

# Схемотехника измерительных устройств

## Лекция 1

### Преобразователи физических величин

усложнение современного производства, развитие научных исследований в различных направлениях привело к необходимости измерять или контролировать одновременно сотни, а иногда и тысячи физических величин.

При этом наметился переход к принятию решений на основании использования результатов не отдельных измерений, а потоков измерительной информации, интенсивность которых возрастает за счет увеличения частотного диапазона и числа измеряемых величин.

# Схемотехника

научно-техническое направление,

занимающееся проектированием, созданием и

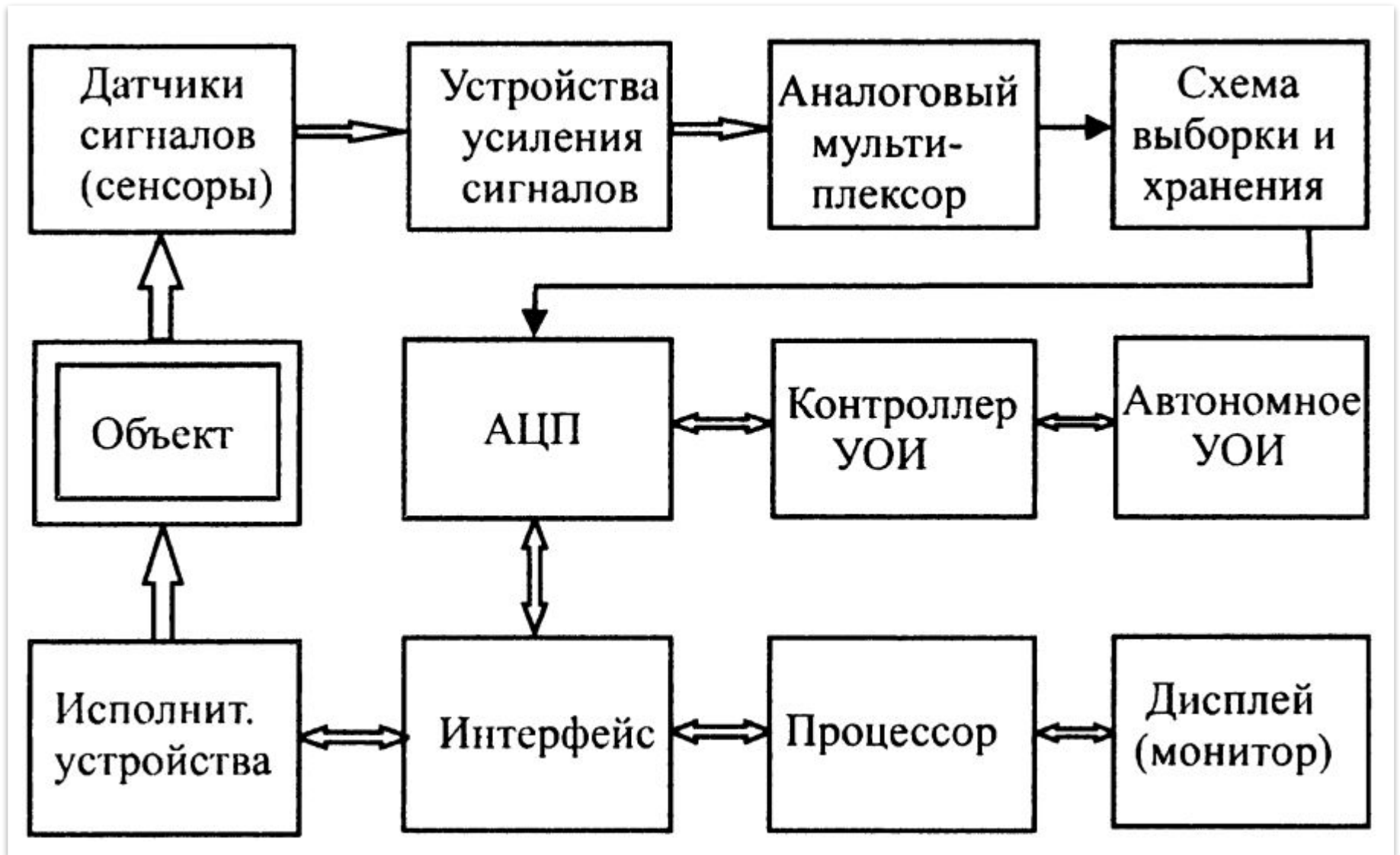
отладкой электронных схем и устройств

различного назначения

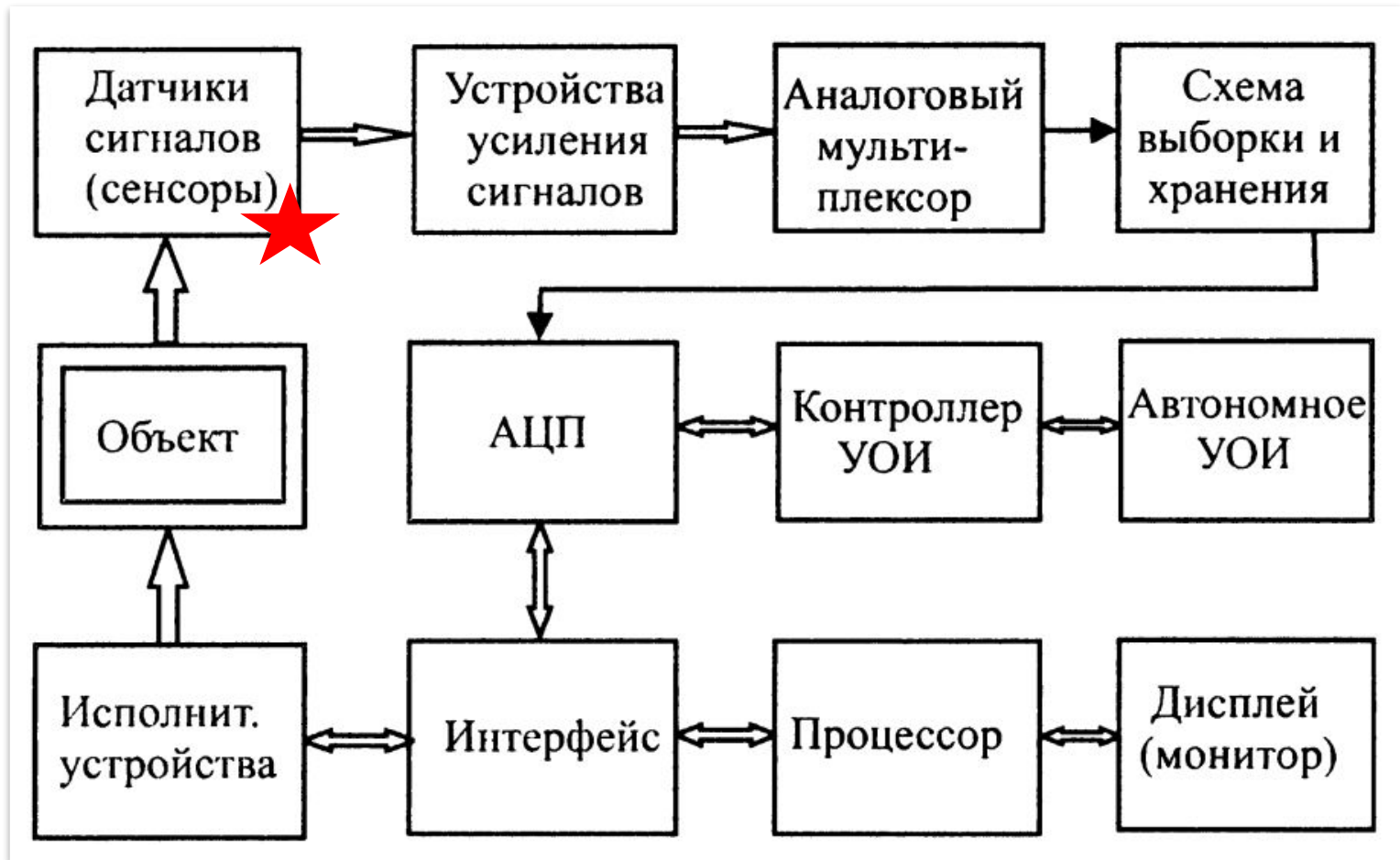
# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (ИИС)

Основными функциями ИИС являются:

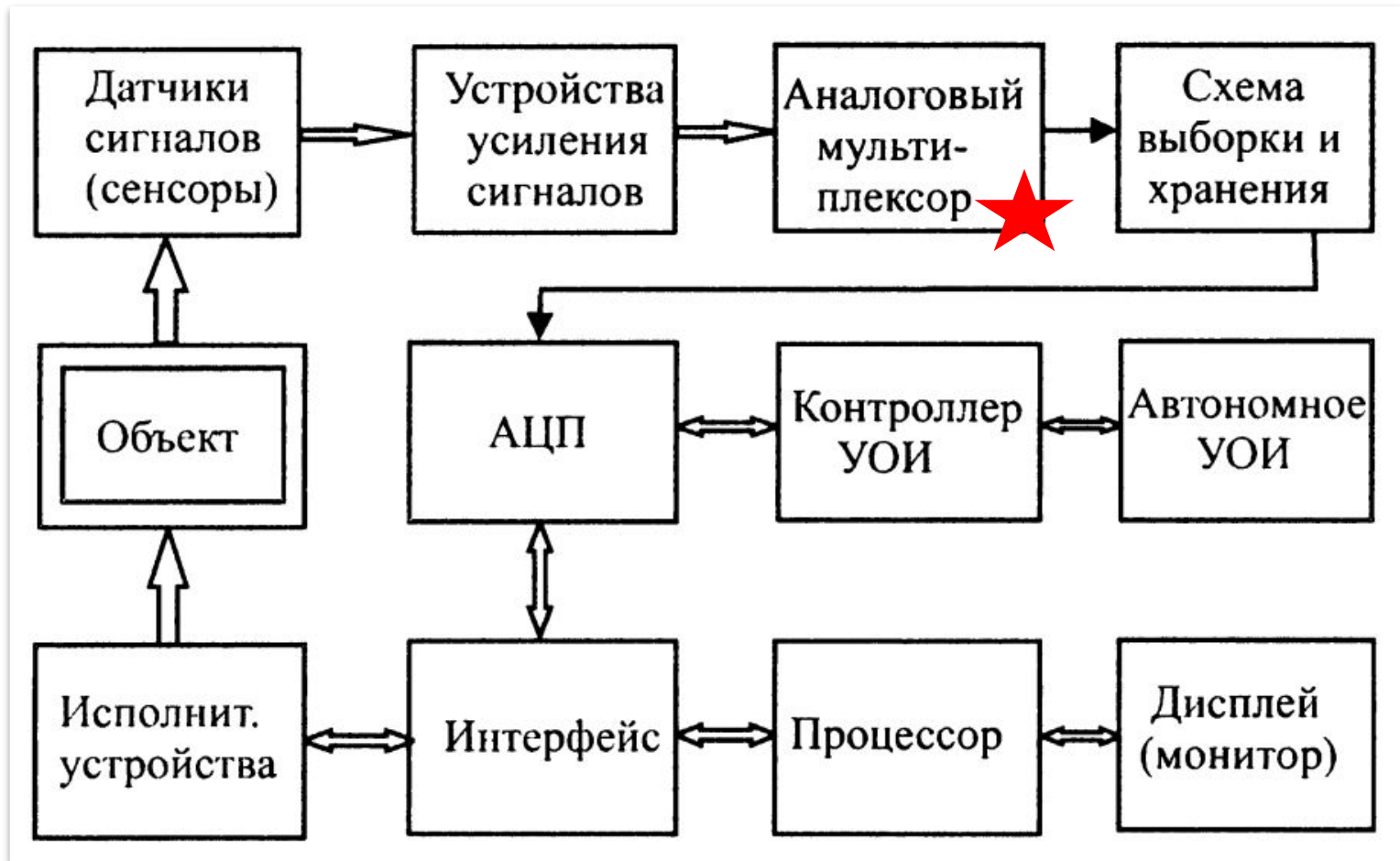
- получение измерительной информации от объекта исследования;
- обработка;
- представление информации оператору;
- формирование управляющих воздействий на объект исследования.



**Структурная схема ИИС**  
 (УОИ – устройство отображения информации)



Датчики – датчики давления, движения, концентрации, температуры и т.д.- представляют собой первичные преобразователи и схему включения преобразователей.



Аналоговый мультиплексор – предназначен для выбора каналов, по которым передается информация с датчиков.



Для современного этапа развития техники характерны следующие ориентировочные стоимостные оценки ИИС:

Датчики — 40% общей стоимости ИИС

Устройства обработки данных — 20% стоимости ИИС

Устройства регистрации и отображения информации — 40%



Для современного этапа развития техники характерны следующие ориентировочные стоимостные оценки ИИС:

Датчики — 40% общей стоимости ИИС

Устройства обработки данных — 20% стоимости ИИС

Устройства регистрации и отображения информации — 40%

# Измерительное преобразование

представляет собой отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной.

Применение измерительных преобразований является единственным методом практического построения любых измерительных устройств

В сложных технических ИИС для обеспечения высокой надежности необходимо применять большое количество датчиков для контроля физических величин.

Например, в отечественной космической системе «**Буран**» использовалось около **3000** датчиков

25% — датчики давления,  
40% — датчики температуры



# Измерительный преобразователь (ИП)

Измерительные преобразователи преобразуют любые физические величины  $x$  (электрические, неэлектрические, магнитные) в выходной электрический сигнал

$$Y = f(x)$$

# Датчик

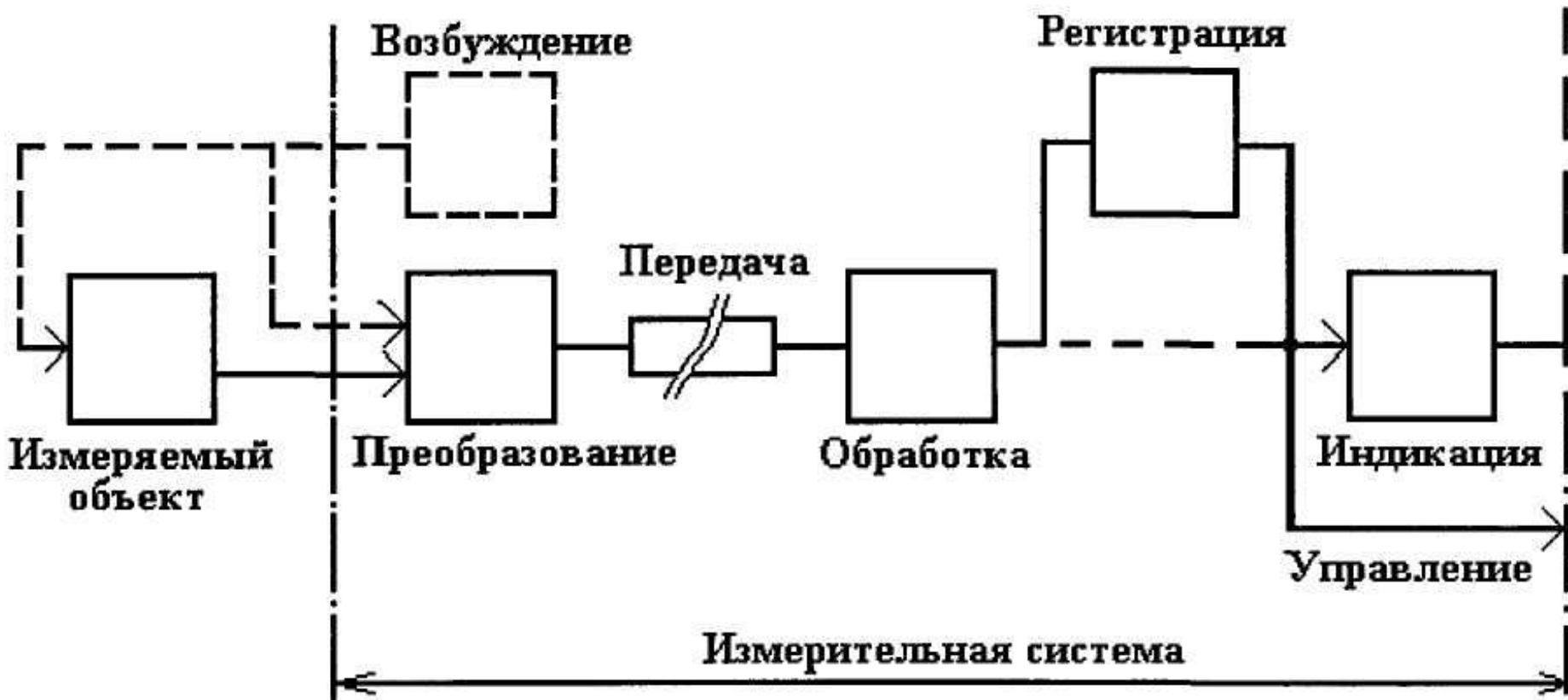
конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации.

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерения, принимающего его сигналы

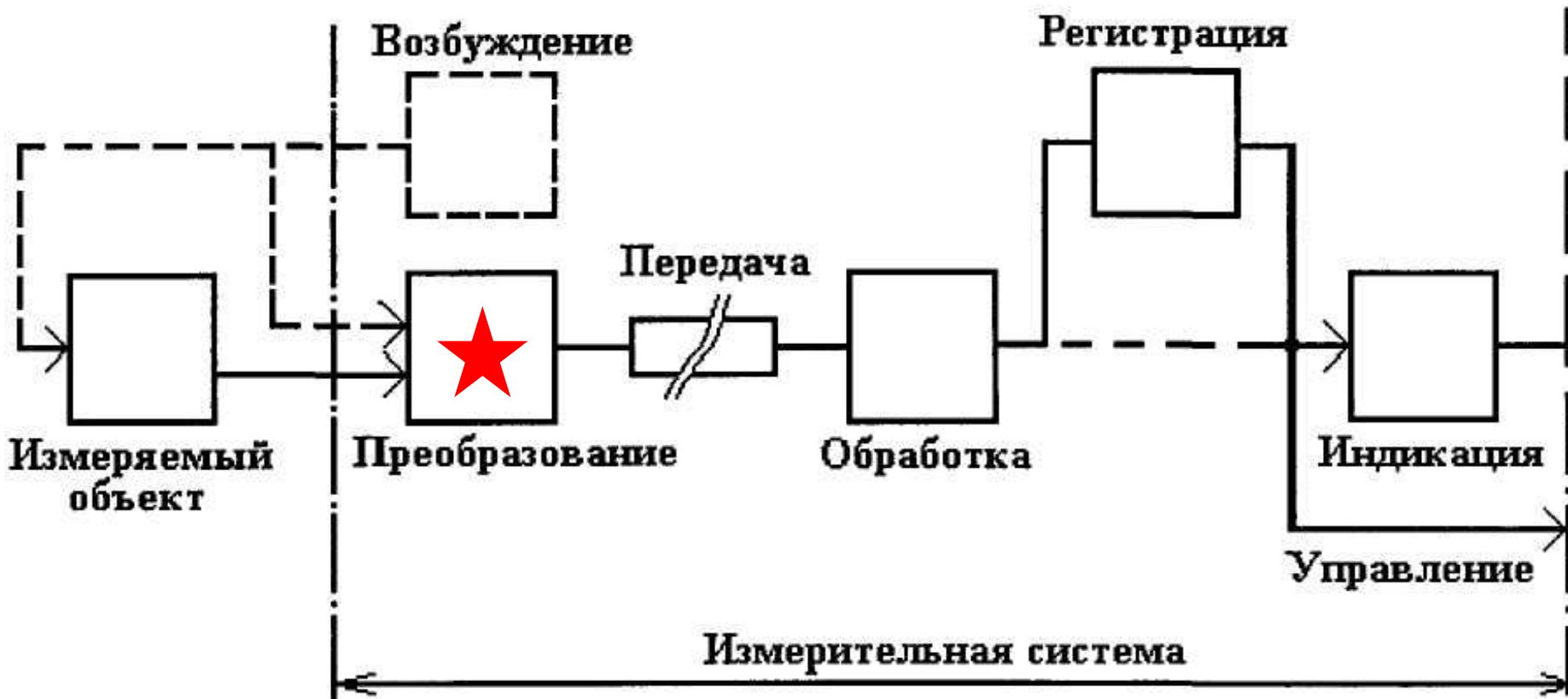


В общем случае по виду входных и выходных физических величин ИП можно подразделить на:

- преобразователи неэлектрических величин в неэлектрические,
- неэлектрических величин в электрические,
- электрических величин в электрические,
- электрических величин в неэлектрические.



Структурная схема простейшей измерительной системы

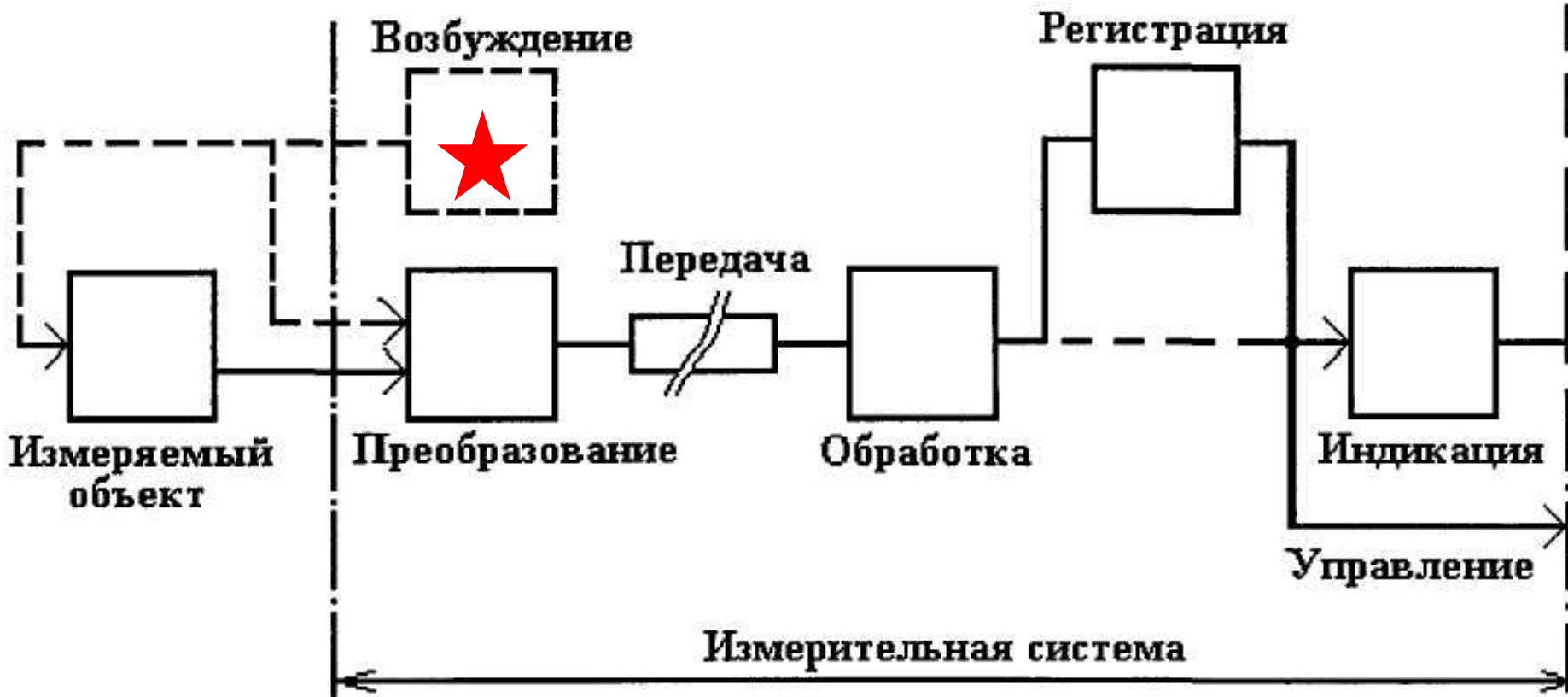


**Преобразователь** - первый элемент измерительной системы - является основным источником электрического сигнала, тогда как остальная часть цепи должна обеспечить <sup>19</sup> передачу, обработку и использование сигнала.

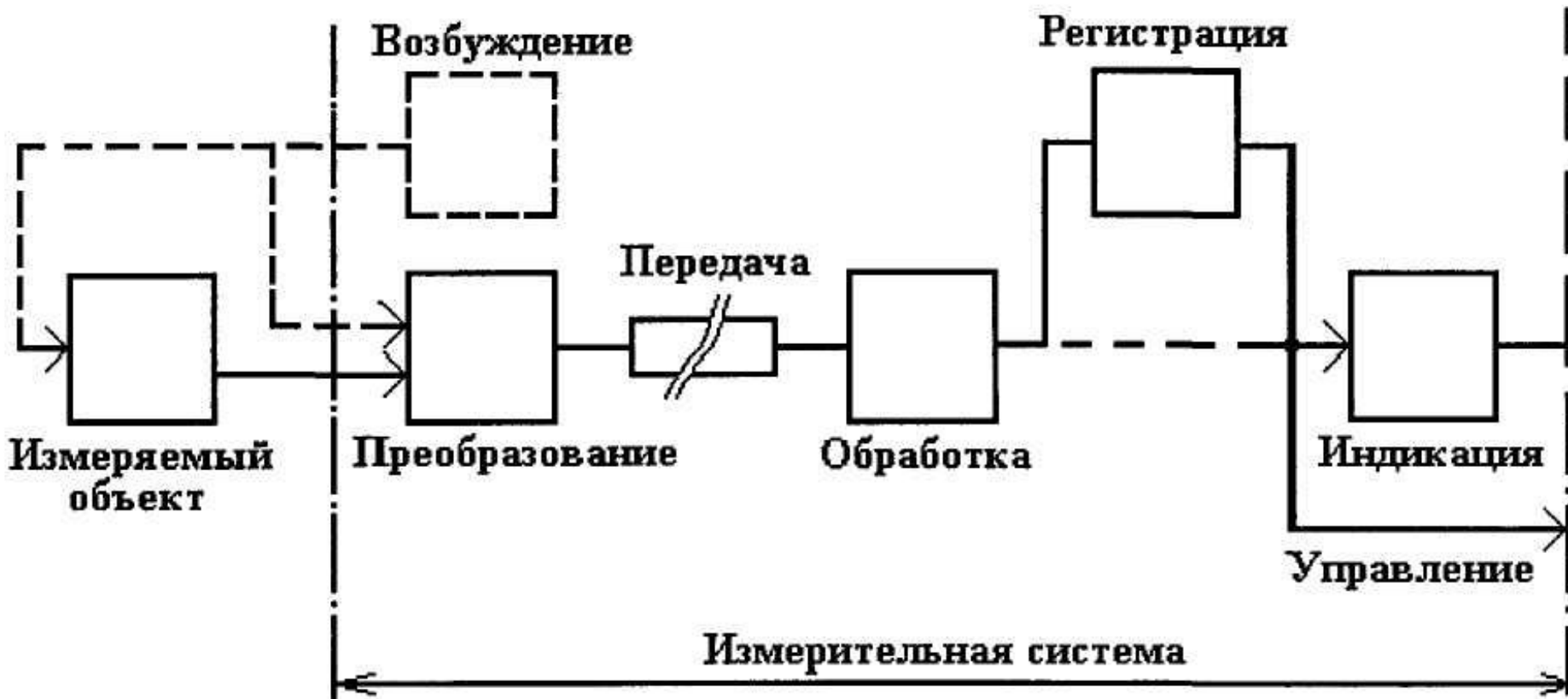
# Электрический сигнал

это переменная составляющая тока или напряжения, которая несет информацию, связанную со значением измеряемой величины

Амплитуда и частота сигнала должны быть непосредственно связаны с амплитудой или частотой измеряемой величины



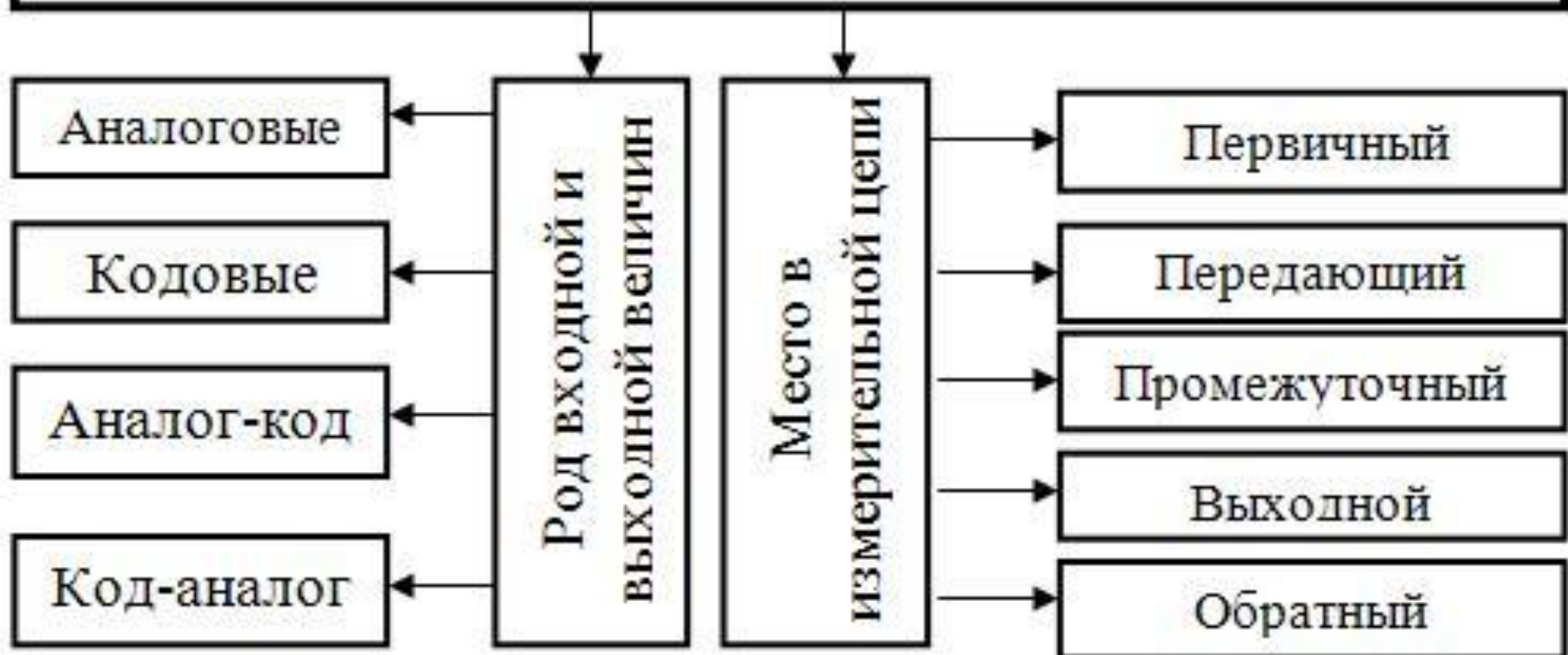
В тех случаях, когда измеряемая величина не является активной, необходимо воспользоваться источником возбуждения, который будет оказывать воздействие на измеряемый объект. Тогда отклик объекта будет содержать желаемую информацию



Не во всех измерительных системах имеются все шесть подсистем. Подсистемы не обязательно должны следовать в том порядке, как указано в нашем примере. Часто, например, какая-то обработка сигнала производится до его

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

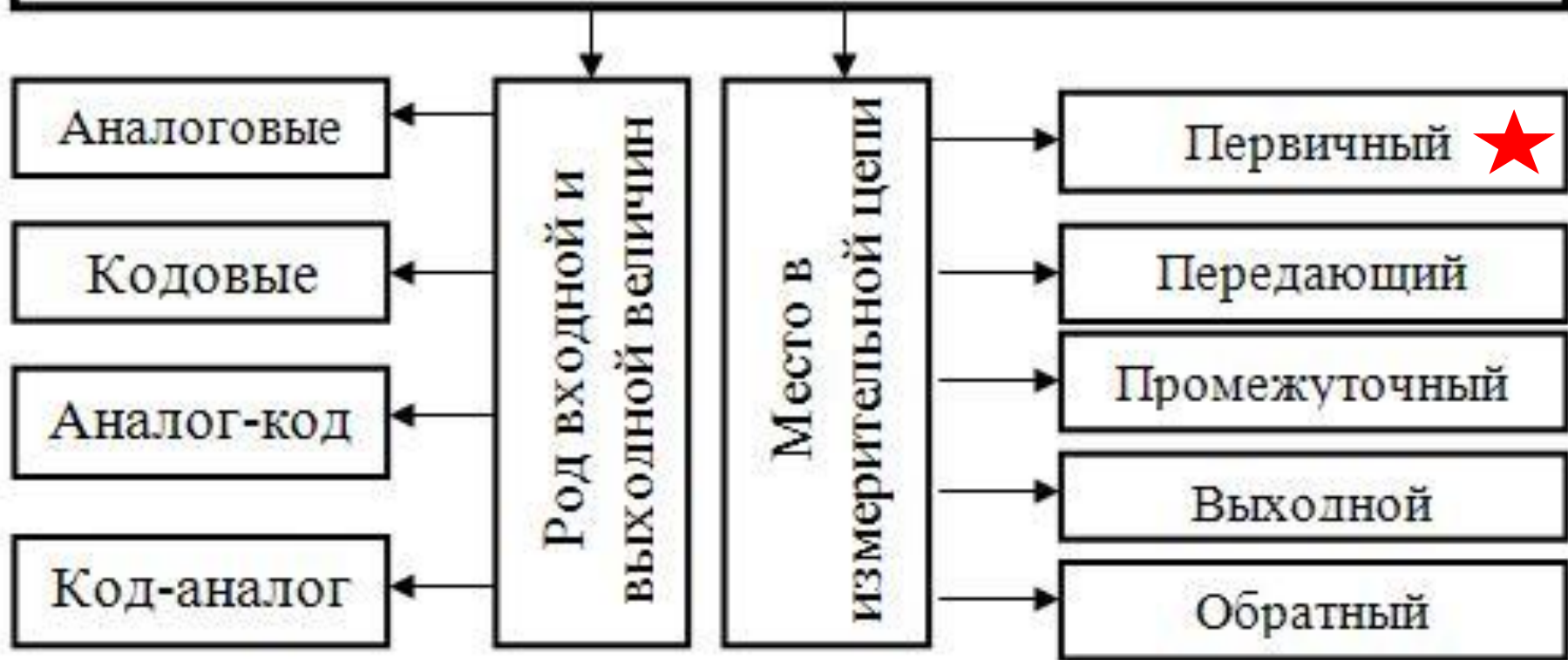
# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



**Классификация измерительных преобразователей**

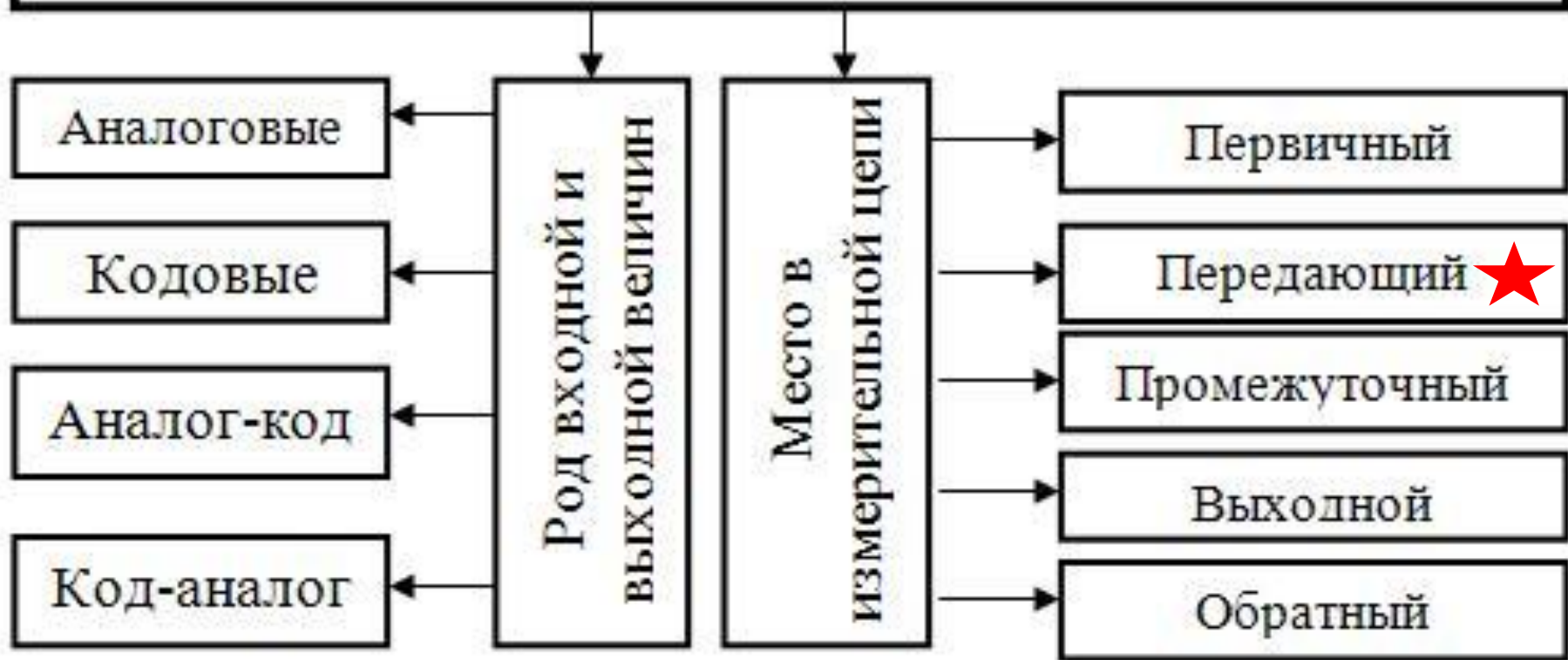


# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



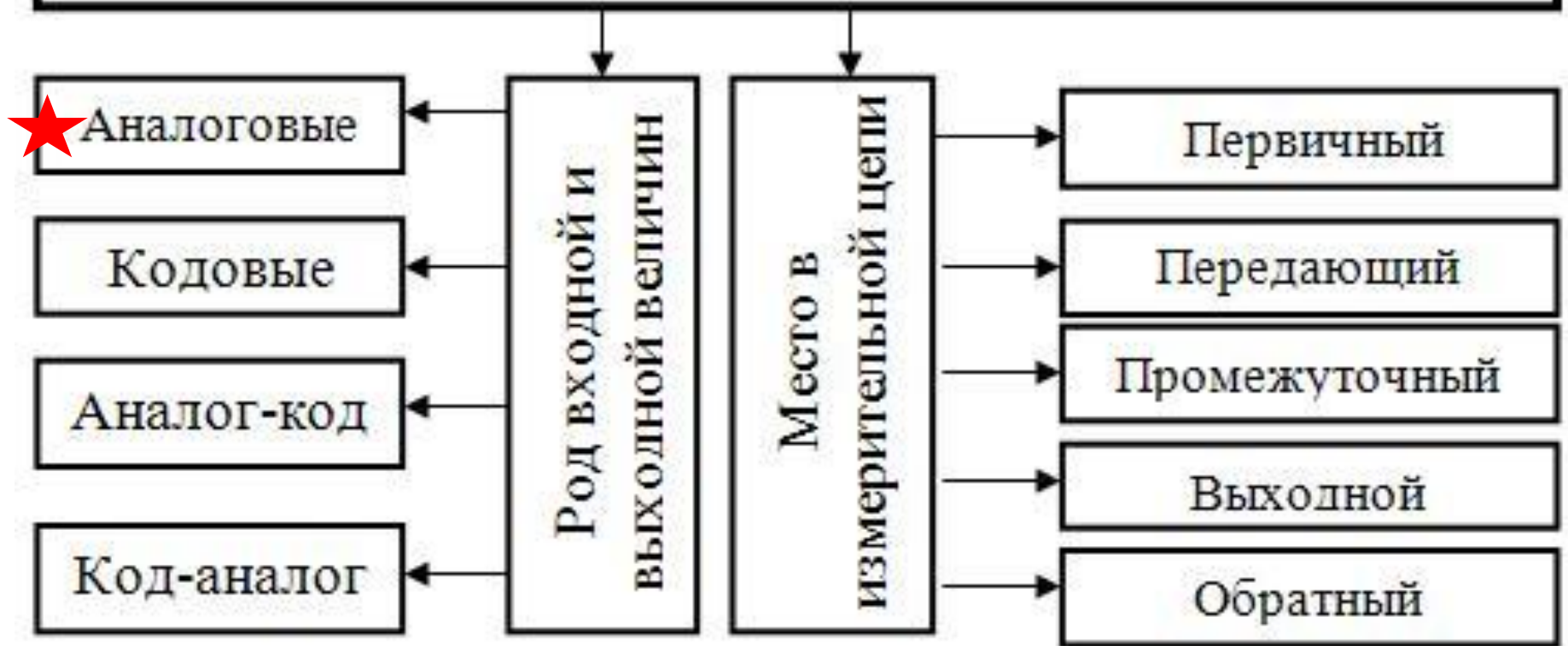
**Первичный преобразователь** - измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



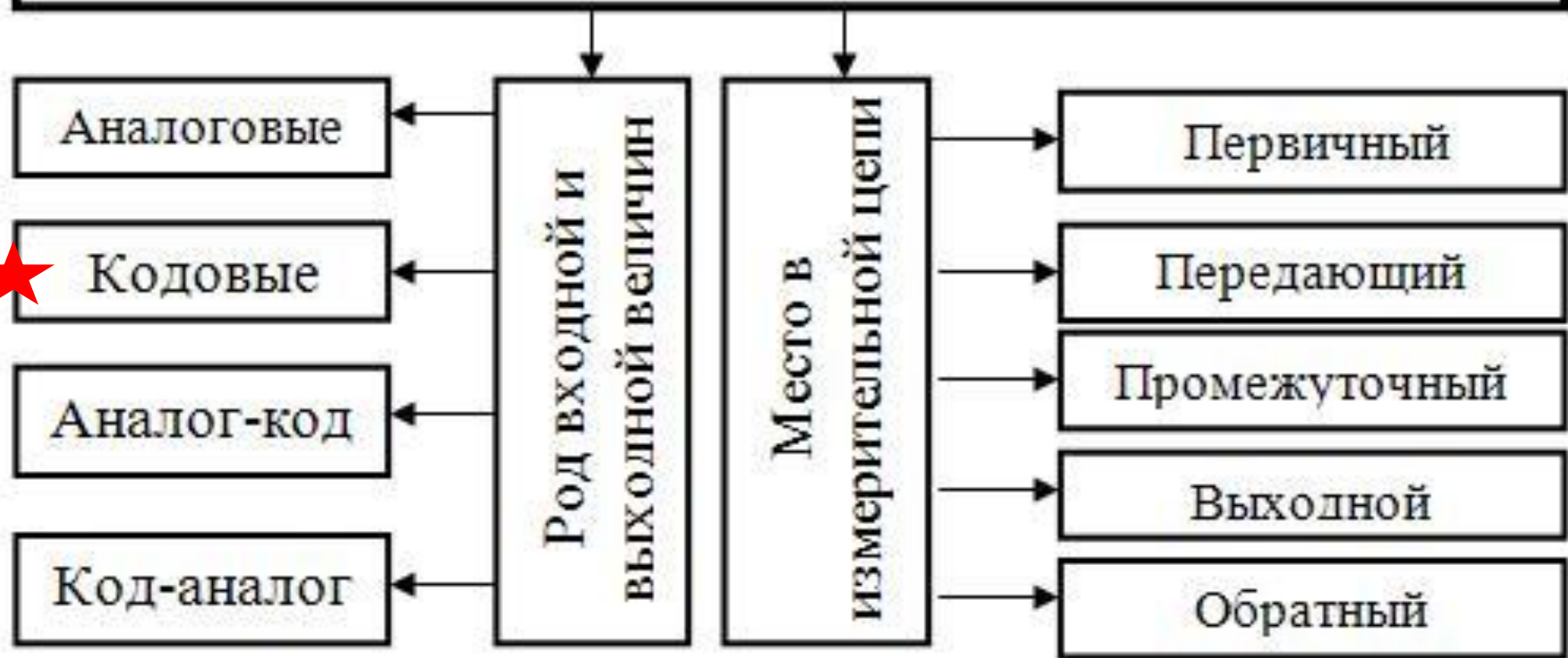
**Передающий преобразователь** - измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



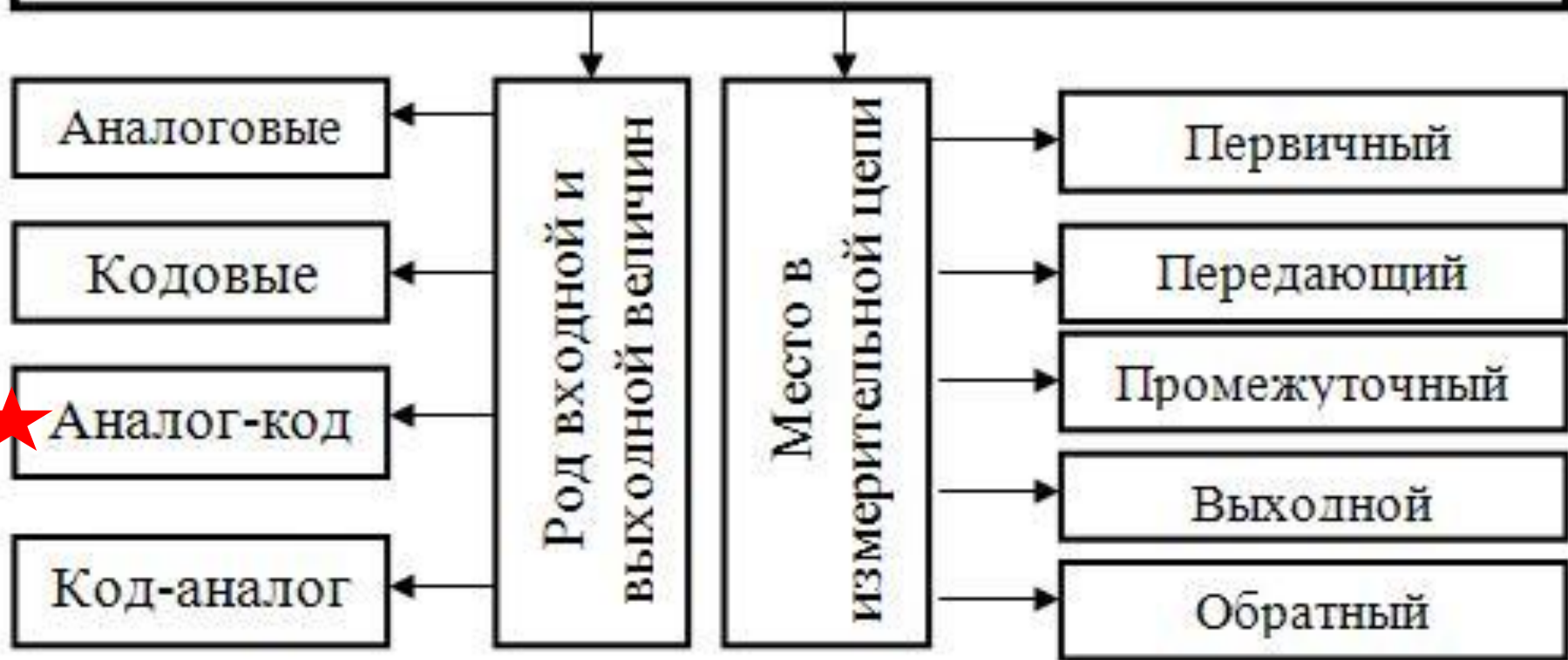
**Аналоговый преобразователь** - измерительный преобразователь, преобразующий одну аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал) в другую аналоговую величину (аналоговый измерительный сигнал)

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



**Цифровой преобразователь** - измерительный преобразователь, преобразующий цифровой измерительный сигнал в другой цифровой измерительный сигнал

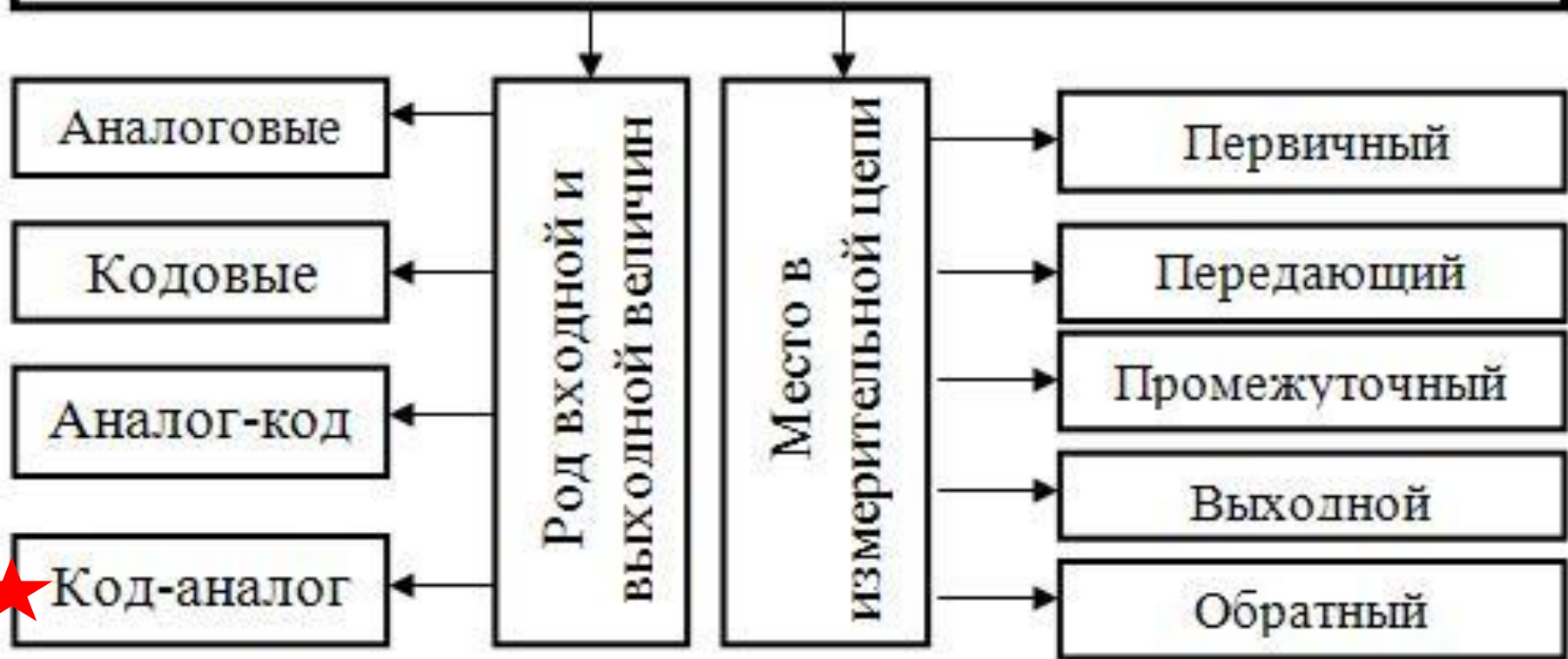
# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



**Аналого-цифровой преобразователь** - измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код



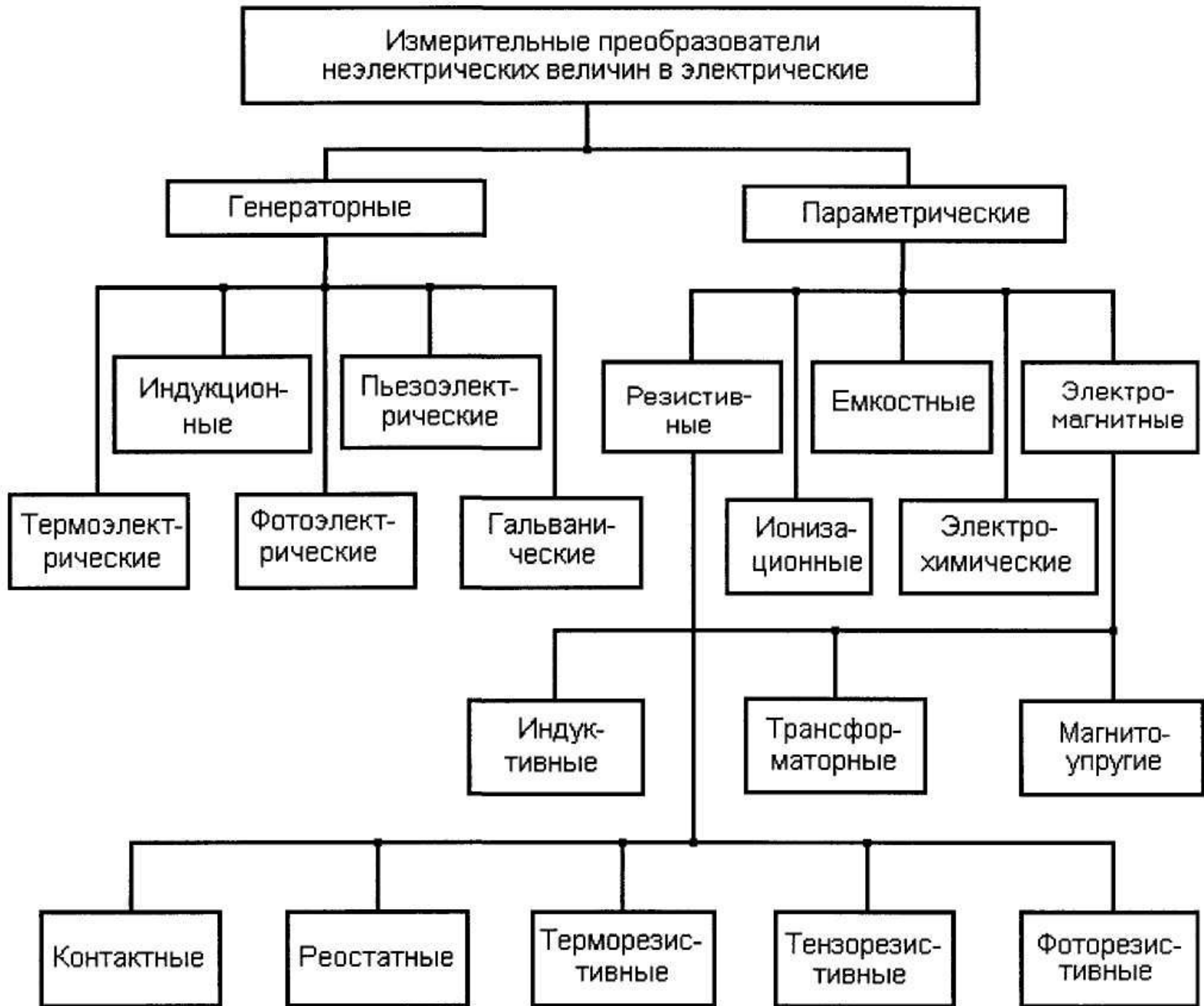
# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



**Цифроаналоговый преобразователь** - измерительный преобразователь, предназначенный для преобразования числового кода в аналоговую величину

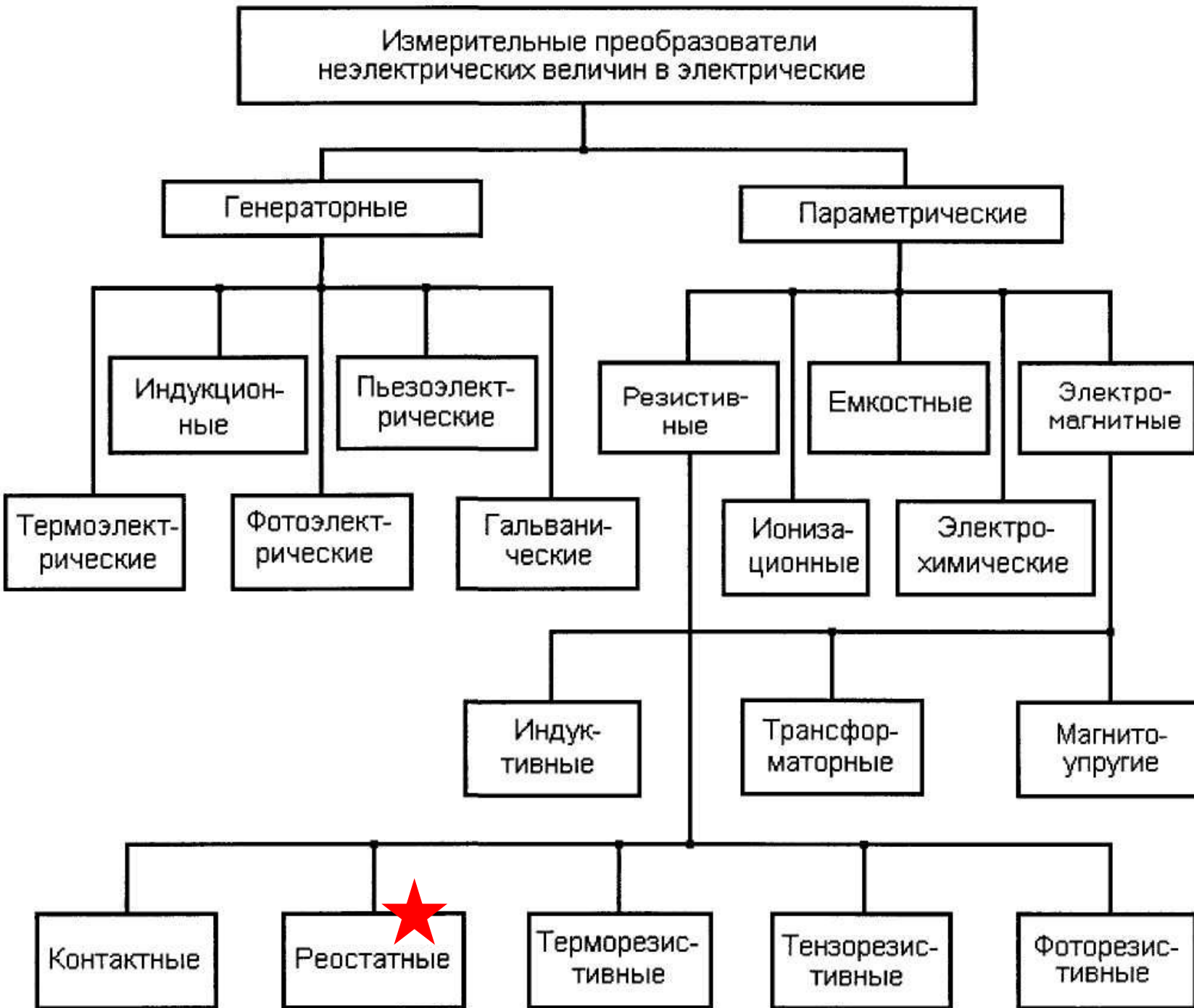
Работа измерительных преобразователей протекает в сложных условиях, так как объект измерения - это, как правило, сложный, многогранный процесс, характеризующийся множеством параметров, каждый из которых действует на измерительный преобразователь совместно с остальными параметрами.

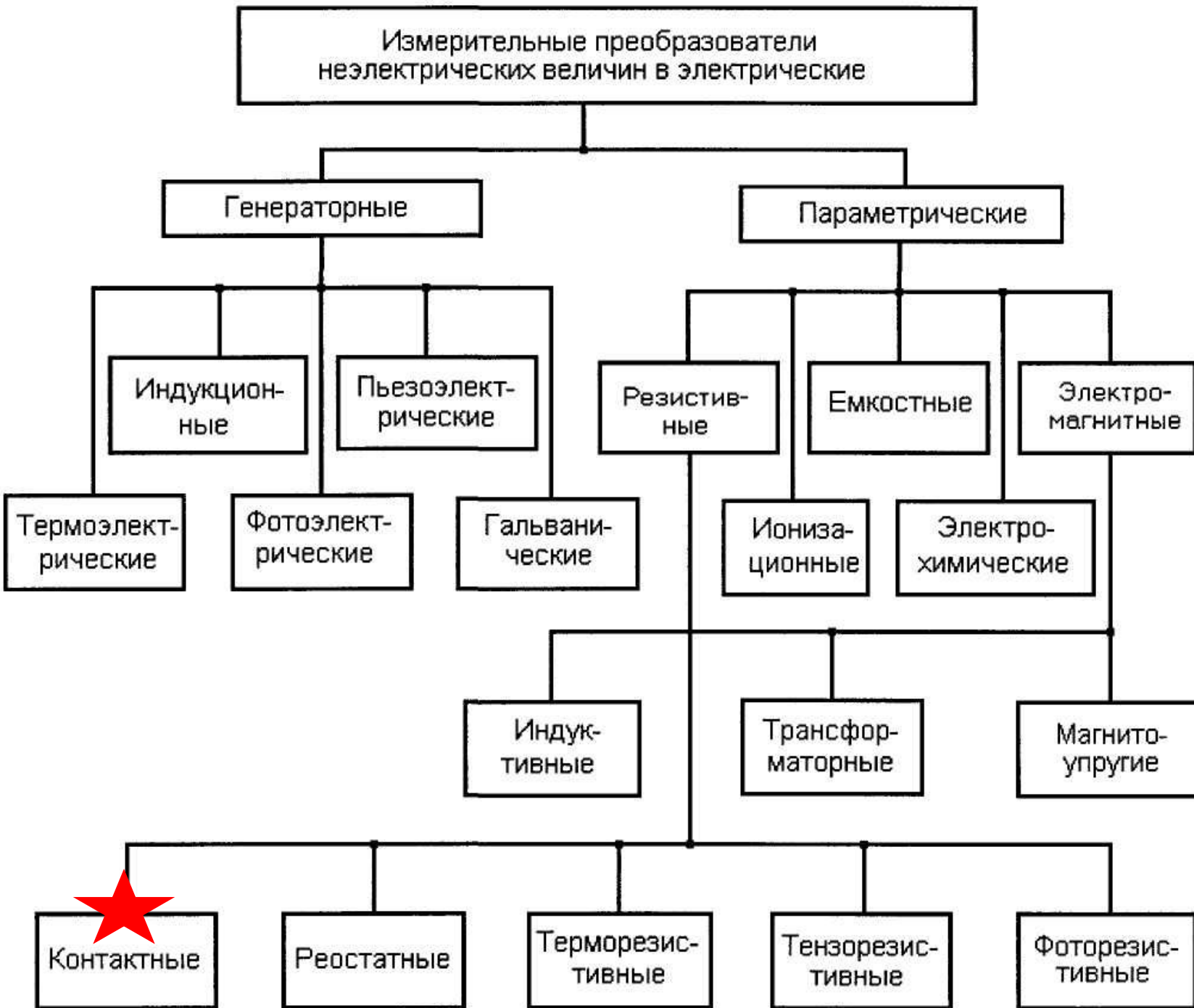
Нас же интересует только один параметр, который называется **измеряемой величиной**, а все остальные параметры процесса считаются **помехами**

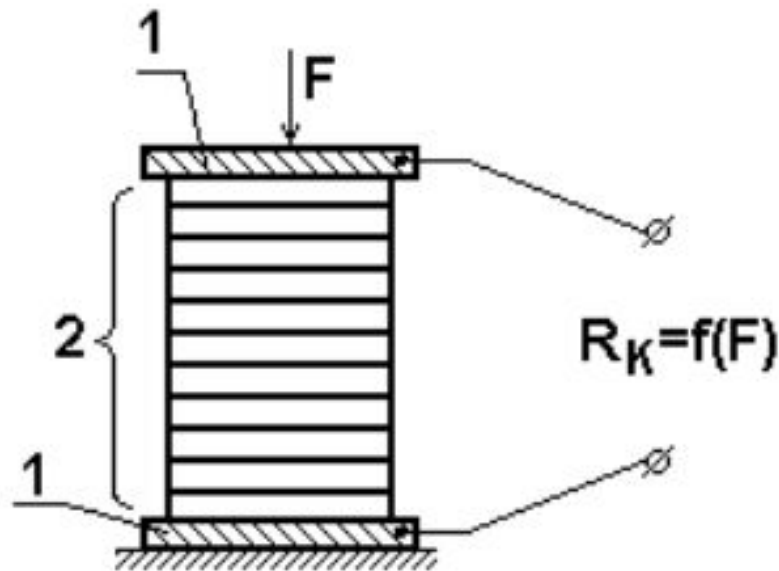


Преобразователи неэлектрических величин в электрические









$$R_K = \frac{K}{F_0 + F}$$

Рис. 9.3. Датчик контактного сопротивления:

1 – металлические пластины; 2 – столбик из шайб (например, угольных)

## Датчики контактного сопротивления

Действие основано на зависимости переходного сопротивления контактов от усилия их сжатия

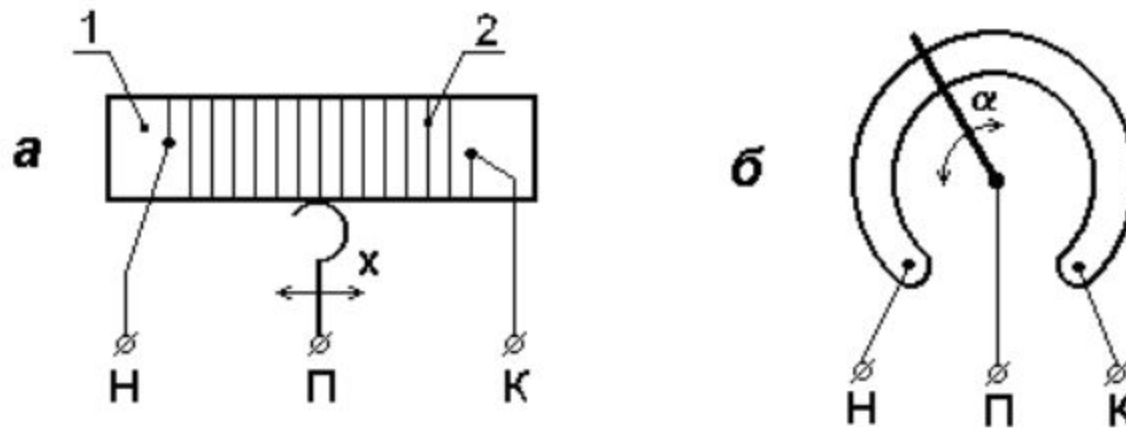
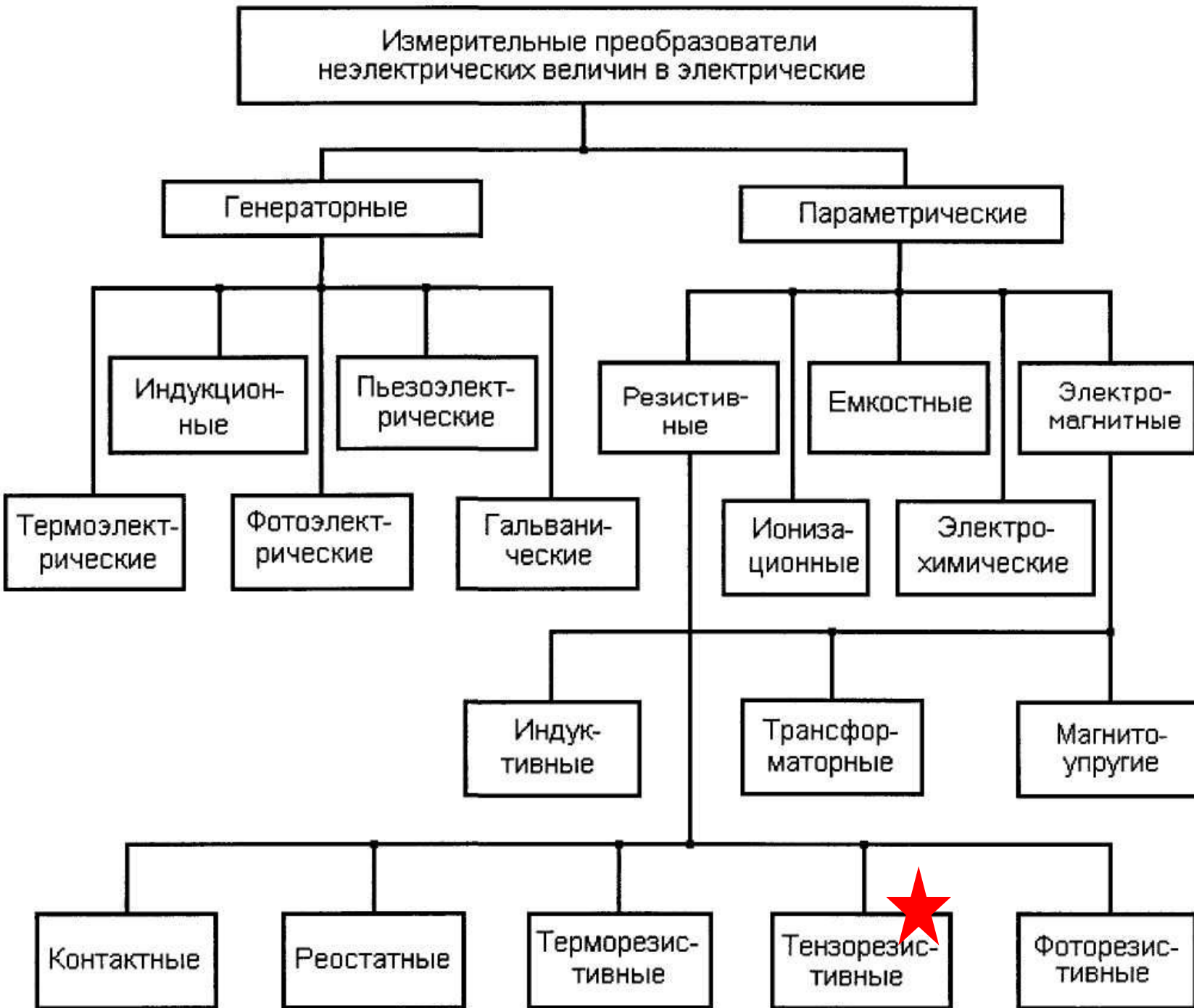


Рис. 9.1. Реостатные преобразователи для линейных (а) и угловых (б) перемещений: 1 – каркас; 2 – обмотка; Н, К – начало и конец обмотки; П – вывод от подвижного контакта (движка);  $x$  – линейное перемещение движка;  $\alpha$  – угловое перемещение движка датчика

**Реостатным параметрическим** датчиком называют переменное сопротивление, движок которого перемещается в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины.

Входной величиной является перемещение движка. Выходной – активное сопротивление



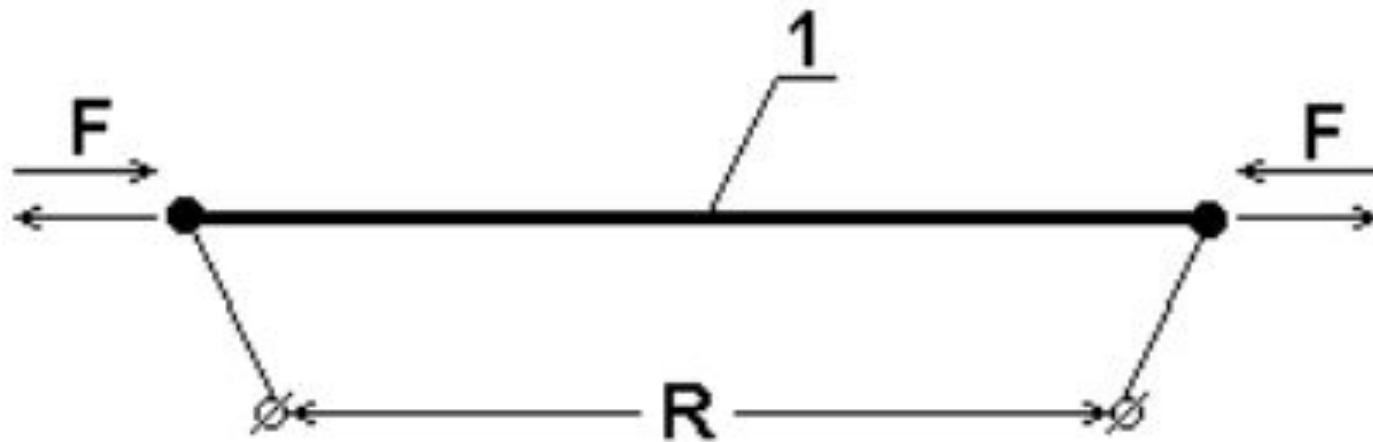
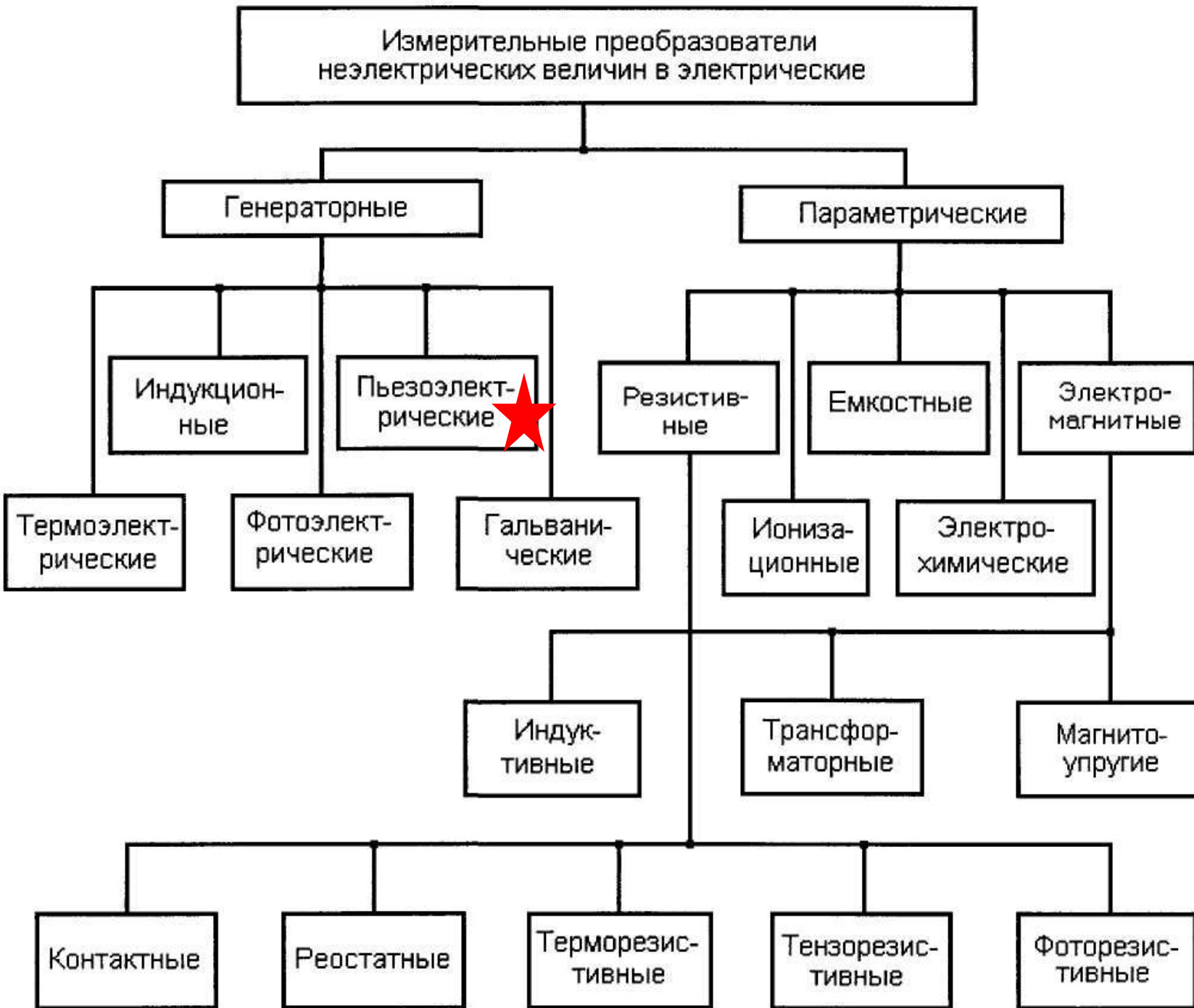


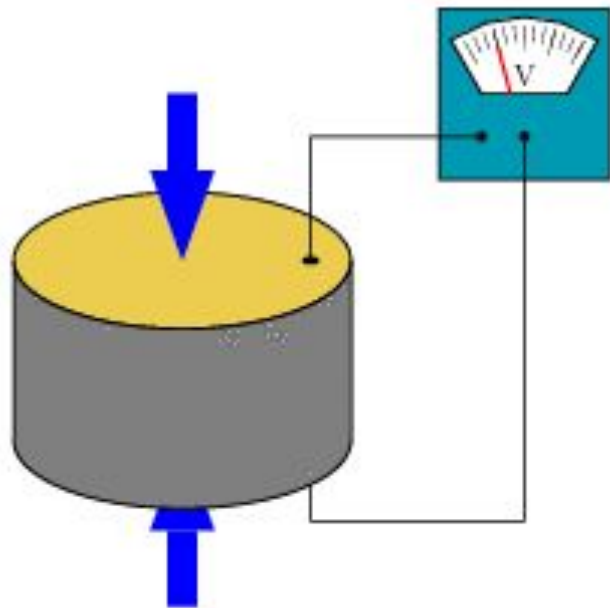
Рис. 9.5. Тензодатчик:

1 – проводник;  $R$  – сопротивление проводника;  
 « $F-F$ » – усилие растяжение (или сжатия) проводника

Принцип действия **тензорезистивных датчиков** основан на изменении сопротивления материала проводника при его деформации





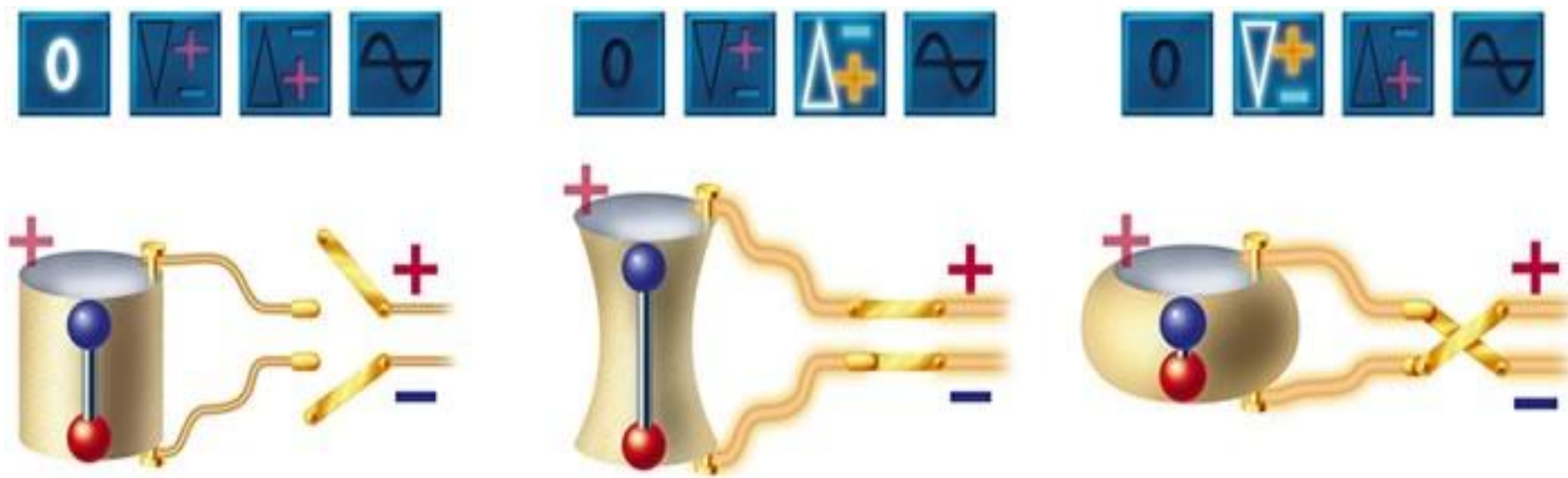


**Пьезоэлектрические преобразователи** — это устройства, использующие пьезоэлектрический эффект в кристаллах, керамике или плёнках и преобразующие механическую энергию в электрическую и наоборот



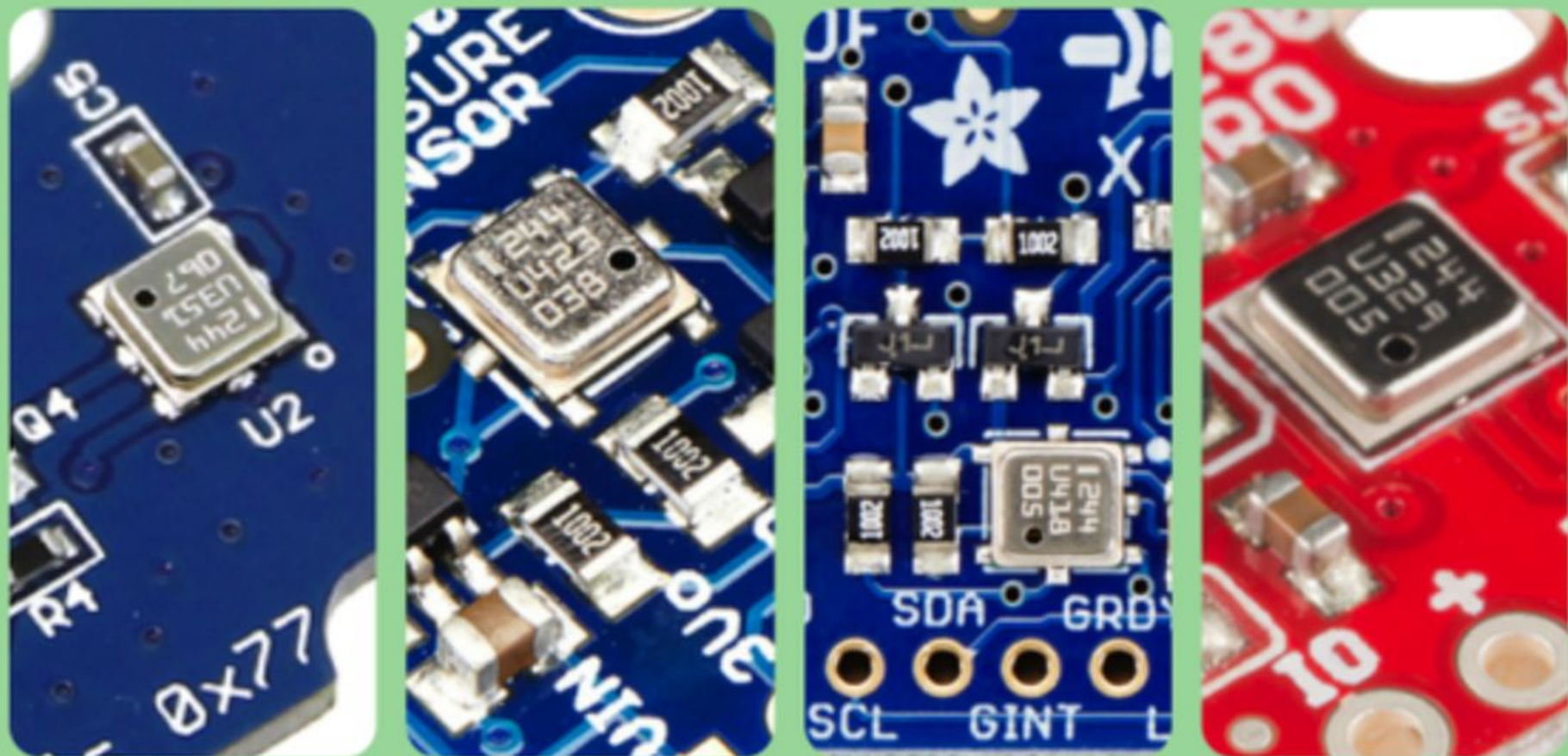


При **прямом пьезоэффekte** деформация пьезоэлектрического образца приводит к возникновению электрического напряжения между поверхностями деформируемого твердого тела

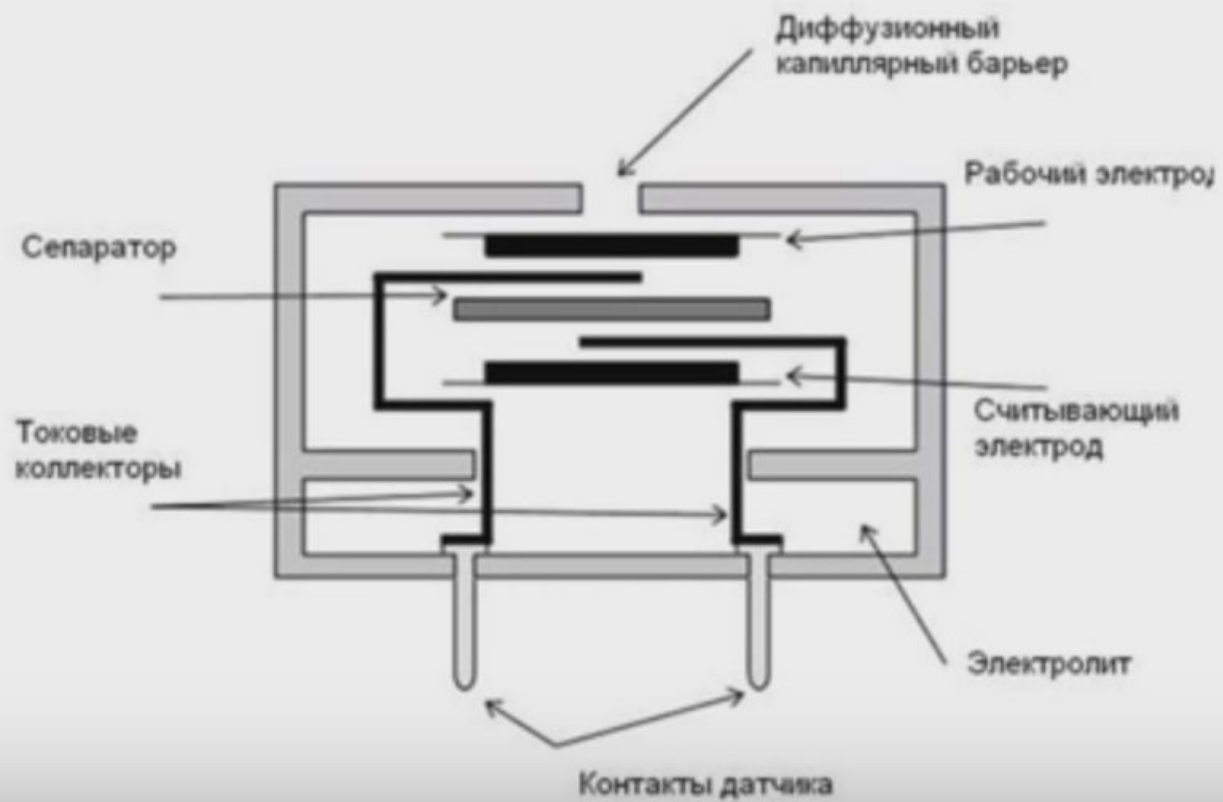


при обратном пьезоэффekte приложение напряжения к телу вызывает его деформацию

# Общая информация



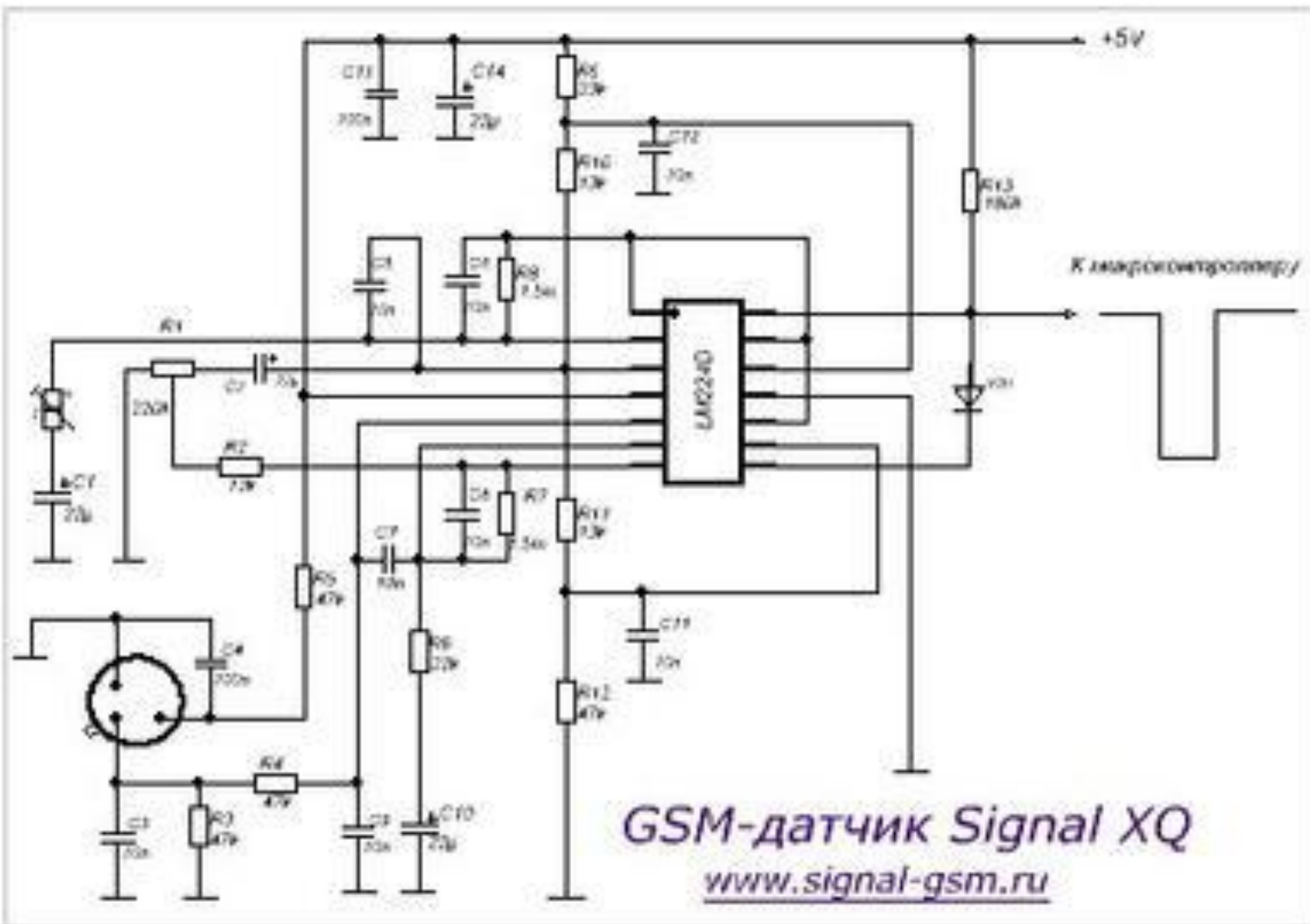
Датчики барометрического давления Bosch BMP085 и BMP180 два небольших датчика, которые могут измерять малейшие изменения в атмосферном давлении. Эти датчики, как и большинство датчиков атмосферного давления, могут быть использованы для мониторинга погоды.



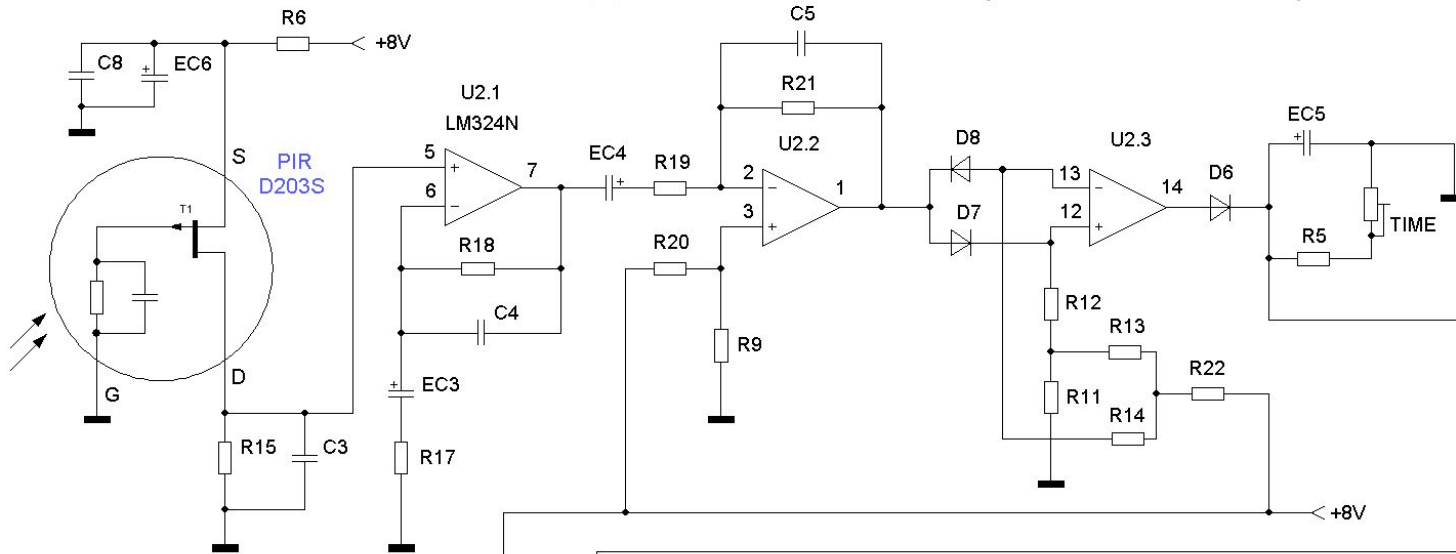
**TGS5042 датчик CO**  
**электрохимический**





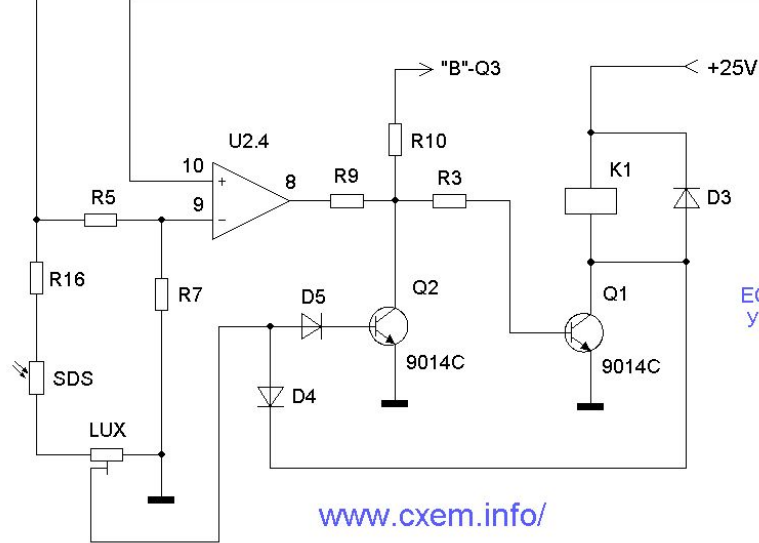


# СХЕМА ДАТЧИКА ОСВЕЩЕНИЯ HR-S1 (часть первая)



PIR - ПРИЁМНИК ИНФРАКРАСНОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЧЕРТЁЖ СХЕМЫ ВЫПОЛНЕН ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММ sPlan6.0.0.1 и Paint



ЕСЛИ ВОЗНИКАЮТ ТРУДНОСТИ УСТАНОВКИ РАБОТЫ ДАТЧИКА НА Короткое время, НЕОБХОДИМО EC5 100мкФ ЗАМЕНИТЬ НА 10мкФ

[www.cxem.info/](http://www.cxem.info/)

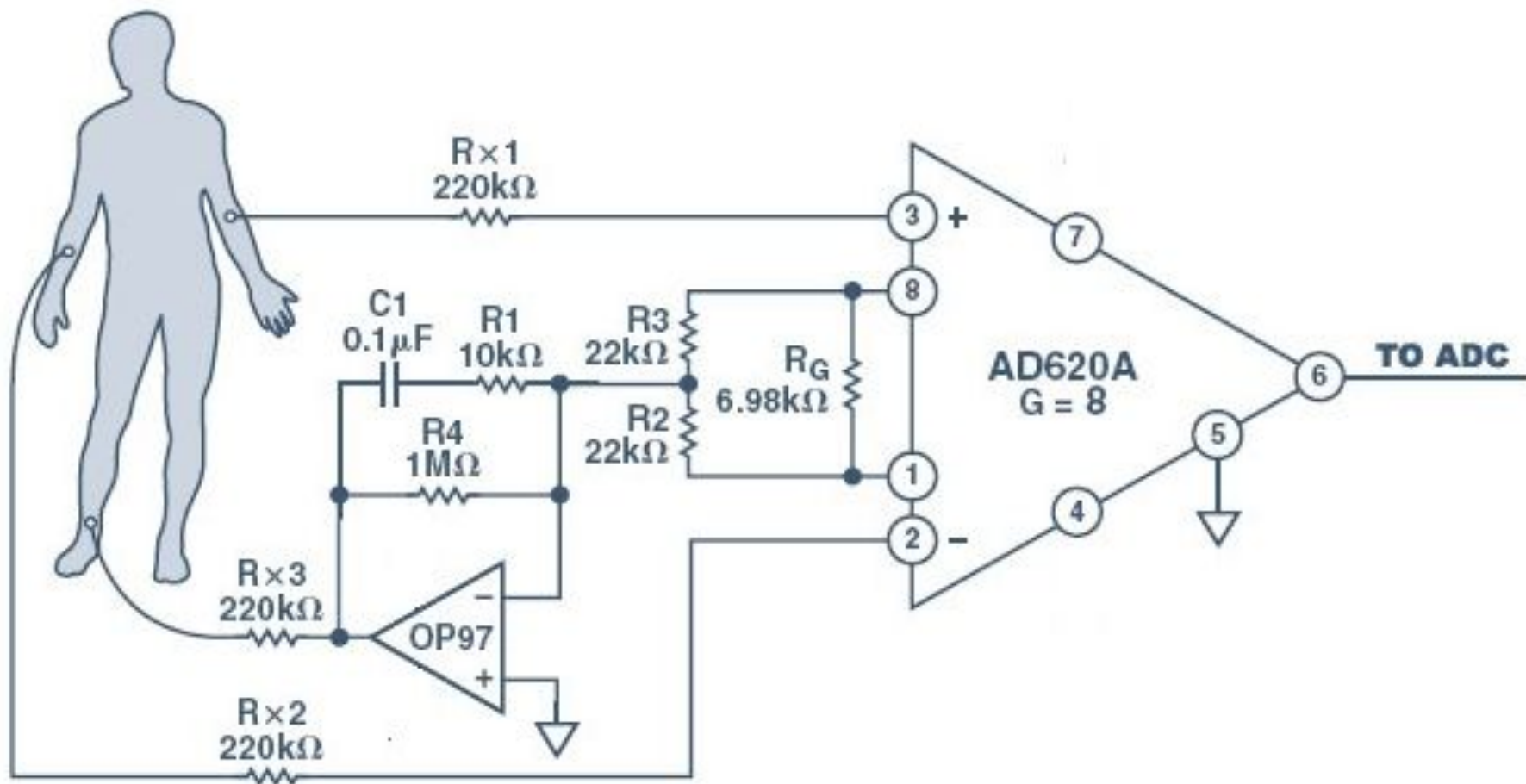


Схема аналоговой части электрокардиографа



# Общие сведения о датчиках физических величин и измерительных схемах



Укрупненная классификация датчиков  
физических величин



В **генераторных датчиках** измеряемая величина вызывает генерацию электрического сигнала — *тока, напряжения, заряда, частоты* и т. д.

Они являются **активными датчиками**

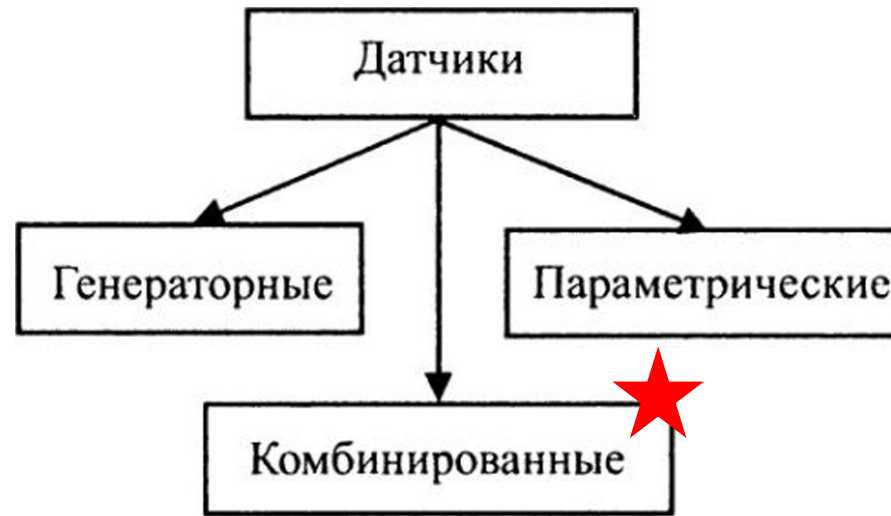


В **параметрических датчиках** изменяются параметры электрических, магнитных, оптических цепей — сопротивления, индуктивности, емкости, пропускания ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $\tau$ ) и т. д.

Они являются **пассивными датчиками** <sup>52</sup>

Пассивные датчики позволяют косвенно судить о физической величине путем включения такого датчика в электрическую цепь

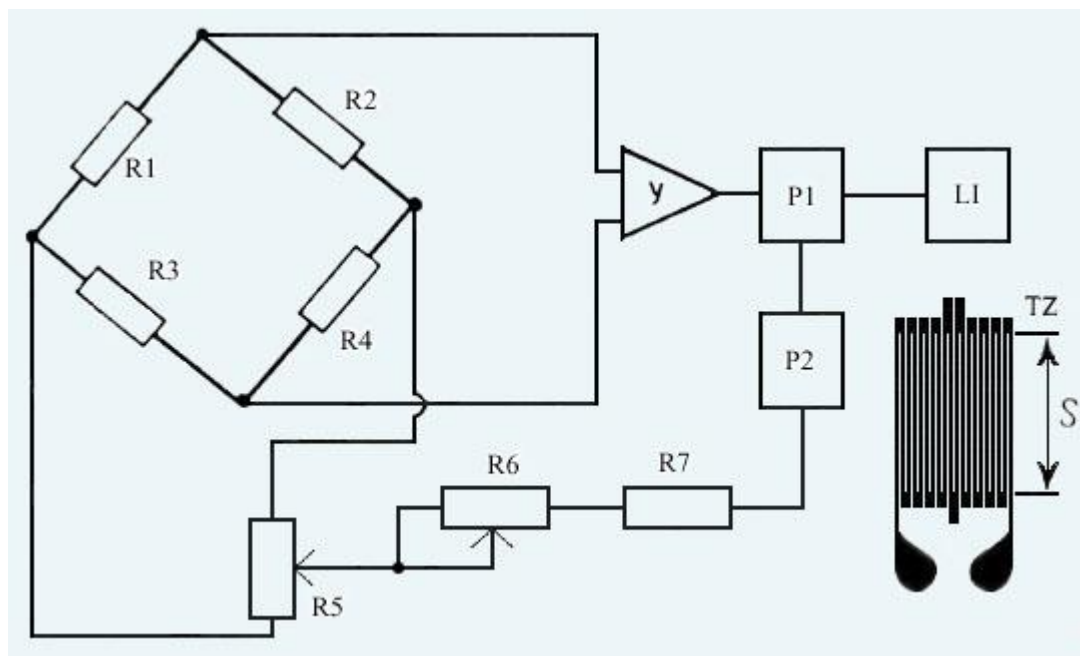
Такие датчики нуждаются в подведении питания



В **комбинированных датчиках** для получения результата используется целая цепь последовательных преобразований

Например, датчики давления могут работать по схеме:

давление □ деформация мембраны □ изменение сопротивления тензодатчика, закрепленного на мембране □ изменение выходного электрического сигнала мостовой схемы



В последнее время в обиход введено понятие  
интеллектуальные и интегрированные  
датчики.

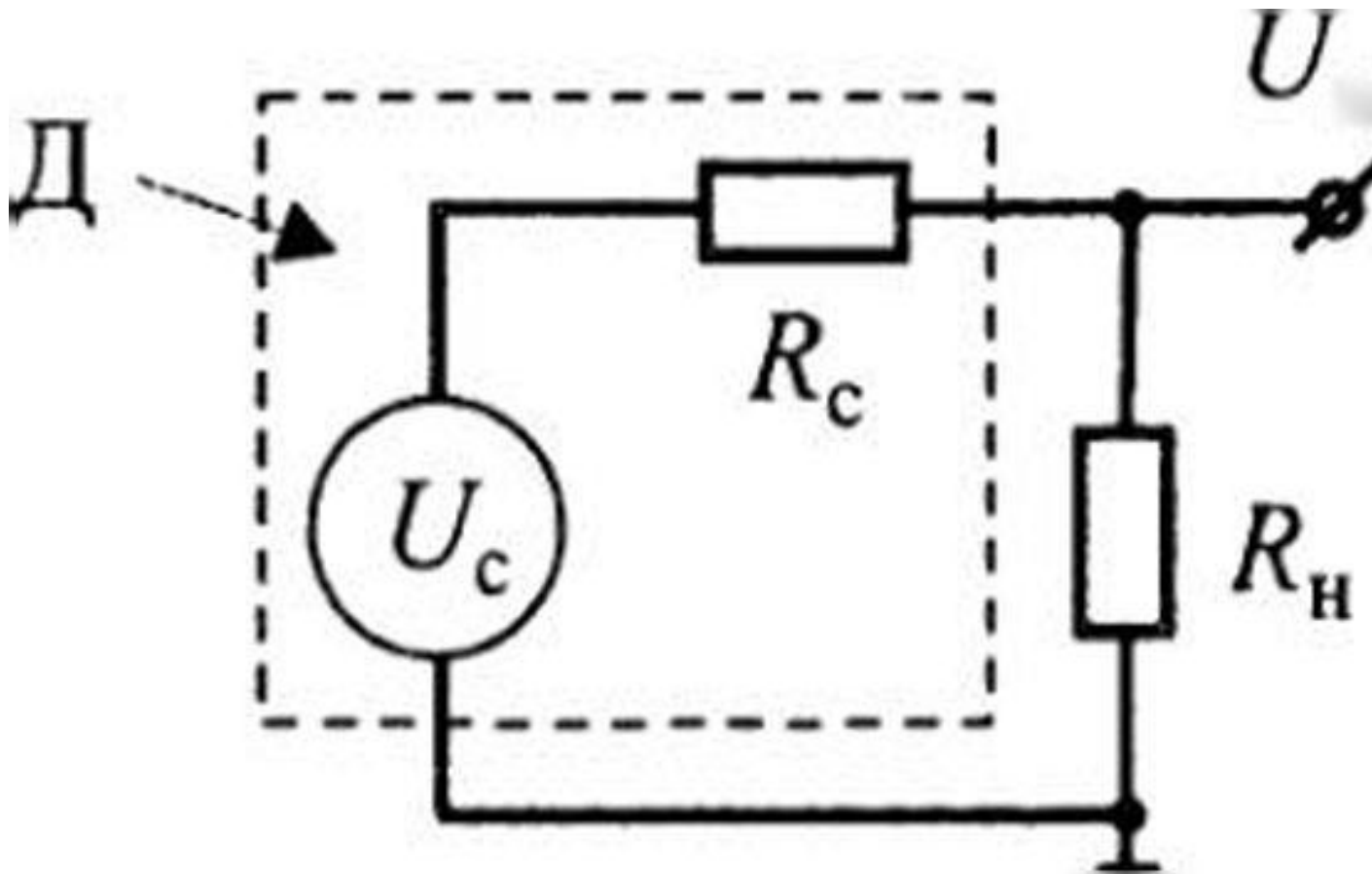
Такие датчики оснащаются встроенными  
микропроцессорами, которые работают по  
достаточно сложным алгоритмам и позволяют  
придать измерительным приборам многие  
дополнительные функциональные

**ВОЗМОЖНОСТИ**

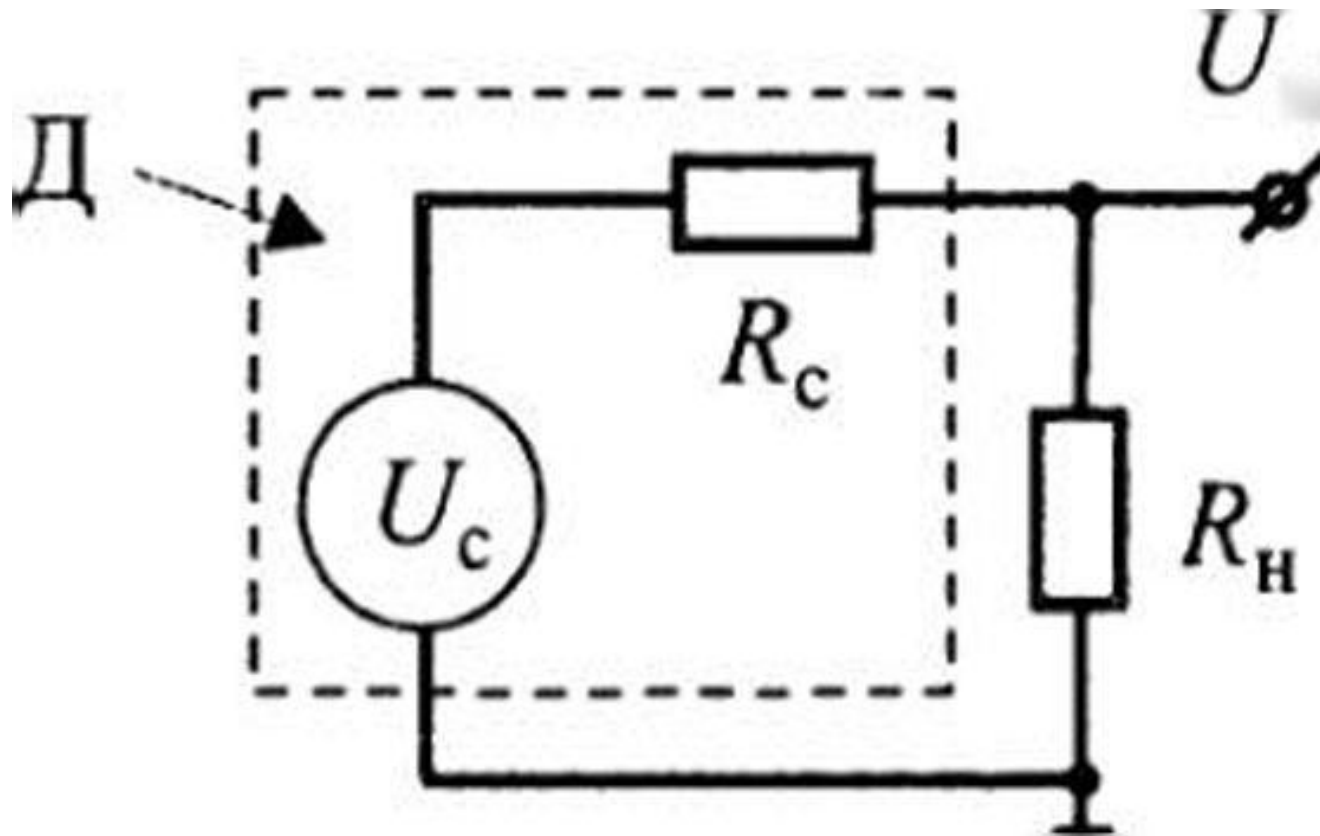


# Генераторные датчики сигналов

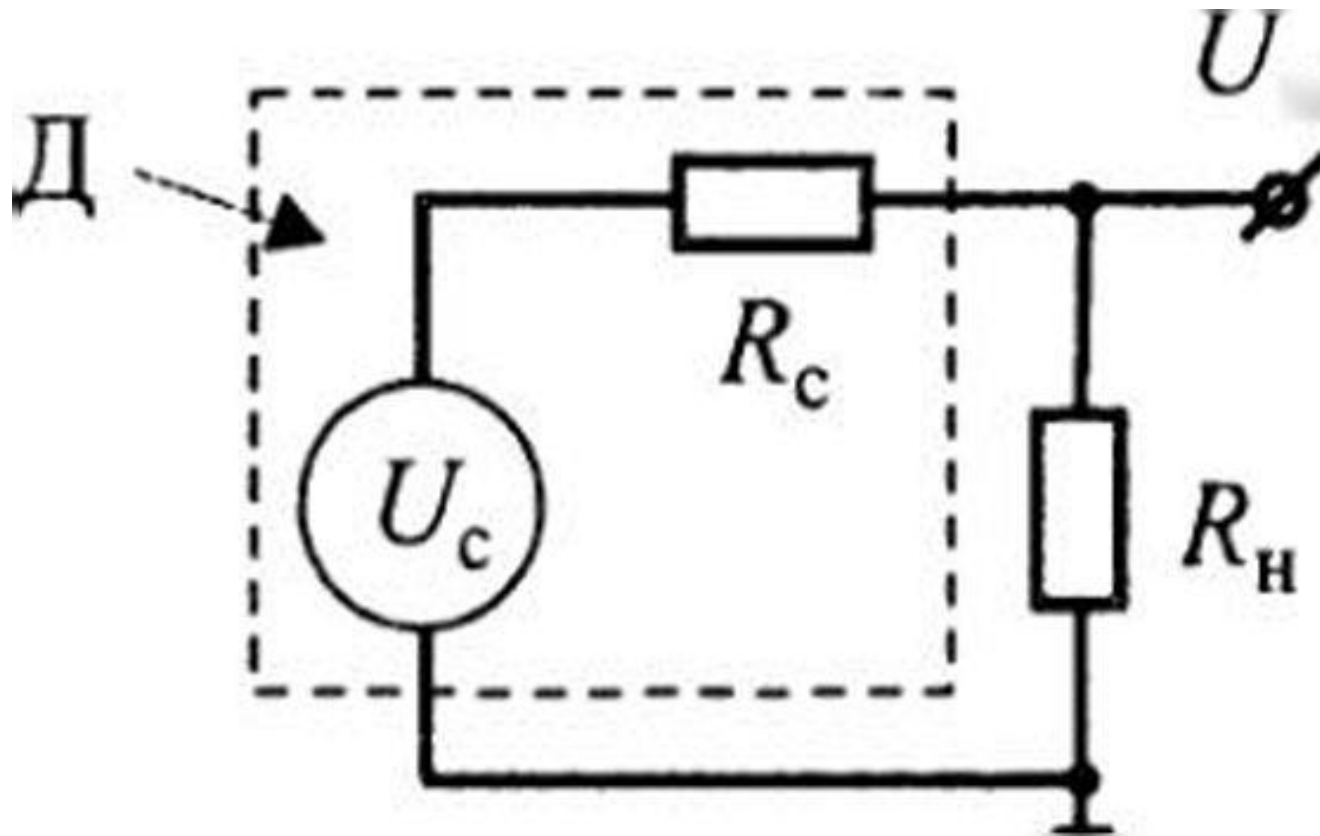
## 1. Датчики давления



Датчик напряжения

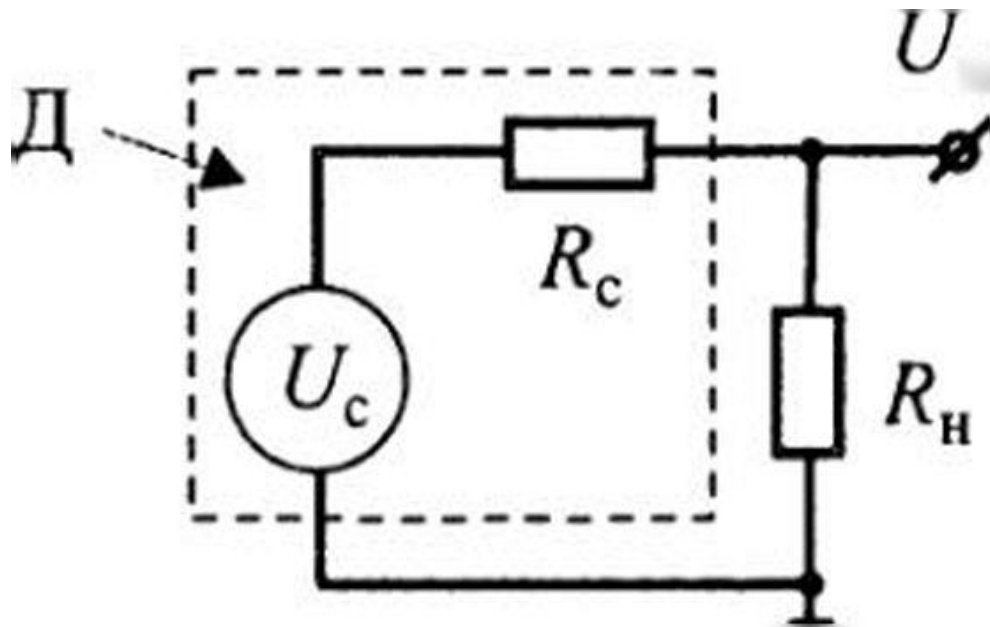


Датчик напряжения (Д) представляет собой эквивалентную схему в виде последовательного соединения ЭДС  $U_c$  с выходным сопротивлением  $R_c$



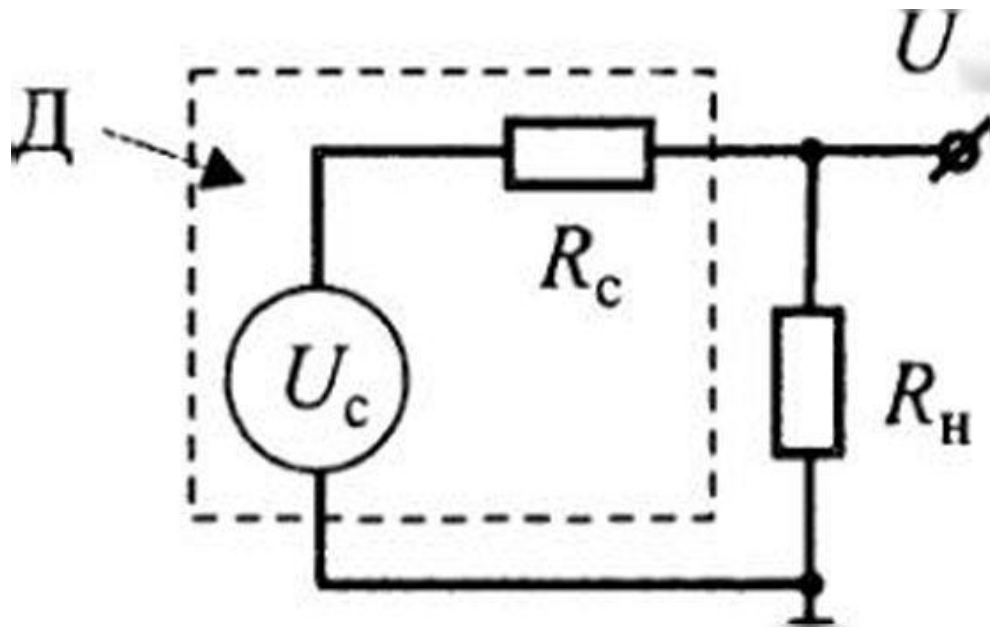
В такой схеме

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_c R_H / (R_H + R_c)$$



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_c R_H / (R_H + R_c)$$

Связь между  $U_c$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  является нелинейной и чувствительность датчика зависит от изменения нагрузки



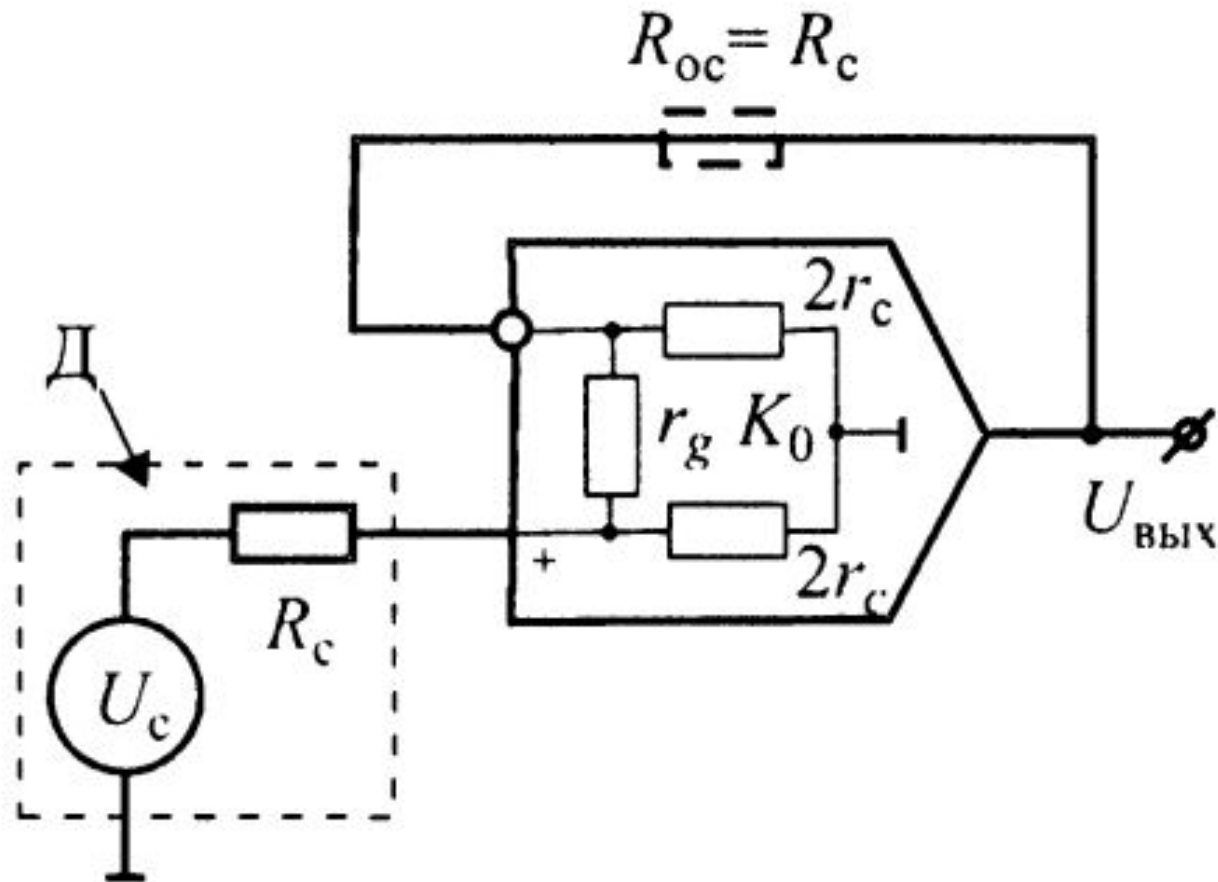
$$U_{\text{ВЫХ}} = U_c R_H / (R_H + R_c)$$

При  $R_H \gg R_c$  достигается линеаризация передаточной характеристики\*

$$U_c = U_{\text{ВЫХ}}$$

\* Линеаризацией называется замена реальных нелинейных уравнений близкими к ним линейными уравнениями

\* Передаточная характеристика - это зависимость напряжения на выходе от напряжения на входе

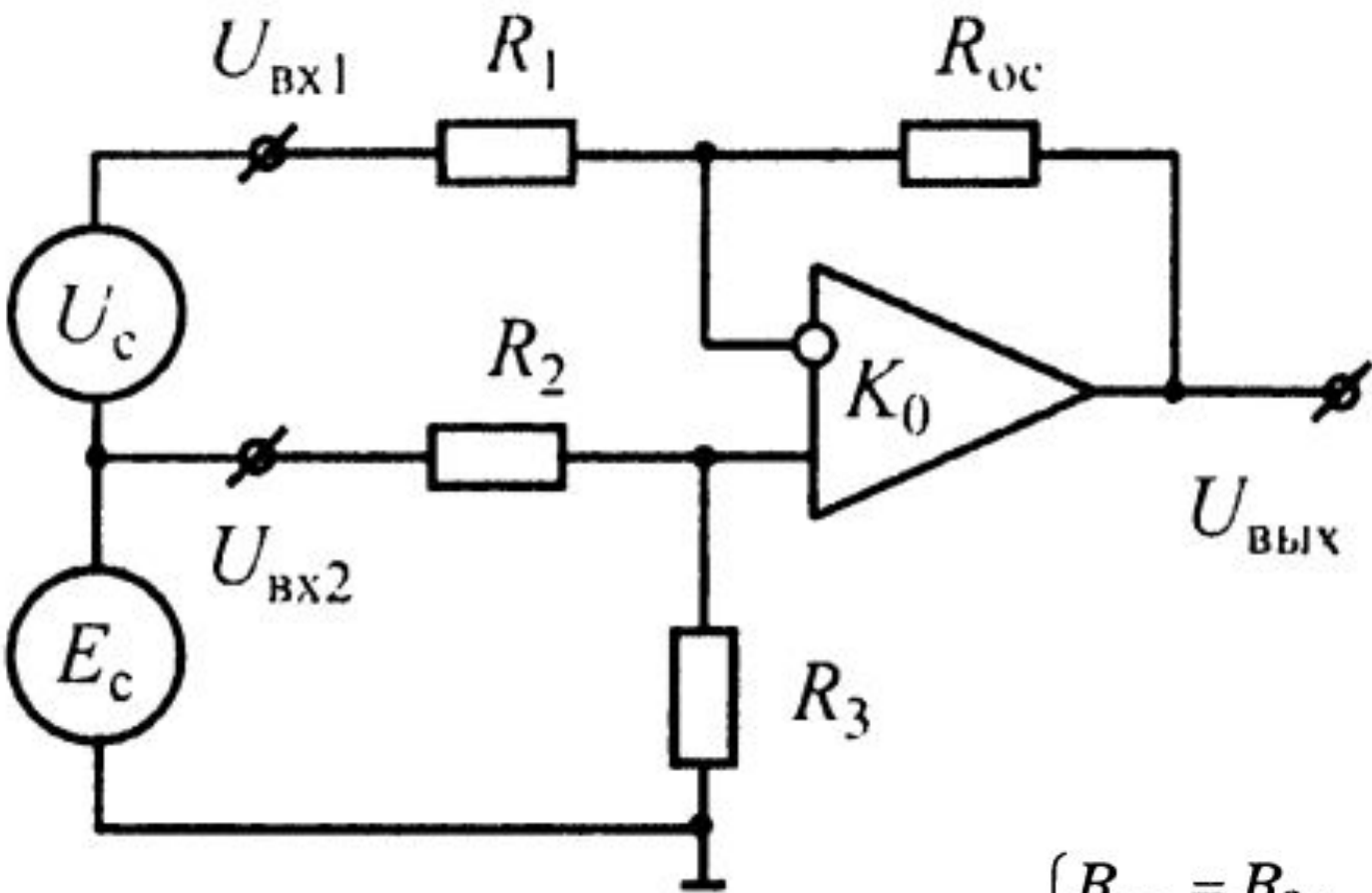


Для обеспечения условия линеаризации передаточной характеристики и низкого выходного сопротивления схемы, как правило, используется буфер на операционном усилителе (ОУ) **в режиме повторителя напряжения**



Во многих случаях измерения сигналов датчиков  $U_c$  проходят на фоне большой синфазной составляющей  $E_c$  (помехи)\*

Для ее подавления применяется  
дифференциальное включение ОУ



Дифференциальное подключение ОУ к датчику напряжения

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{oc} = R_3, \\ R_1 = R_2, \\ K_1 = K_2 = \frac{R_{oc}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = K, \\ U = (+) \frac{R_{oc}}{R_1} (U_{ВХ2} - U_{ВХ1}). \end{array} \right.$$

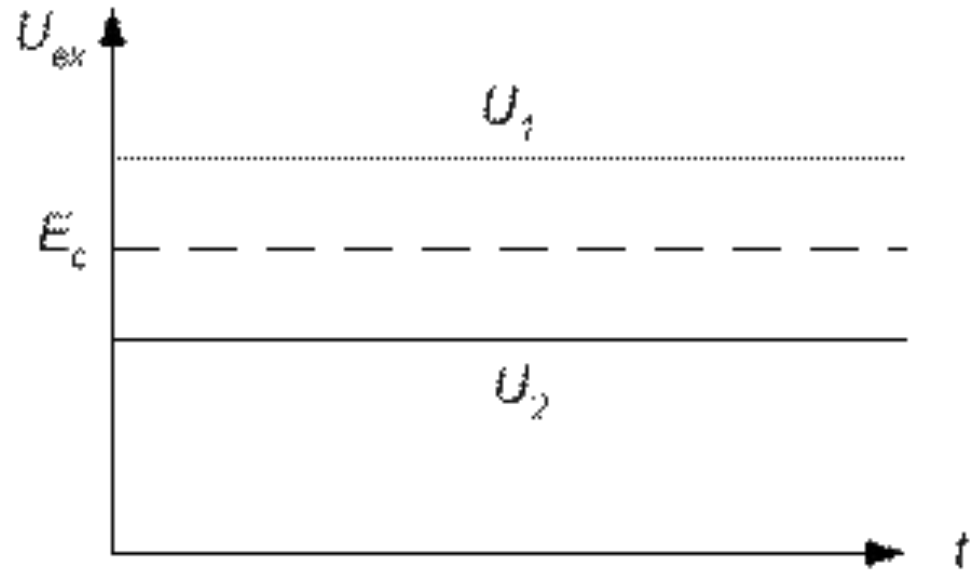
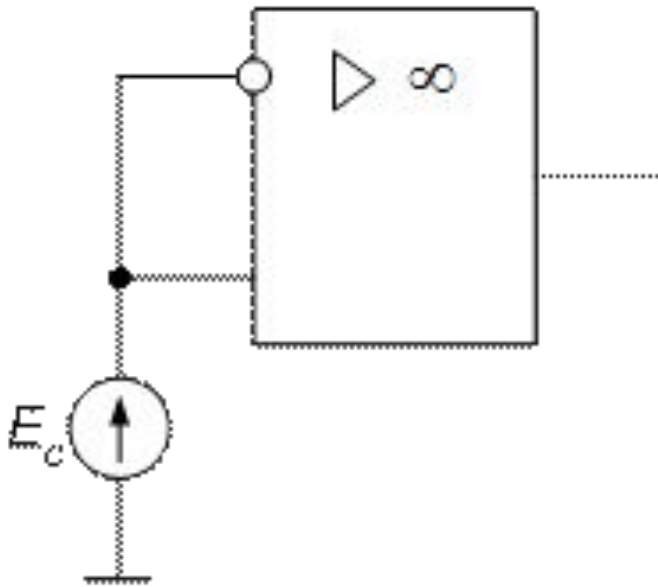
\*Основополагающими в технике являются понятия — **противофазные и синфазные помехи.**

Противофазные помехи  $U_{пф}$  возникают между прямыми и обратными проводами электрических контуров или между входными зажимами подверженных помехам систем.

Синфазные помехи  $U_{сф}$  обусловлены источниками мешающих напряжений, которые появляются между отдельными сигнальными проводниками и массой, обладающей нулевым потенциалом

\*Синфазное напряжение вызывает в параллельных прямом и обратном проводе токи одного и того же характера (синфазные токи), которые через паразитные емкости и землю могут возвращаться к источнику питания

\*Синфазные сигналы– сигналы одинаковой амплитуды и одинаковой фазы одновременно присутствующие на обоих входах

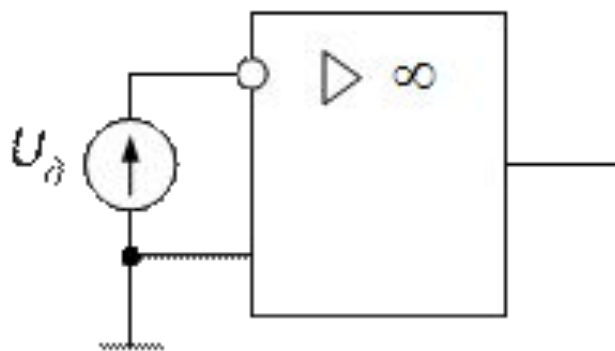


$$E_c = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

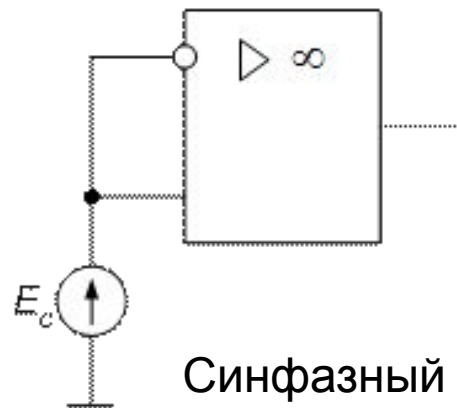
$$U_B = U_1 - U_2$$

\*Максимальное подавление синфазного сигнала осуществляется с помощью входного дифференциального каскада.

Дифференциальные сигналы – сигналы одинаковой амплитуды, но противоположной фазы, присутствующие на обоих входах усилителя независимо от точки заземления источника



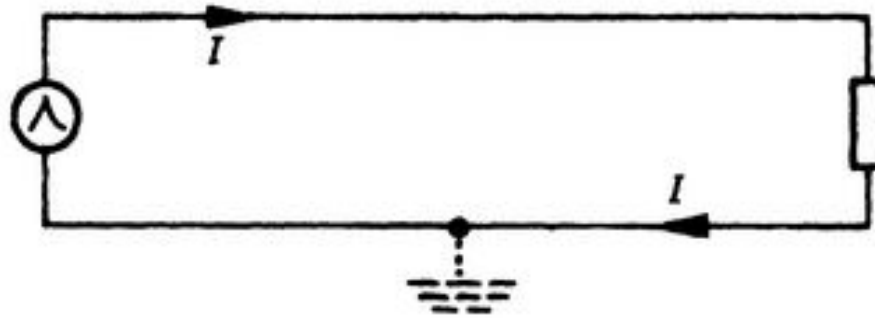
Дифференциальный сигнал



Синфазный сигнал <sup>70</sup>

## \* Заземление

В принципе электрическая цепь вообще не нуждается в заземлении, так как вытекающий из зажима источника напряжения ток после протекания через замкнутый контур возвращается к другому зажиму



\*

Следует строго различать два понятия —

защитное заземление (защитный провод) для защиты людей, животных и т. д.

И

массу, систему опорного потенциала, электрических контуров



\*

Земля и масса, как правило, в одном месте гальванически связаны друг с другом,

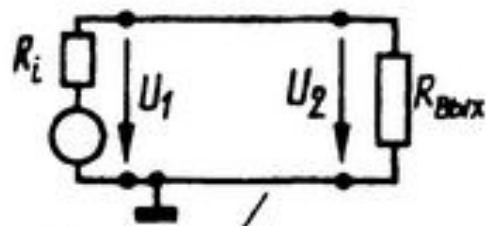
но между ними существует большое различие:

провода заземления проводят ток только в аварийной ситуации,

нулевые провода (масса) — в нормальной рабочей ситуации

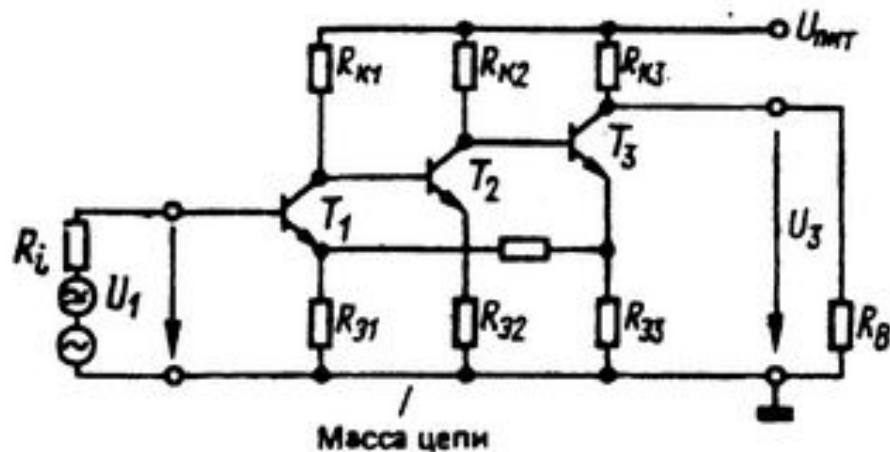
\*Под **массой** в схемотехнике понимают общую систему опорного потенциала, по отношению к которой измеряются узловые напряжения цепи

В простой цепи это просто обратный провод, в электронной схеме — общий обратный провод для всех электрических контуров

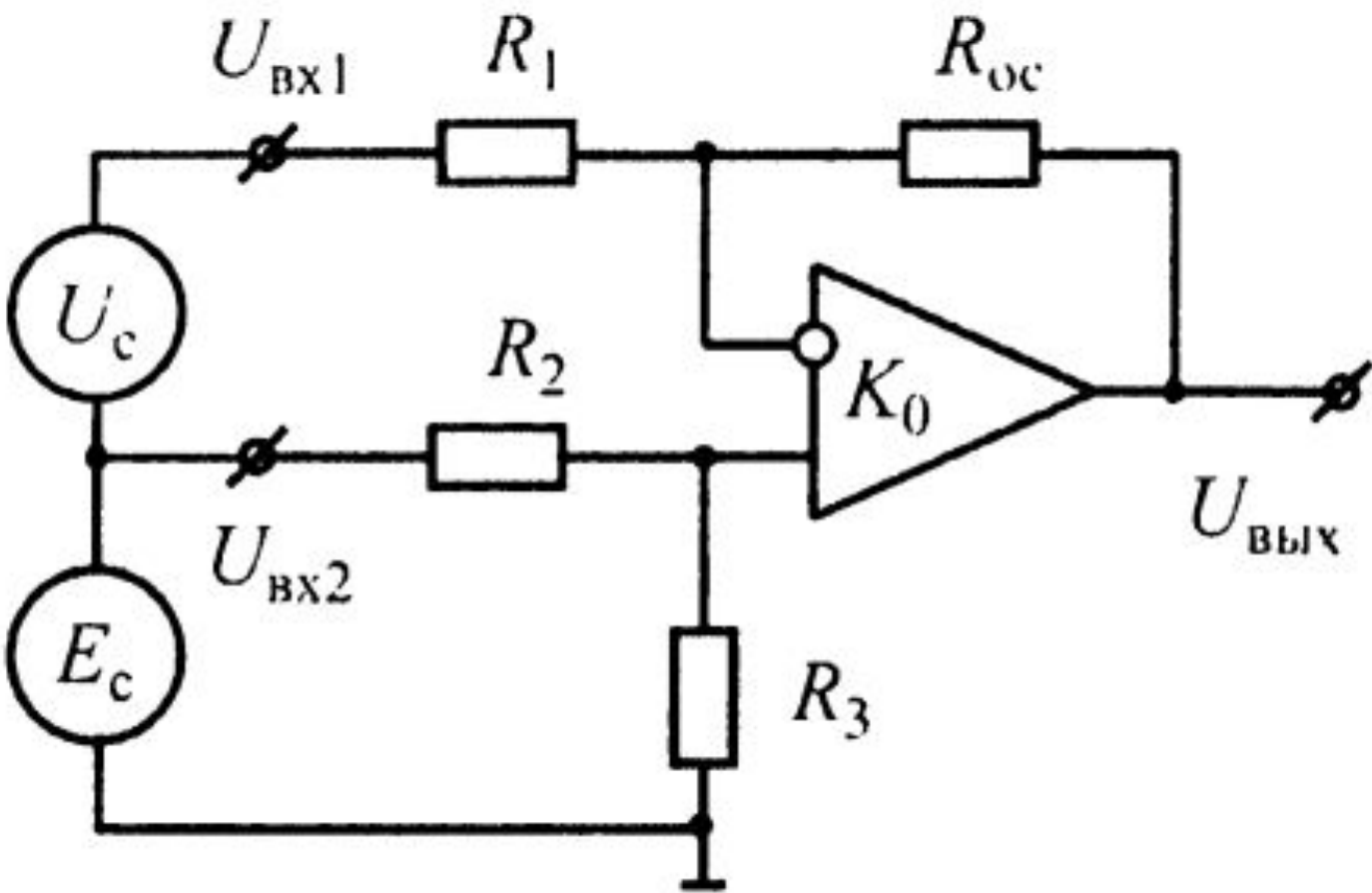


Электрическое соединение  
через корпус

а)



б)

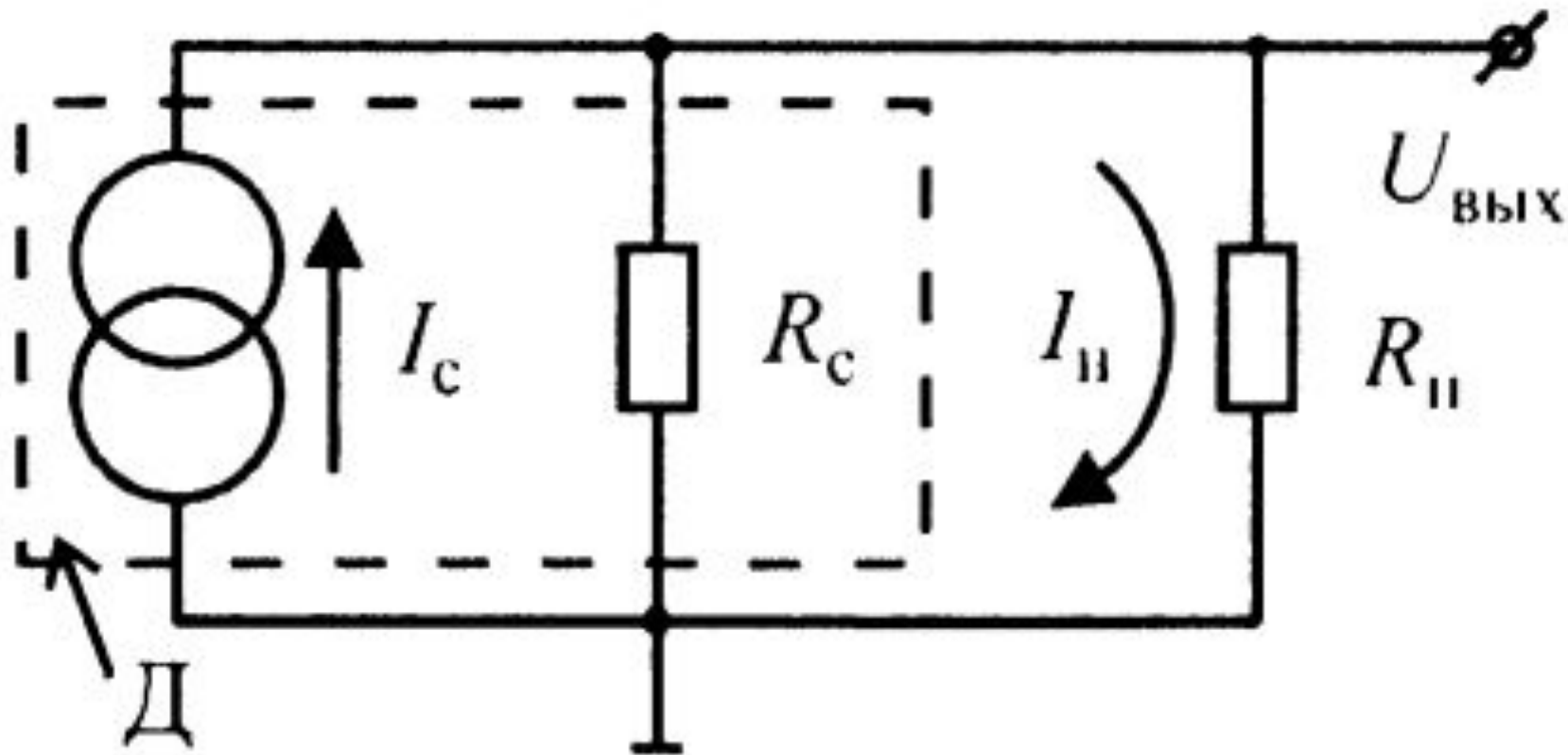


Итак, запомним!

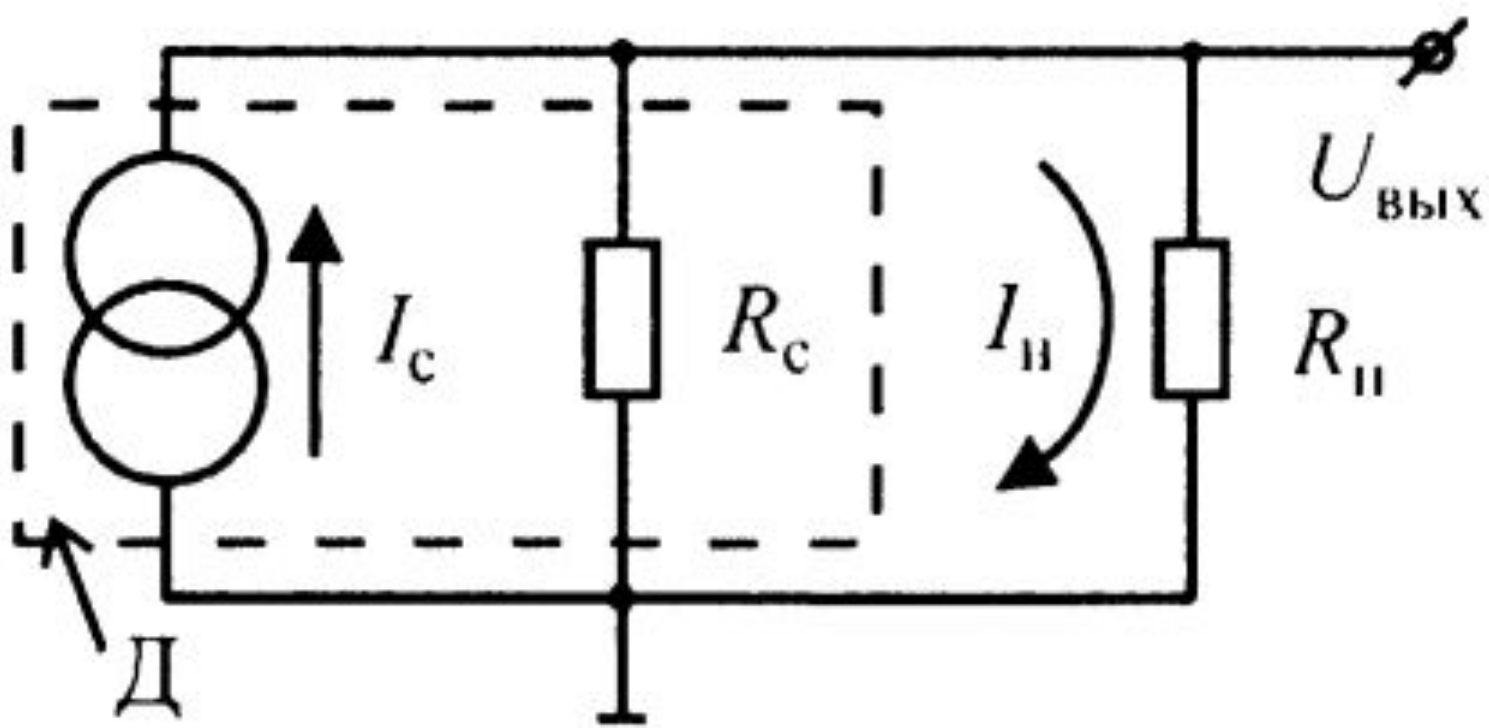
Дифференциальное  
подключение

# Генераторные датчики сигналов

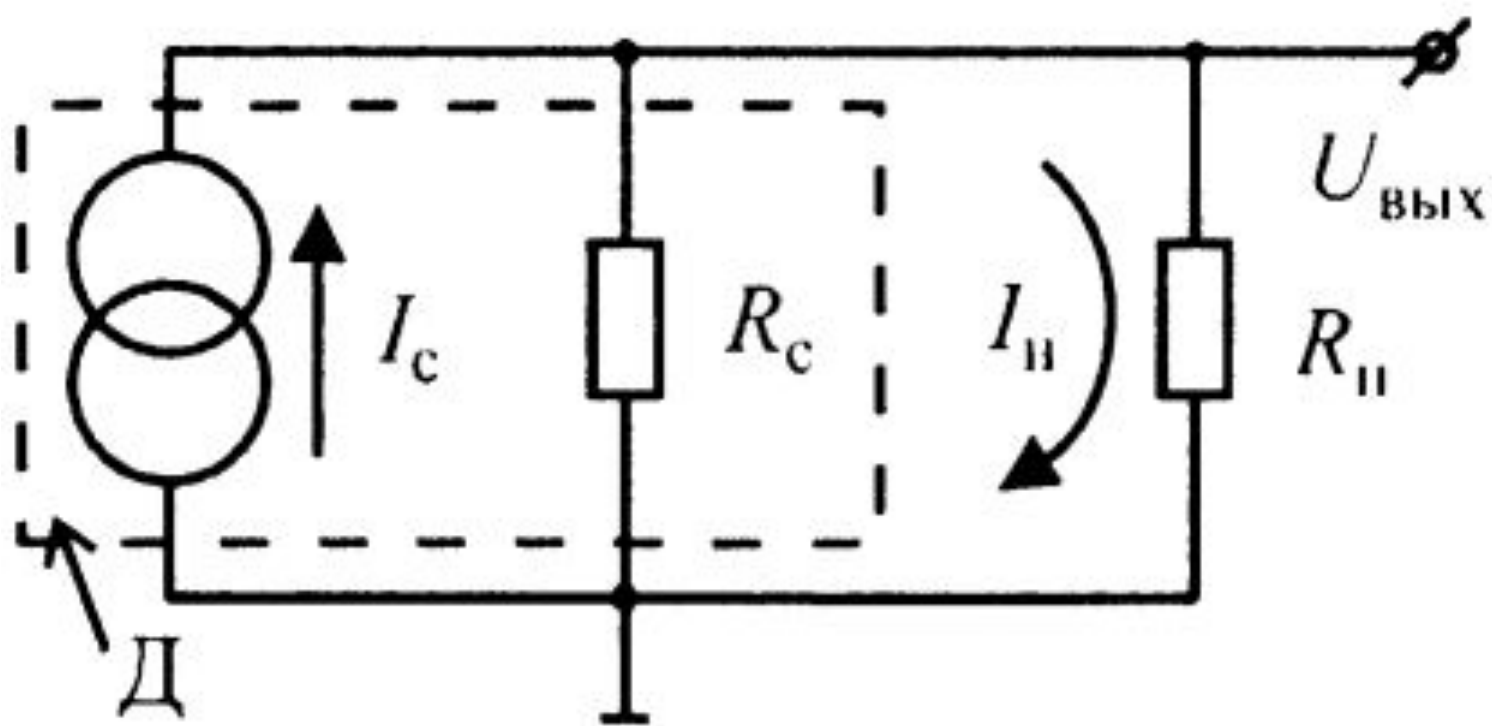
## 2. Датчики тока



Датчик тока

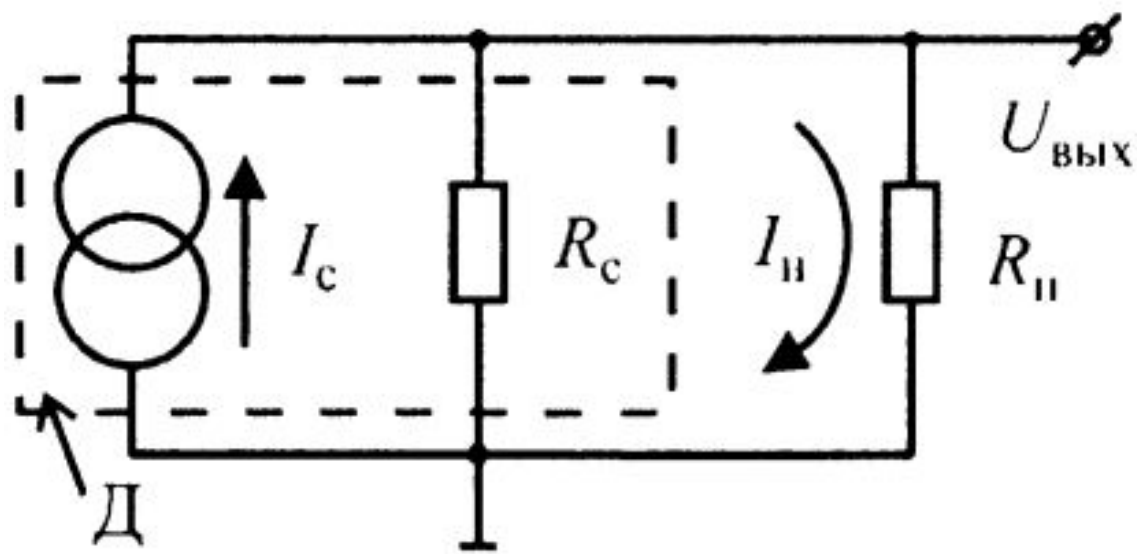


Датчик тока при анализе заменяется своей эквивалентной схемой в виде параллельного соединения идеального источника тока  $I_c$  и резистора  $R_c$ , характеризующего выходное сопротивление датчика



В этом случае  $I_n = I_c R_c / (R_n + R_c)$

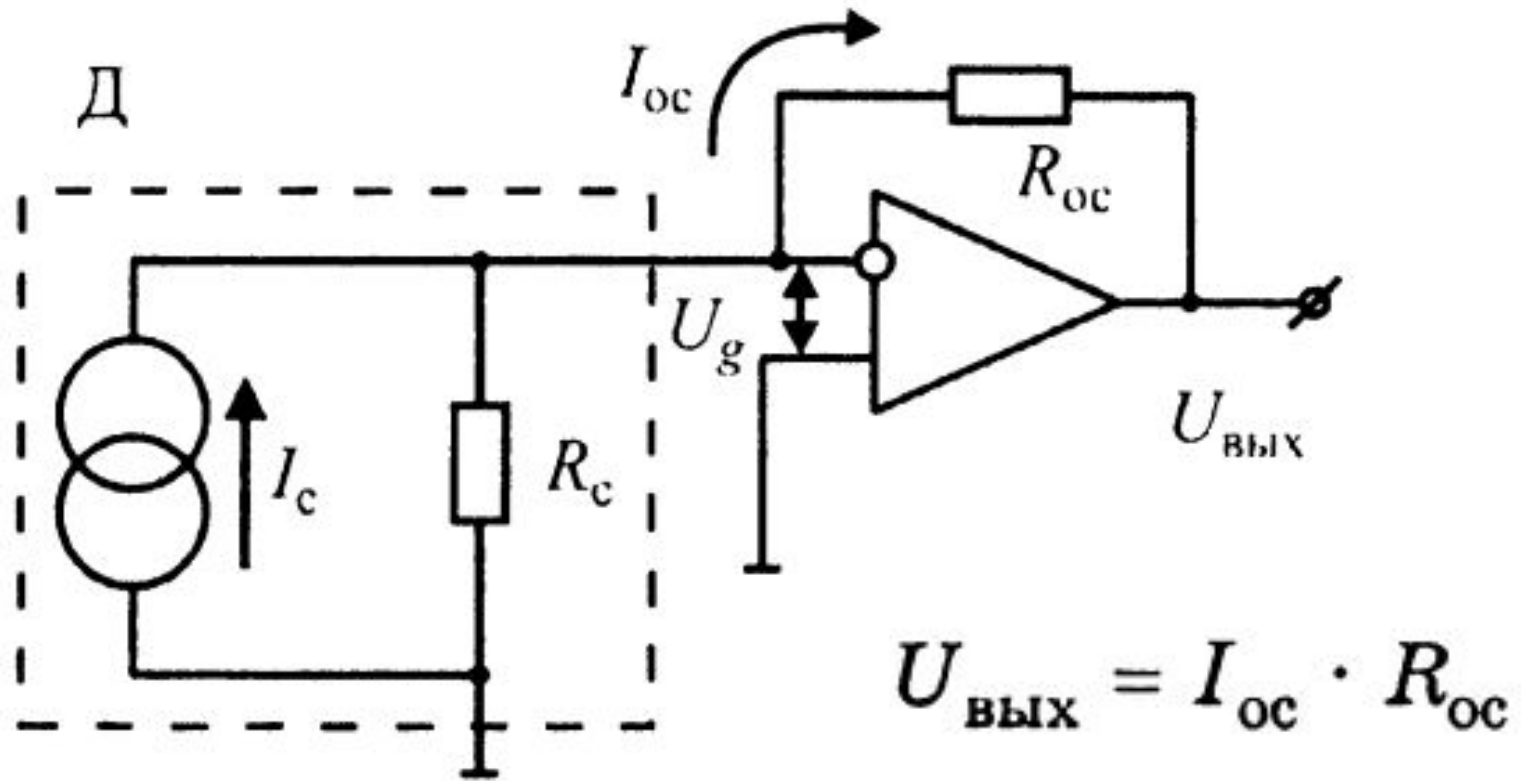
и передаточная характеристика будет  
нелинейная



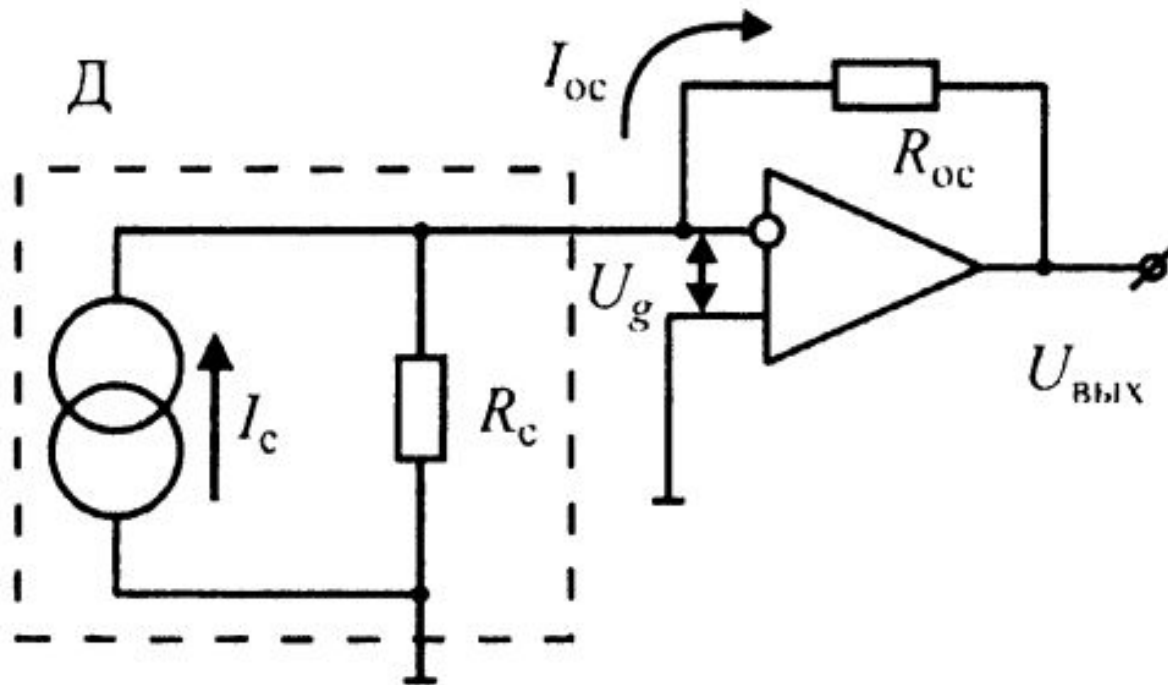
Линеаризация наступает при выполнении условия  $R_H \ll R_c$ , когда  $I_H = I_c$

Но при этом  $U_{\text{ВЫХ}} \approx 0$  и измерить сигнал на выходе затруднительно





Для того чтобы увеличить амплитуду сигнала на выходе, применяются ОУ в режиме преобразования «ток-напряжение»

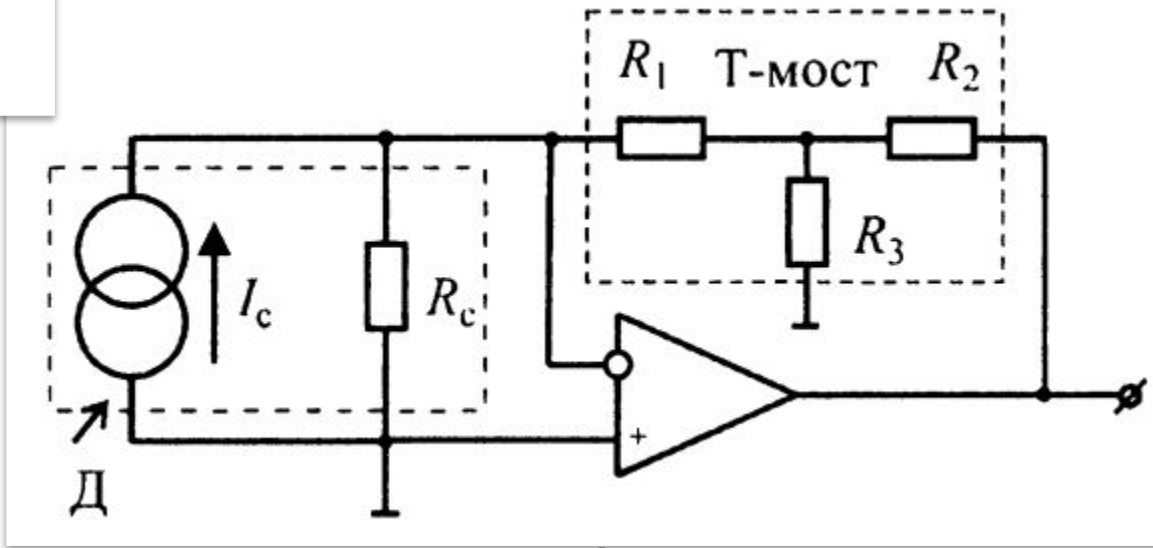
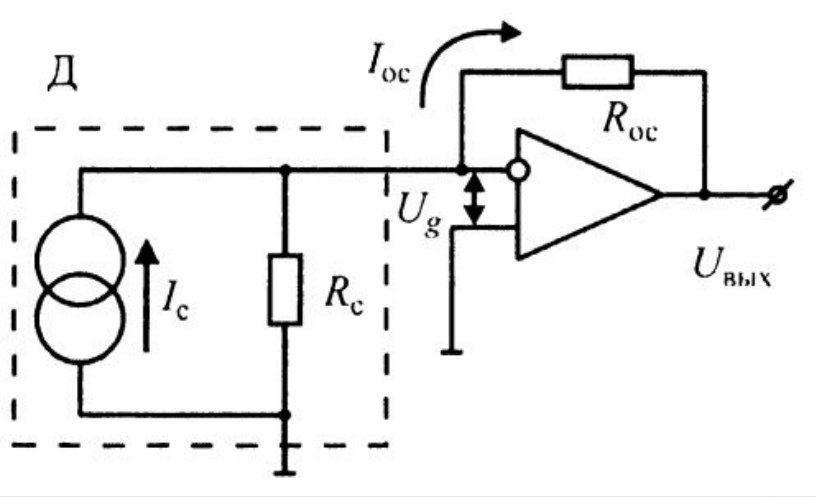


Подключение датчика тока к ОУ

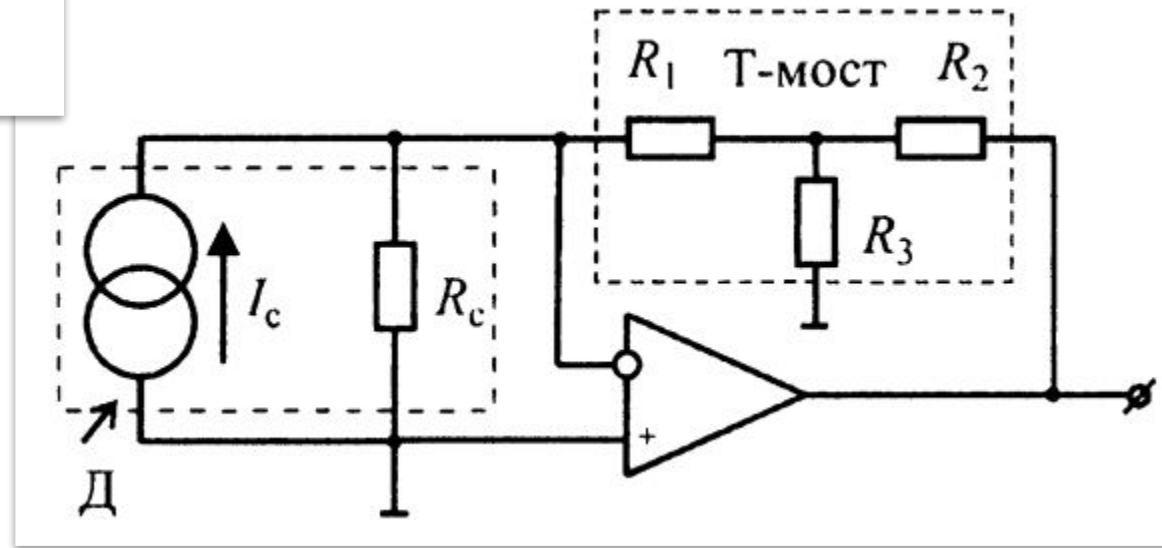
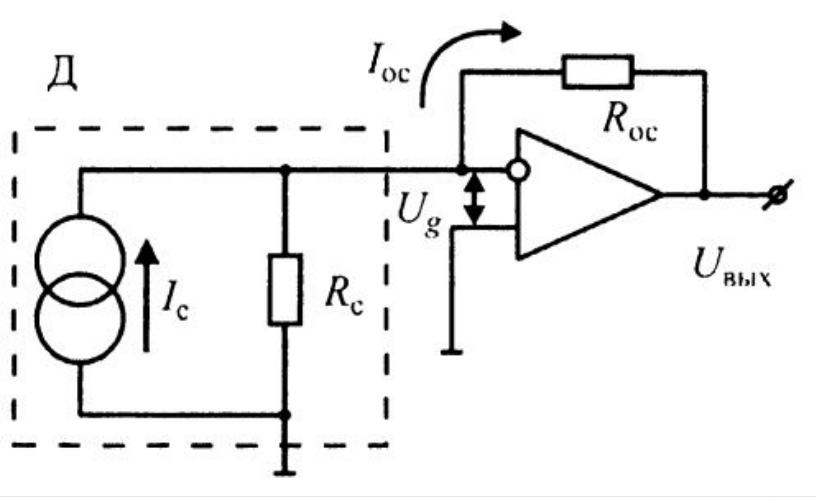
$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{oc} \cdot R_{oc}$$

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / I_c = R_{oc} \text{ (Ом)}$$

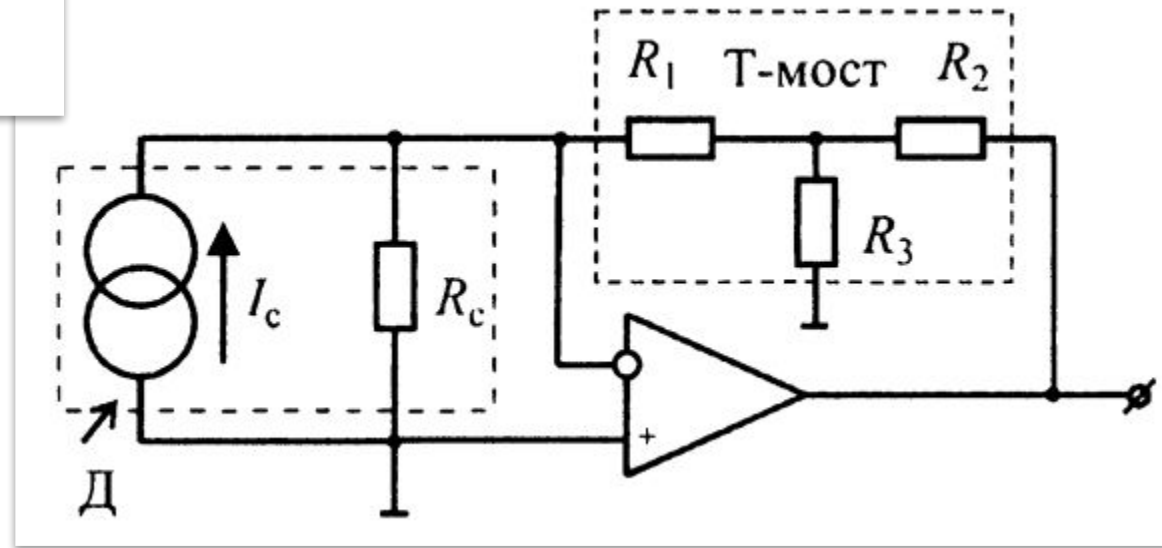
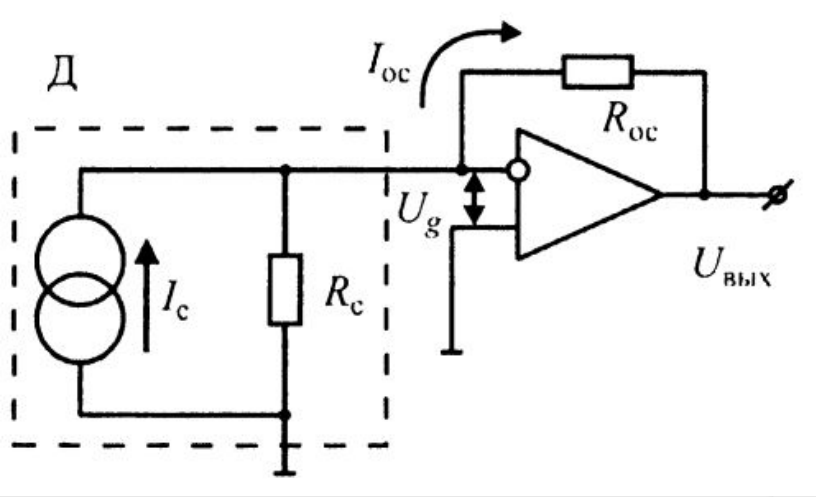
коэффициент  
передачи



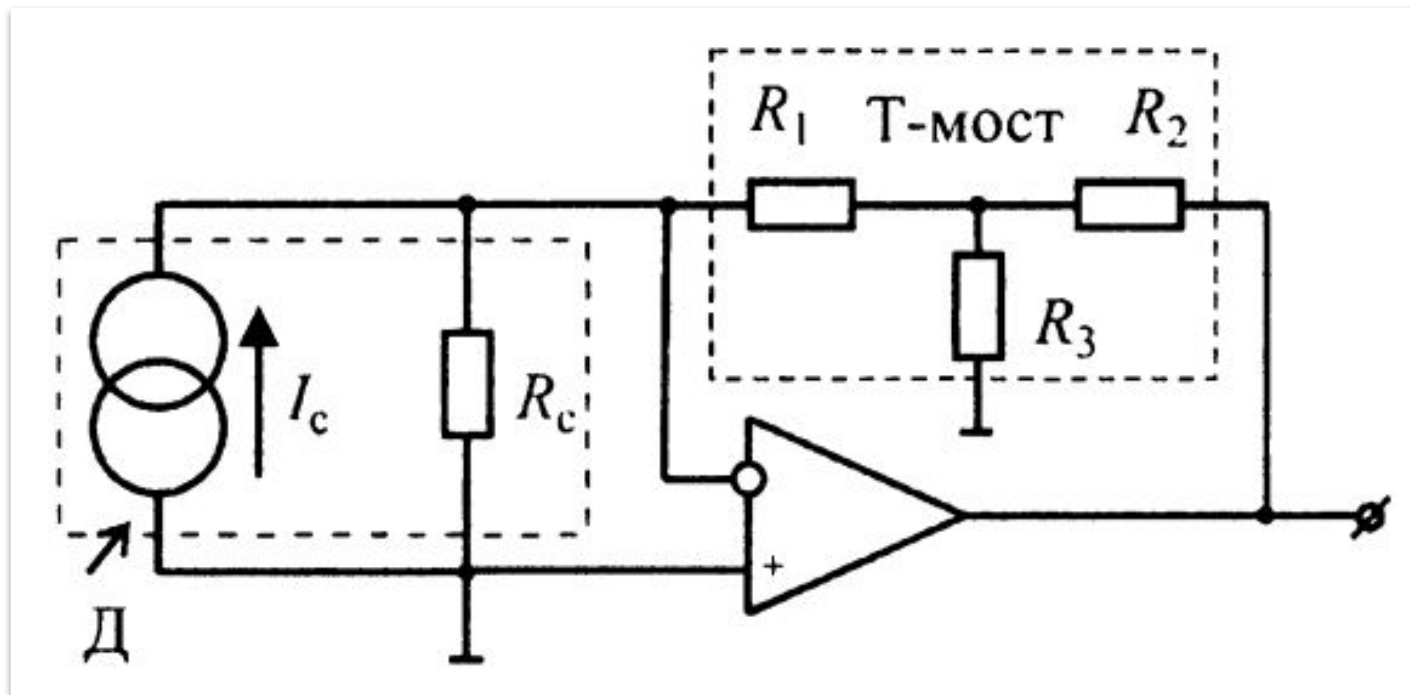
Во многих случаях, для того чтобы **увеличить коэффициент передачи** без чрезмерного увеличения  $R_{oc}$ , в ОС ОУ включается **Т-мост**



$$K = U_{\text{ВЫХ}}/I_c = R_{oc} \Rightarrow K = \left( R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \right)$$



$$K = U_{\text{ВЫХ}}/I_c = R_{oc} \Rightarrow K = \left( R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \right)$$

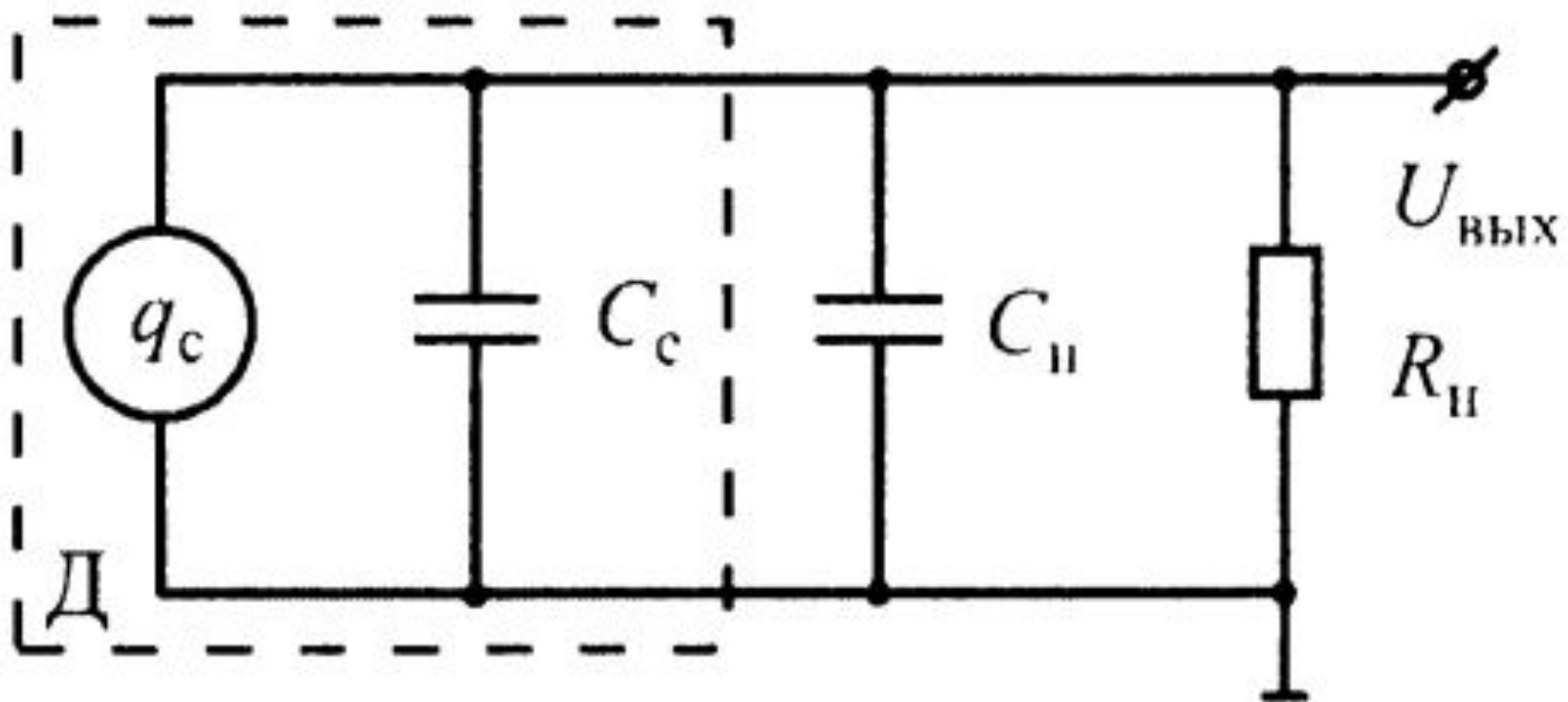


Допустим  $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 0,1 \text{ кОм}$ ,  
тогда  $K = 10^6 \text{ Ом}$ .

Следовательно, включение Т-моста с указанными номиналами равносильно тому, что мы ставим в обратную связь мегаомный резистор

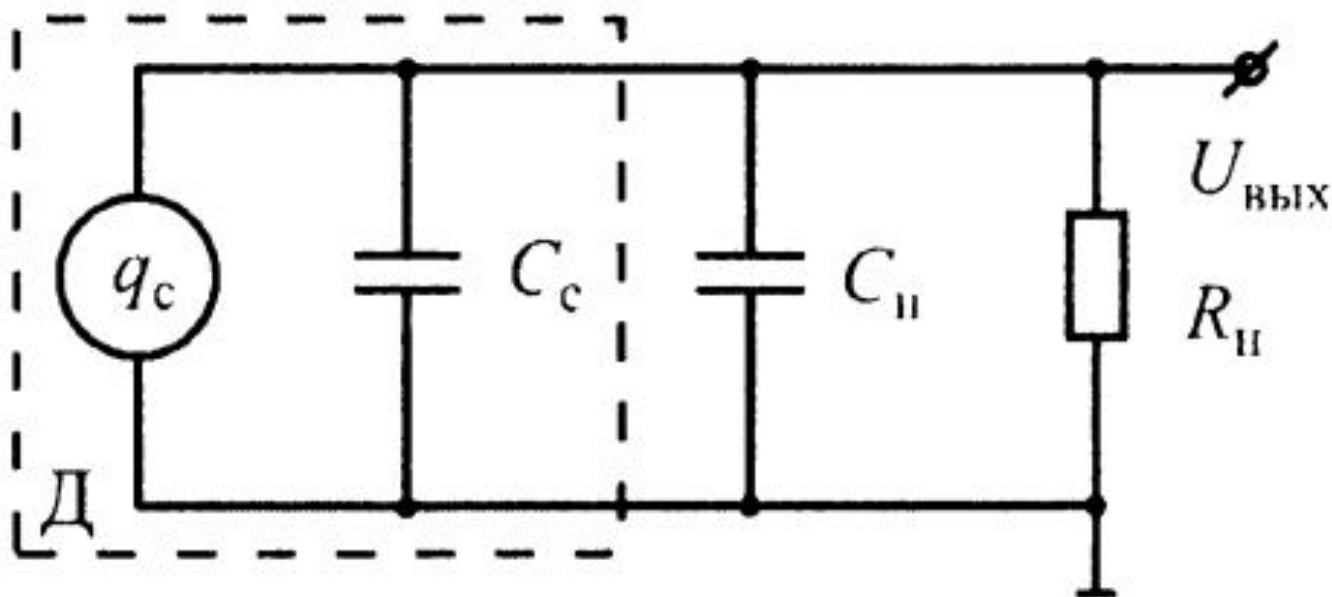
# Генераторные датчики сигналов

## 3. Датчики заряда

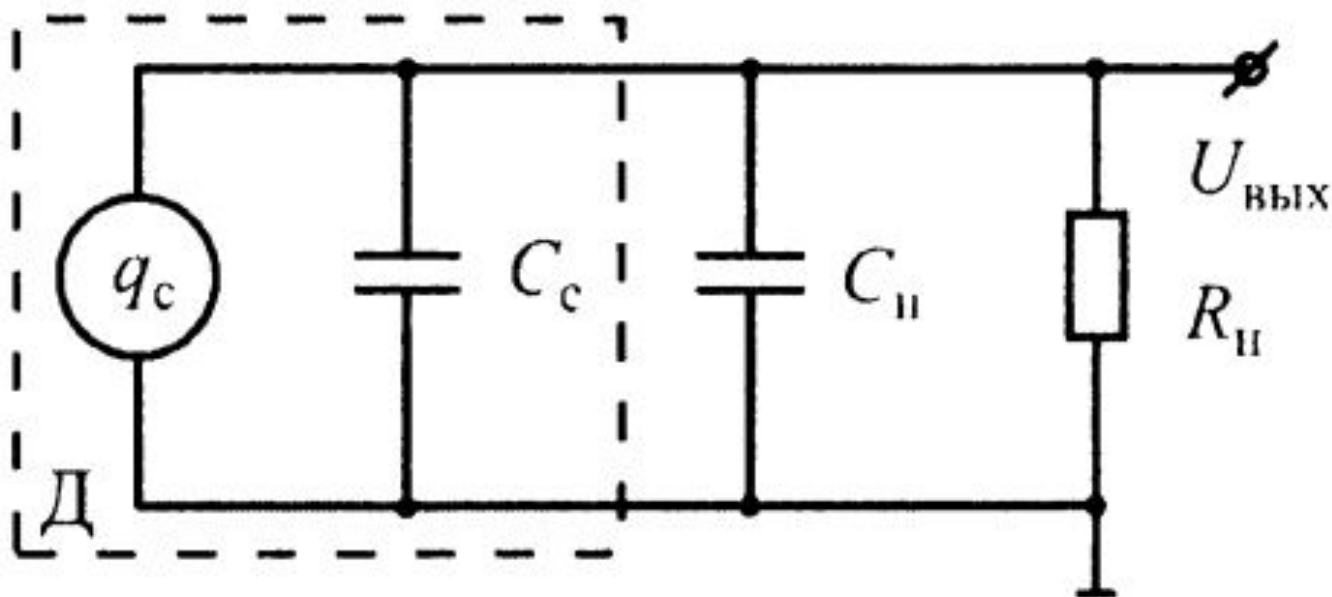


Датчик заряда



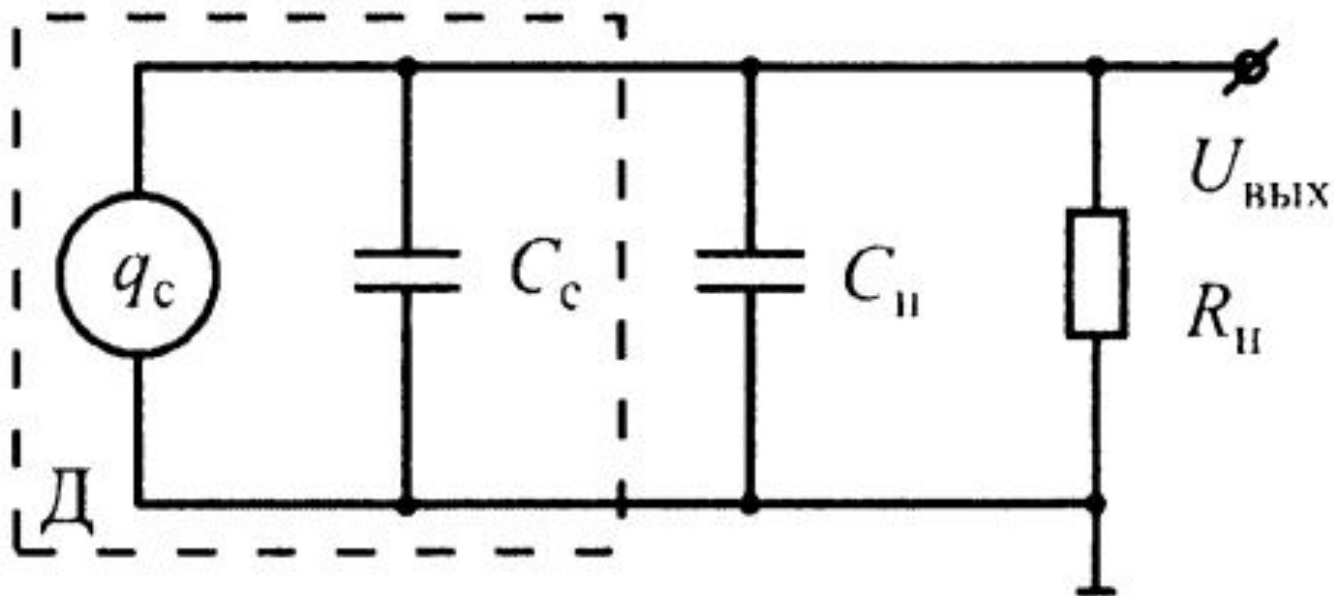


В измерительных системах исходят из того, что датчики заряда (например, **пьезоэлементы**) являются маломощными устройствами, в которых приходится учитывать не только сопротивление нагрузки  $R_n$ , но и внутренний импеданс источника сигнала  $C_c$  и емкость нагрузки  $C_n$ , включая емкость соединительной линии



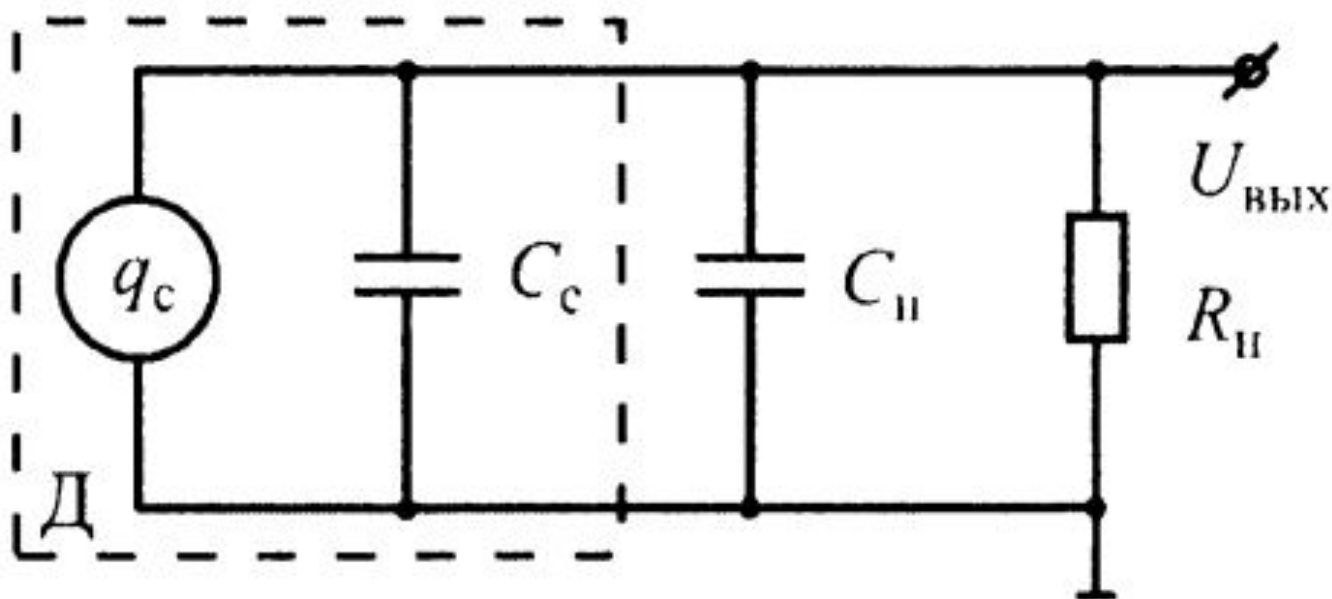
Для того чтобы не «подгрузить» такой датчик, его подключают к схеме с очень большим сопротивлением нагрузки  $R_n$ .

$$R_n \rightarrow \infty, U = q_c / C_{\Sigma}, \text{ где } C_{\Sigma} = C_n + C_c$$

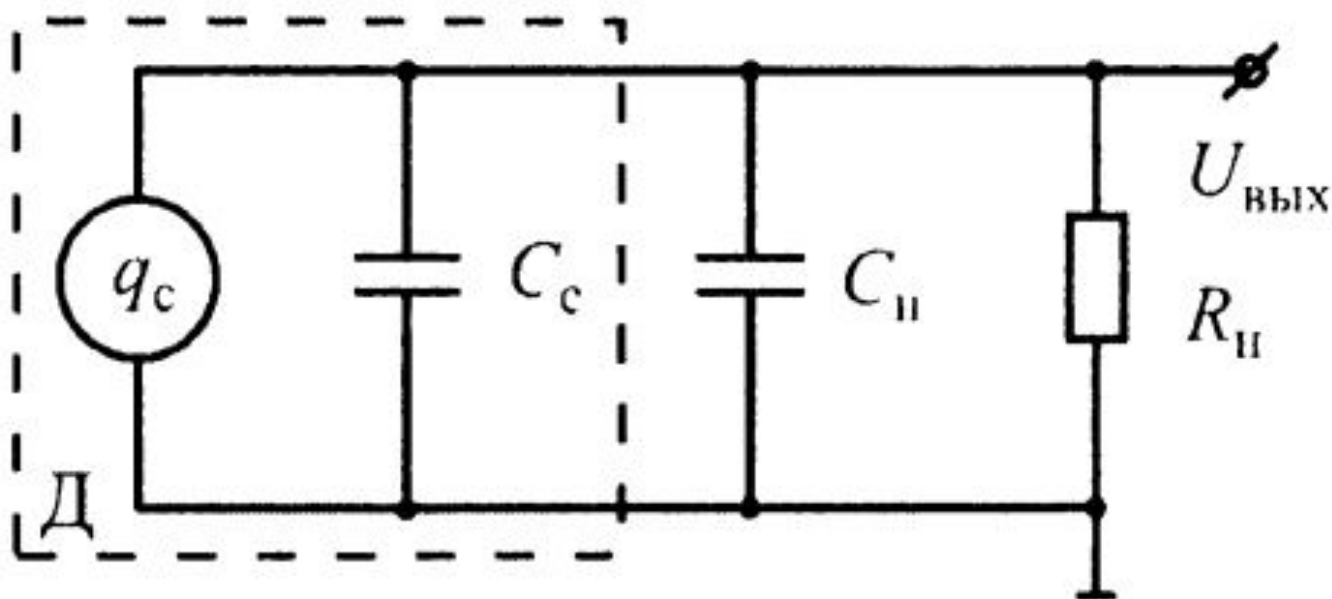


Выходной сигнал будет пропорционален заряду датчика

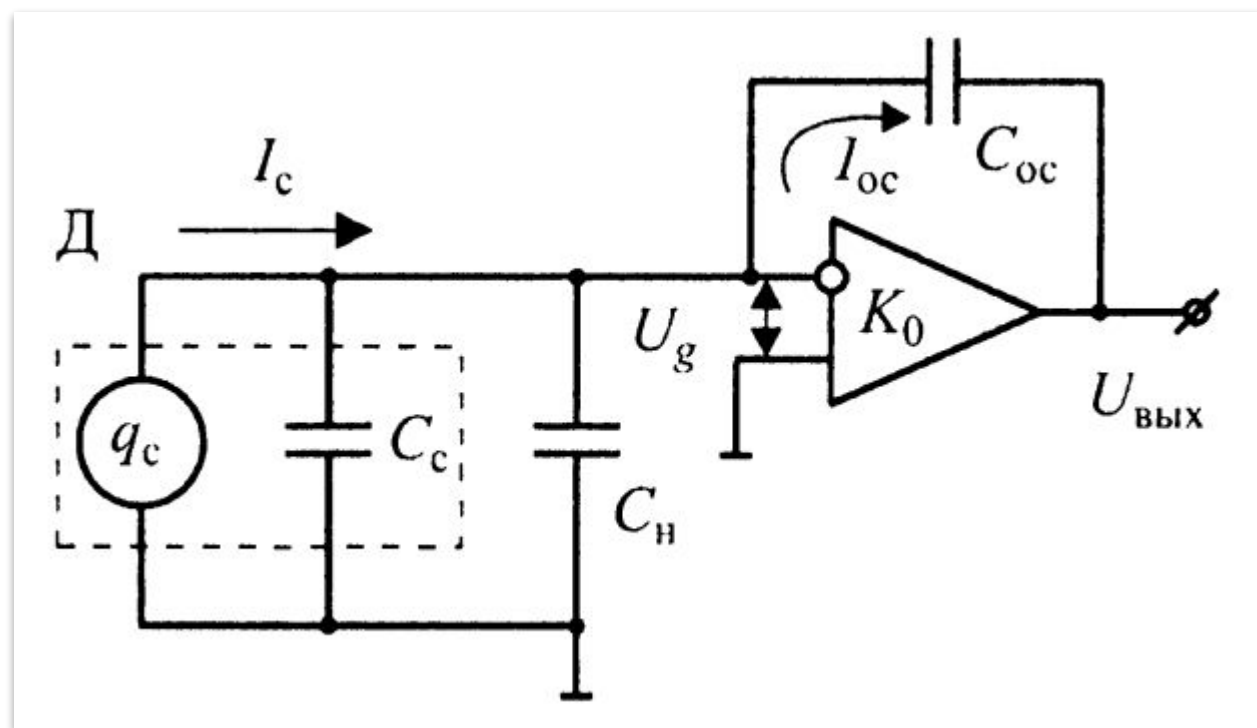
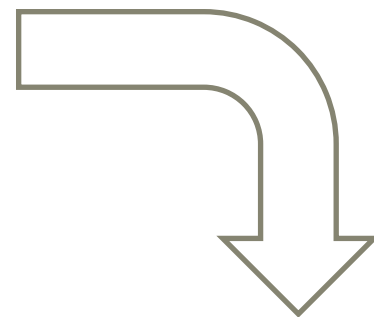
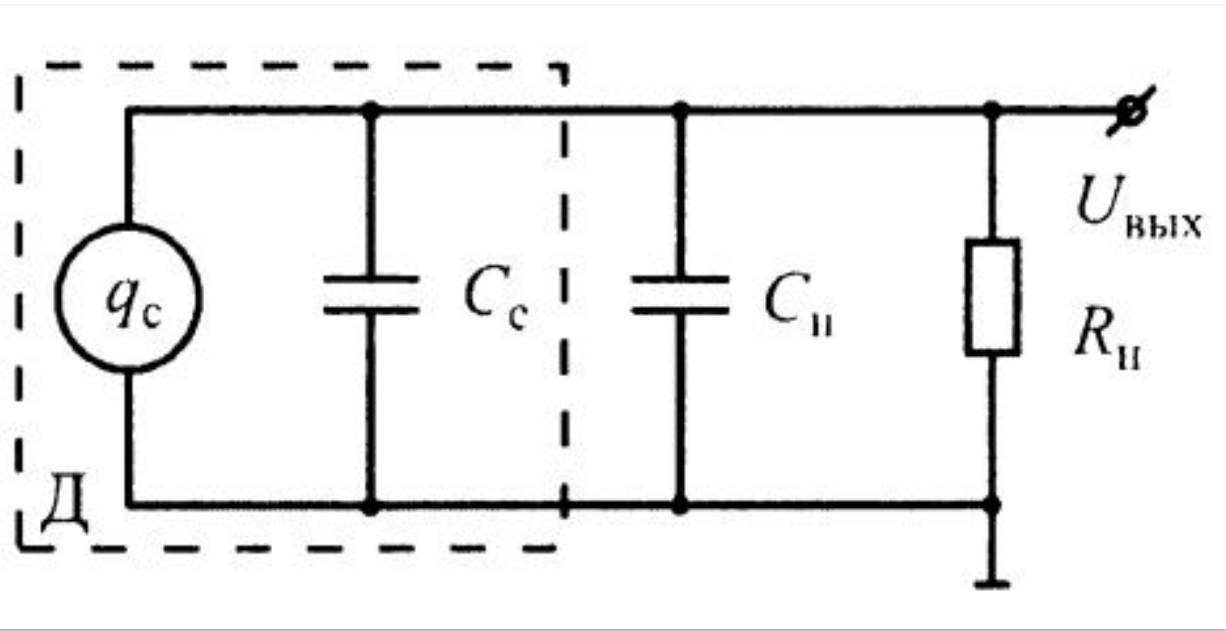
$$U = q_c / C_{\Sigma}$$

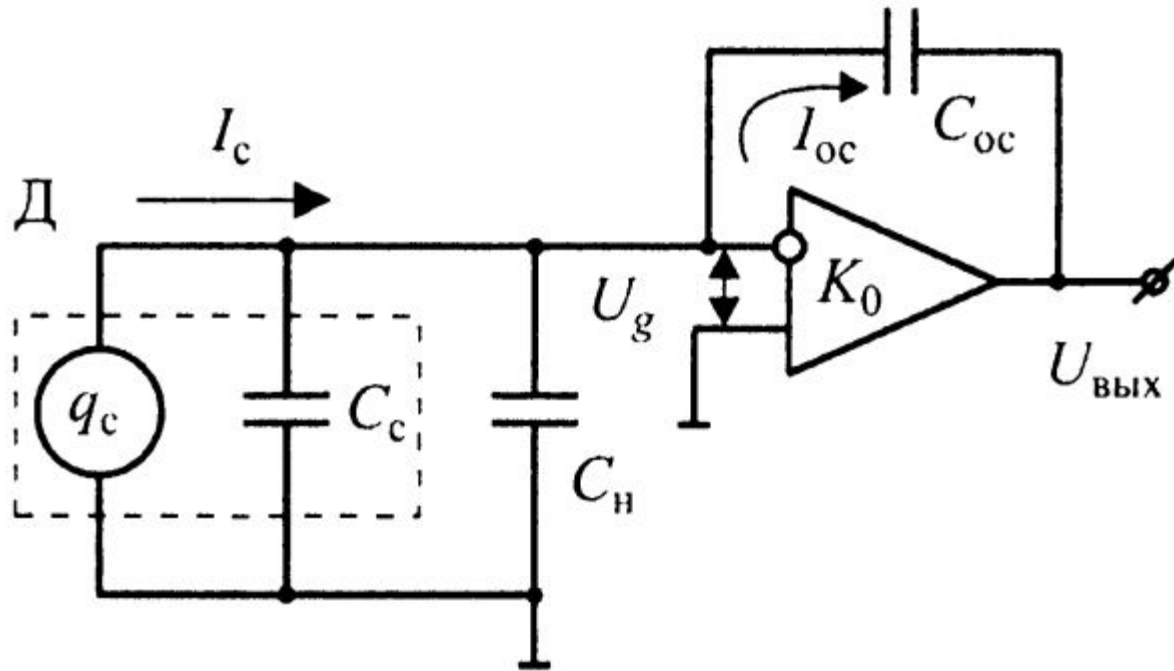


В схеме выходной сигнал зависит от емкости нагрузки. Причем в  $C_н$  входит емкость соединительного провода, который подключает датчик к нагрузке, а это значит, что любое перемещение проводов меняет емкость нагрузки и вызывает изменение выходного сигнала. <sup>92</sup>



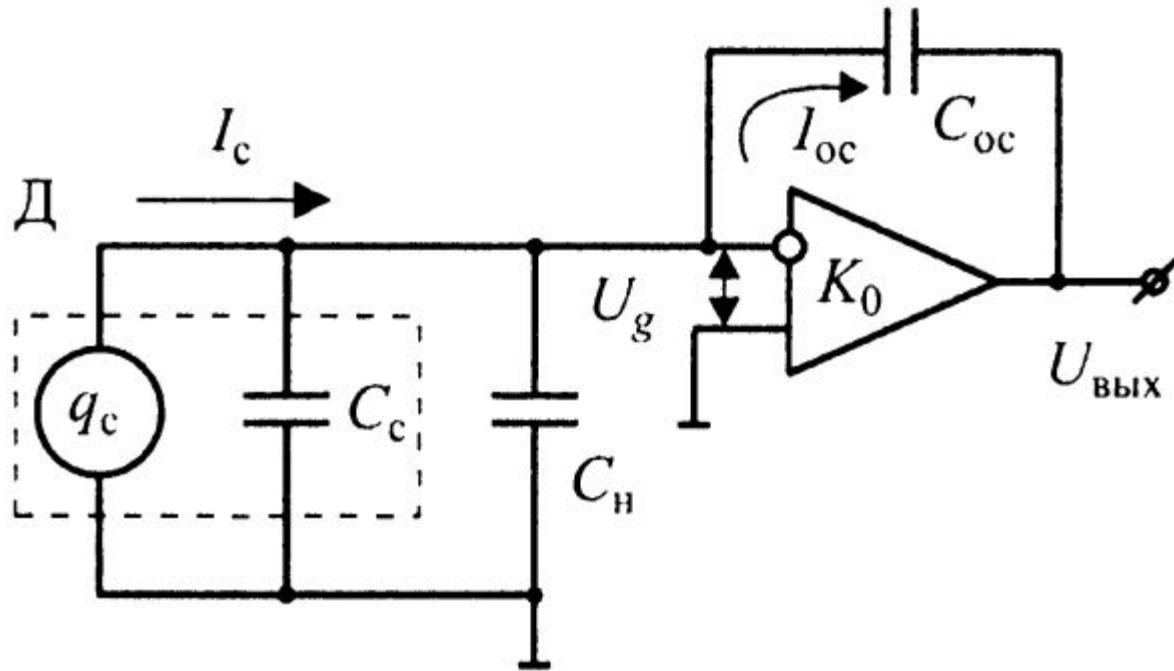
Естественно, это является недостатком такой схемы. Чтобы избавиться от этого недостатка, применяют схему преобразователя «заряд—напряжение» на интеграторе тока





В такой схеме  $U_g \approx 0$   
и по переменному току  $R_{ВХ} \approx 0$ .

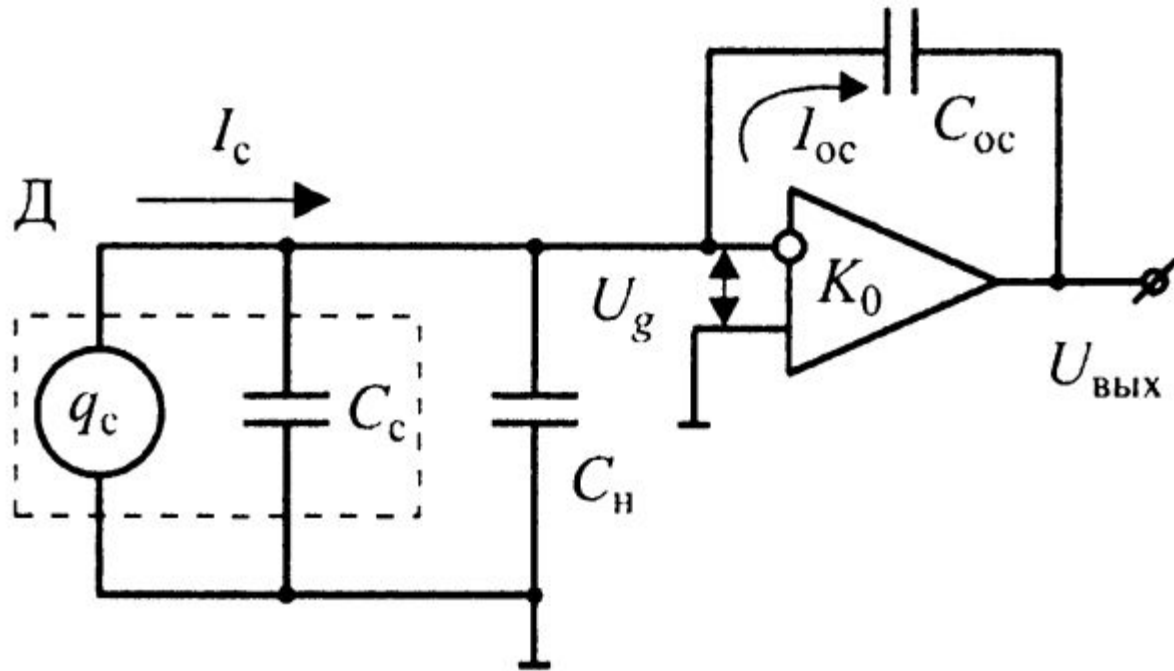
Источник заряда  $q_c$  разряжается на виртуальный ноль операционного усилителя с помощью тока  $I_c = dq_c/dt$ .



Соответственно, это приводит к тому, что в операционной схеме ( $I_c = I_{oc}$ ) мы имеем

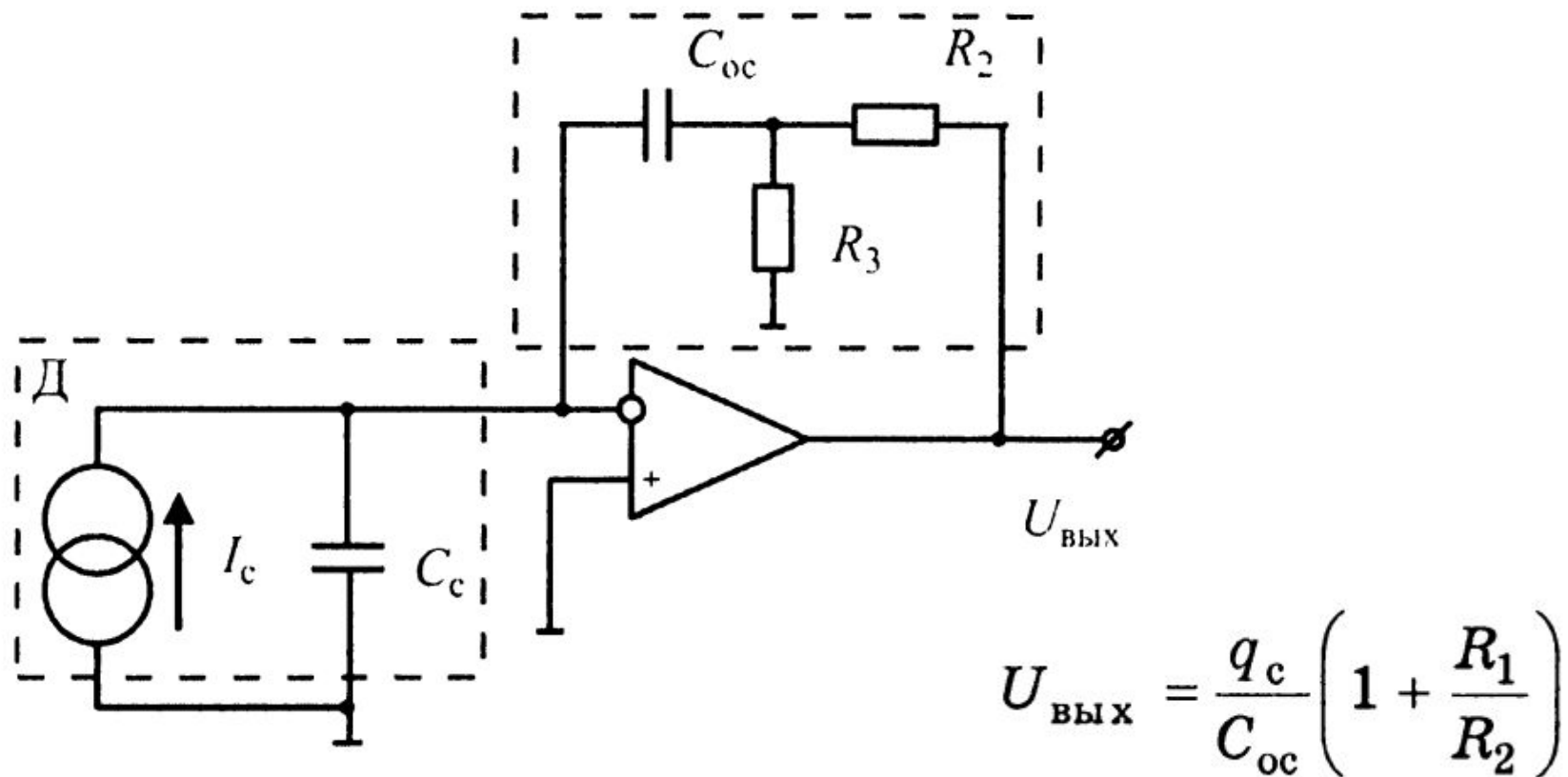
$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{C_{oc}} \int I_{oc} dt = \frac{1}{C_{oc}} \int \frac{dq_c}{dt} dt = \frac{q_c}{C_{oc}}$$



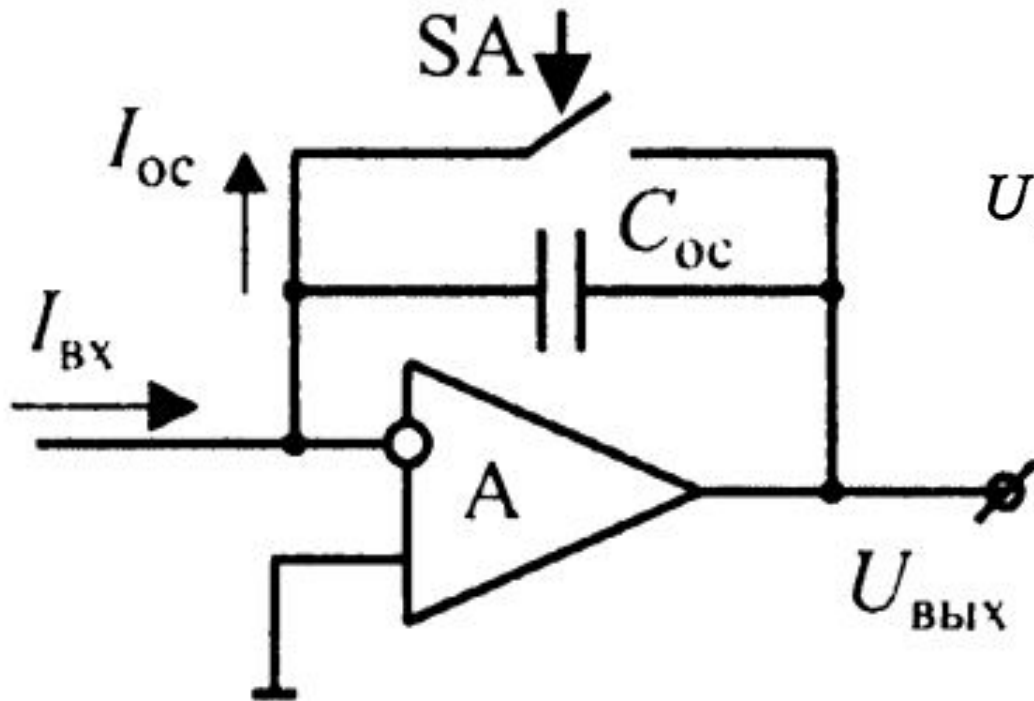


Заметим, что выходное напряжение схемы не зависит от емкости нагрузки  $C_n$ , а коэффициент передачи

$$K_{\text{пер}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{q_c} = \frac{1}{C_{\text{oc}}}$$



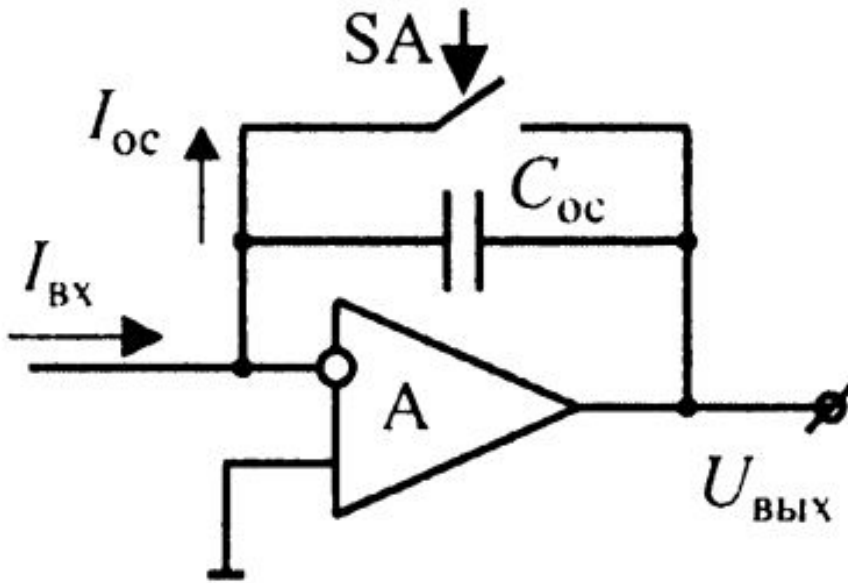
Чтобы не использовать чрезвычайно малые номиналы емкостей, для повышения коэффициента преобразования используют емкостной Т-мост



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{C_{\text{ос}}} \int_0^T I_{\text{ВХ}} dt = \frac{I_{\text{ВХ}} \cdot T}{C_{\text{ос}}}$$

Ключ SA в схеме используется для обеспечения нулевых начальных условий, T – время интегрирования

**Интеграторы тока** часто используются для измерения сверхмалых токов в преобразователях «ток - напряжение» 99



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{C_{\text{ос}}} \int_0^T I_{\text{ВХ}} dt = \frac{I_{\text{ВХ}} \cdot T}{C_{\text{ос}}}$$

Пример: время интегрирования  $T = 10$  с,  $C_{\text{ос}} = 100$  пФ, тогда  $K = 100$  ГОм.

Таким образом, интегратор тока с указанными параметрами эквивалентен преобразователю «ток—напряжение» с резистором  $R_{\text{ос}} = 100$  ГОм

# Параметрические датчики сигналов

В качестве параметрических датчиков наиболее часто используются резистивные

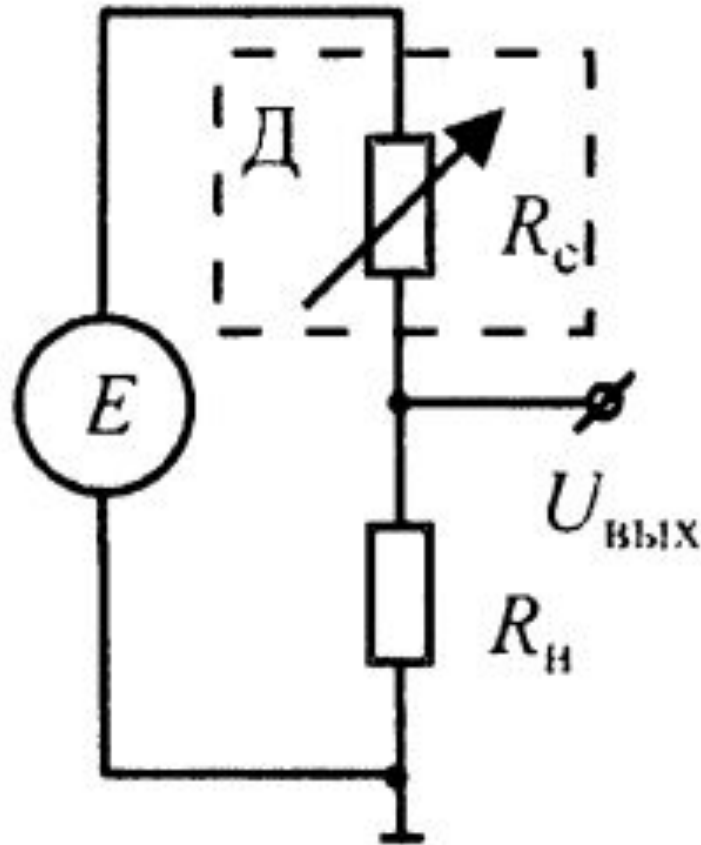
датчики:

- фоторезисторы,
- терморезисторы,
- магниторезисторы
- и т. д.,

Т. е. датчики, у которых в качестве измеряемого параметра используется сопротивление резистора

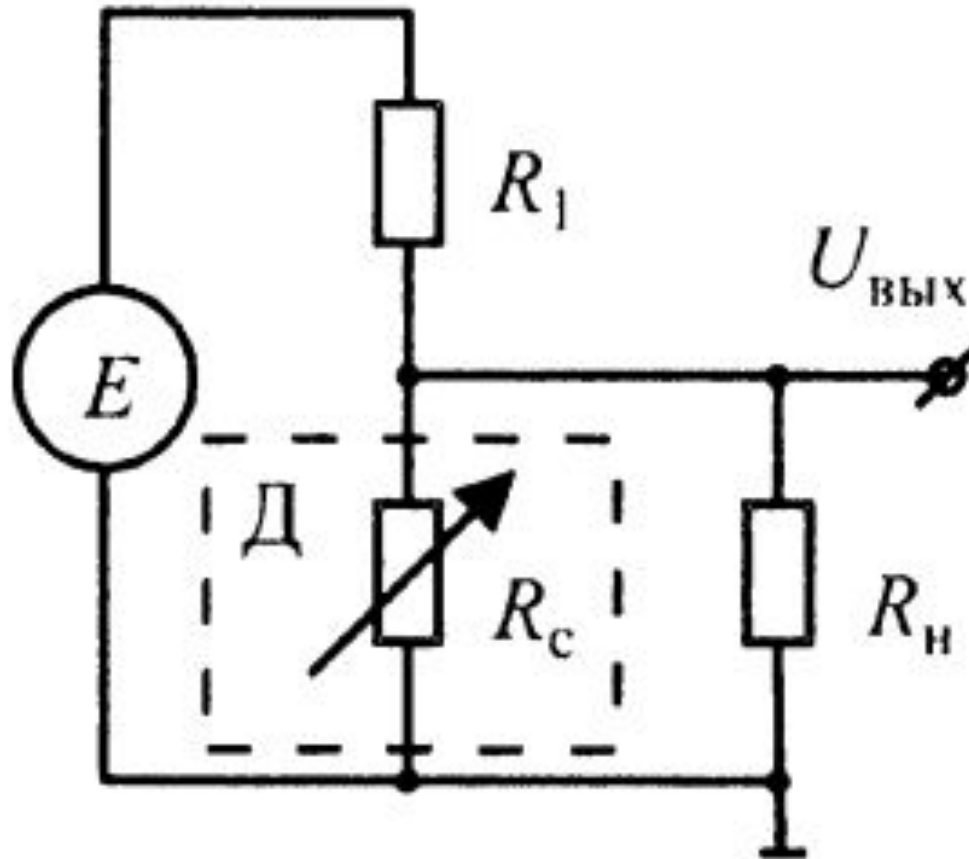
При подключении резистивных датчиков  
используются 3 вида цепей:

- последовательная цепь
- делитель напряжения
- мостовые схемы

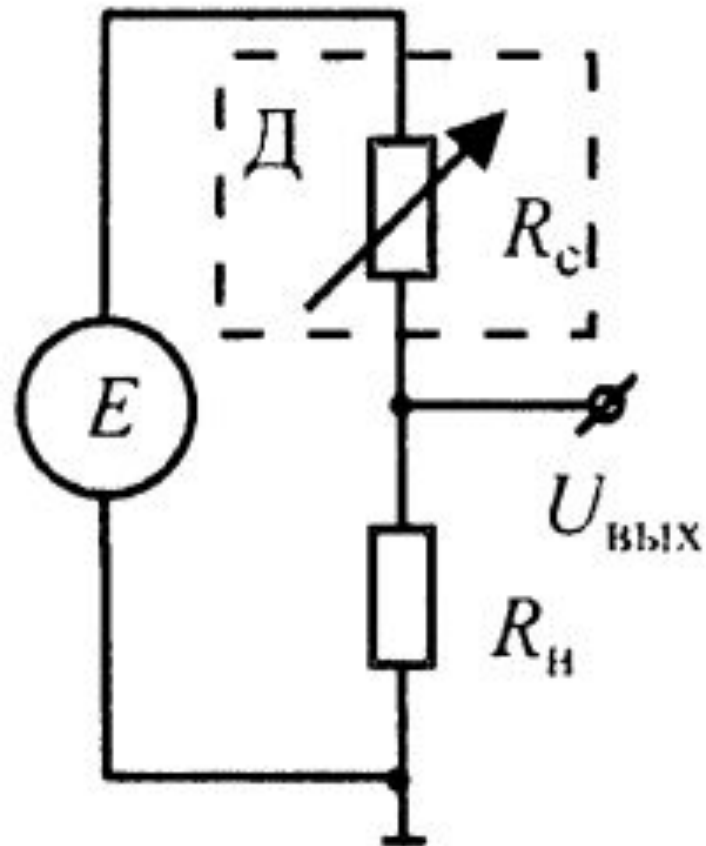


**Последовательная цепь:** датчик  $D$  подключен последовательно с напряжением запитки  $E$  и сопротивлением нагрузки  $R_H$

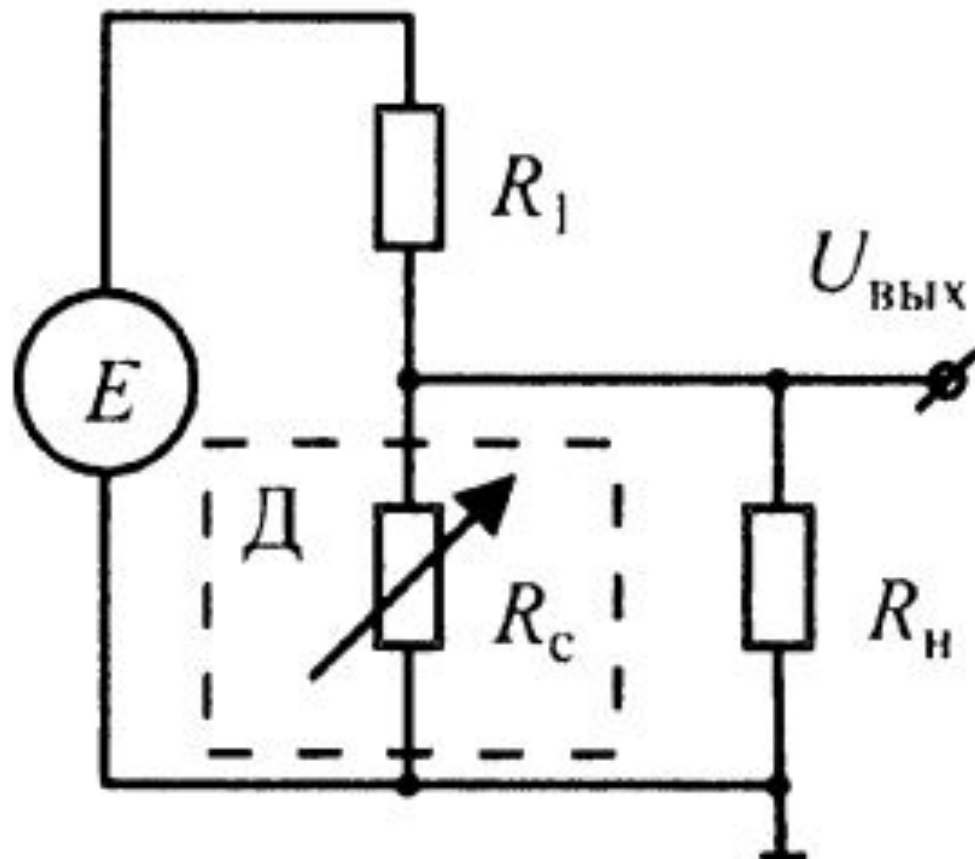




Делитель напряжения: датчик подключен параллельно нагрузке



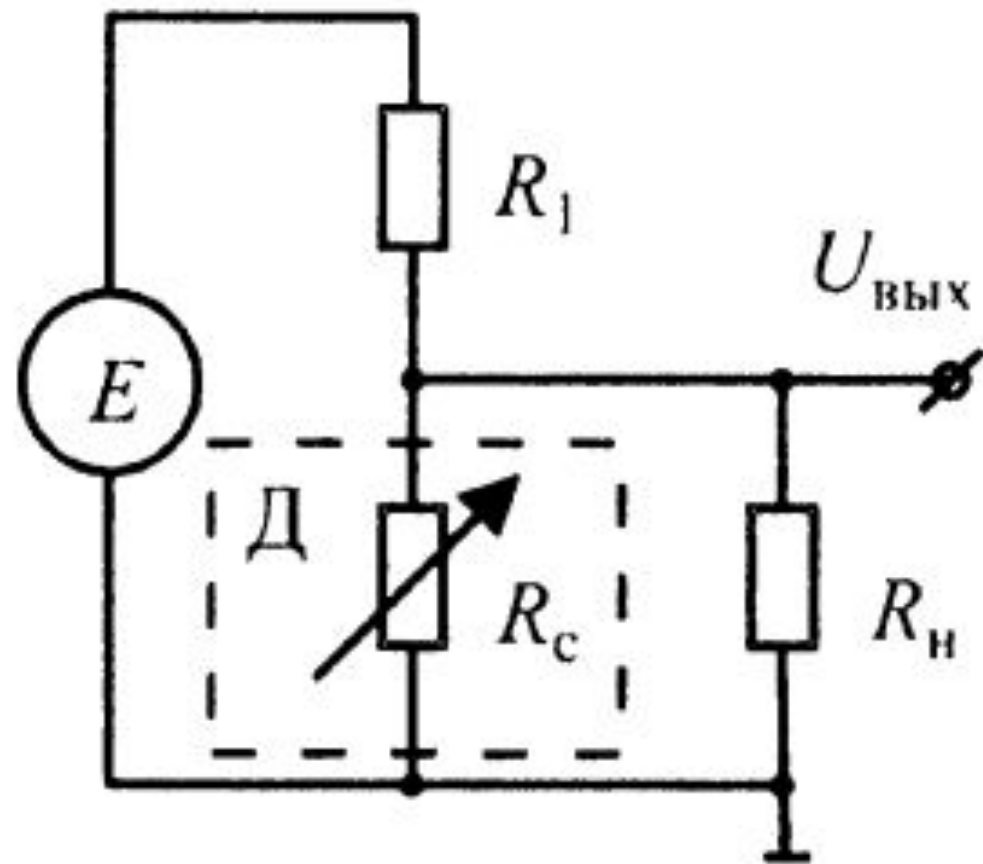
Последовательная  
цепь



Делитель напряжения

В этих случаях, как нетрудно показать, имеет место нелинейная связь между  $R_c$  и  $R_{ВЫХ}$

# Делитель напряжения



$$U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot R_c \cdot R_H / (R_c \cdot R_1 + R_H(R_c + R_1))$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot R_c \cdot R_H / (R_c \cdot R_1 + R_H(R_c + R_1))$$

Даже если сопротивление нагрузки велико, передаточная характеристика остается нелинейной

Как обычно, желательно иметь эту зависимость линейной для уменьшения числа дополнительных преобразований и обеспечения постоянной чувствительности датчика во всем диапазоне преобразуемой величины

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot R_c \cdot R_H / (R_c \cdot R_1 + R_H(R_c + R_1))$$

Это возможно

- или при работе датчика на малом участке передаточной характеристики

- или при запитке схемы источником тока  $I$ .

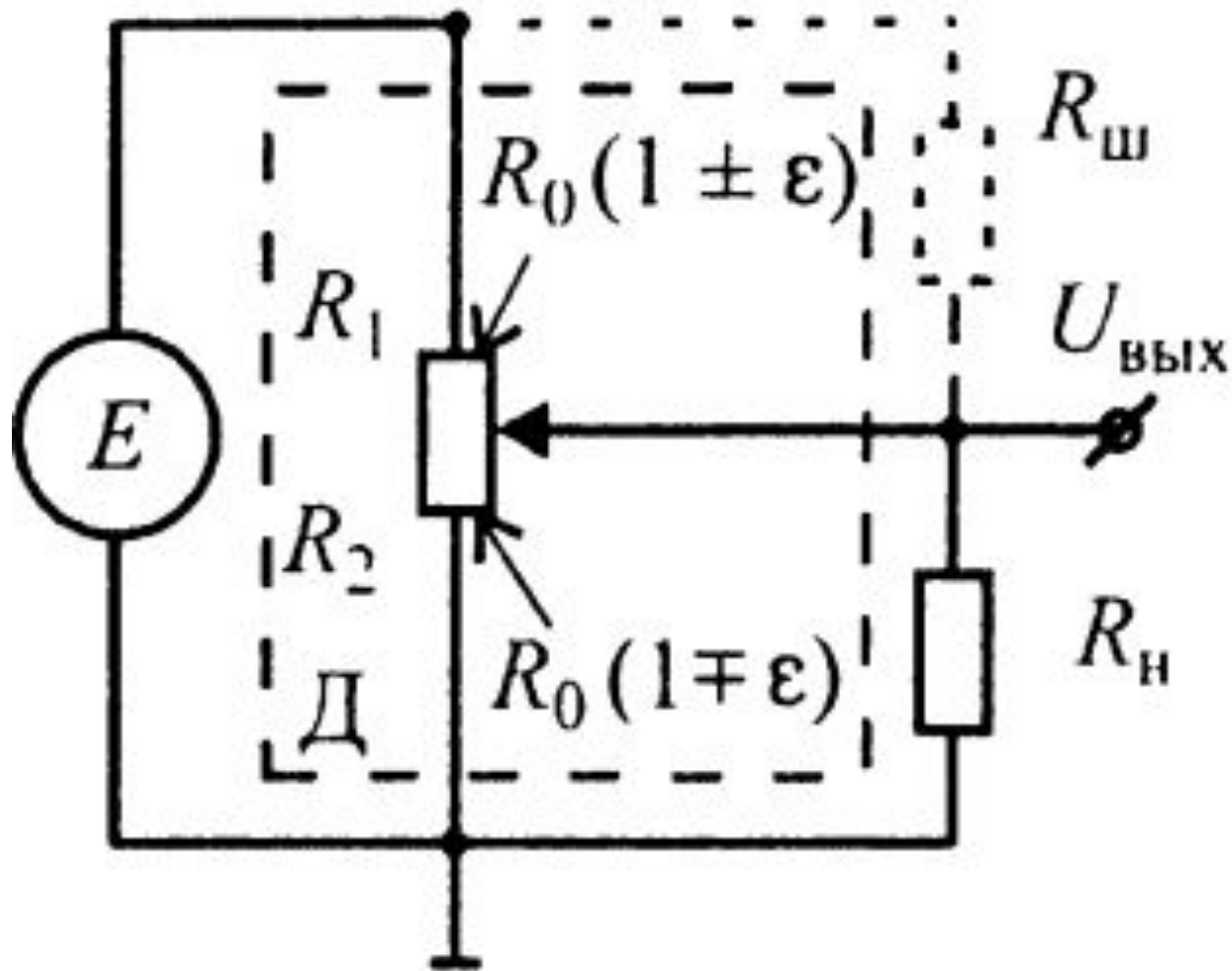
В последнем случае

$$R_H \gg R_c \text{ имеем } U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot R_c$$

У делителей напряжения, несмотря на указанные недостатки, есть несколько частных схем, которые широко используются на практике.

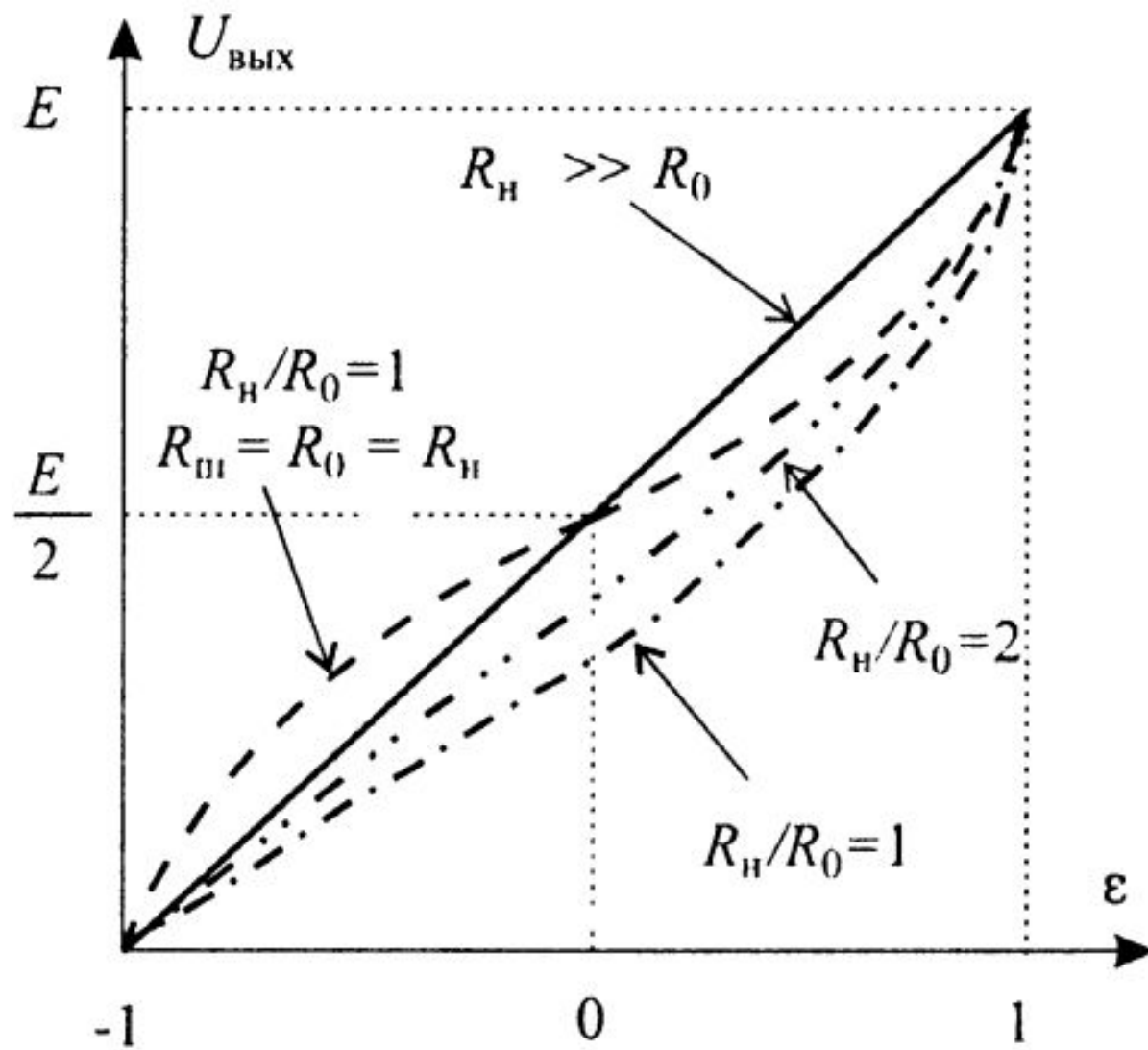
Одной из них является  
потенциометрическая схема,

в которой используется дифференциальный резистивный датчик



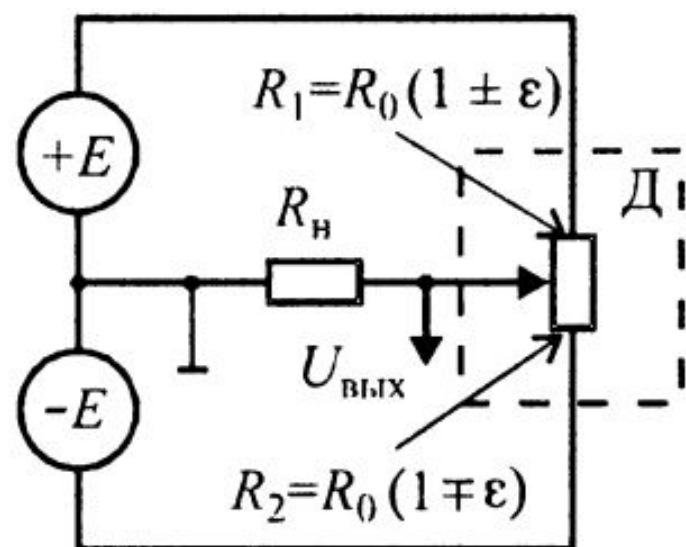
$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = E \cdot \varepsilon \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_H} (1 - \varepsilon) \varepsilon}$$

Потенциометрический датчик

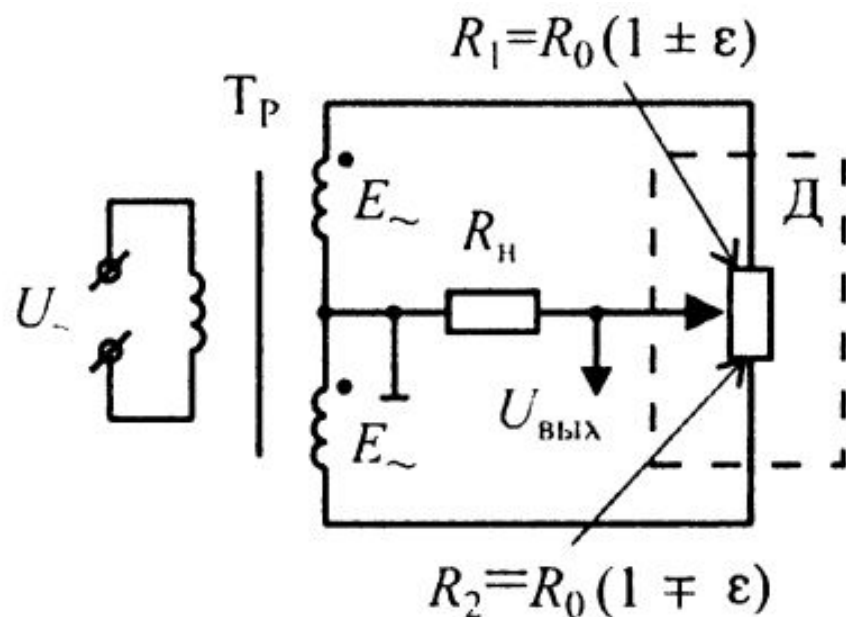


Передаточные характеристики потенциметрической схемы при различных соотношениях  $R_H$  и  $R_0$  112





Симметричная запитка  
потенциометрического датчика



Трансформаторная  
запитка потенциометрического  
датчика

Общим недостатком потенциометрических схем (за исключением схем с симметричной запиткой) является ненулевой выходной сигнал при  $\varepsilon = 0$ .

Этот факт трактуется как измерение малого приращения полезного сигнала на фоне большой синфазной помехи.

Поэтому требование к подавлению синфазного сигнала в потенциометрических схемах повышено. Чтобы исключить этот недостаток, применяют **мостовые измерительные схемы**

В. Б. Топильский

---

# Схемотехника измерительных устройств



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний  
2010

