространство, обусловленный электромагнитными и тепловыми факторами).

При возникновении дуги преобладают процессы ионизации, а в устойчиво горящей дуге процессы ионизации и деионизации одинаково интенсивны. **При преобладании процессов деионизации дуга гаснет.**

**Падение напряжения в дуговом столбе**  $U = El$  (здесь  $E$  - напряженность электрического поля;  $l$  - длина столба<sup>ст</sup>).

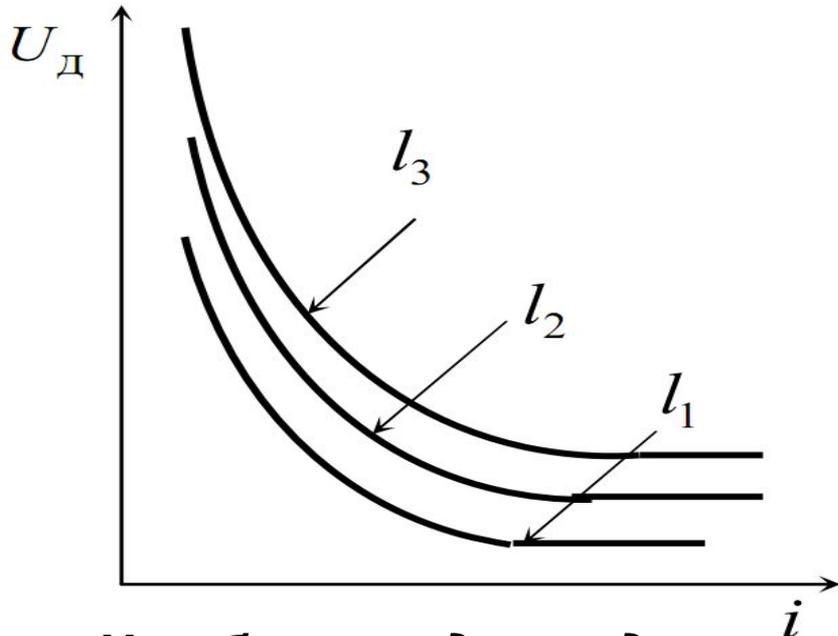
В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падение напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падения напряжения у анода и катода ( $U_A + U_K$ ). Такие дуги называются **короткими**.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги **значительно больше околоэлектродных**. Условия существования таких дуг, называемых **длинными**, определяются процессами в столбе дуги. Для длинных дуг  $U_d \approx U_{ст} = El$ .

**Напряженность электрического поля в столбе дуги обычно одинакова по длине.** Величина напряженности зависит от условий, в которых горит дуга, и от свойств дугогасящей среды и составляет 10–200 В/см. **Меньшие значения относятся к открытым дугам в воздухе при относительно больших токах, большие – к дугам, находящимся в потоке**

# ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуги *устанавливают связь между значением тока и падением напряжения между электродами при неизменной длине дуги и неизменных условиях ее горения.* Они позволяют представить дугу при гашении как нелинейное изменяющееся во времени сопротивление, включенное в размыкаемую **ВАХ, снятая при медленном**



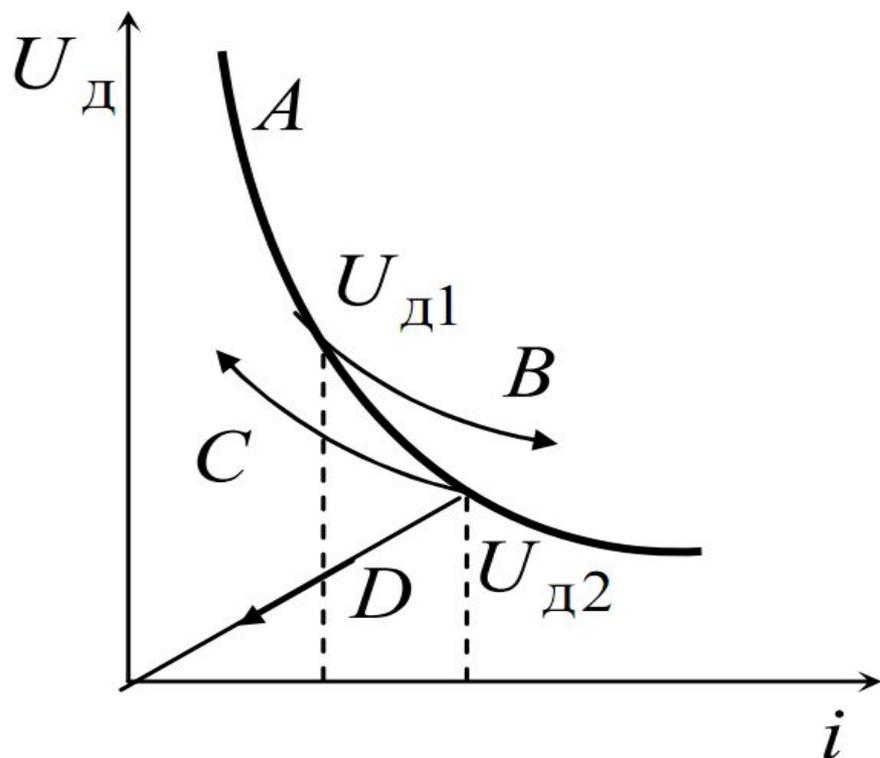
изменении тока, называется статической. **Статическая ВАХ** зависит от **расстояния между электродами (контактами), материала электродов, параметров среды, в которой горит дуга, и условий охлаждения.** С ростом тока увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация воздушного промежутка, резко падает электрическое сопротивление дуги и напряжение дуги. Каждому значению

**Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая ВАХ.** На **ВАХ** влияние оказывают также **направление перемещения дуги** или **поперечном направлении и условия ее зажигания.** Теоретическое определение ВАХ дуги в разных условиях основывается на решении системы уравнений, в которой основным является **уравнение теплового баланса.**

Выражение для статической ВАХ дуги: 
$$U_{\text{д}} = El = Ci^{-a}l$$

$U_{\text{д}}$  — напряжение дуги;  $i$  — ток дуги;  $E$  — напряженность электрического поля в столбе дуги;

# ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ



В реальных установках ток может изменяться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции столба дуги изменение сопротивления отстает от изменения тока. **ВАХ при быстром изменении тока называется динамической.** При возрастании тока **динамическая ВАХ** (кривая B) **идет выше статической** (кривая A), **так как сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток.** При уменьшении — ниже, поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая C).

**Динамическая ВАХ зависит от скорости изменения тока в дуге.**

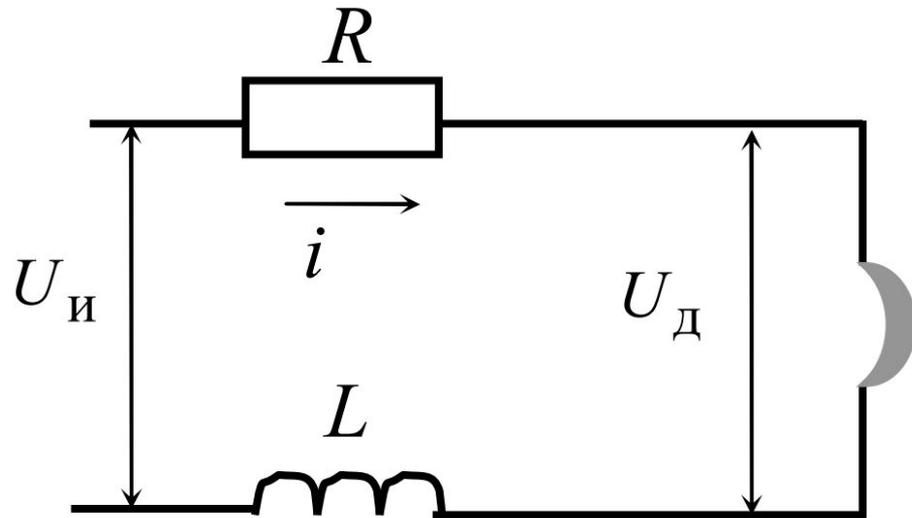
Если в цепь ввести большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то во время спада тока до нуля сопротивление дуги остается постоянным, тогда ВАХ изобразится прямой D, т.е. дуга ведет себя как металлический проводник и напряжение на дуге пропорционально току.

Теоретическое исследование динамических ВАХ дуги проводится на основе энергетических соотношений. **Математическое описание динамических ВАХ — основа для исследования и расчета динамического состояния электрических дуг и процессов**

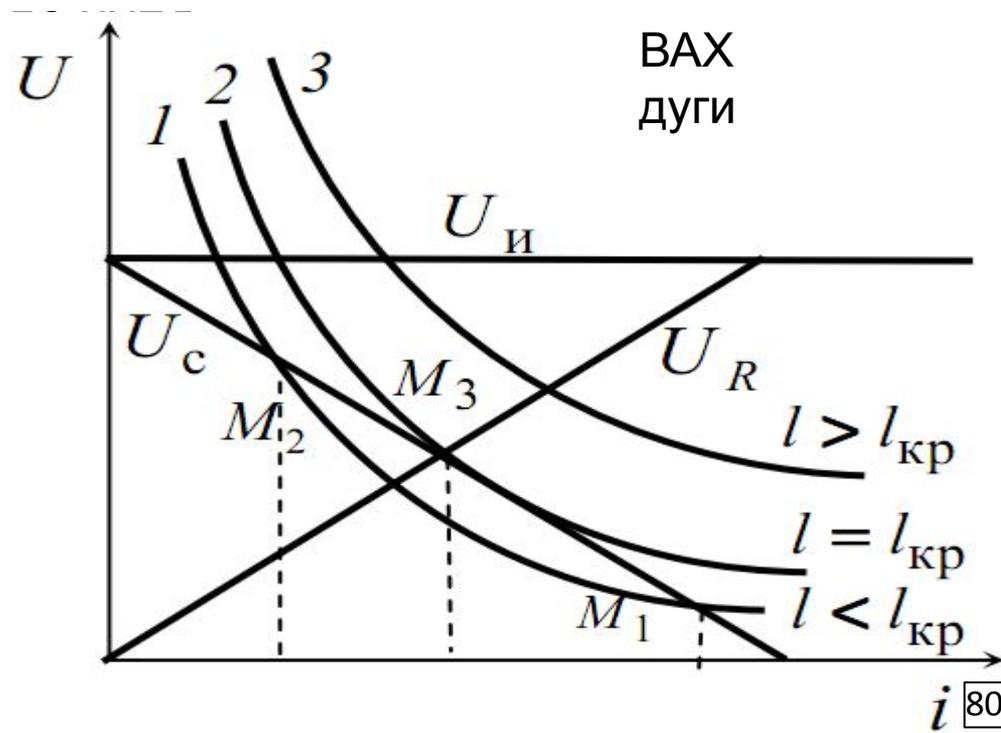
# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

Общее условие гашения электрической дуги может быть сформулировано следующим образом: **электрическая дуга между контактами аппарата погаснет и межконтактный промежуток приобретет свойства диэлектрика, если в каждый момент времени электрическая прочность промежутка будет выше напряжения на нем.** Если же в какой-либо момент времени напряжение на межконтактном промежутке станет выше прочности этого промежутка, то процесс гашения дуги прекратится.

Процесс гашения электрической дуги в цепях с источником постоянного напряжения можно рассматривать как нарушение устойчивости в системе,



Линейная цепь с дугой неизменной длины, имеющая источник постоянного



# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

Из уравнения равновесия напряжения  $U_{\text{и}} = Ri + L di / dt + U_{\text{д}}$  для этой цепи следует выражение для производной тока  $di / dt = (1 / L)(U_{\text{с}} - U_{\text{д}})$  (здесь  $U_{\text{с}} = U_{\text{и}} - Ri$  – воздействующее на дугу напряжение сети – реостатная характеристика).

Условие уменьшения тока дуги во времени ( $di / dt < 0$ ) выполняется, если при всех значениях тока ( $0 < i < \infty$ ) напряжение дуги  $U_{\text{д}} > U_{\text{с}}$ .

На ВАХ дуги показаны статические вольт-амперные характеристики дуги (кривые 1, 2, 3). Здесь же приведена величина напряжения источника  $U_{\text{и}}$  и вольт-амперная характеристика сопротивления цепи  $U_{\text{R}} = Ri = f(i)$ .

Длина дуги, при которой статическая вольт-амперная характеристика дуги касается прямой  $U_{\text{и}} - iR$ , называется *критической*.

Предельное условие для гашения дуги наступает при  $U_{\text{д}} = U_{\text{с}}$ , когда эти характеристики соприкасаются в некоторой точке  $M_3$ , т.е. когда длина дуги достигает критической ( $l = l_{\text{кр}}$ ) при заданных внешних условиях.

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

Можно показать, что в точке  $M_1$  существует условие стабильного горения дуги ( $di/dt = 0$ ), а в точке  $M_2$  – состояние неустойчивого равновесия в системе (случайные малые отклонения тока в ту или иную сторону приводят или к увеличению тока до  $I_1$ , или уменьшают его до нуля). Если по какой-то причине  $i < I_2$ , то  $U_d > U_c$ , а  $di/dt < 0$  и ток упадет до нуля. Если  $i > I_2$ , то  $U_d < U_c$ , т.е. в цепи оказывается избыточное напряжение, которое приведет к возрастанию тока до значения  $I_1$ . При любом значении тока  $I_2 < i < I_1$  ток будет возрастать до  $I_1$ .

Точка  $M_1$  является точкой устойчивого равновесия, так как при выходе из нее возникают процессы, возвращающие состояние цепи снова в эту точку. При  $i > I_1$  оказывается, что  $U_d > U_c$ , а  $di/dt < 0$ , т.е. для поддержания такого тока напряжения недостаточно. Ток в цепи будет падать до значения  $I_1$ , что приведет к устойчивому горению дуги.

*Гашение дуги постоянного тока* обеспечивается, если ВАХ дуги лежит выше реостатной характеристики отключаемой сети. Условия гашения дуги можно достичь поднятием вольт-амперной характеристики (за счет увеличения длины дуги до критической, интенсивного охлаждения, повышения давления среды, в которой горит дуга), увеличением  $R$  (за счет введения балластного сопротивления) или шунтированием дуги активным сопротивлением.

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

Напряжение на контактах в момент достижения током нулевого значения называется *напряжением гашения дуги*.

При  $i = 0$  уравнение  $U_{\text{и}} = Ri + Ldi / dt + U_{\text{д}}$  имеет вид

$$U_{\text{и}} = Ldi / dt + u_{\text{гаш}};$$

$$u_{\text{гаш}} = U_{\text{и}} - Ldi / dt.$$

Так как  $Ldi / dt < 0$ , можно написать, что

$$u_{\text{гаш}} = U_{\text{и}} + |Ldi / dt|_{i=0}.$$

Для оценки перенапряжения вводится понятие *коэффициент перенапряжений*:

$$k = u_{\text{гаш}} / U_{\text{и}} = 1 + |Ldi / dt|_{i=0} / U_{\text{и}}.$$

Из выражения для перенапряжения  $\Delta U = -Ldi / dt$  можно определить время угасания дуги

$$t_{\text{д}} = -\frac{L}{\Delta U} \int_I^0 di.$$

Решая уравнение ВАХ совместно с уравнением устойчивого состояния дуги  $U_{\text{и}} = U_{\text{д}} + iR$ , получим значение  $l$  в функции  $i$ :

$$l = \frac{i^a U_{\text{и}}}{C} \left(1 - \frac{iR}{U_{\text{и}}}\right) = \frac{i^a U_{\text{и}}}{C} \left(1 - \frac{i}{I}\right),$$

где  $I$  – ток цепи, ограниченный собственным сопротивлением цепи  $R$ . 83

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

Если взять производную от  $l$  по  $i$  и приравнять ее нулю (условие максимума), то получим критический ток

$$i = i_{\text{кр}} = I \frac{a}{1+a} = \frac{U_{\text{и}}}{R} \left( \frac{a}{1+a} \right).$$

Подстановкой можно определить критическую длину дуги

$$l_{\text{кр}} = \frac{a^a}{(1+a)^{1+a}} \cdot \frac{I^a U_{\text{и}}}{C}.$$

Умножив обе части уравнения электрического равновесия в цепи на  $idt$  и проинтегрировав полученное выражение, будем иметь

$$\int_0^t U_{\text{и}} idt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^t u_{\text{д}} idt + \int_{I_{\text{к}}}^0 Lidt.$$

После преобразований получим выражение для определения энергии дуги

$$A_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{д}}} u_{\text{д}} idt = \int_0^{t_{\text{д}}} U_{\text{и}} idt - \int_0^{t_{\text{д}}} i^2 R dt + LI^2 / 2.$$

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

При электродуговом размыкании цепей переменного тока в межконтактном промежутке протекают три процесса: горение дуги в подавляющей части каждого полупериода тока; распад плазмы столба дуги в течение весьма короткого времени в конце каждого полупериода тока (в так называемой околонулевой области тока) при определенном характере воздействия на дугу окружающей среды и восстанавливающегося напряжения сети; восстановление электрической прочности межконтактного промежутка. При переменном токе нарастающую с относительно большой скоростью прочность межконтактного промежутка называют восстанавливающейся прочностью.

Дуга переменного тока обычно гасится легче, чем дуга постоянного тока, так как при переменном токе в дуге (независимо от степени ионизации дугового промежутка) ток переходит через ноль каждый полупериод, т.е. каждый полупериод дуга гаснет и зажигается вновь. Задача гашения дуги переменного тока заключается в том, чтобы создать такие условия, при которых ток не восстанавливался бы после прохождения через ноль.

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

*Условие гашения дуги переменного тока* определяется на основе сопоставления кривых восстанавливающегося напряжения сети и восстанавливающейся прочности за переходом тока через нулевое значение. Для гашения дуги необходимо, чтобы кривая восстанавливающейся прочности лежала выше кривой восстанавливающегося напряжения.

Оценка возможных условий гашения дуги переменного тока основывается на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства области столба дуги, и уравнений, характеризующих переходные электромагнитные процессы в размыкаемой цепи для околонулевой области тока. Для решения системы уравнений применяются различные приближенные методы: аналитические, численные, графо-аналитические, методы теории устойчивости.

При размыкании электрической цепи на контактах восстанавливается напряжение. В зависимости от параметров цепи процесс восстановления напряжения может быть апериодическим или колебательным.

*Апериодический процесс* имеет место, если

$$\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 > \frac{1}{LC},$$

где  $r$  и  $C$  – активное сопротивление и емкость, включенные параллельно с контактами.

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

В случае апериодического процесса восстанавливающееся напряжение  $u_B$  изменяется следующим образом:

$$u_B = U_0 \left[ 1 + \frac{1}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \right],$$

где  $U_0$  – мгновенное значение напряжения источника в момент перехода тока через нуль.

Корни характеристического уравнения определяются на основе решения характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Скорость восстанавливающегося напряжения определяется как

$$du_B / dt = U_0 \frac{p_1 p_2}{p_1 - p_2} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}).$$

# УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

*Колебательный процесс* имеет место, если

$$\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 < \frac{1}{LC}.$$

Изменение напряжения на контактах при колебательном процессе имеет вид

$$u_B = U_0 \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t \right) e^{\alpha t} \right],$$

где  $\omega_0 = \sqrt{1/LC - (1/4)[R/L - 1/(rC)]^2}$  – угловая частота свободных колебаний;  $\alpha = -(1/2)[R/L + 1/(rC)]$  – показатель затухания.

При  $\omega_0 \gg \alpha$

$$u_B = U_0 [1 - e^{\alpha t} \cos \omega_0 t].$$

Наибольшее значение восстанавливающегося напряжения характеризуется коэффициентом превышения амплитуды

$$K = U_{B \max} / U_0 = 1 + e^{\alpha \frac{\pi}{\omega_0}}.$$

Средняя скорость восстановления напряжения (первая четверть периода собственных колебаний  $T$ )

$$v_{\text{ср}} = du_B / dt_{\text{ср}} = 4f_0 U_0,$$

где  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ .

# СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ДУГИ. ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Задача конструирования дугогасительного устройства (ДГУ) состоит в том, чтобы обеспечить гашение дуги за малое время с допустимым уровнем перенапряжений, при минимальном объеме раскаленных газов и износе частей аппарата, с минимальным звуковым, тепловым и световым эффектами.

Гашение электрической дуги обеспечивается увеличением ее электрического сопротивления, снижением тока до критических значений и рассеянием остаточного газоразрядного канала.

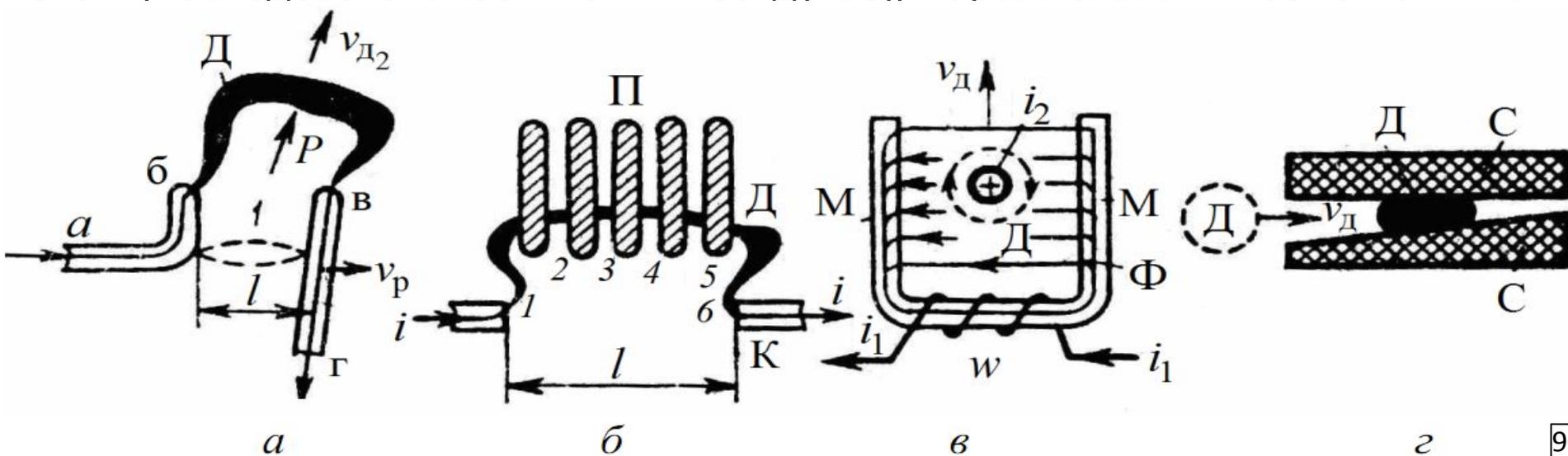
Для гашения дуги постоянного тока стремятся повысить напряжение на дуге (и ее сопротивление) или путем ее растяжения, или путем повышения напряженности электрического поля в дуговом столбе, а чаще всего – одновременно тем и другим путем. Также можно добиваться увеличения суммы падений напряжений у электродов ( $U_A + U_K$ ). Последнее достигается увеличением количества металлических электродов, разбивающих дугу на ряд коротких дуг. Увеличение напряженности в столбе дуги достигается путем эффективного охлаждения дуги и подъема давления среды, в которой она горит. Охлаждение дуги можно создать за счет перемещения дуги в воздухе или газе, за счет их перемещения относительно дуги либо размещения дуги в узкой щели, стенки которой имеют высокую теплопроводность и дугостойкость.

# СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ДУГИ. ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Простейший способ гашения дуги — механическое растяжение столба дуги. При небольших токах (примерно до 10 А) дуга 1 (рис. а) растягивается между контактами на длину  $l$  и не выходит из межконтактного промежутка. При значительных токах столб дуги 2 (рис. а) выдувается вверх под действием сил, вызываемых тепловыми потоками, или сил электродинамического взаимодействия тока дуги  $D$  на участке бв с токами в токоведущих элементах аб и вг. В таких устройствах гасится свободная (открытая) дуга.

Широко применяются **дугогасительные решетки** (рис. б), набранные из стальных пластин П, на которые выдувается электрическая дуга. Пластины, разбившие столб дуги на ряд коротких дуг 1-6, являются своеобразными радиаторами, интенсивно их охлаждающими.

Весьма часто в ДГУ постоянного тока применяют **магнитное дутье** (рис. в), т.е. создают в зоне горения дуги поперечное магнитное поле, которое увеличивает скорость перемещения (и растяжения) дуги и способствует вхождению столба дуги в узкие щели между изоляционными стенками (рис. г). Магнитное поле может быть создано обмотками, обтекаемыми отключаемым током (последовательное магнитное дутье), параллельными обмотками или



# СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ДУГИ. ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

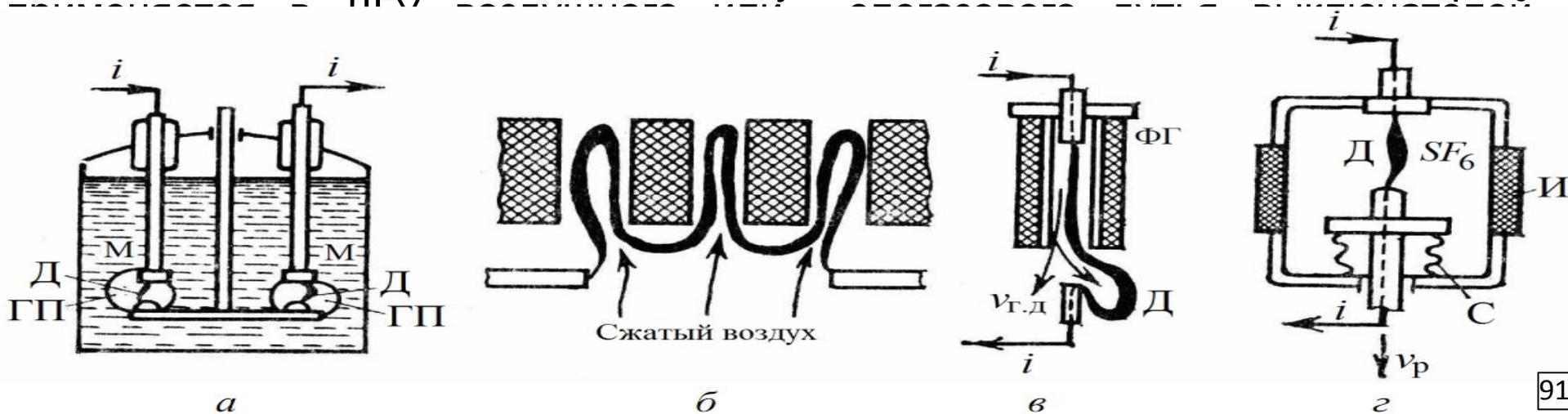
## ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

При гашении дуги в трансформаторном масле (рис. а) дуга (Д) разлагает масло (М) и образуются газопаровыи струи (ГП), обладающие высокой теплопроводностью. Возникающее бурное перемешивание смеси из масла, его паров и газов обуславливает гашение дуги.

**Поток сжатого воздуха** (рис. б), воздействующий на дугу, интенсивно ее охлаждает и растягивает столб, особенно если на пути находятся изолирующие перегородки.

Для гашения дуги можно использовать **эффект выделения газов** (рис. в) из некоторых материалов. Дуга, соприкасаясь с фибровой трубкой (ФТ), дает поток газов, который охлаждает и гасит дугу.

В герметизированных ДГУ (рис. г) дугогасящей средой является **элегаз** или **вакуум**. Хорошие дугогасящие свойства элегаза определяются его высокой теплоотводящей способностью и спецификой химических реакций в условиях гашения дуги. Резкое снижение концентрации газовых частиц в вакууме снижает возможность возникновения носителей тока (электронов и ионов). В результате пробивные напряжения промежутков в вакууме повышаются в 4-5 раз в сравнении с воздухом при атмосферном давлении. При прохождении переменного тока через нуль возможность для переноса тока исчезает и дуга гасится. Способ гашения электрической дуги, связанный с интенсивным охлаждением столба дуги в потоках сжатого газа, широко



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Контакторы и пускатели – это силовые аппараты, коммутирующие электрические цепи нагрузки в нормальных режимах работы электрооборудования.

## ПОНЯТИЕ КОНТАКТОР. КЛАССИФИКАЦИЯ

**Контактор** – электрический аппарат дистанционным управлением, предназначенный для частых коммутаций силовых электрических цепей при нормальных токах нагрузки и для редких отключений при токах перегрузки.

Электромагнитные контакторы используются:

- ✓ для коммутации цепи по команде оператора,
- ✓ для защиты электрооборудования от понижения напряжения в сети при соответствующем выборе параметров электромагнитных приводов.

Контактор имеет два коммутационных положения, соответствующих

<b>контакторы</b>	По роду тока коммутируемой цепи	контакторы постоянного тока
		контакторы переменного тока
	В зависимости от привода	контакторы электромагнитные
		контакторы пневматические
	По положению главных контактов	контакторы с нормально открытыми контактами
		контакторы с нормально закрытыми контактами
		контакторы со смешанными контактами

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНТАКТОРАХ.

## Основные технические данные контакторов

**Номинальный ток главных контактов  $I$**  составляет 3–4000 А, коммутируемый ток достигает  $(6-10)I$  (например, пусковые токи асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором). Для режима пуска двигателей с фазным ротором и торможения противовключением характерны 2,5–4-кратные токи перегрузки.

**Номинальные напряжения коммутируемых цепей** – 220, 440, 750 В при постоянном токе; 380, 660 В – при переменном токе.

**Механическая износостойкость** контактора определяется числом циклов включение-отключение без замены его узлов и деталей (ток цепи при этом равен нулю) и составляет  $(10-20)10^6$  операций. Согласно стандарту различают 5 классов механической износостойкости.

**Коммутационная износостойкость** определяется таким числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка  $(2-3)10^6$ .

**Собственное время срабатывания** (время от момента подачи питания на катушку до момента касания контактов) при включении состоит из времени нарастания потока до значения потока трогания и времени движения якоря. У контакторов постоянного тока большая часть времени тратится на нарастание потока (0,15–0,25 с). Для контакторов переменного тока время срабатывания составляет 0,03–0,05 с (переходный процесс при включении протекает в течение 1/4 периода).

**Собственное время отключения (отпускания)** – время от момента снятия напряжения с катушки до момента размыкания контактов. Для контакторов постоянного тока время отпускания составляет 0,07–0,2 с, для контакторов переменного тока – 0,02 с.

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНТАКТОРАХ.

## Требования, предъявляемые к контакторам, и условия их работы определены стандартами

Контакторы должны обладать высокой механической и коммутационной износостойкостью, технологичностью конструкции, высокой надежностью; обеспечивать длительный срок службы при большой частоте включений (до 3600 включений в час).

## Категории применения контакторов обусловлены различными

режимами отключения электрических цепей переменного тока: **контакторами**

Стандарты регламентируют следующие режимы отключения контакторами:

- АС-1 – активная или малоиндуктивная нагрузка;
- АС-2 – пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противовключением;

- АС-3 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке;

- АС-4 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение неподвижных или медленно вращающихся двигателей. Торможение противовключением.

Для **контакторов постоянного тока** существуют следующие категории применения:

- DC-1 – активная или малоиндуктивная нагрузка;
- DC-2 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

- DC-3 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при неподвижном или медленно вращающемся роторе;

- DC-4 – пуск электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

- DC-5 – пуск электродвигателей постоянного тока с последовательным

Условия отключения цепи контакторами во многом определяются отношением индуктивности  $L$  нагрузки к ее активному сопротивлению  $R$ ; чем выше это отношение, тем труднее условия отключения. Легкие условия наблюдаются при отключении электрических печей и сопротивлений, а наиболее тяжелые – при отключении заторможенных двигателей. Так, категории применения АС1 соответствует режим отключения цепи со слабоиндуктивной нагрузкой, когда угол сдвига фаз между током и напряжением цепи близок к нулю. В этих условиях мгновенное значение возрастающего напряжения промышленной частоты (т.е. напряжение источника при переходе через нуль) невелико и скорость восстановления напряжения за переходом тока через нуль мала, процесс отключения цепи переменного тока оказывается для контактора очень легким.

При отключении вращающихся двигателей условия отключения определяются степенью скольжения ротора относительно поля статора. Поле статора в асинхронном двигателе создает основной магнитный поток. При отключении статорной обмотки поток должен исчезнуть, но это вызывает в роторе ток, стремящийся поддержать поток. Поток, создаваемый током ротора, неподвижен по отношению к ротору, но вращается вместе с ротором относительно статора и наводит в нем ЭДС, противоположную по направлению напряжению сети. Чем быстрее вращается ротор (чем меньше скольжение), тем ниже падение напряжения на контактах контактора. ЭДС затухает во времени, так как вращающийся по инерции ротор теряет запас кинетической энергии и ток ротора уменьшается ввиду прекращения поступления энергии из сети. В момент перехода тока через ноль в цепи статора скорость восстановления напряжения, прямо пропорциональная разности напряжения сети и ЭДС, небольшая и условия гашения дуги будут легкими.

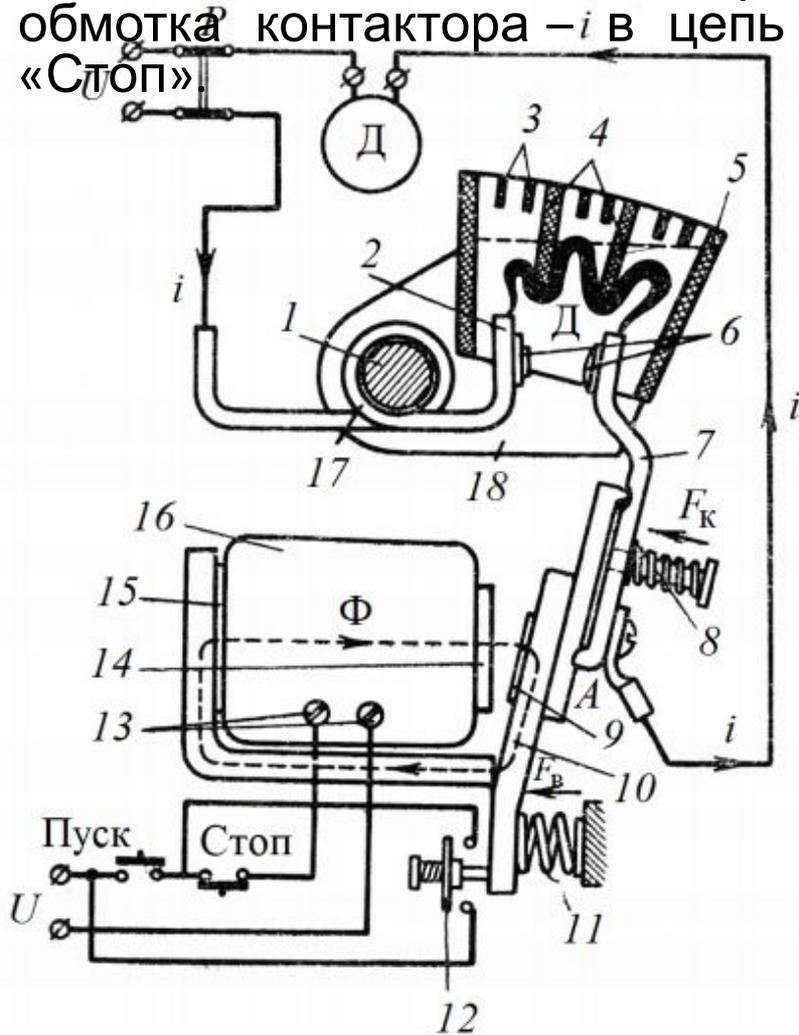
Условия отключения цепи наиболее тяжелые при отключении пусковых токов при неподвижном роторе (в этом случае практически отсутствует противоЭДС, скорость восстановления напряжения большая и гашение дуги затруднено).

# УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КОНТАКТОРА

Контактор имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительное устройство, привод, систему вспомогательных слаботочных контактов (блок-контактов), предназначенных для согласования работы контактора с другими устройствами. В течение срока службы изношенные контакты могут несколько раз заменяться новыми. Главные контакты контактора включены в силовую цепь двигателя Д, обмотка контактора –  $i$  в цепь управления, содержащую кнопки «Пуск» и «Стоп».

При отключении силовой цепи напряжение с обмотки 16, расположенной на сердечнике 15, снимается и подвижная система под действием возвратной пружины 11 приходит в нормальное состояние.

Возникающая при расхождении главных контактов дуга Д гасится в дугогасительной камере 5, имеющей изоляционные перегородки 4, которые способствуют растяжению дуги, увеличению ее длины и сопротивления. На выходе камеры установлены металлические пластины 3 пламягасительной решетки. Эти пластины рассеивают остаточный столб дуги. Пламягасительная решетка препятствует выходу ионизированных газов за пределы камеры. Быстрый выход дуги с контактов в камеру



Обмотка этой системы 17 включена последовательно в цепь главного тока и размещена на стальном сердечнике 1. Две стальные пластины – полюса 18, расположенные по бокам сердечника 1, подводят создаваемое обмоткой 17 магнитное поле к зоне горения дуги в камере. Дугогасительная камера 5 изготавливается из дугостойкого изоляционного материала (например, керамики).

Включение контактора произойдет, если подать напряжение на зажимы 13 обмотки 16 приводного электромагнита. Это обеспечивается нажатием кнопки «Пуск». Якорь 10 электромагнита притянется к сердечнику, преодолев силы противодействия возвратной 11 и контактной 8 пружин. При включении контактора кнопка «Пуск» окажется зашунтированной блоком контактами 12 контактора. При ее отпуске цепь обмотки 16 не будет разорвана, а контактор останется во включенном состоянии.

Установкой полюсного наконечника 14 на сердечник электромагнита достигается увеличение электромагнитной силы и видоизменение тяговой характеристики. Немагнитная прокладка (например, латунная) 9 на якоре 10 предназначена для уменьшения силы, обусловленной остаточной индукцией, и предохранения якоря от залипания при снятом напряжении с обмотки.

Соприкосновение контактов 7 и 2 происходит раньше, чем якорь электромагнита полностью притянется к полюсу. По мере движения якоря подвижный контакт «проваливается», упираясь своей верхней частью в неподвижный контакт 2. Он повернется на некоторый угол и вызовет дополнительное нажатие контактной пружины 8. Возникает так называемый провал контактов – смещение подвижного контакта на уровне точки его касания с неподвижным в случае, если неподвижный контакт будет удален. Провал контактов обеспечивает надежное замыкание цепи, когда толщина контактов уменьшается вследствие выгорания их материала под действием электрической дуги. Величина

После соприкосновения контактов происходит перекатывание подвижного контакта 7 по неподвижному 2. Контактная пружина создает определенное нажатие в контактах, поэтому при перекатывании происходит разрушение окисных пленок и других химических соединений.

При перекатывании точки касания контактов переходят на новые места контактной поверхности, не подвергавшиеся воздействию дуги и являющиеся поэтому чистыми. Все это уменьшает переходное сопротивление контактов и улучшает условия их работы, однако повышает механический износ контактов.

Благодаря предварительному натяжению контактной пружины 8 в момент соприкосновения подвижный контакт оказывает давление на неподвижный. Вследствие этого переходное сопротивление контактов в момент их касания будет небольшим и контактная площадка не разогреется при включении до значительной температуры. Предварительное натяжение контактной пружины 8 позволяет снизить вибрацию подвижного контакта при ударе его о неподвижный. Это предохраняет контакты от приваривания при включении электрической цепи.

Контактные накладки 6, выполненные из специального материала (например, серебра), предназначены для улучшения условий длительного прохождения тока через замкнутые контакты во включенном состоянии. В других случаях применяются контактные накладки из дугостойкого материала (например, металлокерамики) для уменьшения износа контактов под воздействием электрической дуги при частых отключениях цепи.

Совершенствование конструкций контакторов и магнитных пускателей имеет своей целью повышение износостойкости достижение простоты

Число контактов у контакторов переменного тока может быть от 1 до 5. Наибольшее распространение получили трехполюсные контакторы (они входят в комплект магнитных пускателей). Дугогасительное устройство по способу гашения дуги отличается от аналогичных устройств контакторов постоянного тока тем, что у контакторов переменного тока гашение дуги осуществляется с помощью коротких дуг, в то время как у контакторов постоянного тока дуга гасится с помощью магнитного дутья.

Втягивающая катушка контакторов переменного тока отличается тем, что основным параметром (величиной электрического сопротивления является индуктивное сопротивление, а не омическое, как в катушке постоянного тока). Поэтому число витков втягивающей катушки на переменном токе примерно в 10 раз меньше, чем на постоянном.

Магнитная система контакторов переменного тока выполняется шихтованной из листовой электротехнической стали. Магнитные системы обычно П-, Ш-образные и соленоидные.

Для увеличения износостойкости и надежности применяют гибридные контакторы. В таких контакторах имеется полупроводниковая приставка, предназначенная для шунтирования главных контактов.

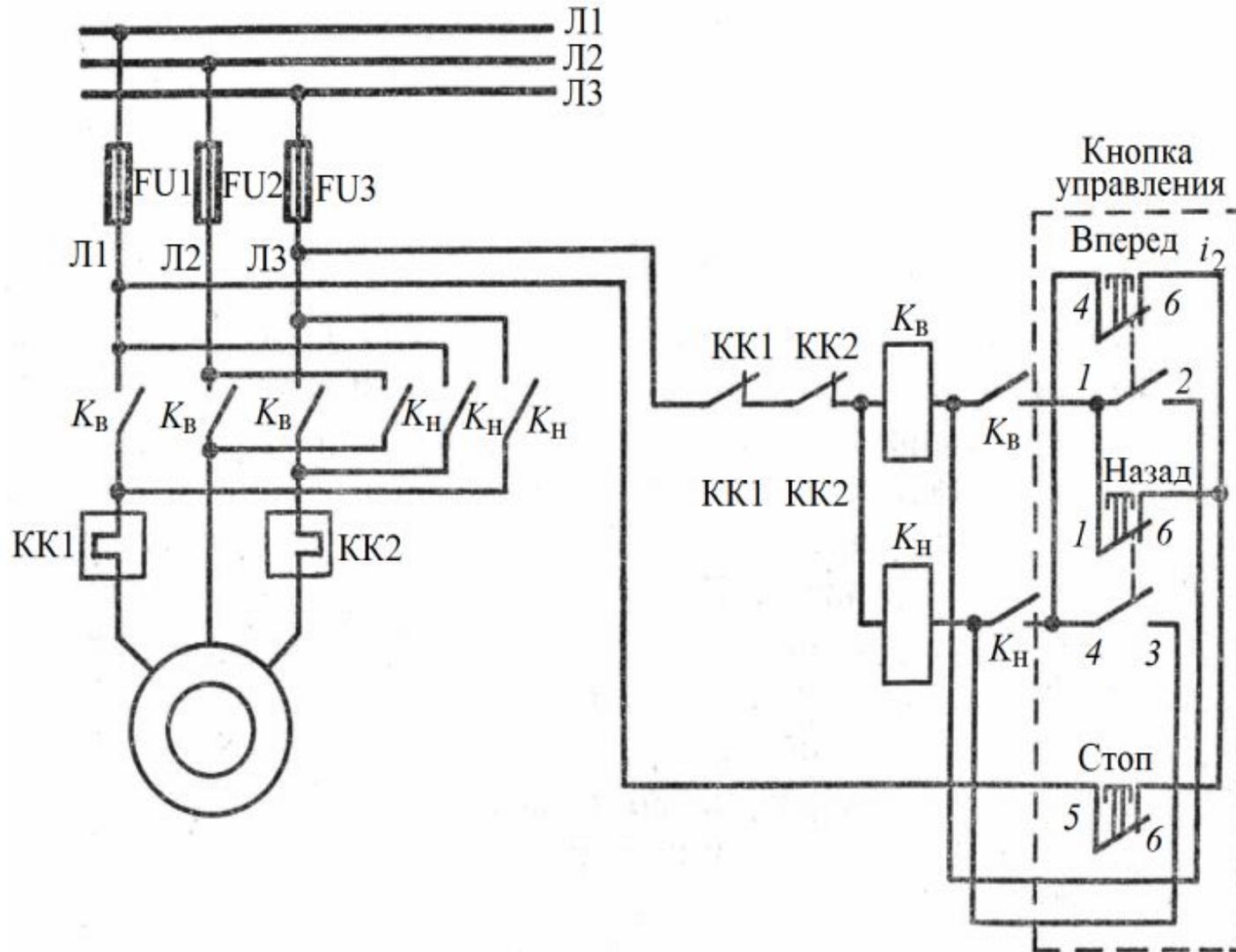
В гибридных контакторах дуга полностью не устраняется, но она существует на контактах в течение короткого времени перехода тока с контактов в полупроводниковую приставку. Переход тока в полупроводниковую приставку начинается с момента достижения напряжением дуги значения, равного пороговому напряжению тиристора. Износ главных контактов от этой кратковременной дуги небольшой и их коммутационная износостойкость соизмерима с механической.

Существуют также герметизированные (вакуумные, герметичные) контакторы. Контактная система герметизированных контакторов работает в среде инертных газов (или в вакууме). Вакуумные контакторы являются разновидностью герметизированных контакторов. Они обладают высокой дугогасительной способностью и высокой электрической

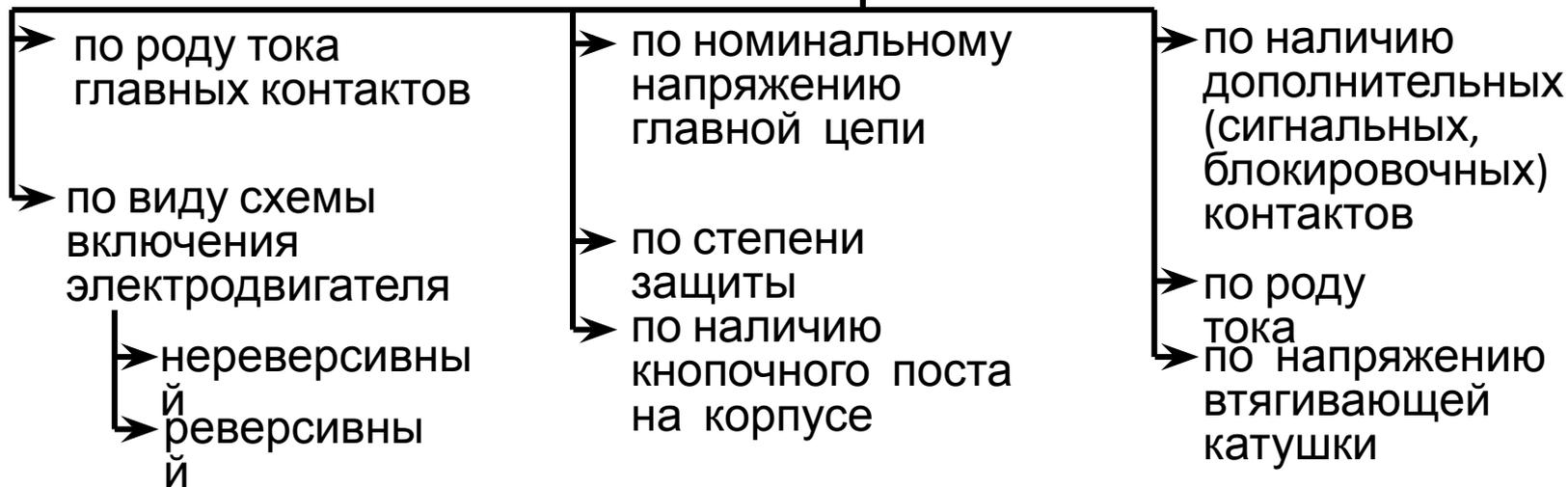
# МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

**Магнитный пускатель** – электрический аппарат, предназначенный для пуска, реверса и отключения электродвигателей. Магнитный пускатель, – по существу, контактор переменного или постоянного тока для коммутации цепей двигателей (при переменном токе – асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором).

В магнитный пускатель может встраиваться элемент (наиболее часто – тепловое реле), который осуществляет защиту от токов перегрузки и «потери фазы». В этом случае магнитный пускатель представляет, по существу, комплектное устройство, включающее контактор и реле.



# МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ



Такой пускатель, помимо защиты и пуска двигателя, позволяет осуществить его реверс с помощью изменения последовательности чередования фаз. Реверсивный пускатель содержит два контактора, якоря которых соединены между собой рычагом механической блокировки.

При пуске «Вперед» замыкаются контакты 1–2. Цепь обмотки контактора КВ замыкается через размыкающие контакты 1–6 кнопки «Назад». Одновременно размыкаются размыкающие контакты 4–6 кнопки «Вперед», разрывается цепь катушки контактора КН. При нажатии кнопки «Назад» вначале размыкаются контакты 1–6, обесточивается катушка контактора КВ и отключаются его контакты. Затем контактами 4–3 включается контактор КН, после чего замыкаются его контакты. При этом очередность фаз питания двигателя становится обратной. При одновременном нажатии кнопок «Вперед» и «Назад» оба контактора не включатся. Это есть электрическая блокировка. Часто применяется комбинированная блокировка для устранения перегрева катушки.

# РЕЛЕ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Реле** – электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) сигнала до определенной заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) сигнала. При этом один из сигналов является электрическим.

## Реле состоит из трех основных функциональных элементов

- **Воспринимающий элемент** реагирует на входной параметр (ток, напряжение и т.д.) и преобразует его в физическую величину (например, электромагнитную силу), необходимую для работы реле. Конструктивное исполнение воспринимающего элемента определяется в основном параметром, на которое должно реагировать реле. В реле тока и напряжения воспринимающий элемент – электромагнит, в реле давления – мембрана, в реле температуры – биметаллическая пластина.
- **Промежуточный элемент** (противодействующие пружины и успокоители в контактном реле) передает первичное воздействие от воспринимающего элемента на исполнительный элемент.
- **Исполнительный элемент** (контакты в контактном реле) воздействует на управляемую цепь.

**Реле** относится к **аппаратам прерывистого управления**, так как его рабочее состояние определяется двумя крайними положениями исполнительного элемента: «**включено**» и «**выключено**».

# РЕЛЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ

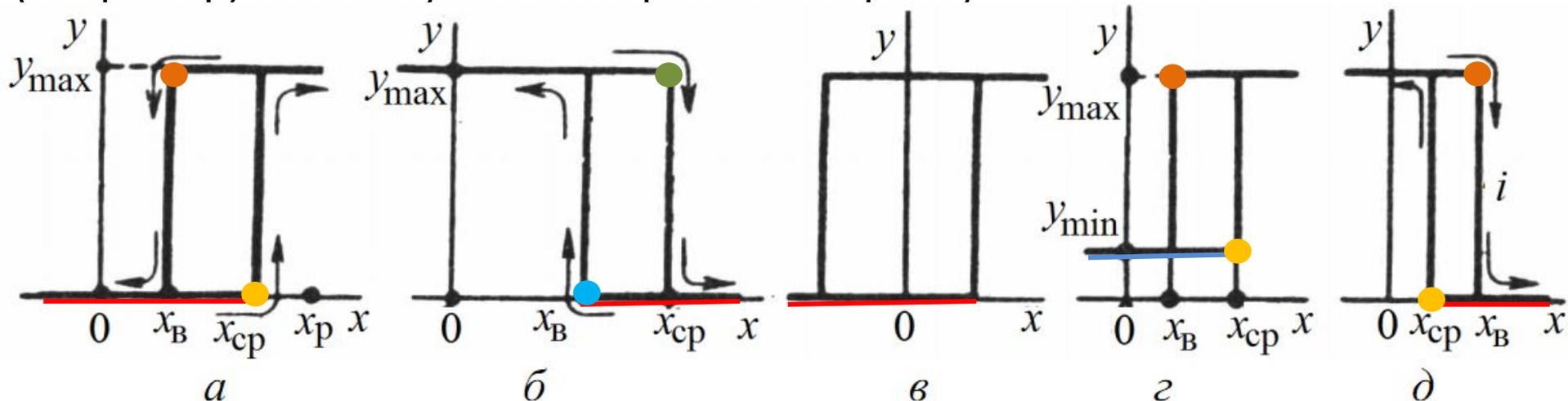
Реле	По области применения (с их помощью можно осуществлять пуск, реверсирование, торможение двигателей)	реле для схем автоматики	
		реле для управления	
		реле для регулирования	
		реле для защиты электропривода	
		реле для защиты энергосистем	
	По принципу действия	электромагнитные	
		поляризованные	
		магнитоэлектрические	
		электродинамические	
		индукционные	
		тепловые	
		температурные	
		полупроводниковые	
	другие		
	В зависимости от входного сигнала	реле, реагирующие на максимальное или минимальное значения	тока
напряжения			
мощности			
частоты			
другое			
Дифференциальное реле (реле реагирует на разность значений входных сигналов)			
Реле обратной мощности (реле реагирует на			
Реле реагирует на изменение скорости входного сигнала			

# РЕЛЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Реле	По принципу воздействия на управляемую цепь	контактные реле (воздействуют на управляемую цепь путем размыкания и замыкания при помощи контактов)		
		бесконтактные реле	полупроводниковые	осуществляют управление за счет скачкообразного (релейного) изменения параметров (активного сопротивления, индуктивности) своего исполнительного элемента, включенного в управляемую цепь
магнитные				
По способу включения воспринимающего элемента	По способу воздействия исполнительного элемента на объект управления	первичные реле (включаются в контролируемую цепь непосредственно)		
		вторичные реле (через измерительные трансформаторы (тока и напряжения))		
		промежуточные реле (работают от исполнительных элементов других аппаратов и предназначены для усиления сигнала, увеличения числа управляемых цепей)		
По способу воздействия исполнительного элемента на объект управления	По способу воздействия исполнительного элемента на объект управления	реле прямого действия (реле своим исполнительным элементом непосредственно управляет цепью)		
		реле косвенного действия (такое реле воздействует своим исполнительным элементом на цепь через другие аппараты)		
В зависимости от времени срабатывания	В зависимости от времени срабатывания	безинерционные (время срабатывания меньше 0,001 с)		
		<del>сверхбыстродействующие (время срабатывания меньше 0,005 с)</del>		
		быстродействующие (время срабатывания меньше 0,05 с)		
		нормальные (время срабатывания 0,05–0,25 с)		
		замедленные (время срабатывания 0,25–1 с)		
		реле времени (время срабатывания зависит от установки)		

# РЕЛЕ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основная характеристика реле – характеристика управления (характеристика «вход»–«выход»), представляющая зависимость выходного сигнала  $y$  (например, ток через контакты реле) от входного  $x$  (например, ток в катушке электромагнита реле)



В контактных реле при отсутствии входного сигнала контакты разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Для бесконтактных реле сопротивление в управляемой цепи достаточно велико и ток имеет минимальное значение.

Значение входного сигнала, при котором происходит скачкообразное увеличение выходного сигнала при замыкающем контакте (рис. а, г, д) или уменьшение выходного сигнала при размыкающем контакте (рис. б), называется **величиной (параметром) срабатывания**  $x_{ср}$ . При  $x=x_{ср}$  выходной параметр скачком меняется от  $y_{min}$  до  $y_{max}$  (происходит срабатывание реле).

**Величина (параметр) возврата**  $x_B$  – значение входного сигнала, при котором происходит скачкообразное уменьшение выходного сигнала при замыкающем контакте (рис. а, г, д) или увеличение выходного сигнала при размыкающем контакте (рис. б)

# РЕЛЕ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И

## ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Время срабатывания** – время с момента подачи сигнала на срабатывание до начала возрастания или уменьшения выходного сигнала (зависит от конструкции реле, схемы его включения и входного сигнала).

**Время возврата** – время с момента подачи сигнала на отключение до достижения минимального или максимального значения выходного сигнала называется.

**Коэффициент запаса** – отношение входного сигнала к параметру срабатывания ( $k_z = x_{\text{раб}} / x_{\text{сп}}$ ).

**Коэффициент возврата** – отношение параметра возврата к параметру срабатывания ( $k_v = x_v / x_{\text{сп}} = 0,2-0,99$ ).

**Коэффициент усиления** – отношение максимальной мощности нагрузки в управляемой (выходной) цепи к минимальной мощности входного сигнала срабатывания.

**Уставка по входному сигналу** – значение входного сигнала, при котором происходит срабатывание или возврат.

**Чувствительность** – минимальная входная мощность, которая еще способна вызвать скачкообразное изменение выходной величины (в электромагнитном реле чувствительность характеризуется МДС срабатывания и выражается через минимальные ток или напряжение срабатывания).

# РЕЛЕ. ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Требования, предъявляемые к реле, определяются их назначением.

К реле защиты энергосистем предъявляются требования:

- ✓ **Селективность** (способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы).
- ✓ Высокое **быстродействие** позволяет снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии.
- ✓ Увеличение **чувствительности** позволяет улучшить качество электротехнических устройств. Например, повышение чувствительности релейной защиты позволяет сократить длину линии электропередачи, которая не может быть защищена от аварийных режимов.
- ✓ Высокая **надежность** реле не позволяет развиваться тяжелым авариям, приводящим к недоотпуску большого количества электроэнергии.

Реле защиты энергосистем эксплуатируются, как правило, в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, пыли и газов, вызывающих коррозию. Так как аварийные режимы в энергосистеме редки, к этим реле не предъявляются высокие требования в отношении износостойкости.

**Реле для управления и защиты электроприводов** работают в тяжелых условиях эксплуатации: возможны удары, вибрация, воздух часто засорен пылью или агрессивными производственными примесями.

Так как частота включения в современных схемах электропривода достигает 1000–1200 и более включений в час, реле управления должны иметь **механическую и электрическую износостойкость** до  $(1-10)10^6$  циклов. К таким реле предъявляют определенные требования в отношении **вибростойкости**.

К реле для схем автоматики предъявляется требование **высокой надежности**.

# ТИПЫ РЕЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

Электромагнитные реле благодаря простоте конструкции и надежности в работе широко применяются в схемах электропривода и в схемах защиты энергосистем.

Работа электромагнитных реле основана на электромагнитном принципе. Такие реле приводятся в действие с помощью электромагнитов постоянного или переменного тока. Основными системами в конструкции электромагнитных реле тока и напряжения являются: электромагнитная, механическая (механизм), контактная.

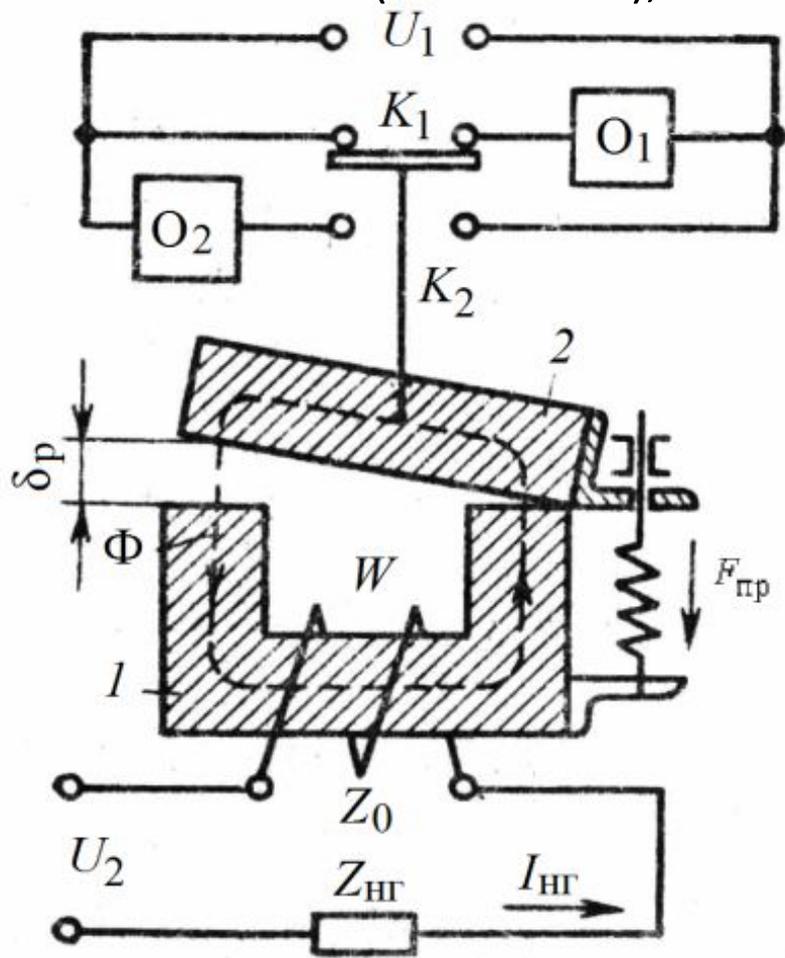


рис. изображена схема электромагнитного реле, контролирующего значение тока нагрузки  $I_{нГ}$  в цепи. Сопротивление  $Z_0$  обмотки реле  $W$  практически не влияет на величину  $I_{нГ}$ , так как  $Z_{нГ} \gg Z_0$ .

При достижении током  $I_{нГ}$  критического значения электромагнитная сила  $F$  притяжения якоря 2 к магнитопроводу 1 оказывается достаточной для преодоления силы возвратной пружины. Якорь притягивается, контакты  $K_1$  размыкаются и отключают объект управления  $O_1$ , а контакты  $K_2$  замыкаются и включают объект управления  $O_2$  под напряжение  $U_1$ .

При уменьшении тока  $I_{нГ}$  до определенного значения сила  $F$  будет недостаточна для удержания якоря. Под действием силы возвратной пружины  $F_{пр}$  якорь перейдет в первоначальное положение и контакты  $K_1$  и  $K_2$  переключат объекты  $O_1$  и  $O_2$ . Таким образом,

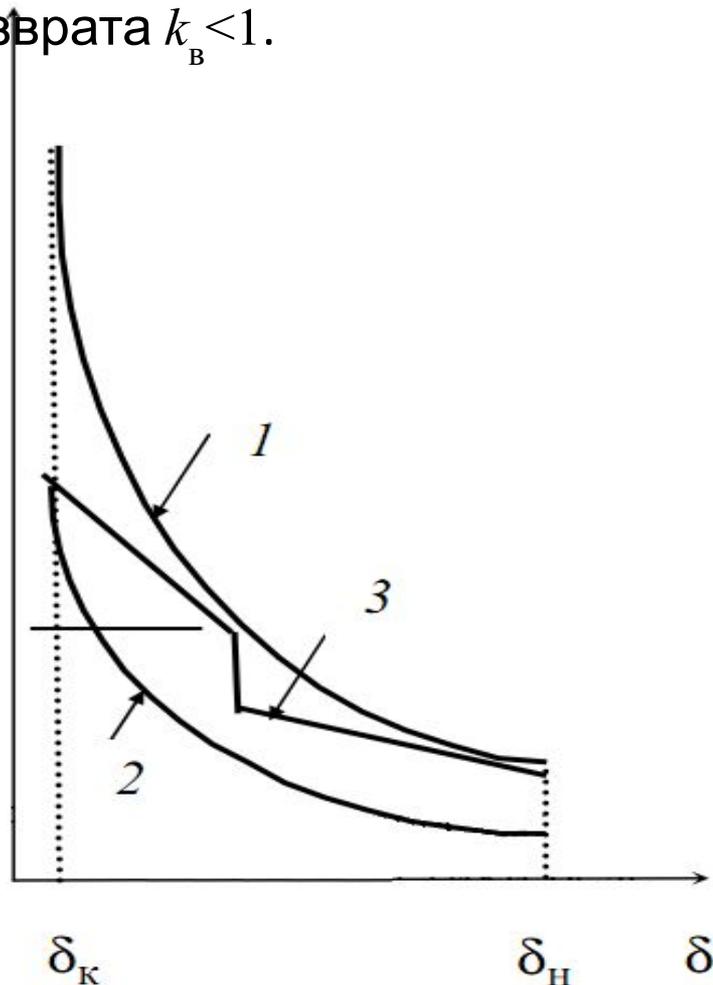
# ТИПЫ РЕЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

Для контроля уменьшения входного сигнала используют

**минимальные реле (напряжения или тока)**, контакты которого отключают установку при снижении напряжения сети ниже допустимого. Напряжением срабатывания таких реле является напряжение, при котором происходит отпускание якоря, а напряжением возврата – напряжение, при котором якорь притягивается к магнитопроводу электромагнита. Коэффициент возврата  $k_B < 1$ .

Существуют **реле тока и напряжения**, в которых предусмотрена возможность регулирования тока или напряжения срабатывания (возврата). Ток срабатывания можно регулировать изменением числа витков обмотки, силы натяжения возвратной пружины, величины рабочего воздушного зазора.

Для нормальной работы реле его **тяговые характеристики 1, 2** должны быть согласованы с механической 3 (характеристикой противодействующих сил). Для срабатывания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика во всех точках хода якоря проходила выше механической (кривая 1), а для возврата



# ТИПЫ РЕЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

Наименьшее значение тока, при котором тяговая характеристика проходит выше механической, определяет ток трогания  $I_{тр}$ . Коэффициент запаса  $k_3 = I_{раб} / I_{тр} = 1,4$ . С ростом  $k_3$  увеличивается электромагнитная сила, сокращается время включения, но возрастают удары в механизме и вибрация якоря. Характеристике 2 соответствует ток возврата  $I_B$ .

Для реле защиты энергосистем и электроприводов, контролирующих значение тока в узких пределах, коэффициент возврата должен быть возможно ближе к единице.

Для повышения коэффициента возврата сближают тяговую и механическую характеристики за счет:

- ✓ увеличения значения воздушного конечного зазора (меняется ток возврата),
- ✓ уменьшения хода якоря,
- ✓ выбора формы якоря,
- ✓ выбора формы полюсов (меняется форма тяговой характеристики).

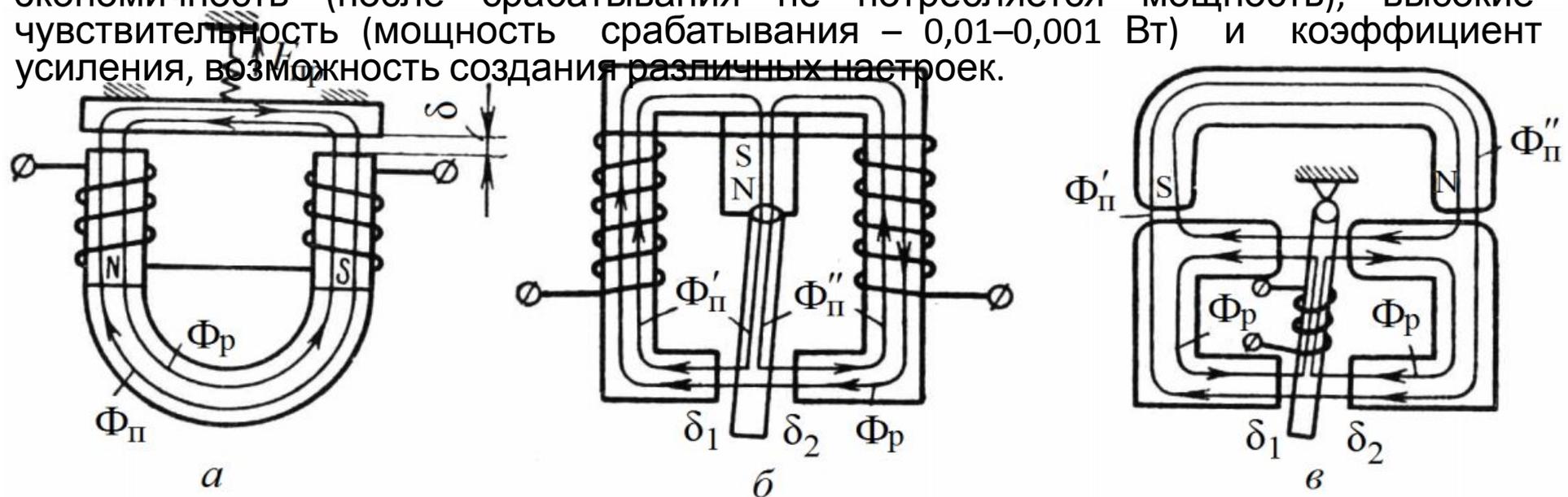
Высокий коэффициент возврата в реле переменного тока объясняется более пологой тяговой характеристикой.

Иногда для изменения тока срабатывания меняется начальная сила возвратной пружины за счет изменения ее натяжения. С ростом начального натяжения коэффициент возврата уменьшается.

# ТИПЫ РЕЛЕ. ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ

В поляризованных реле действуют: основной поток, создаваемый обмоткой электромагнита  $\Phi_p$  и дополнительный поляризующий поток от постоянного магнита  $\Phi_{II}$ , поэтому направление электромагнитной силы, действующей на якорь, изменяется в зависимости от направления тока в обмотке.

ПЭР обеспечивают: широкие функциональные возможности (состояние контактной системы зависит от полярности управляющего импульса), возможность управления кратковременными импульсами (замкнутое состояние сохраняется после снятия сигнала), высокое быстродействие (несколько миллисекунд), экономичность (после срабатывания не потребляется мощность), высокие чувствительность (мощность срабатывания – 0,01–0,001 Вт) и коэффициент усиления, возможность создания различных настроек.

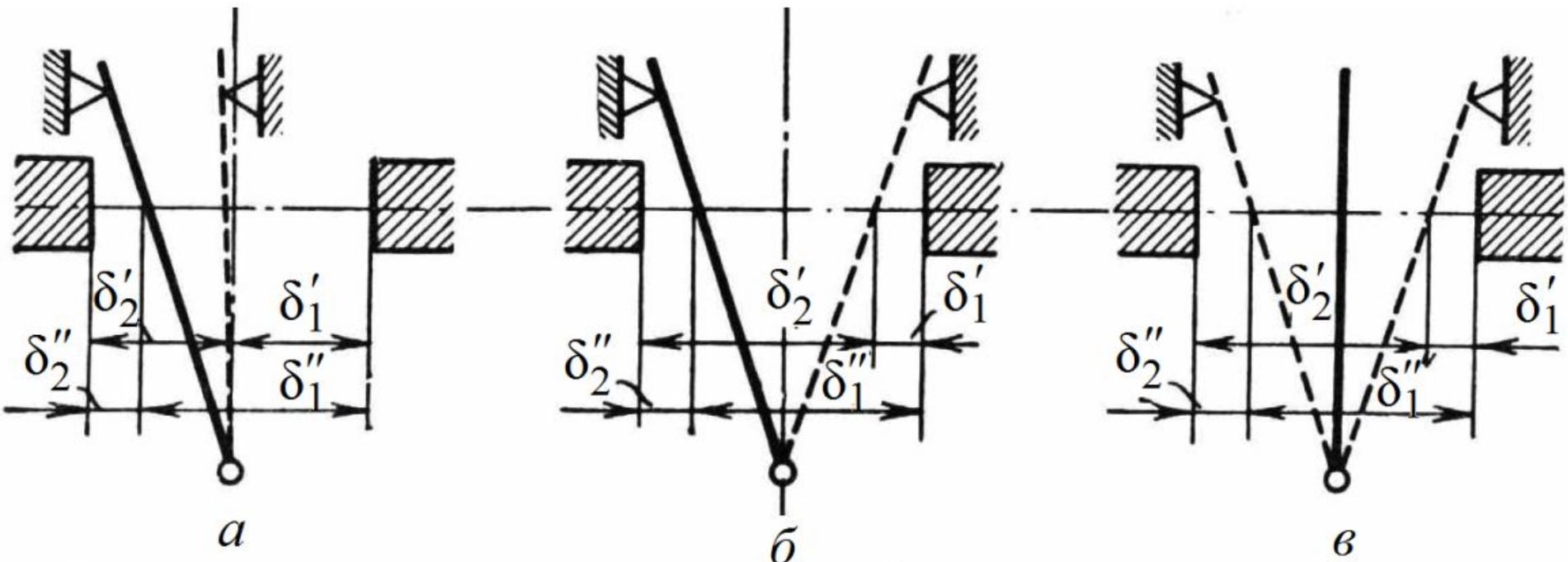


Магнитные системы поляризованных реле:

*а* – последовательная; *б* – параллельная; *в* – мостовая

Последовательная магнитная цепь применяется редко из-за недостатков: 1) требуется повышенное значение МДС рабочей обмотки из-за малой магнитной проницаемости постоянного магнита; 2) постоянный магнит подвержен действию рабочего потока и размагничивается при встречном направлении рабочего

# ТИПЫ РЕЛЕ. ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ



При двухпозиционном исполнении с преобладанием, при отсутствии тока в обмотке, якорь всегда находится в одном положении (рис. а). Перемещение якоря может происходить только при определенном направлении тока в обмотке. При отключении тока якорь возвращается в исходное положение.

При двухпозиционном исполнении без преобладания, при отсутствии тока в рабочей обмотке, якорь занимает положение около одного или другого полюса электромагнита, в зависимости от предшествующего направления тока в обмотке (рис. б). Перемещение якоря происходит при направлении тока в рабочей обмотке, противоположном направлению, имевшему место при предыдущем включении. После отключения тока якорь остается в положении, которое он занял в процессе срабатывания.

Существует система с трехпозиционной настройкой. Положение контактов зависит от полярности предыдущего импульса тока. Якорь, укрепленный на плоской пружине, при обесточенной катушке находится в нейтральном (среднем) положении. В зависимости от полярности тока катушки замыкается левый или правый контакт.

# ТИПЫ РЕЛЕ. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

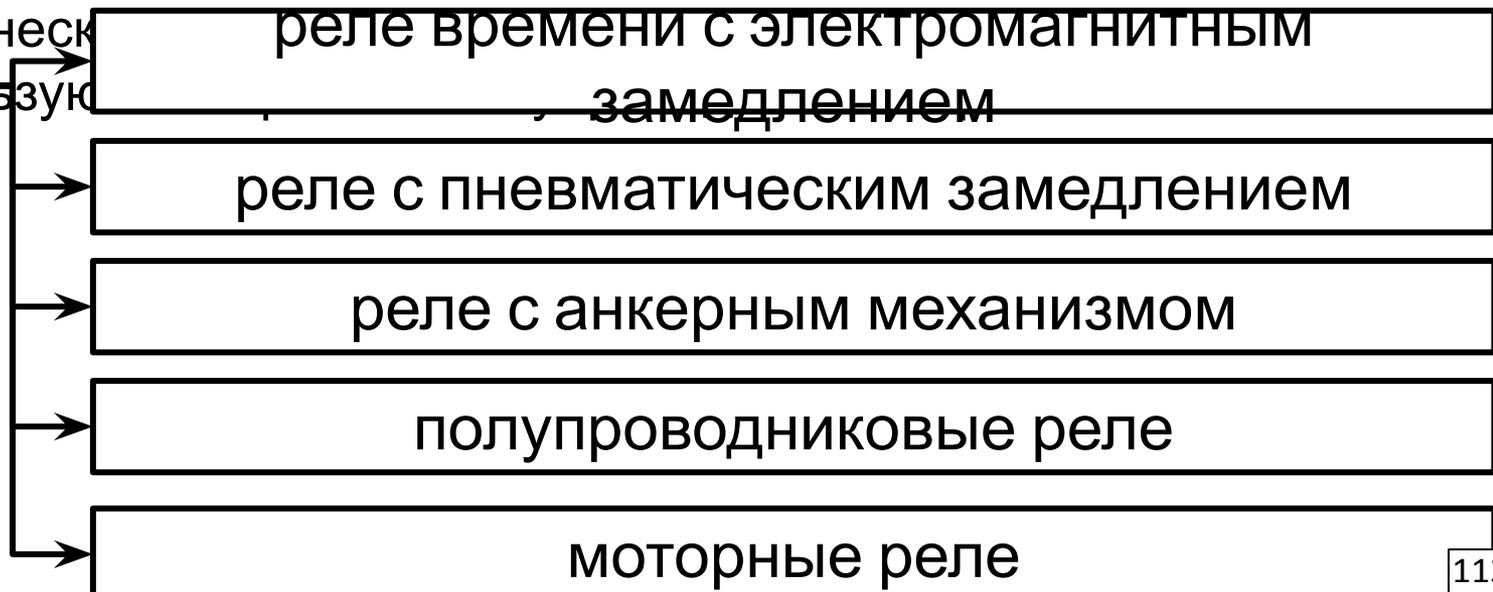
Реле времени служат для создания выдержки времени между срабатываниями нескольких аппаратов в схемах защиты автоматики и при автоматизации технологических процессов.

К таким реле предъявляется требование стабильности выдержки времени при колебаниях напряжения, частоты питания, температуры и т.д.

Для схем автоматического управления электроприводом требуемые выдержки времени находятся в пределах 0,25–10 с. Разброс времени срабатывания может составлять 10 %. Реле для защиты энергосистем должны иметь большую точность выдержки времени. Требуемые выдержки времени таких реле – 0,1–20 с. Для автоматизации технологических процессов необходимы реле с большой выдержкой

**РЕЛЕ  
ВРЕМЕНИ**

т неск  
ользую

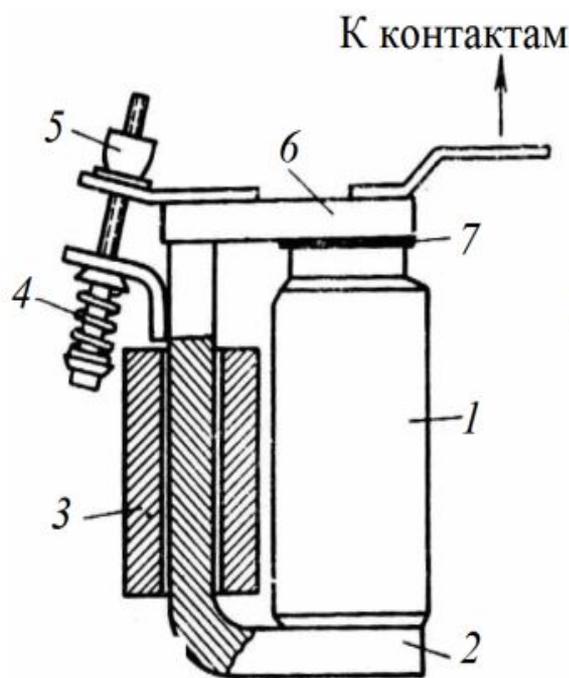


# ТИПЫ РЕЛЕ. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

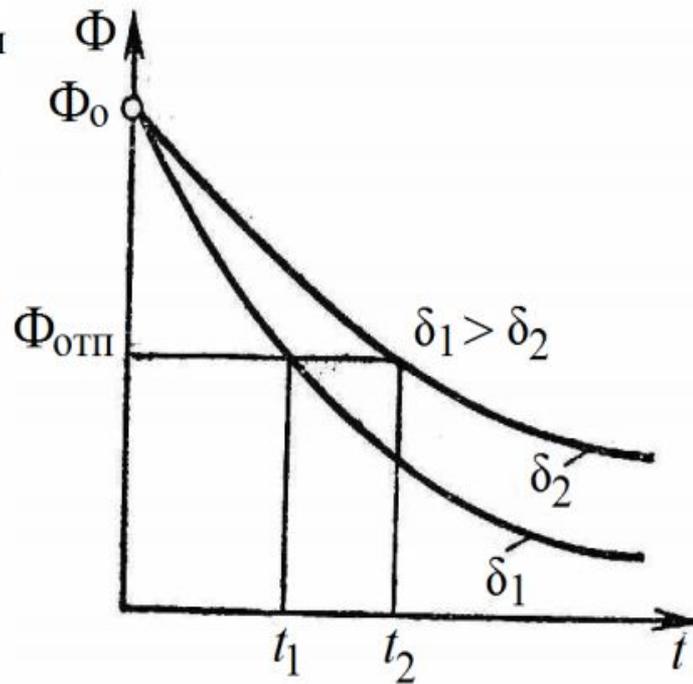
В реле времени с электромагнитным замедлением использован принцип электромагнитного замедления. В качестве короткозамкнутой обмотки используется алюминиевая или медная гильза, надеваемая на сердечник. При включении обмотки электромагнита реле или при ее отключении в такой гильзе наводится ЭДС и вихревые токи, создающие поток, препятствующий изменению потока обмотки электромагнита. При этом замедление при срабатывании небольшое (доли секунды) из-за малой индуктивности и постоянной времени при большом (начальном) зазоре. Замедление при отпуске может достигать десяти секунд, так как при отпуске проводимость конечного зазора большая, и, следовательно, большая индуктивность и постоянная времени. Для получения большой выдержки времени при отпуске необходима высокая магнитная проводимость рабочего и паразитного зазоров в замкнутом состоянии магнитной системы. С этой целью все соприкасающиеся детали магнитопровода и якоря тщательно шлифуются.

Магнитная цепь такого реле делается насыщенной для того, чтобы уменьшить зависимость магнитного потока и выдержки времени от питающего напряжения.

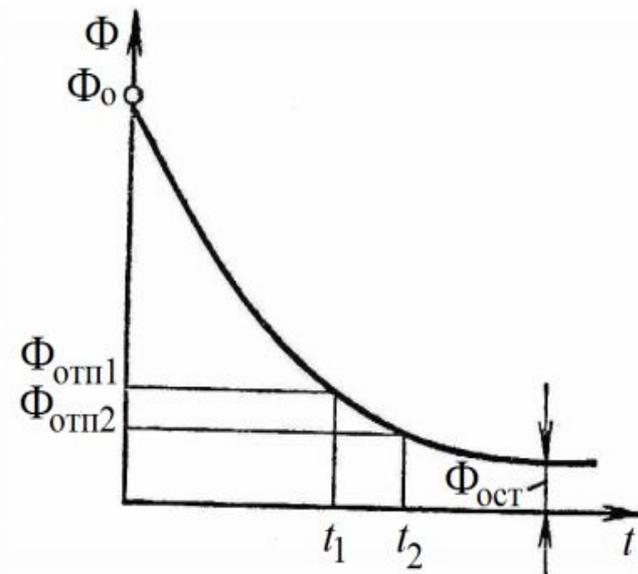
# ТИПЫ РЕЛЕ. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ



а



б



в

На рис. а изображена конструктивная схема реле с электромагнитным возбуждением. Здесь 1 – катушка электромагнита; 2 – магнитопровод; 3 – короткозамкнутая гильза; 6 – якорь. Время срабатывания при отпускании можно регулировать изменением толщины немагнитной прокладки 7. Уменьшение толщины прокладки увеличивает проводимость, индуктивность, постоянную времени и соответственно время отпускания реле (рис. б). Чем больше сила пружины 4, регулируемая гайкой 5, тем больше поток отпускания и тем меньше время срабатывания при

# ТИПЫ РЕЛЕ. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

У реальных магнитных материалов после отключения намагничивающей обмотки поток спадает до остаточного потока, который определяется свойствами материала магнитопровода, геометрическими размерами магнитной цепи и магнитной проводимостью рабочего зазора. При большом остаточном потоке возможно залипание якоря (якорь остается в притянутом состоянии после отключения обмотки электромагнита). Для устранения залипания используется тонкая немагнитная прокладка.

Реле времени с электромагнитным замедлением:

- ✓ достаточно просты по конструкции;
- ✓ обладают большой ударо-, вибро- и износостойкостью;
- ✓ допустимое число включений достигает 600 в час;
- ✓ могут использоваться в схемах автоматики и электропривода как реле тока, напряжения и промежуточные;
- ✓ коэффициент возврата низок и составляет 0,1–0,3;
- ✓ выдержки времени при отпуске – 0,3–5 секунд.

Промышленностью выпускаются многочисленные модификации реле с электромагнитным замедлением. Реле имеют один или два унифицированных контактных узла. Каждый узел имеет один замыкающий и один размыкающий контакты с общей точкой. Постоянный ток включения контактов составляет 10 А при напряжении 110 В и 5 А при 220 В. Ток

# ТИПЫ РЕЛЕ. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

В реле с пневматическим замедлением и анкерным механизмом электромагнит постоянного или переменного тока воздействует на контактную систему через замедляющее устройство в виде пневматического демпфера или часового (анкерного) механизма. Выдержка времени меняется при регулировке этого устройства. Преимуществами такого реле являются возможность питания как постоянным, так и переменным током и независимость от напряжения, частоты питания, температуры. Реле с пневматическим замедлением РВП применяется в схемах электропривода металлорежущих станков и других механизмов. Такое реле позволяет регулировать выдержку времени в диапазоне от 0,4 до 180 секунд с точностью  $\pm 10\%$ .

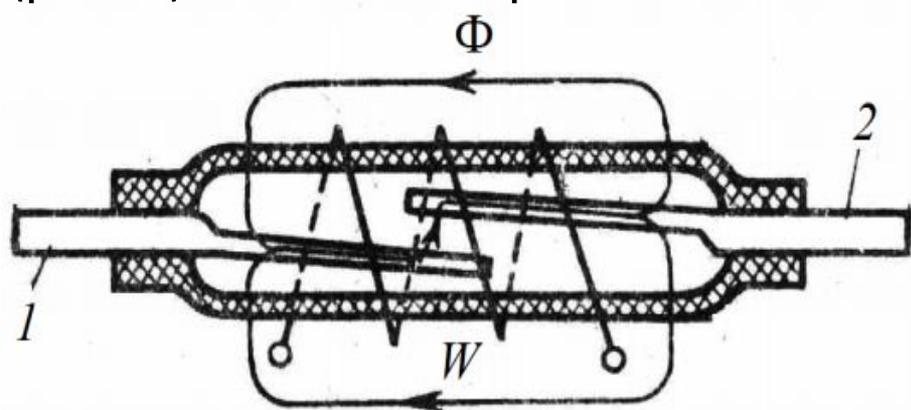
В замедлителях в виде анкерного механизма его пружина заводится под воздействием электромагнита. Контакты реле приходят в движение лишь после того, как связанный с ними анкерный механизм отсчитает определенное время уставки. Выдержка времени у этих реле регулируется в пределах от 7 до 17 секунд с точностью  $\pm 10\%$  уставки. В реле имеются и нерегулируемые контакты, которые связаны с якорем электромагнита и используются в цепях, не требующих выдержки времени. Реле надежно работают при напряжении питания до  $0,85U_H$ . Износостойкость анкерного механизма составляет всего 15000 срабатываний, поэтому такие реле не применяют при частых включениях.

В состав **моторных реле времени** входит электродвигатель с заданной частотой вращения. Промышленностью выпускаются реле на выдержки времени от 1 секунды до 26 минут с различным исполнением контактов. Точность работы реле составляет  $\pm 5$  секунд. Реле позволяет устанавливать

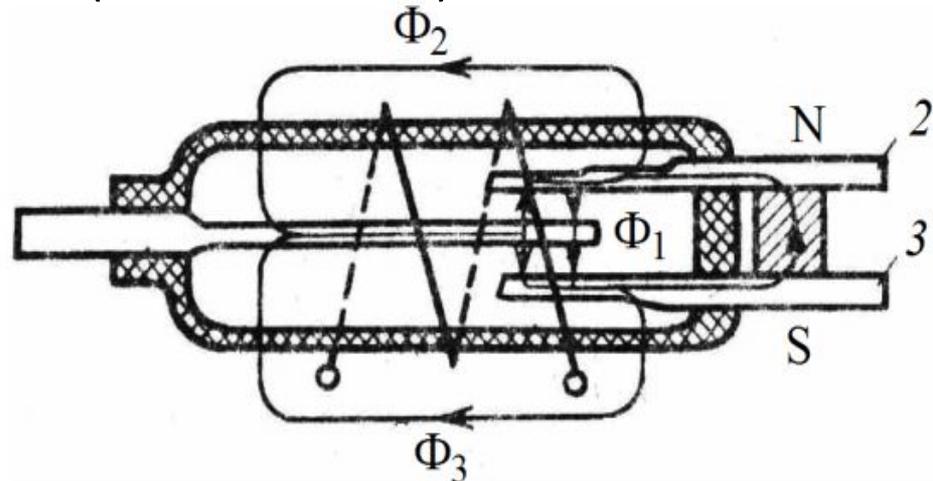
# ТИПЫ РЕЛЕ. ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ

**Герконовые реле** – это реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами. Контакты герконовых реле 1, 2, 3 (контактные сердечники) помещаются в стеклянный баллон с инертным газом или вакуумом (рисунок). Контакты в этих реле выполняют функции магнитопровода, токопровода и возвратной пружины.

При подаче тока в обмотку  $w$  (рис. а) возникает магнитный поток  $\Phi$  и электромагнитная сила, притягивающая контакты. Если отключить ток, то под действием собственных упругих сил контакты разомкнутся. Изменение полярности тока в обмотке управления поляризованного реле (рис. б) вызывает переключение контактов (1 и 2 или 1 и 3).



а



б

Существуют разновидности герконов с ртутными контактами. В небольшом объеме ртути (подвижный контакт), содержащемся в герметичном баллоне, размещается ферромагнитная деталь (поплавок). Под действием магнитного поля управляемой катушки эта деталь погружается в ртуть и поднимает ее уровень до замыкания неподвижных

# ТИПЫ РЕЛЕ. ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ

Герконы имеют преимущества:

- ✓ благодаря полной герметизации могут работать в неблагоприятных условиях окружающей среды;
- ✓ могут работать при неблагоприятных параметрах (при низком переходном сопротивлении, малом напряжении на контактах);
- ✓ имеют простую конструкцию, малые массы и габариты;
- ✓ имеют высокое быстродействие (1–3 мс), высокую частоту коммутаций – 1000 включений в секунду,
- ✓ имеют высокую электрическую прочность межконтактного промежутка;
- ✓ в них отсутствуют трущиеся детали;
- ✓ обеспечивают удобство согласования с современными изделиями микроэлектроники и надежность работы в широком диапазоне температур;
- ✓ их износостойкость достигает десятков и сотен миллионов срабатываний.

Герконы имеют следующие недостатки:

- восприимчивость к внешним магнитным полям (необходима защита),
- хрупкость стеклянного баллона,
- чувствительность к ударам и вибрациям (необходима амортизация мест установки герконов),
- значительное время вибрации контактов,
- малую мощность коммутируемых цепей,
- возможность самопроизвольного размыкания контактов при больших токах,
- значительный технологический разброс параметров.

Герконовые реле используются в схемах автоматики и защиты

# ТИПЫ РЕЛЕ. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

**Тепловые реле** предназначены для защиты электроустановок, главным образом электрических машин, от перегрева при длительных перегрузках.

Тепловое реле срабатывает при определенной температуре нагрева основного чувствительного элемента. В качестве чувствительного элемента наибольшее распространение получили биметаллические элементы. Нагрев элемента может быть:

- ✓ непосредственным (за счет тепла, выделяемого током нагрузки),
- ✓ косвенным (за счет тепла нагревательного элемента НЭ),
- ✓ комбинированным.

Биметаллический элемент состоит из двух пластин металла (с различными температурными коэффициентами линейного расширения), соединенных сваркой или прокаткой в горячем состоянии. В тепловых реле применяются биметаллы, у которых в качестве терморезистивного материала (с большим значением коэффициента) используется железоникелевый сплав – инвар, а в качестве термоактивного материала (с меньшим значением коэффициента) – хромоникелевые, молибденоникелевые стали.

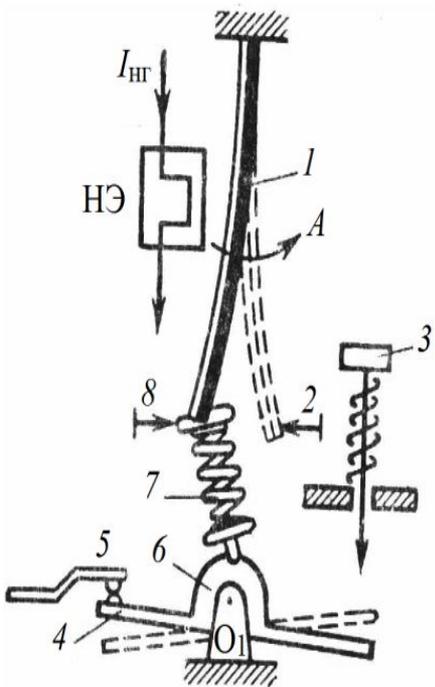
Если такой элемент закрепить неподвижно и нагреть, то произойдет его изгиб в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения. Механическая сила, затрачиваемая на преодоление сил

# ТИПЫ РЕЛЕ. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

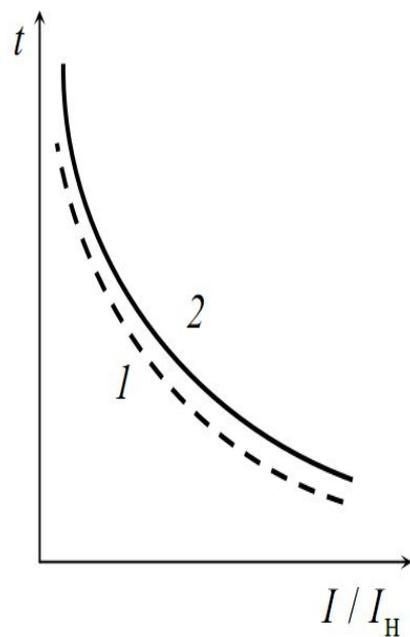
Конструктивная схема реле (рис. а):

1 и 2 – биметаллическая пластина в различных положениях; 3 – кнопка ручного возврата; 4 и 5 – контакты; 6 – пластмассовая колодка; 7 – пружина; 8 – упор. В данном реле происходит мгновенный переброс контактов из одного положения в другое, и нажатие на контакты не зависит от усилия, развиваемого биметаллической пластиной.

В момент достижения предельно допустимой температуры защищаемого объекта (например, обмотки машины) биметаллический элемент должен нагреться до температуры



а



б

Время срабатывания реле с момента появления (перегрузки) зависит от начальной температуры окружающей среды, величина тока и конструкции реле.

Одной из основных характеристик теплового реле является **токовременная характеристика**, выражающая зависимость времени срабатывания реле от тока, протекающего через него (рис. б). Для осуществления надежной защиты необходимо согласовать токовременную характеристику реле с перегрузочной характеристикой двигателя. При правильно выбранном реле его характеристика (кривая 1) должна располагаться ниже и вблизи характеристики нагрева двигателя (кривая 2). В эксплуатационных условиях согласование характеристик реле и двигателя достигается выбором реле с номинальным током, равным номинальному току двигателя. В этом случае обычно обеспечивается

# ТИПЫ РЕЛЕ. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

Максимальный механический прогиб свободного конца элемента

$$X_{\max} = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \tau}{\delta},$$

где  $\alpha_1$  – температурный коэффициент расширения термоактивного материала;  $\alpha_2$  – температурный коэффициент расширения терморезистивного материала;  $\delta$  – суммарная толщина биметаллического элемента;  $l$  – его длина;  $\tau$  – превышение температуры биметаллического элемента относительно окружающей среды.

Сила, развиваемая на прогнутом конце элемента, равна

$$F = \frac{3}{16}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{b\delta^2}{l} E\tau,$$

где  $b$  – ширина элемента;  $E = (E_1 + E_2)$  – средний модуль упругости материала элемента.

Существенным недостатком тепловых реле является зависимость времени действия от температуры окружающей среды. Такая зависимость приводит к тому, что, например, при температуре 80–90 градусов реле может отключить цепь даже при отсутствии тока. Поэтому для получения благоприятной защитной характеристики необходимо, чтобы температура окружающей среды для защищаемого объекта и реле совпадала или чтобы биметаллический элемент работал при более высоких температурах.

Тепловые реле с биметаллическими элементами не обеспечивают защиту от токов короткого замыкания, так как постоянная времени срабатывания реле значительно больше длительности процесса короткого замыкания.

# ДАТЧИКИ. ПОНЯТИЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Датчики (первичные преобразователи) – аппараты, предназначенные для контроля и (или) измерения параметров.

Области применения: автоматика, телемеханика, информационно-измерительная техника.

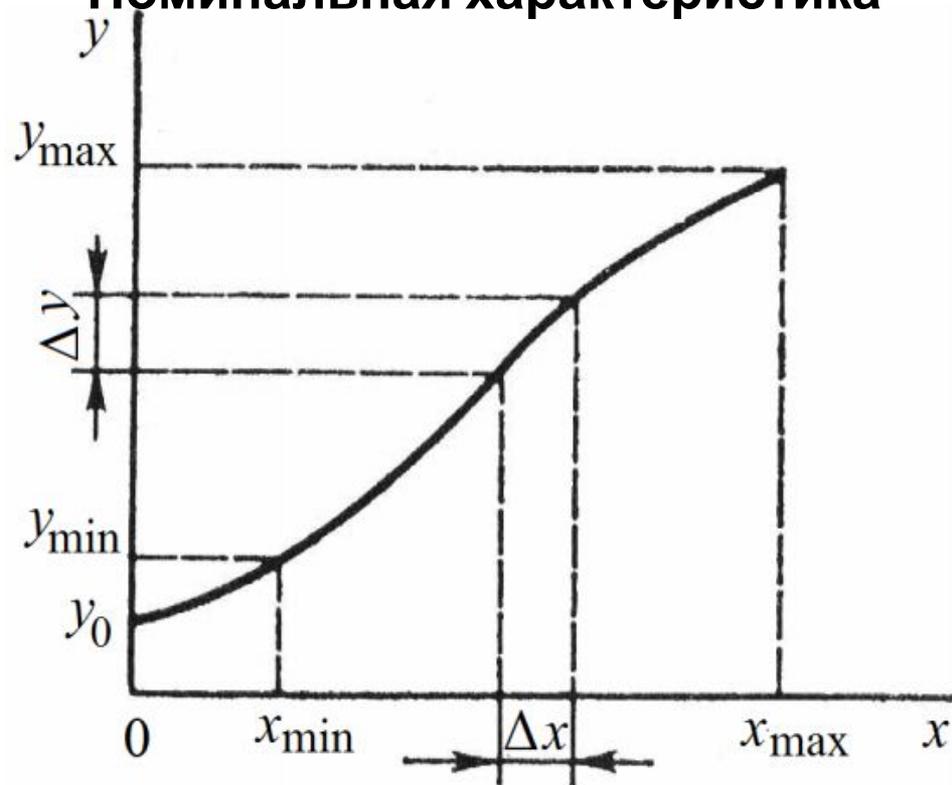
Электрические датчики преобразуют различные физические величины в эквивалентные электрические сигналы. Изменение выходного электрического параметра приводит к изменению (коммутации) тока или появлению электродвижущей силы в электрической цепи на выходе

<b>Датчик и</b>	В зависимости от способа преобразования входной величины	<b>параметрические (пассивные)</b> по виду входной величины:	резисторные	Энергия выходного сигнала обеспечивается за счет энергии входного сигнала, значит мощность выходного сигнала меньше входного. Для таких датчиков необходимы электрические источники питания. К генераторным относятся датчики, использующие эффект наведенной электродвижущей силы. В таких датчиках осуществляется непосредственное преобразование входной величины в выходную.	
			емкостные		
			индуктивные		
			трансформаторные		
		<b>генераторные (активные)</b>	индукционные		
			пьезоэлектрические		
			термоэлектрические на основе эффекта Холла		
	В зависимости от входной величины датчики	перемещения	уровня		давления
		угла поворота момента	скорости		расхода
		вращения	ускорения параметров		температуры
размеров		вибраций	и т.д.		
По типу коммутации	контактные				
	бесконтактные				

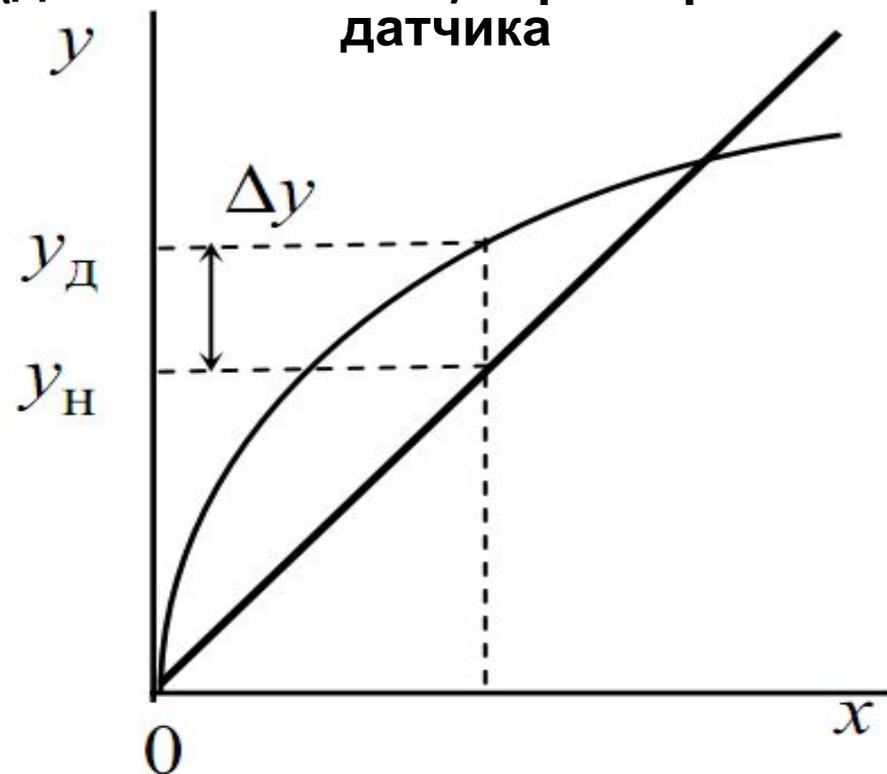
# ДАТЧИКИ. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ

Статическая характеристика датчика.

Номинальная характеристика



Паспортная (расчетная, номинальная) и реальная (действительная) характеристики датчика



Основная характеристика датчика – **статическая характеристика (характеристика управления)**, представляющая зависимость выходной величины  $y$  от входной величины  $x$ .

Статическая характеристика может быть линейной и нелинейной. Нелинейность характеристики обусловлена физическими свойствами датчиков: наличием в них насыщения, неоднородности магнитного поля и т. д. Статическая характеристика ограничивается нижними  $(x_{\min}, y_{\min})$  и верхними  $(x_{\max}, y_{\max})$  предельными значениями входной и выходной величин.

# ДАТЧИКИ. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ

**Чувствительность датчика** представляет отношение приращений выходной и входной величин. Для нелинейной статической характеристики чувствительность является функцией входной величины. При линейной статической характеристике чувствительность имеет постоянное значение.

**Коэффициент преобразования** – это отношение значения выходной величины к соответствующему значению входной величины. У датчиков с линейной характеристикой чувствительность и коэффициент преобразования равны.

**Остаточный сигнал** – значение выходной величины при нулевой входной величине. Остаточный сигнал отрицательно сказывается на точности измерений, так как при этом в зоне малых значений  $x$  падает чувствительность.

**Порог чувствительности** представляет минимальное значение входной величины, вызывающее изменение выходной величины, которое может быть измерено.

**Номинальной характеристикой** датчика называют статическую характеристику, данную в паспорте датчика. Экспериментально снятая характеристика отличается на величину погрешности.

**Абсолютная погрешность** представляет собой разность между номинальным (расчетным) значением выходной величины и полученным (действительным) ее значением

**Точность преобразования датчика** характеризуется относительной погрешностью.

**Относительная погрешность** рассчитывается  $\delta = \frac{\Delta u_n}{u_n}$  – отношение абсолютной погрешности к номинальному значению выходной величины

На погрешность оказывают влияние внешние условия эксплуатации: температура, магнитные и электрические поля, влажность, напряжение частота источника питания, механические и радиационные воздействия и т.

# ДАТЧИКИ. ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

- ✓ Высокая чувствительность.
- ✓ Малая погрешность.
- ✓ Необходимый диапазоном изменения входной величины.
- ✓ Возможность согласования со схемой управления.
- ✓ Минимальное обратное воздействие датчика на входную величину.
- ✓ Малая инерционность (при быстрых изменениях входной величины).
- ✓ Параметры и характеристики датчика должны оставаться стабильными во времени.
- ✓ Параметры и характеристики датчика должны оставаться стабильными при изменении условий работы:
  - температуры,
  - давления,
  - влажности среды,
  - положения датчика в пространстве

# ДАТЧИКИ. РЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Резисторные датчики предназначены для измерения перемещения и сил.

Принцип действия резисторных датчиков основан на изменении электрического сопротивления  $R$  при изменении длины  $l$ , сечения  $S$  или удельного сопротивления материала резистора  $\rho$ , так как в общем случае сопротивление зависит от этих параметров:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

резисторные датчики	потенциометрические	проволочные потенциометрические	
	тензорезисторные	проводниковые	проволочные
			фольговые
	терморезисторные	полупроводниковые	
		проводниковые	
		полупроводниковые	позисторы
термисторы			
магниторезисторные			

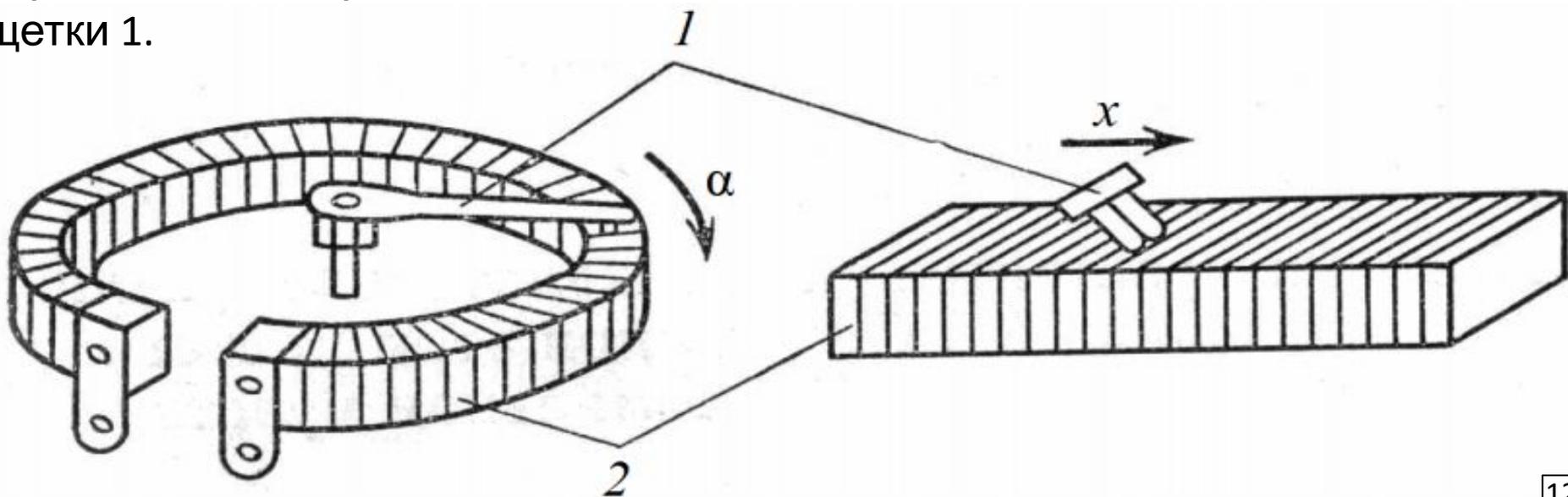
# ДАТЧИКИ. ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Потенциометрические датчики предназначены для измерения угловых или линейных перемещений. С их помощью можно измерить уровень и расход жидкости, силу, размеры и т.д.

В потенциометрических датчиках изменение сопротивления происходит за счет изменения длины проводника.

Потенциометрические датчики представляют собой переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается. Величина сопротивления зависит от положения подвижного токосъемного контакта. В потенциометрических датчиках механическое перемещение преобразуется в соответствующее изменение напряжения или тока.

Проволочные потенциометрические датчики непрерывной намотки: каркаса, на который намотана обмотка 2, и токосъемный контакт в виде щетки 1.



# ДАТЧИКИ. ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Для обмоточного провода используются сплавы с **высоким удельным сопротивлением** (манганин, константан, нихром). Наилучшей температурной стабильностью обладают резистивные датчики, выполненные из **состаренных** (подвергнутых циклическому нагреву до 120–130 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры) **сплавов**.

Для уменьшения реактивной составляющей намотку проволочных датчиков выполняют на специальных каркасах **бифилярно**, т.е. наматывают одновременно двумя проводниками.

Характеристики реальных потенциометрических датчиков имеют **ступенчатый характер**, так как перемещения щетки с одного витка провода на другой вызывает скачкообразное изменение выходного напряжения.

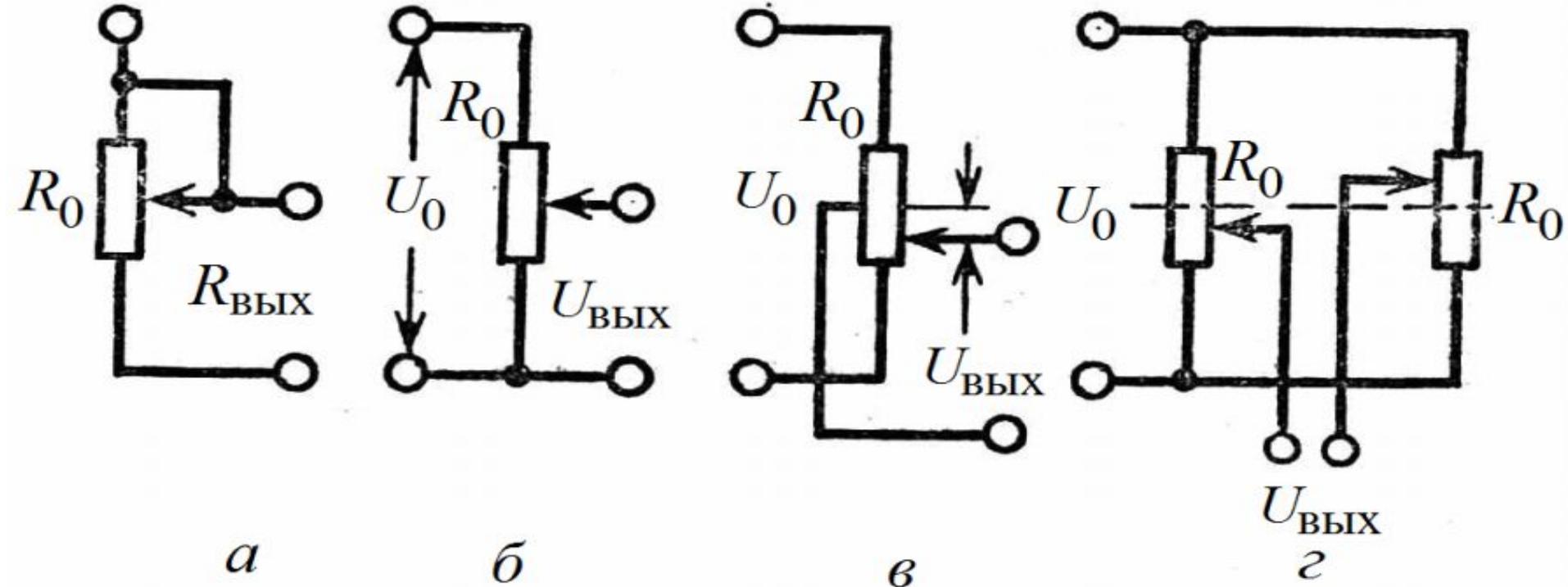
Для получения нелинейной характеристики датчика, работающего без нагрузки, применяют **неоднородную намотку, фигурный каркас, шунтирование участков обмотки** и т.д.

Погрешность работы датчиков зависит от **стабильности питающего напряжения, точности изготовления конструктивных деталей, температурной стабильности проводникового материала**.

Достоинствами потенциометрических датчиков являются **малые масса и габариты, сравнительная простота конструкции, высокая точность работы** (погрешность составляет до 0,1 %), **возможность питания от источника как постоянного, так и переменного тока**.

**Основной недостаток – наличие подвижного контакта и влияние**

# ДАТЧИКИ. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ



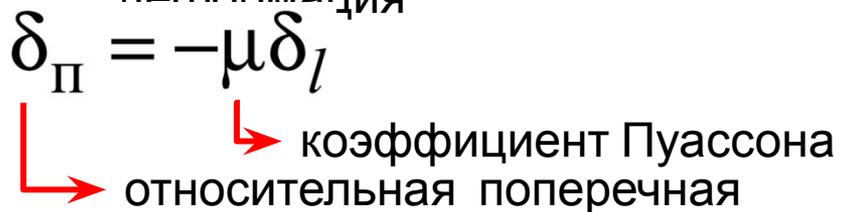
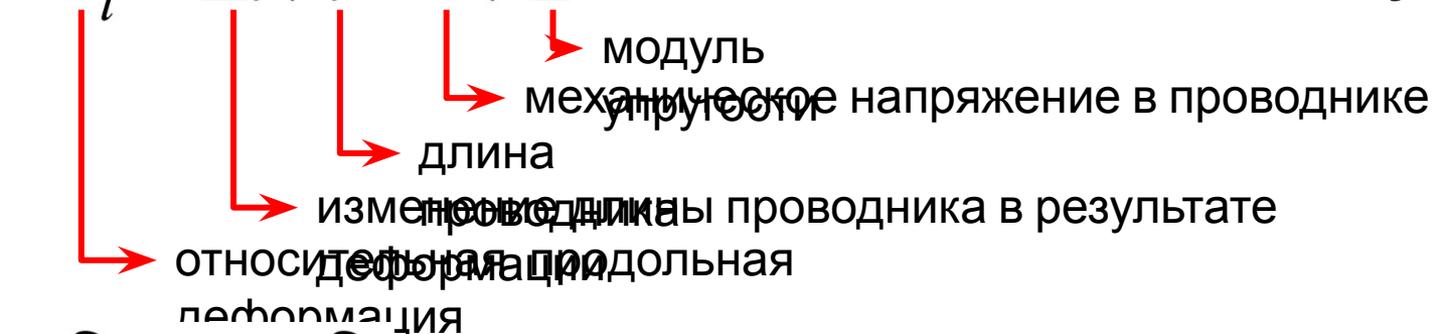
Наиболее простой является **реостатная схема** (рис. а) включения датчика. Применяется также **параметрическая схема** (рис. б). Если входное сопротивление измерительной схемы велико, то выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  зависит от  $\alpha$  или  $x$  и не зависит от  $R_0$ . В **реверсивном потенциометрическом датчике** (рис. в) имеется отвод от средней точки обмотки, от которой происходит отсчет перемещения щетки. При изменении направления перемещения щетки от средней точки обмотки происходит изменение знака выходного напряжения. В схеме (рис. г) при перемещении левого подвижного контакта вниз правый с помощью механической передачи движется вверх. Чувствительность при это 130

# ДАТЧИКИ. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Тензорезисторные датчики предназначены для измерения деформаций, возникающих под действием внешних сил. В тензорезисторных датчиках изменение сопротивления происходит за счет изменения трех величин: длины проводника  $\delta_R = \Delta R / R = \Delta l / l - \Delta S / S + \Delta \rho / \rho$  сопротивления.

Принцип действия таких датчиков основан на явлении **тензоэффекта**, заключающегося в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним механических напряжений.

При наличии внешней силы происходит деформация проводника как в направлении действия силы, так и в перпендикулярном направлении. Деформация в направлении действия силы в области упругих  $\delta_l = \Delta l / l = \sigma / E$  ит в соответствии с **законом Гука**



# ДАТЧИКИ. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Относительное изменение сопротивления проводника

$$\delta_R = \Delta R / R = \Delta l / l - \Delta S / S + \Delta \rho / \rho$$

Тензоэффект различных материалов характеризуется **коэффициентом тензочувствительности**

$$k_T = \delta_R / \delta_l = 1 + 2\mu + m \quad [m = \Delta \rho / (\delta_l \rho)]$$

Характеристика управления проволочных резисторов определяется выражением

$$\Delta R = k_T R \delta_l$$

Для увеличения чувствительности тензорезисторного датчика выбираются материалы с:

- ✓ **высоким коэффициентом тензочувствительности** (например, константан),
- ✓ **большим удельным сопротивлением,**
- ✓ **малым поперечным сечением.**

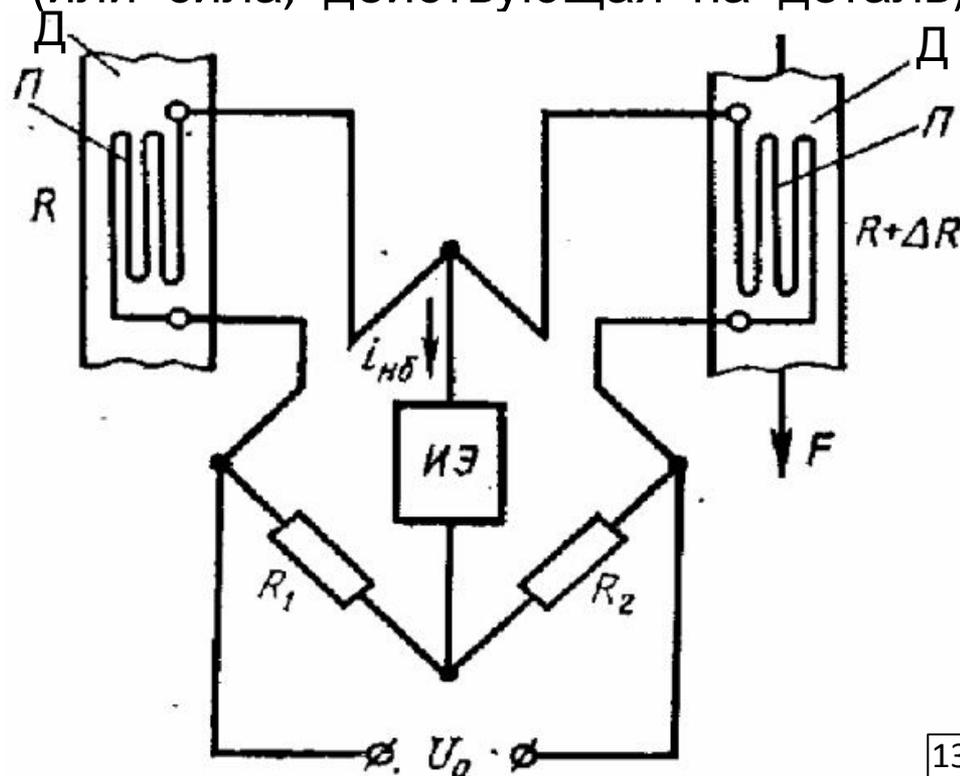
# ДАТЧИКИ. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Проводниковые тензорезисторные датчики могут быть **проволочными** и **фольговыми**. Вторые имеют большую площадь охлаждения и могут пропускать большой ток.

Проволочные тензорезисторные датчики представляют собой тонкую проволоку (диаметр 0,01–0,05 мм), уложенную зигзагообразно между двумя электроизоляционными подложками, скрепленными клеем или лаком. К концам проволоки присоединяются выводы.

С помощью лака или клея тензодатчик прочно крепится на детали, механическая деформация которой (или сила, действующая на деталь) контролируется.

При растяжении (или сжатии) детали аналогичную деформацию претерпевает и тонкая проволока тензодатчика, что вызывает изменение ее электрического сопротивления. Если проволочный элемент П тензодатчика, наклеенный на деформируемую деталь Д, включить в одно из плеч мостовой схемы, то изменение его сопротивления на  $\Delta R$  при



# ДАТЧИКИ. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

детали силой  $F$  вызовет разбаланс в схеме моста. Измерительный элемент ИЭ в диагонали схемы зафиксирует соответствующий ток небаланса  $i_{нб}$ . Для компенсации температурной погрешности тензодатчика нередко в другое плечо моста включается идентичный элемент, сопротивление которого остается неизменным, т.к. он крепится на детали, не подверженной деформации.

**Фольговые датчики** аналогичны проволочным. Фотохимический способ позволяет создать любой рисунок, что является преимуществом фольговых датчиков.

Применяются также **полупроводниковые тензорезисторные датчики**, основными достоинствами которых являются малые размеры, высокий уровень выходного сигнала, высокий коэффициент тензочувствительности. Полупроводниковые тензорезисторы имеют в десятки раз большую тензочувствительность по сравнению с обычными. Тензорезисторы n-типа имеют отрицательный коэффициент тензочувствительности, а p-типа – положительный.

Недостаток таких датчиков – разброс параметров, достигающий 20 % в одной партии, достоинство – термическая стабильность.

Тензорезисторы широко используются в тензометрировании.

# ДАТЧИКИ. ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Терморезисторные датчики предназначены для измерения температуры деталей машин, приборов, механизмов.

Принцип действия таких датчиков основан на изменении электрического сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при изменении их температуры. В терморезисторных датчиках используются материалы, обладающие большим и стабильным температурным коэффициентом сопротивления и линейной зависимостью сопротивления от температуры.

Проводниковые терморезисторные датчики изготавливаются из платины, меди, никеля, железа, вольфрама и др. материалов.

Зависимость сопротивления от температуры с некоторым приближением имеет вид  $R = R_0(1 + \alpha\theta)$  ( $R_0$  – сопротивление проводника при температуре  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\theta$  – превышение температуры проводника относительно  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления).

На точность работы влияют:

- ✓ изменение свойств материалов со временем,
- ✓ нестабильность сопротивления токоподводящих проводов,
- ✓ дополнительный нагрев датчиков при прохождении по ним тока.

Погрешность измерений составляет 0,5–1 %. Для увеличения чувствительности выбирают материалы с большим температурным коэффициентом сопротивления. Конструктивно терморезисторный датчик представляет собой бифилярную обмотку из тонкой проволоки

# ДАТЧИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Как элементы различных датчиков широкое распространение получили **полупроводниковые термосопротивления (терморезисторы)**, имеющие сильно выраженную зависимость сопротивления от температуры.

Среди полупроводниковых терморезисторов различают **позисторы** и **термисторы**. Первые из них характеризуются положительным температурным коэффициентом сопротивления, вторые – значительным отрицательным. Полупроводниковые терморезисторы, наряду с более высокой чувствительностью по сравнению с обычными, обладают такими недостатками, как нелинейность и узкий температурный диапазон.

Максимальная рабочая температура полупроводниковых терморезисторов не может превышать 300 °С, в то время как для вольфрамовых терморезисторов она может достигать 3000 °С.

Сопротивление термистора уменьшается с повышением температуры по экспоненциальному закону

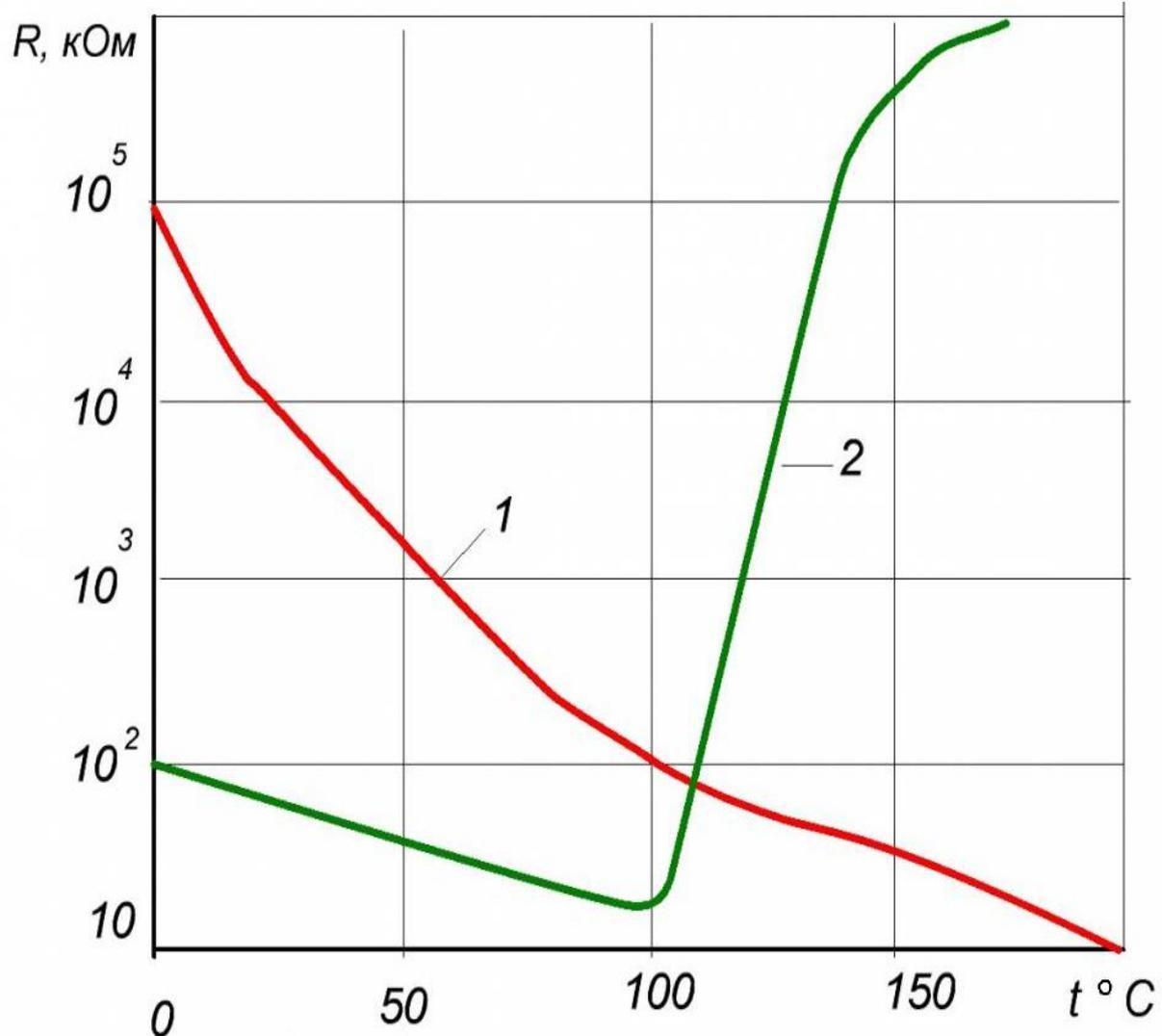
$$R_T = R_0 e^{-\alpha\theta} = R_0 \left( 1 - \alpha\theta + \frac{\alpha^2\theta^2}{2} - \dots \right)$$

превышение температуры термистора относительно 0°С

температурный коэффициент термистора;

сопротивление термистора  $R_0$  при температуре 0

# ДАТЧИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ



Температурные характеристики терморезисторов:

1 - термистора; 2 - позистора

Конструктивно термисторы представляют из себя тело дисковой, шаровой или других форм с металлическими выводами, покрытое слоем лака или стекла или помещенное в герметичный стеклянный баллон для защиты от влаги.

Термисторы изготавливают прессованием и отжигом измельченных оксидов, сульфидов, нитридов или карбидов металлов.

Чувствительность термисторов в 5–30 раз выше, чем

# ДАТЧИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТЕРМОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Термисторы находят применение для ограничения пусковых токов электродвигателей в качестве **датчиков-ограничителей тока**.

Способность термисторов существенно изменять свое сопротивление при изменении условий охлаждения определила их применение в качестве **датчиков измерения температуры окружающей среды**.

Если термистор поместить в поток жидкости или газа, то температура его нагрева протекающим по нему током будет зависеть от скорости этого потока. Следовательно, термистор можно использовать в качестве **датчика скорости движения жидкости или газа**, а при соответствующей схеме включения нескольких термисторов – в качестве **датчика направления потока**.

Термистор может быть и **датчиком уровня жидкости**. Погруженный в жидкость термистор имеет определенную температуру. Если уровень жидкости понизится и термистор окажется в воздухе, то его температура и сопротивление изменятся, так как условия охлаждения будут другими.

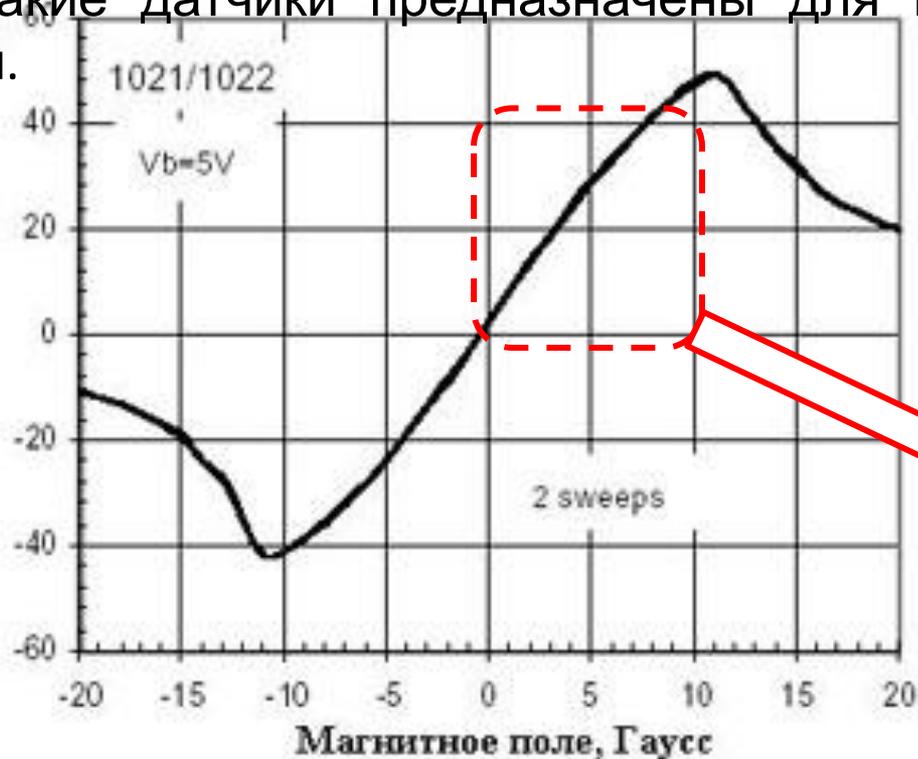
Термистор может быть **датчиком степени разрежения воздуха (вакуума)**. С понижением давления воздуха ухудшаются условия передачи тепла от термистора, расположенного в этой среде.

# ДАТЧИКИ. МАГНИТОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Магниторезисторные датчики являются менее распространенными резистивными датчиками.

Их действие основано на эффекте Гаусса (увеличение сопротивления полупроводника при внесении его в магнитное поле): регулируя напряженность магнитного поля, можно управлять сопротивлением резистора.

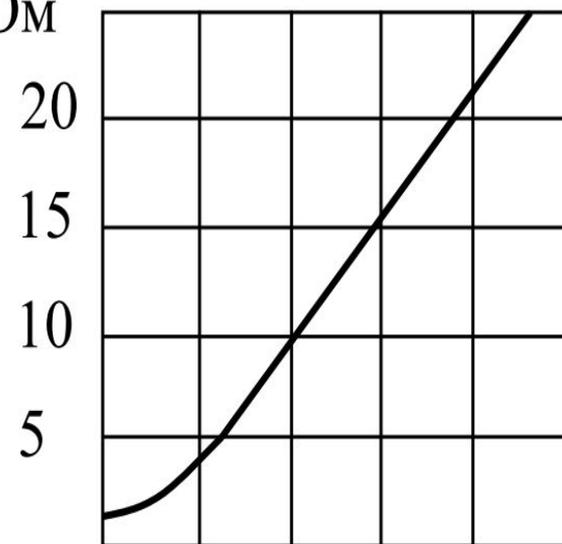
Такие датчики предназначены для измерения индукции магнитного поля.



Передаточная характеристика магниторезистивного датчика

Основная характеристика магниторезисторного датчика – зависимость его сопротивления от индукции магнитного поля.

$R, \text{ Ом}$



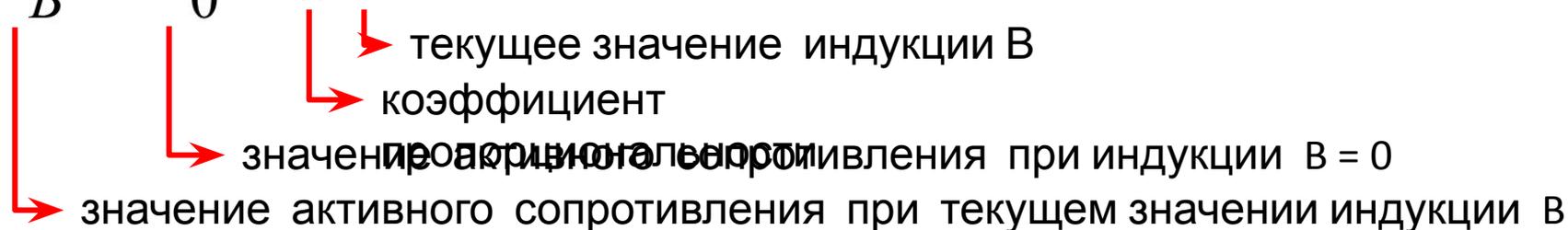
$B, \text{ Тл}$  139

# ДАТЧИКИ. МАГНИТОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

В интервале малых индукций характеристика нелинейна, а при больших значениях индукции практически линейна.

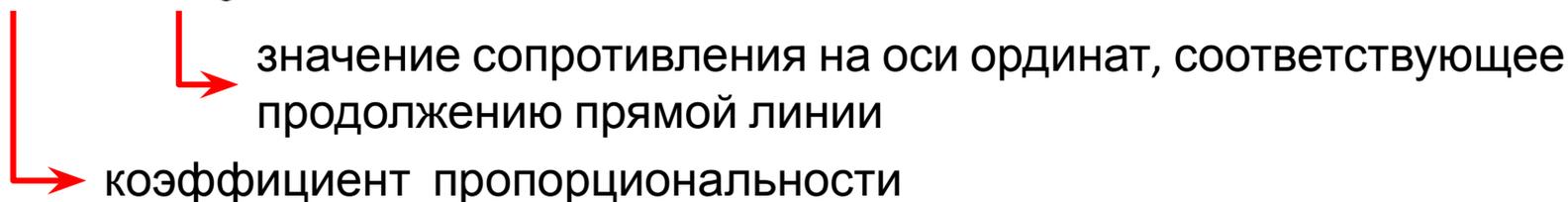
В слабых полях (0,3–0,5 Тл) зависимость сопротивления от индукции квадратичная:

$$R_B = R_0 + aB^2$$

  
текущее значение индукции  $B$   
коэффициент  
значение активного сопротивления при индукции  $B = 0$   
значение активного сопротивления при текущем значении индукции  $B$

При больших индукциях зависимость становится линейной:

$$R_B = bB \pm R'_0$$

  
значение сопротивления на оси ординат, соответствующее продолжению прямой линии  
коэффициент пропорциональности

Квадратичная зависимость создает при некоторых применениях затруднения, поэтому используют поле предварительного смещения с индукцией 0,3–0,5 Тл.

# ДАТЧИКИ. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

**Емкостные датчики** служат для измерения перемещений, размеров деталей, уровня жидкости, механических напряжений, температуры.

Принцип действия емкостных датчиков основан на изменении емкости конденсатора под воздействием входной величины.

Такие датчики нашли широкое применение в схемах автоматики и измерительных приборов благодаря высокой чувствительности, малым габаритам, массе и инерционности, простой технологии изготовления.

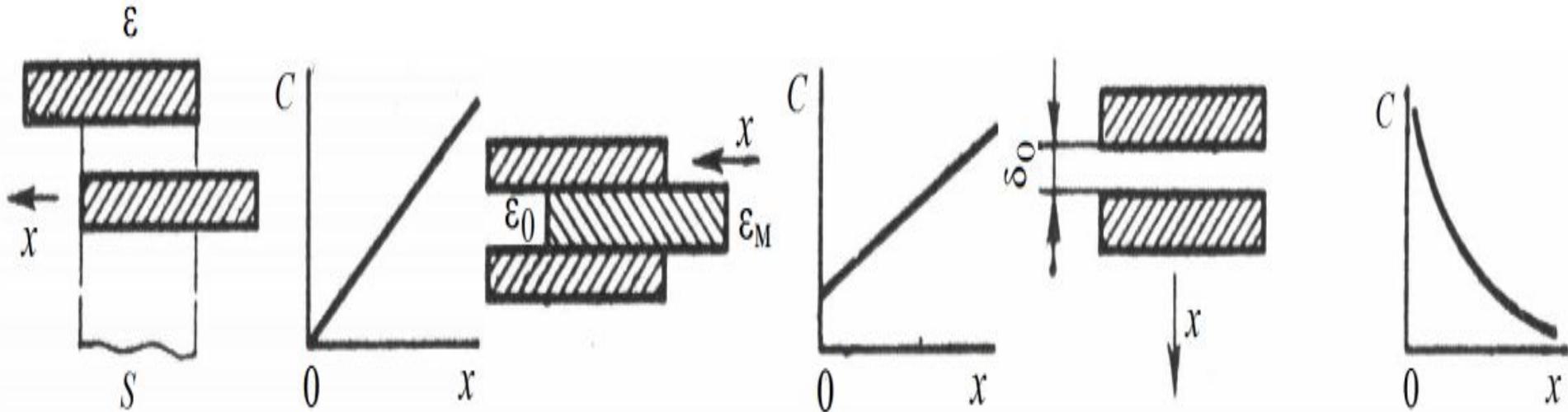
Недостатки емкостных датчиков:

- ✓ большое внутреннее емкостное сопротивление, что делает эти датчики маломощными;
- ✓ необходимость работы на высокой частоте источника питания;
- ✓ сильное влияние паразитных емкостей на точность работы датчика;
- ✓ влияние посторонних электрических полей,
- ✓ влияние изменения температуры ,
- ✓ влияние изменения влажности среды.

Недостатки емкостных датчиков вызваны тем, что при реальных технически целесообразных размерах удается получить небольшие их собственные емкости (10–50 пФ).

# ДАТЧИКИ. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Устройство емкостных датчиков и графики изменения их емкости при изменении площади перекрытия пластин (электродов) в результате смещения одной пластины конденсатора относительно другой (рис. а); при изменении диэлектрической проницаемости среды (рис. б) и изменении воздушного зазора между пластинами конденсатора (рис. в).



а

б

в

Конструктивно емкостной датчик представляет собой плоскопараллельный или цилиндрический конденсатор переменной емкости.

Одна из пластин неподвижна и механически соединена с корпусом контролируемого устройства, а вторая подвижна и соединяется с деталью

# ДАТЧИКИ. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Датчики с изменением величины воздушного зазора и площади перекрытия используются обычно для **измерения линейных и угловых перемещений, размеров деталей**, а датчики с изменением диэлектрической проницаемости – **для измерения уровней непроводящих жидкостей**.

Емкостной датчик перемещения с изменяющимся воздушным зазором применяют **в случае небольшого диапазона изменения контролируемой величины**, так как чувствительность зависит от измеряемого перемещения.

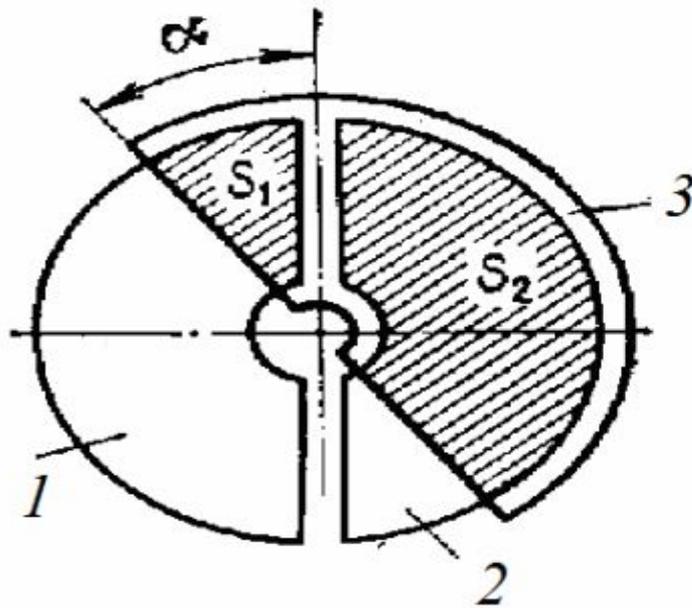
Емкостной датчик перемещения с переменной площадью перекрытия используется, в частности, **для измерения угла поворота вала**. Достоинством таких датчиков является возможность соответствующим выбором формы подвижной и неподвижной пластин получить заданную зависимость между изменением емкости и входным угловым или линейным перемещением.

Для повышения чувствительности емкостных датчиков применяют дифференциальные конструкции конденсаторных систем, которые используются для построения **датчика угловых перемещений**.

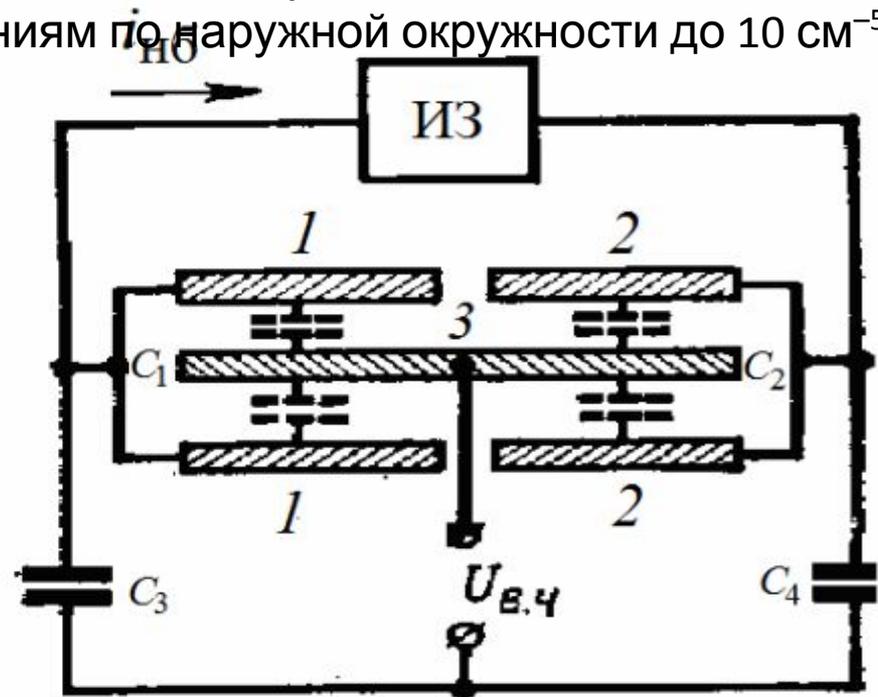
На работу емкостных датчиков оказывают влияние колебания температуры и влажности окружающей среды. Для устранения этого

# ДАТЧИКИ. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

Пример конструкции, использованной для построения датчика угловых перемещений. При повороте средней пластины 3 и увеличении угла  $\alpha$  емкость с пластины 3 на пластину 1 увеличивается (площадь  $S_1$ ), а емкость с пластины 3 на пластину 2 уменьшается (площадь  $S_2$ ). Если эти емкости ( $C_1$  и  $C_2$ ) включить в мостовую схему, включающую также постоянные емкости  $C_3$  и  $C_4$  и питаемую от источника высокой частоты  $U_{в.ч}$ , то неравенство  $C_1 \neq C_2$  приведет к появлению в диагонали моста тока небаланса, измеряемого элементом ИЭ. Выбором формы пластин 1, 2 и 3 можно добиться любого вида зависимости емкостей  $C_1$  и  $C_2$  от угла поворота  $\alpha$ . Расстояние между пластинами измеряется десятными долями миллиметра. Такие датчики позволяют измерять весьма малые углы, соответствующие линейным перемещениям по наружной окружности до  $10 \text{ см}^{-5}$ .



а

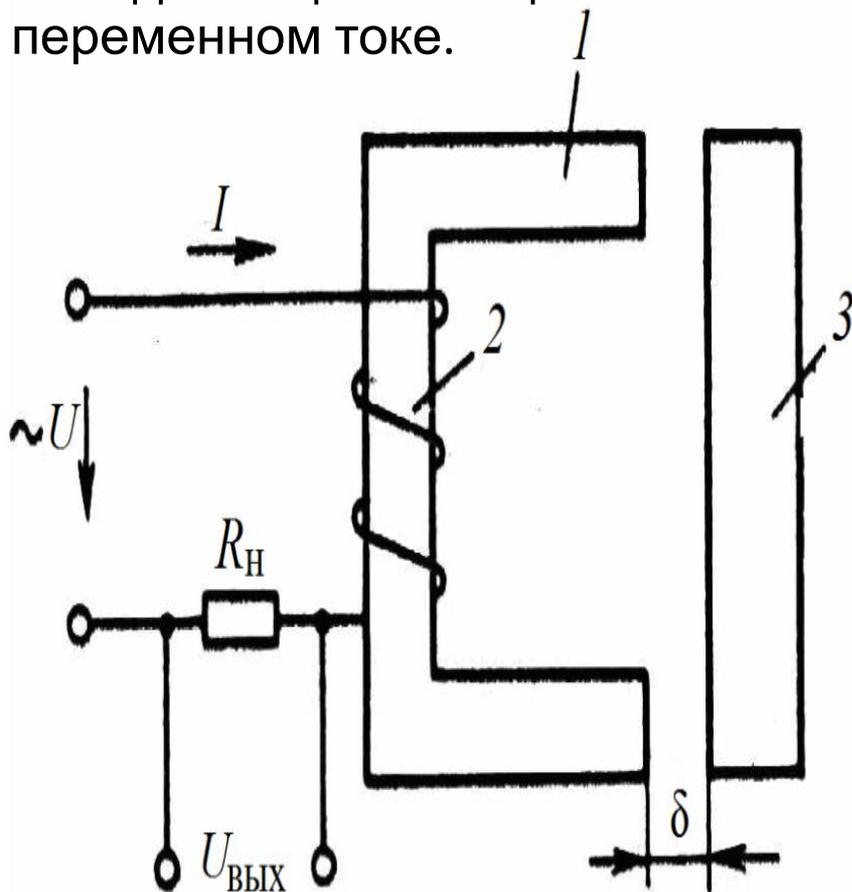


б

# ДАТЧИКИ. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Индуктивные датчики служат для измерения перемещений и сил. Принцип действия таких датчиков основан на изменении индуктивности обмотки, включенной в цепь переменного тока.

Достоинствами индуктивных датчиков являются большие надежность и срок службы ввиду отсутствия скользящих контактов. К недостаткам относятся наличие остаточного сигнала, чувствительность к изменению напряжения питания, наличие фазовых искажений и гальванической связи выходной цепи с цепью питания. Работают такие датчики только на переменном токе.



Индуктивность обмотки зависит от величины сопротивления немагнитного зазора и сопротивления магнитопровода.

Сопротивление немагнитного зазора может изменяться за счет изменения величины зазора или его площади.

На рисунке представлен датчик с изменяемым зазором. Датчик состоит из магнитопровода 1 с обмоткой возбуждения 2 и подвижного якоря 3. При перемещении якоря изменяется сопротивление магнитной цепи и индуктивность обмотки. Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, потоками рассеяния и выпучивания, то индуктив

$$L = \Lambda_{\delta} w^2 = \mu_0 S w^2 / (2\delta)$$

# ДАТЧИКИ. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

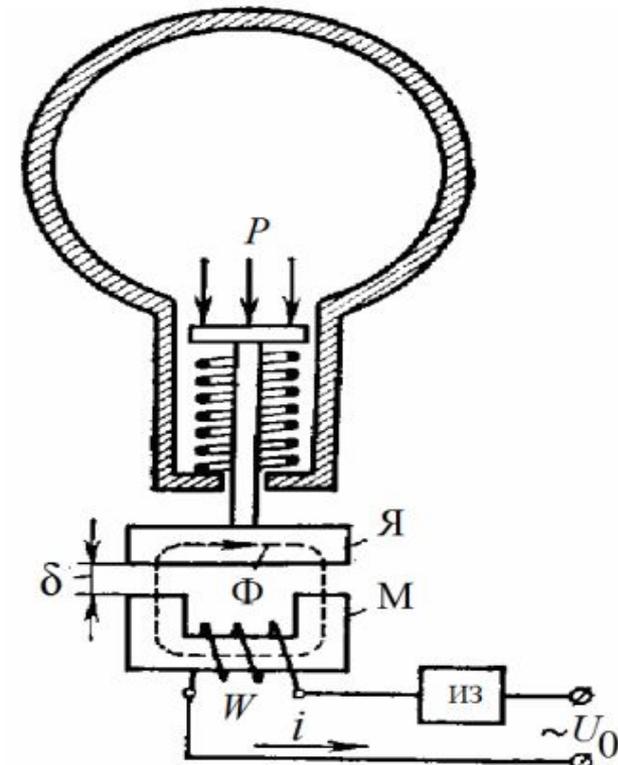
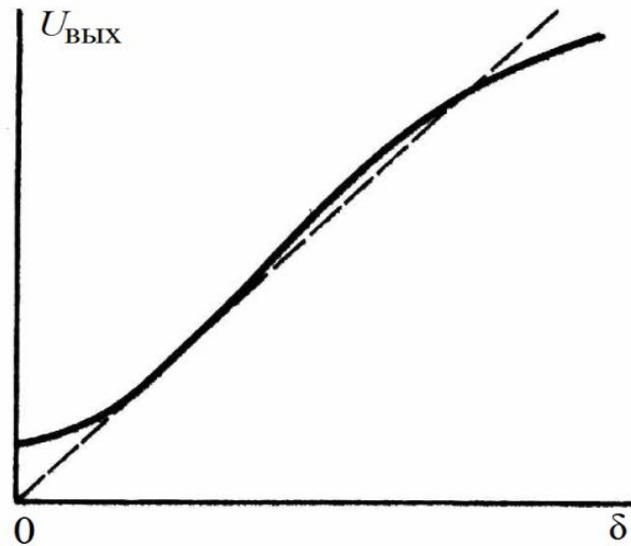
Выходное напряжение датчика (индуктивное сопротивление обмотки много больше активного)

$$U_{\text{ВЫХ}} = 2UR_H \delta / (\omega \mu_0 S_M w^2)$$

Зависимость выходного напряжения от зазора дана на рисунке. Реальная характеристика индуктивного датчика не проходит через начало координат. Это объясняется тем, что при  $\delta = 0$  сопротивление цепи имеет конечное значение и индуктивное сопротивление обмотки не равно  $\infty$ .

На рисунке показано применение индуктивного датчика для контроля давления  $P$  в закрытом резервуаре. Увеличение давления приводит к перемещению вниз якоря  $Я$  и уменьшению воздушного зазора  $\delta$  в магнитной системе датчика. Изменение воздушного зазора в магнитной системе, вызванное изменением давления  $P$ , фиксируется измерительным элементом ИЭ через соответствующую величину тока, частота которого обычно лежит в пределах 100–3000 Гц.

Индуктивные датчики такого типа имеют следующие недостатки: фаза выходного напряжения зависит от величины воздушного зазора; на якорь действует значительная электромагнитная сила; характеристика

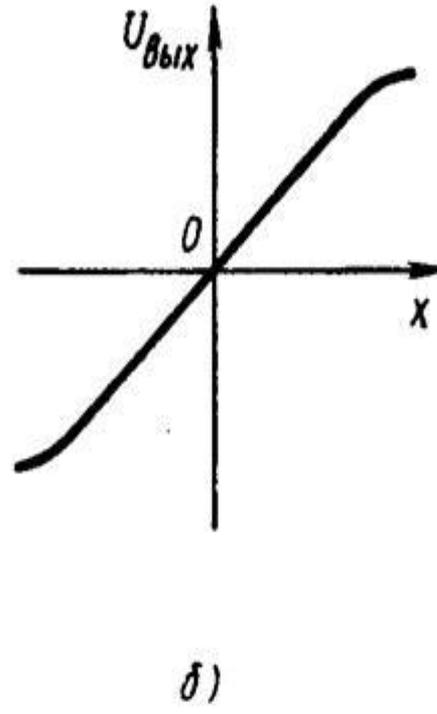
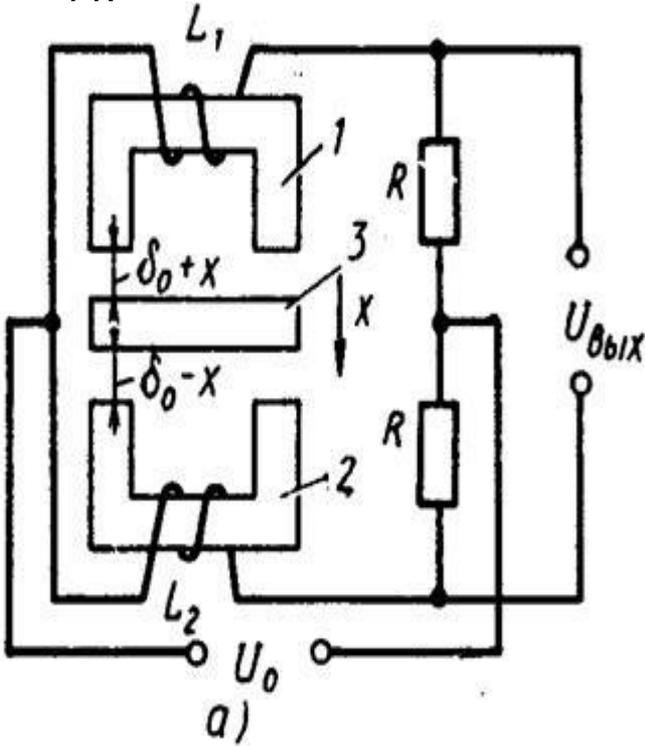


# ДАТЧИКИ. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Более широкое применение получили **реверсивные датчики**, имеющие лучшие характеристики. Дифференциальный реверсивный датчик содержит две совершенно одинаковые и симметрично расположенные электромагнитные системы.

В нейтральном положении якоря индуктивности обмоток равны.

Токи обмоток равны по величине и имеют противоположное направление, в результате чего ток нагрузки и выходное напряжение равны нулю. С увеличением перемещения якоря от нейтрального положения выходное напряжение растет по закону, близкому к линейному, при значительных перемещениях происходит замедление роста выходного напряжения, так как при больших зазорах одна из индуктивностей меняется мало. Изменение знака выходного напряжения при

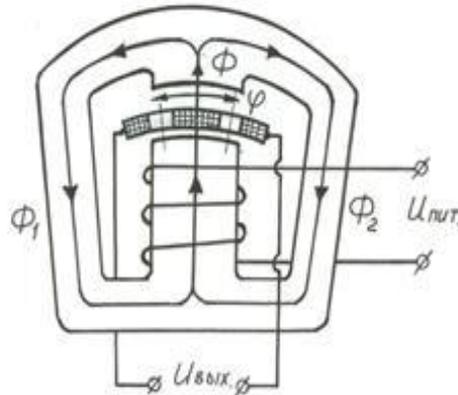
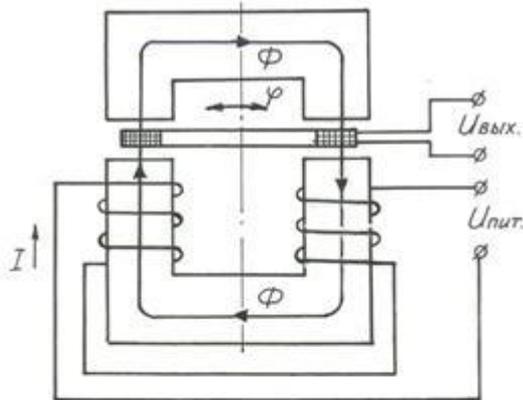
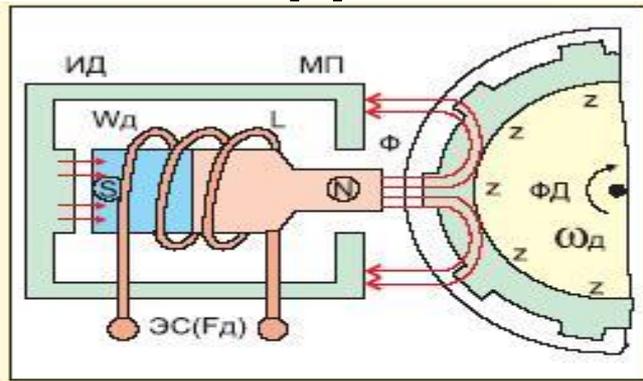


дет ~~реверсивный датчик~~ может быть включен по мостовой схеме (рис. а).

Реверсивные датчики имеют следующие преимущества перед нереверсивными: линейная часть выходной характеристики имеет большую протяженность (рис. б); электромагнитное усилие, действующее на якорь, значительно меньше (это объясняется частичной компенсацией

# ДАТЧИКИ. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

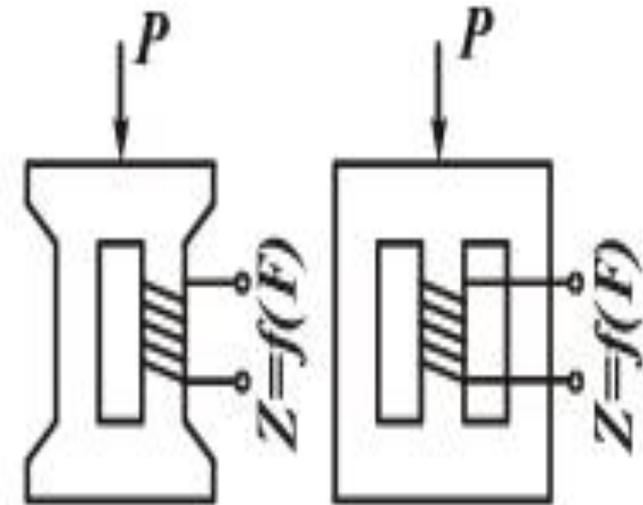
Для точного измерения больших перемещений применяются **линейные и круговые датчики с зубчатыми сердечниками**, позволяющие измерять также линейное и угловое перемещение путем счета периодов изменения выходного сигнала в процессе движения подвижной части.



Индуктивные датчики с подвижными экранами измеряют механические перемещения. При перемещении экрана в таких датчиках меняется реактивное сопротивление немагнитного зазора, а следовательно и индуктивное сопротивление обмотки.

Индуктивные магнитоупругие датчики предназначены для измерения значительных механических сил. Принцип действия таких датчиков основан на магнитоупругости (изменении проницаемости ферромагнитных тел под воздействием механических сил). Хорошими магнитоупругими свойствами обладают железоникелевые и железокобальтовые сплавы.

При изменении силы, действующей на магнитопровод, меняется полное электрическое



# ДАТЧИКИ. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Трансформаторные датчики применяются для измерения механических перемещений и сил. Они представляют собой трансформаторные устройства с переменной магнитной связью между первичной и вторичной обмотками.

Достоинствами трансформаторных датчиков являются отсутствие гальванической связи между источником питания и цепью нагрузки и скользящего контакта между подвижной и неподвижной частями, а также простые конструкция и технология изготовления.

К недостаткам датчиков относятся наличие остаточного сигнала и помехам со стороны электромагнитных полей.

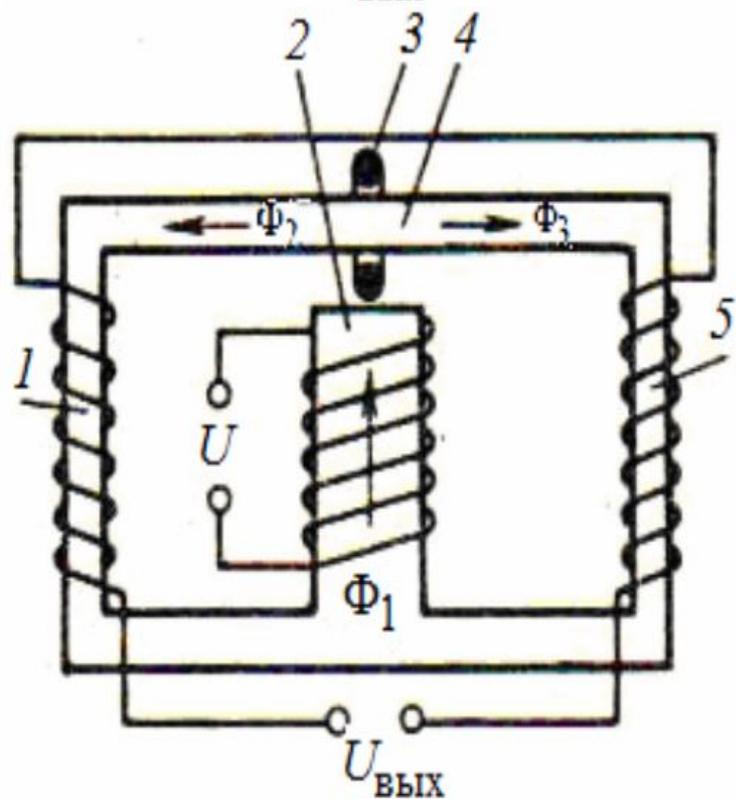
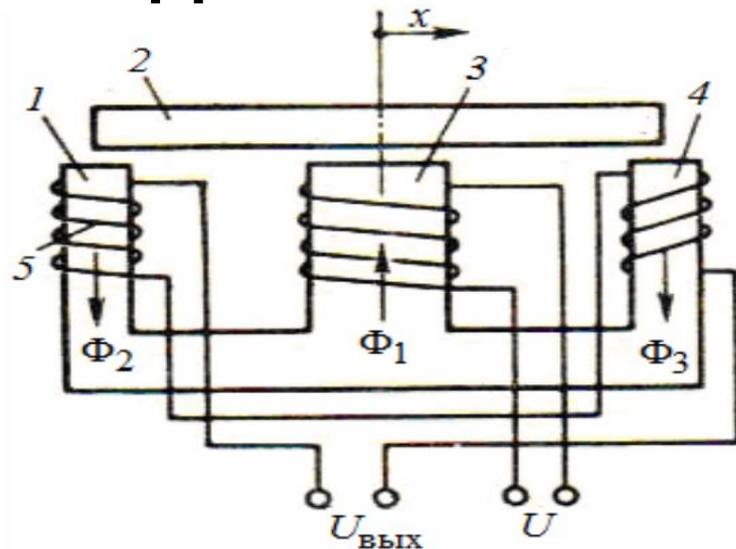
Трансформаторные датчики

датчики с перемещающимся якорем

датчики с перемещающимся электромагнитным экраном (короткозамкнутым витком)

датчики с перемещающейся обмоткой

# ДАТЧИКИ. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ



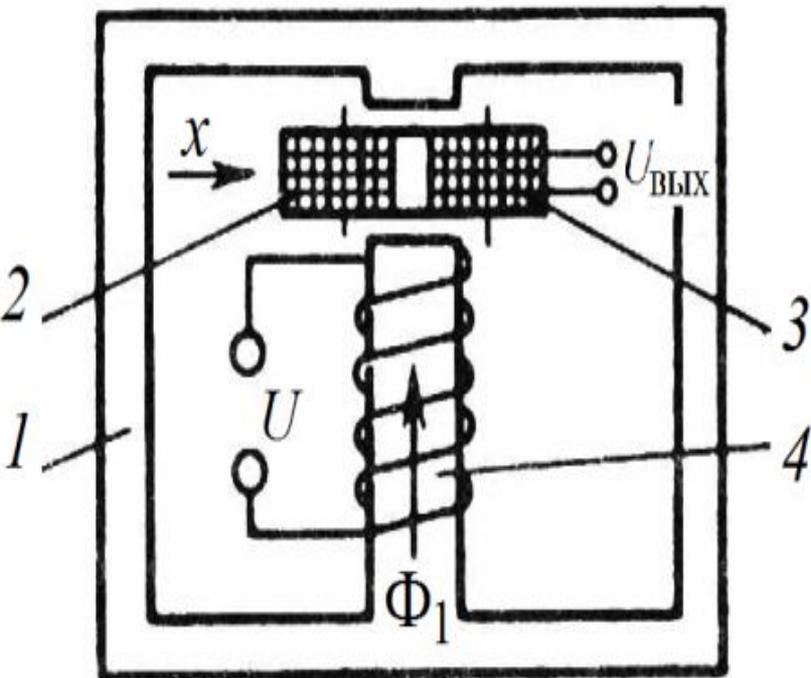
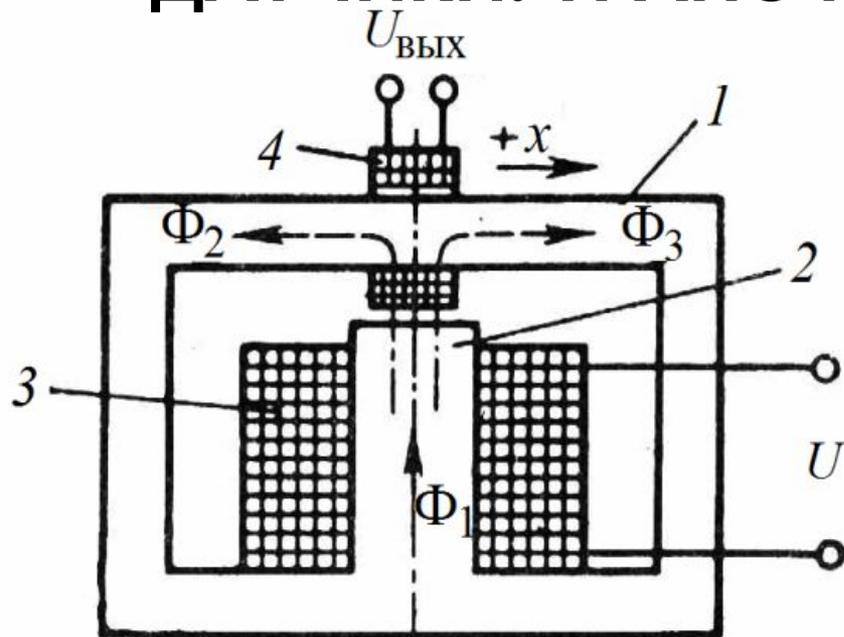
Трансформаторные датчики с перемещающимся якорем не имеют подвижной обмотки. При смещении якоря происходит перераспределение магнитных потоков в крайних стержнях, так как меняется проводимость воздушных зазоров и на выходе появляется сигнал, зависящий от смещения якоря; фаза сигнала соответствует направлению смещения.

На якорь датчика действует электромагнитная сила, которая нагружает подшипники и, кроме того, стремится вернуть якорь в исходное положение.

Магнитная система датчика с перемещающимся короткозамкнутым витком имеет зазор между средним стержнем 2 и горизонтальным магнитопроводом 4. Короткозамкнутый виток 3 охватывает магнитопровод и может свободно перемещаться вдоль него. Первичная обмотка надета на средний стержень, а последовательно и встречно включенные сигнальные обмотки расположены на боковых стержнях 1 и 5. Первичная обмотка создает поток  $\Phi_1$ , разветвляющийся на потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ . При отклонении витка от симметричного положения происходит перераспределение потоков  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , в результате которого образуется выходной сигнал, возрастающий по мере удаления витка от нейтрального положения.

В датчиках с короткозамкнутым витком возникает электродинамическая сила, 150

# ДАТЧИКИ. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ



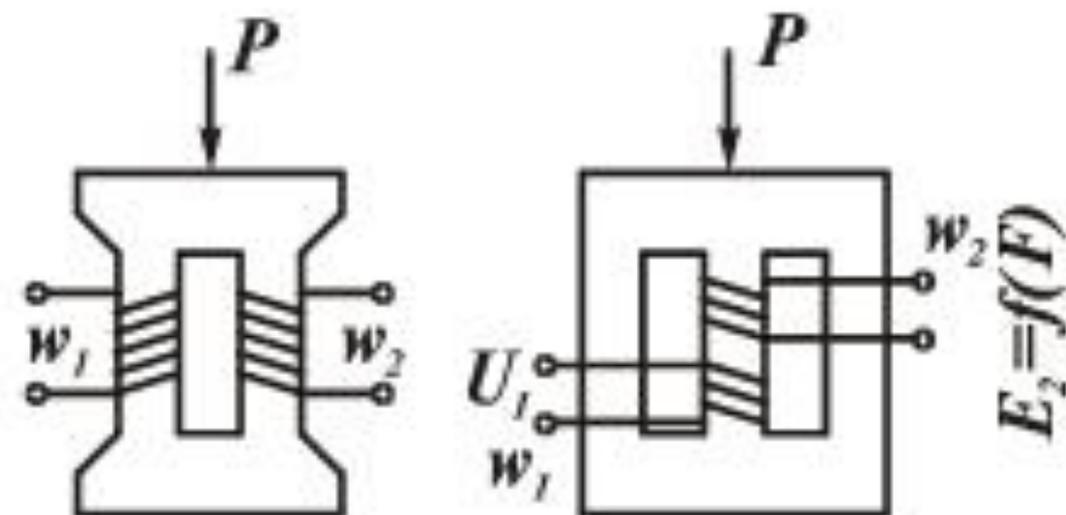
Магнитная система датчика со вторичной обмоткой, перемещающейся вдоль магнитопровода, имеет воздушный зазор между вертикальным сердечником 2 и горизонтальным 1. Последний охватывает вторичная обмотка 4. Первичная обмотка 3 расположена на среднем сердечнике. Взаимная индуктивность между обмотками изменяется при перемещении вторичной обмотки в магнитном поле, создаваемом первичной. Выходной сигнал зависит от перемещения.

Магнитная система датчика с обмоткой, перемещающейся в воздушном зазоре, состоит из замкнутого магнитопровода 1 с одним воздушным зазором и надетой на средний стержень 4 первичной обмотки. В воздушном зазоре перемещается вторичная обмотка, состоящая из двух одинаковых катушек 2 и 3, включенных встречно. При перемещении вторичной обмотки значения электродвижущих сил катушек меняются в зависимости от положения обмотки, в результате чего появляется выходной сигнал

# ДАТЧИКИ. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Рассмотренные трансформаторные датчики с перемещающейся обмоткой имеют сравнительно высокую чувствительность, малые остаточные сигналы, практически не имеют электромагнитной силы, действующей на подвижную обмотку, и не чувствительны к поперечным колебаниям обмотки.

На такой датчик практически не оказывают влияние магнитные поля, так как воздушный зазор шунтирован магнитопроводом. Кроме того, такие датчики проще по конструкции и технологии сборки.

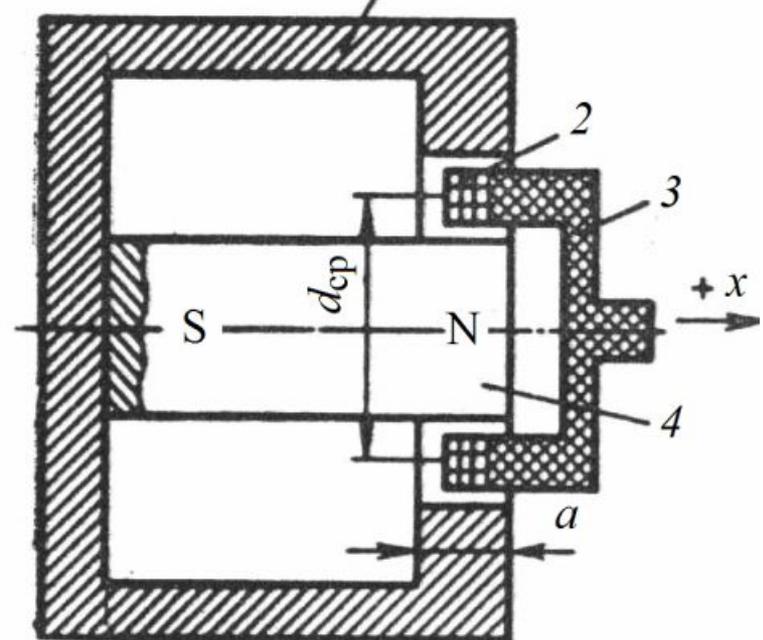


В трансформаторном магнитоупругом датчике изменение магнитной проницаемости при воздействии силы приводит к изменению магнитного потока и электродвижущей силы.

# ДАТЧИКИ. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Индукционные датчики предназначены для измерения линейных и угловых скоростей или перемещений. По принципу действия индукционные датчики можно разделить на **датчики со взаимным перемещением обмотки и магнита** и **датчики с изменяющейся величиной поля постоянного магнита**.

В датчиках первой группы индуктированная электродвижущая сила наводится благодаря линейным или угловым перемещениям обмотки в зазоре магнитной системы. При этом в некоторых конструкциях обмотка выполняется неподвижной, а перемещается магнитная система.



Индукционные датчики скорости в качестве входной величины имеют механическую скорость, а в качестве выходной – электрическое напряжение или электродвижущую силу.

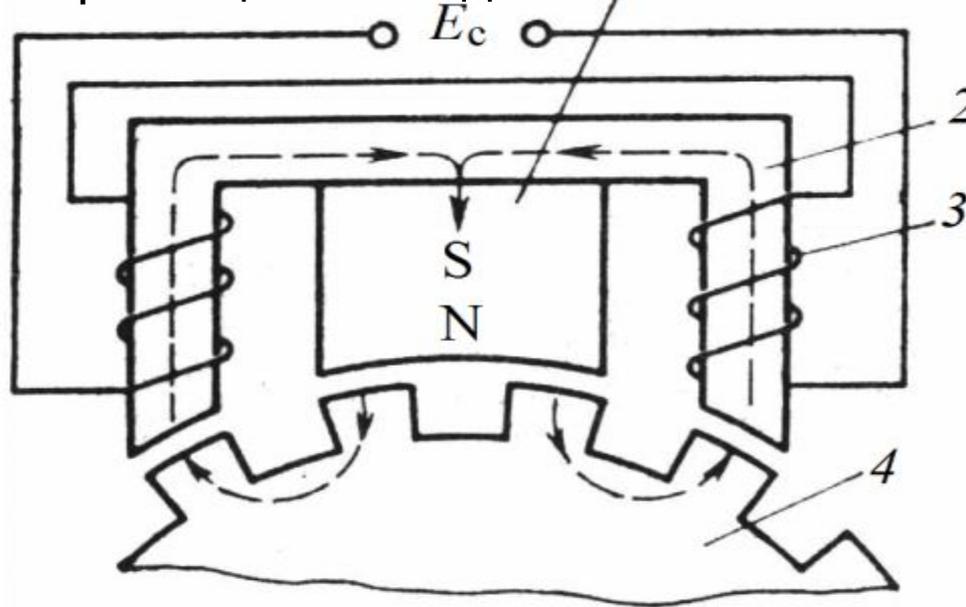
Датчик с взаимным перемещением обмотки и магнита представлен на рисунке. Магнит 4 цилиндрической формы является источником потока, замыкающегося через магнитопровод 1, который имеет форму полого цилиндра, и воздушный зазор. В воздушном зазоре вдоль оси перемещается сигнальная обмотка 2, выполненная в виде кольца.

Обмотка залита эпоксидным компаундом 3, что обеспечивает ей прочность и крепление

Индукционный датчик скорости

# ДАТЧИКИ. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

В датчиках второй группы индуктированная электродвижущая сила наводится в результате изменения магнитного сопротивления цепи при перемещениях подвижной части.



Индукционный датчик угловой скорости

Погрешность датчиков первой группы составляет 0,02–0,01%. У датчиков второй группы линейность зависит от магнитных характеристик материалов магнитной цепи. Поскольку эти характеристики обычно нелинейные, датчики второй группы имеют большую погрешность.

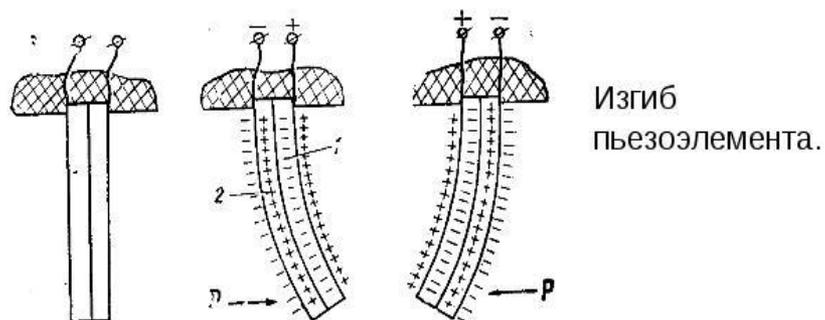
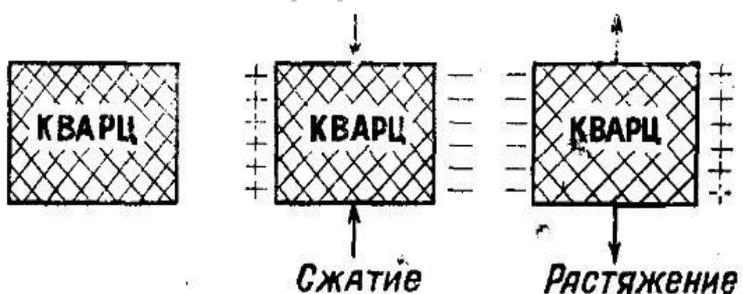
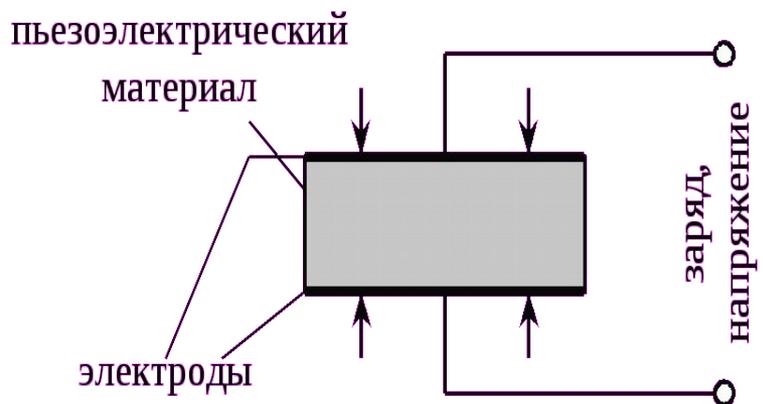
Выходной сигнал датчика может быть включен через выпрямительный мост на измерительный прибор постоянного тока. Если на выходе обмотки подключить счетчик импульсов, то по его показаниям можно определить количество прошедших деталей.

Датчик угловой скорости, изображенный на рисунке, относится по принципу действия ко второй группе. Он содержит постоянный магнит 1, жестко связанный с магнитопроводом 2, на стержнях которого расположена обмотка, состоящая из двух катушек 3, соединенных последовательно и согласно. При вращении зубчатого колеса 4 периодически меняются полная проводимость системы и магнитный поток, пронизывающий обмотку, в результате чего в ней наводится электродвижущая сила, пропорциональная скорости вращения колеса.

# ДАТЧИКИ. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

Пьезоэлектрические датчики широко применяются для измерения вибраций, переменных усилий и в ультразвуковых генераторах.

Принцип действия таких датчиков основан на использовании пьезоэлектрического эффекта, которым обладают некоторые кристаллы.

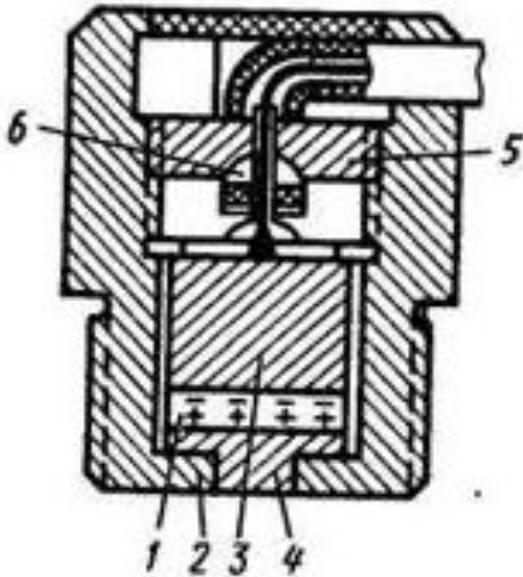


При воздействии механической силы на кристаллы в них происходит разделение (смещение) зарядов – одна область в кристалле заряжается положительно, а другая – отрицательно.

Пьезоэффект наиболее сильно выражен у кварца, турмалина, сегнетоэлектриков.

Различают прямой и обратный пьезоэффекты. Прямой пьезоэффект заключается в возникновении электрических зарядов на гранях кристалла под действием механических напряжений. Обратный пьезоэффект состоит в изменении геометрических размеров кристалла под действием электрического поля. Различают также продольный и поперечный пьезоэффекты, в зависимости от направления действия

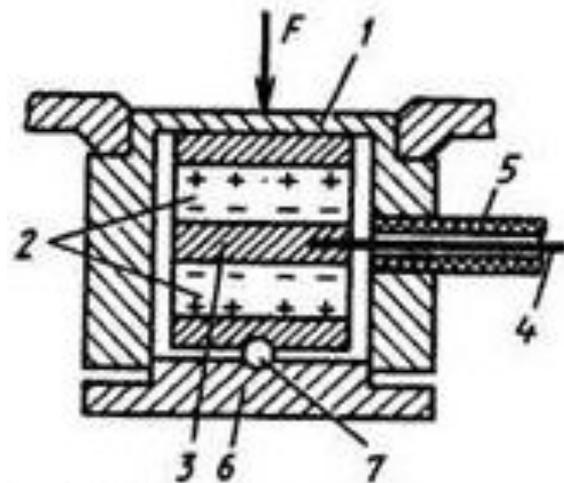
# ДАТЧИКИ. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ



Пьезоэлектрический датчик ускорения

Пьезоэлектрические датчики непригодны для контроля постоянных или медленно изменяющихся усилий, так как заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента, имеет малую величину. Кроме того, происходит его утечка через изоляцию. Из пьезокристаллов выполняют датчики динамических величин. Кварцевые датчики являются наиболее подходящими для работы в расширенном диапазоне температур при больших значениях преобразуемых усилий с точки зрения точности и стабильности характеристик.

Параллельное электрическое соединение пьезодатчиков, подвергающихся воздействию одной и той же силы (датчики располагаются столбом – один над другим), позволяет увеличить их чувствительность.



Пьезоэлектрический датчик давления

# ДАТЧИКИ. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Термоэлектрические датчики применяются для измерения температур. Специальные термоэлектрические датчики используются для измерения тепловой радиации, температуры нагревателей в термоанемометрах и вакуумметрах.

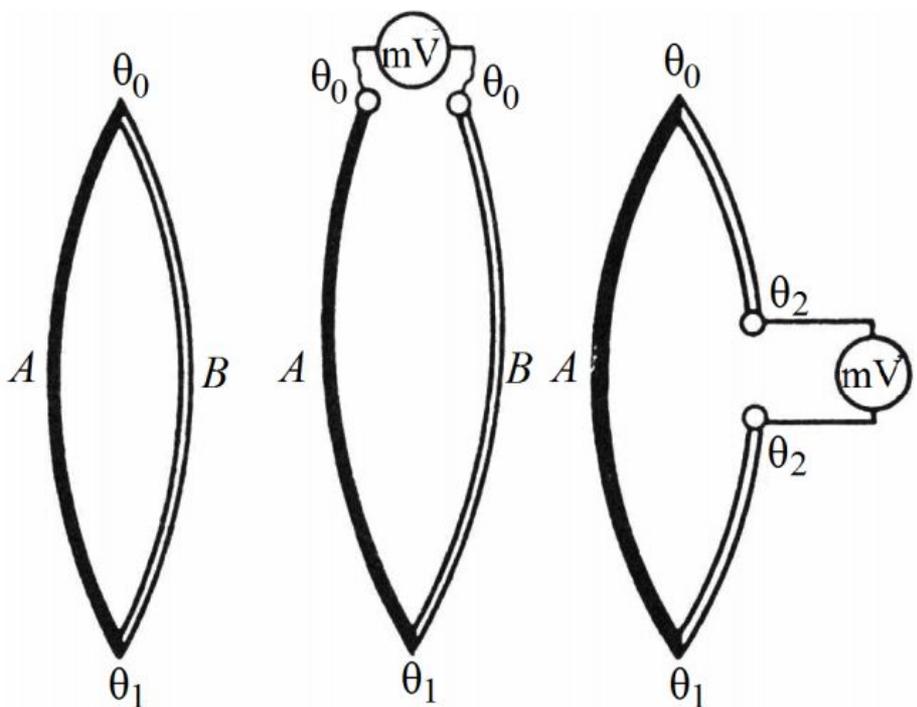
Принцип действия термоэлектрических датчиков основан на **явлении термоэлектричества**.

Явление термоэлектричества заключается в возникновении термоэлектродвижущей силы в цепи (термопаре), составленной из двух различных проводников или полупроводников (термоэлектродов) А и В (рис. 64, а), соединенных между собой концами (спаями), причем температуры мест соединения различны друг от друга.

Величина термоэлектродвижущей силы зависит только от материала проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температуры между спаями. Если один спай (рабочий) поместить в среду с температурой  $\theta_1$ , подлежащей измерению, а температуру  $\theta_0$  других, холодных спаев, поддерживать постоянной, то

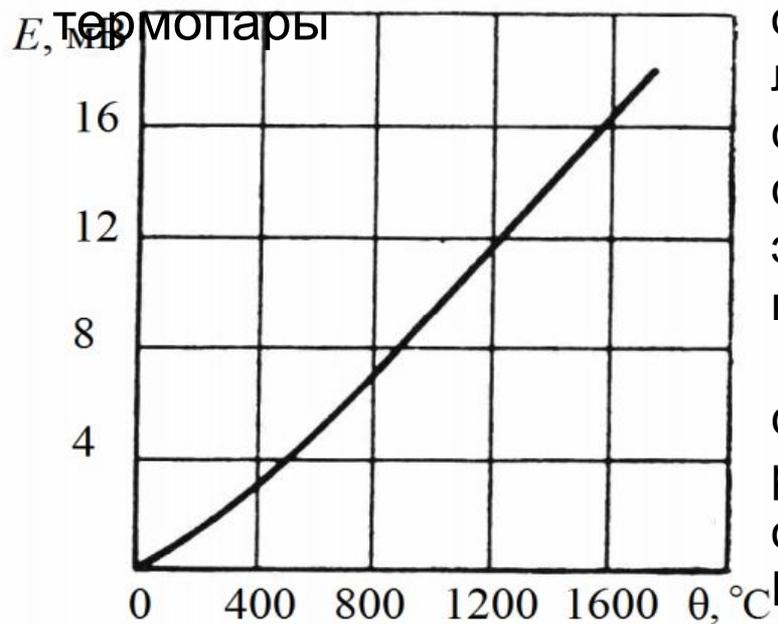
$$E_{AB}(\theta_1, \theta_0) = f(\theta_1) - C = f_1(\theta_1)$$

независимо от того, каким образом произведено соединение



# ДАТЧИКИ. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

## Характеристика



Материалы для термоэлектродов должны отвечать следующим требованиям: иметь линейную зависимость термоэлектродвижущей силы от температуры, неизменность физических свойств при эксплуатации, высокую электропроводность, малый температурный коэффициент сопротивления.

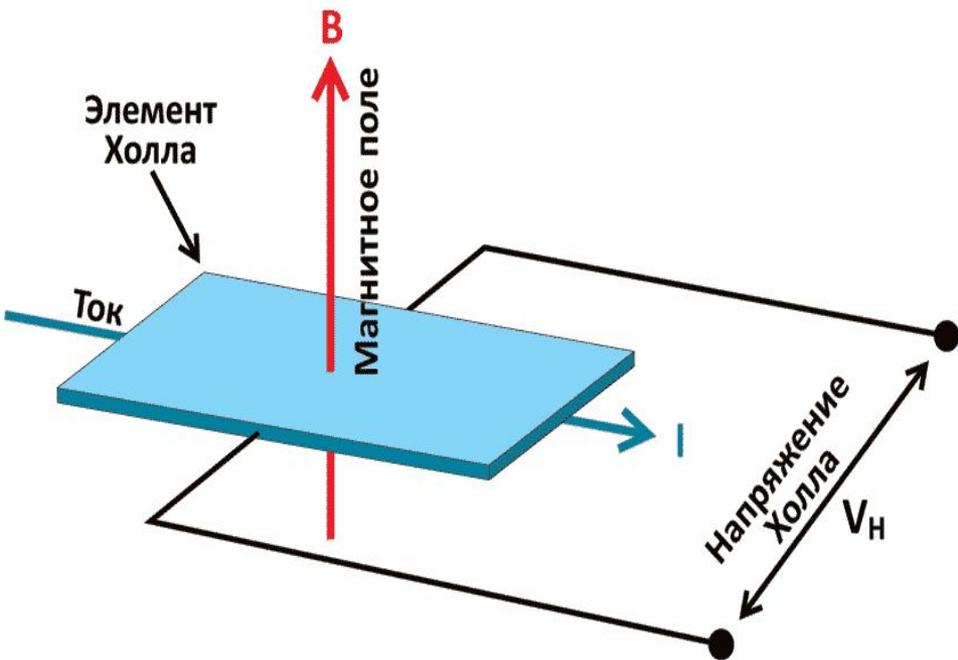
При конструировании термопар стремятся сочетать термоэлектроды, один из которых развивает с платиной положительную, а другой – отрицательную термоэлектродвижущую силу. Положительную термоэлектродвижущую силу имеют материалы, у которых в паре с платиной ток в горячем спае течет от платины (например, свинец, олово, магний), а отрицательную – материалы, у которых ток течет к платине (например, никель).

Термопары из благородных материалов отличаются стабильностью характеристик и устойчивостью к влиянию внешней среды. Недостаток их – небольшое значение термоэлектродвижущей силы.

Для повышения выходной

# ДАТЧИКИ. ДАТЧИКИ ХОЛЛА

Эффект Холла

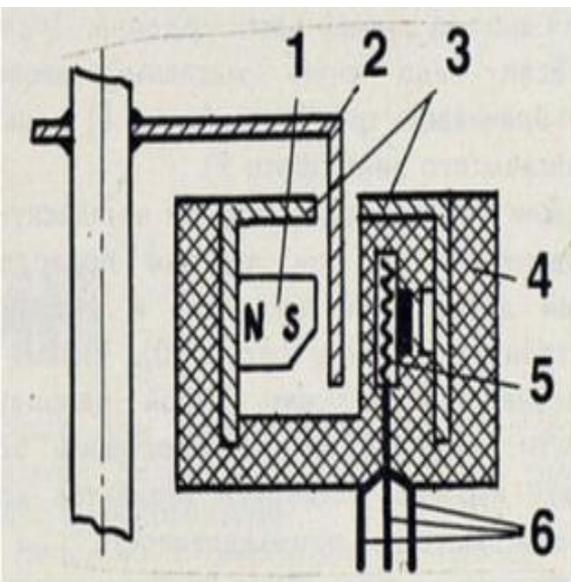


Датчики Холла используются для измерения магнитных, электрических и неэлектрических величин.

Принцип действия таких датчиков основан на **эффекте Холла**.

Эффект Холла возникает в пластине с током, помещенной в магнитное поле, и выражается в смещении носителей электричества к краям пластины, между которыми возникает электродвижущая сила Холла. Обычно длина пластины значительно превышает ее ширину, поэтому датчики Холла с пластинами из

металлов непригодны для практического применения из-за малой электродвижущей силы, соизмеримой с теми, которые наводятся посторонними электромагнитными полями (помехи). Практическое применение нашли датчики Холла с пластинами из полупроводниковых материалов. Материалами для изготовления датчиков Холла являются германи



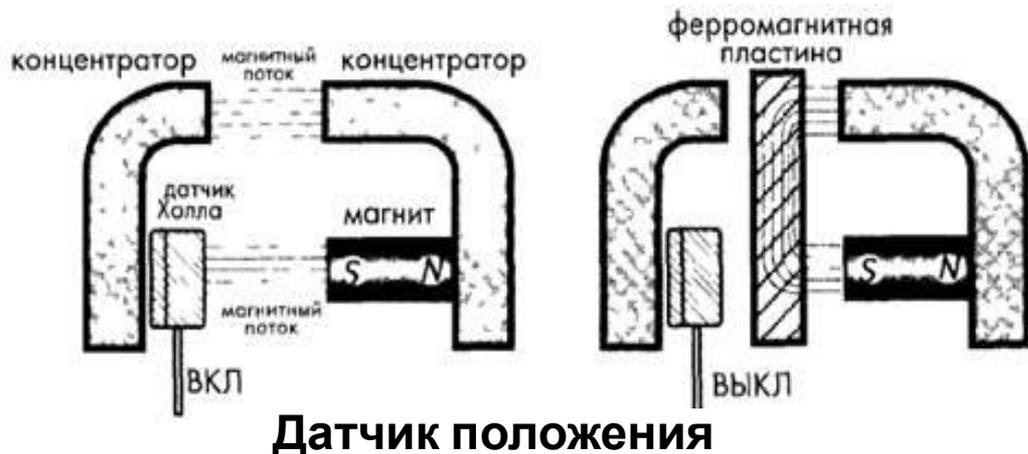
Устройство датчика Холла:

- 1 — постоянный магнит;
- 2 — лопасть ротора;
- 3 — магнитопроводы;
- 4 — пластмассовый корпус;
- 5 — микросхема;
- 6 — выводы.

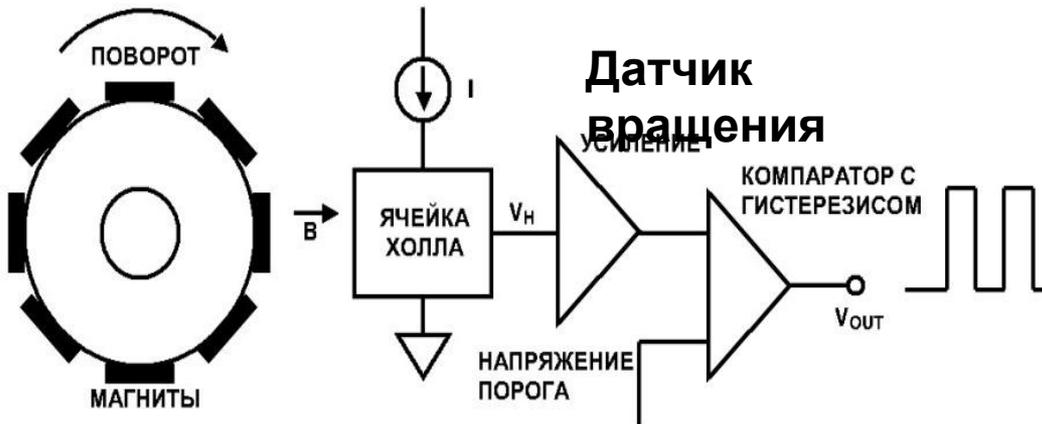
# ДАТЧИКИ. ДАТЧИКИ ХОЛЛА

Монокристаллические датчики изготавливаются в виде пластинок (толщина более 0,1 мм), которые с целью увеличения механической прочности покрываются синтетическими смолами с хорошей теплопроводностью.

Пленочные датчики изготавливают распылением материала по поверхности изолирующей подложки из слюды с последующей термообработкой. Толщина пленок – 0,002–0,05 мм. Для электрической изоляции пленки и ее защиты от механических повреждений применяют лаковые покрытия.



Датчики Холла позволяют измерять распределение магнитных полей в пространстве; проводить измерения в глубоких отверстиях и малых зазорах; имеют линейную зависимость выходного напряжения от управляющих величин; имеют малые размеры; широкий частотный диапазон для переменных величин тока или индукции и практически неограниченный срок службы.



Недостатками являются: относительно сложная технология; большой разброс параметров в пределах одной партии; зависимость коэффициента Холла