

Тема: Приборы сравнения

Измерительные приборы, в которых для измерения физической величины используются методы сравнения с мерой, называются приборами сравнения.

Приборы сравнения имеют хорошие метрологические характеристики и позволяют получать результат измерения с высокой точностью.

Наиболее распространенными приборами сравнения являются *мосты* постоянного и переменного тока и *компенсаторы* (потенциометры) постоянного и переменного тока.

1 Мосты постоянного тока

Мосты постоянного тока используются для измерения активных сопротивлений (сопротивлений постоянному току).

Различают одинарные (четырехплечие) и двойные (шестиплечие) мосты.

Одинарные мосты

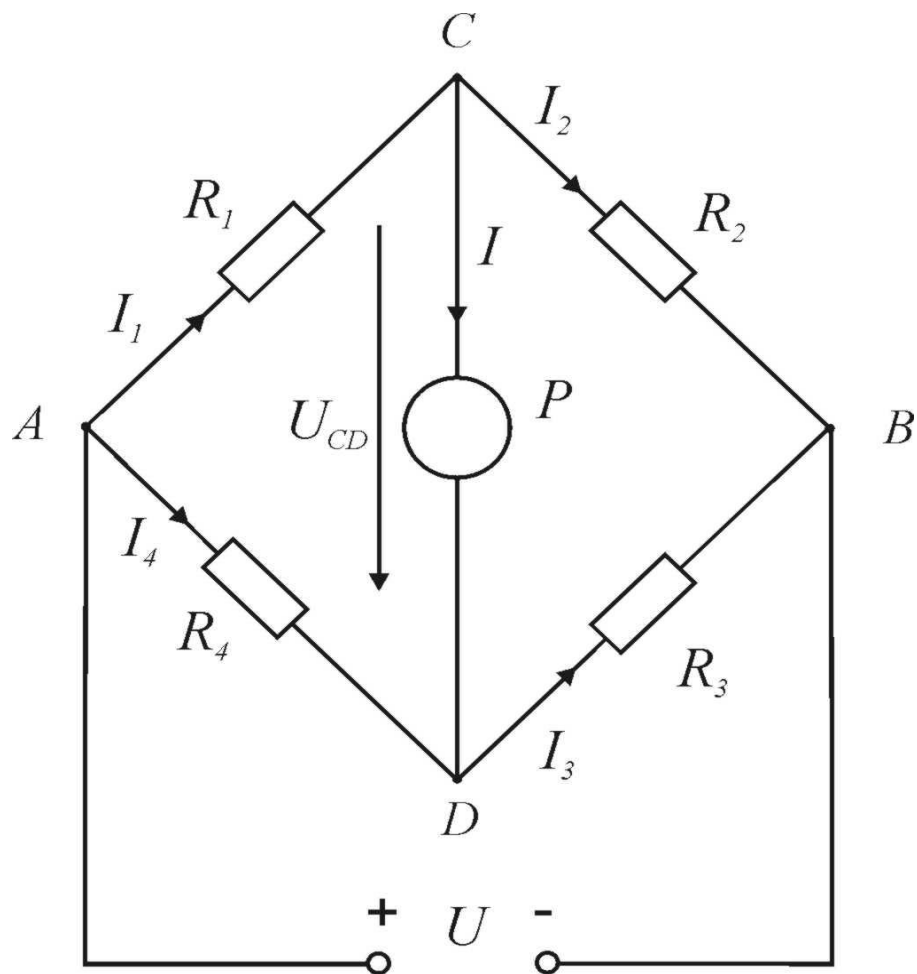


Рис. 1 Схема одинарного моста постоянного тока

Ветви AC, CB, BD и DA называются плечами моста.

Диагональ AB, к которой подключен источник постоянного тока, называется диагональю питания, а диагональ CD – измерительной диагональю.

В измерительной диагонали включен прибор P, который называется указателем равновесия.

Раньше в качестве указателя равновесия обычно использовались магнитоэлектрические гальванометры, в настоящее время для этих целей чаще применяются электронные нуль-индикаторы, имеющие более высокую чувствительность

Режим работы такой схемы, когда в измерительной диагонали ток равен нулю, называется равновесием моста. Условие равновесия можно получить из системы уравнений, составленных на основании 2-го закона Кирхгофа.

$$\begin{cases} I_1 R_1 + U_{CD} - I_4 R_4 = 0; \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 - U_{CD} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

При равновесии моста:

$I = 0$; $U_{CD} = 0$ следовательно $I_1 = I_2$ и $I_4 = I_3$.

Тогда систему (1) можно записать в виде

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_4 R_4; \\ I_1 R_2 = I_4 R_3. \end{cases} \quad (2)$$

Разделив первое уравнение системы (2) на второе, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

т.е. условием равновесия одинарного моста является *равенство произведений сопротивлений противоположных плеч.*

Поместив в одно плечо моста неизвестное измеряемое сопротивление R_x (скажем вместо R_1) и, добившись равновесия моста изменением сопротивлений других плеч, можно, зная их величину, определить величину R_x .

$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3}$$

Сопротивление R_2 называется **плечом сравнения** и обычно выполняется в виде многодекадного магазина сопротивлений (многозначной меры сопротивления).

Сопротивления R_4 и R_3 называются **плечами отношения** и выполняются обычно в виде набора мер сопротивлений, кратных 10, имеющих штепсельное переключение.

Одинарные мосты позволяют измерять с высокой точностью средние сопротивления в пределах от 10 Ом до 10^6 Ом.

При меньших значениях сопротивления точность уменьшается за счет влияния сопротивлений контактов и соединительных проводов (измеряемое сопротивление, сопротивление контактов и сопротивление проводов соединены последовательно в одном плече моста).

В некоторой степени снизить погрешность одинарных мостов при измерении малых сопротивлений можно путем **четырёхзажимного (четырёхпроводного)** подключения измеряемого сопротивления.

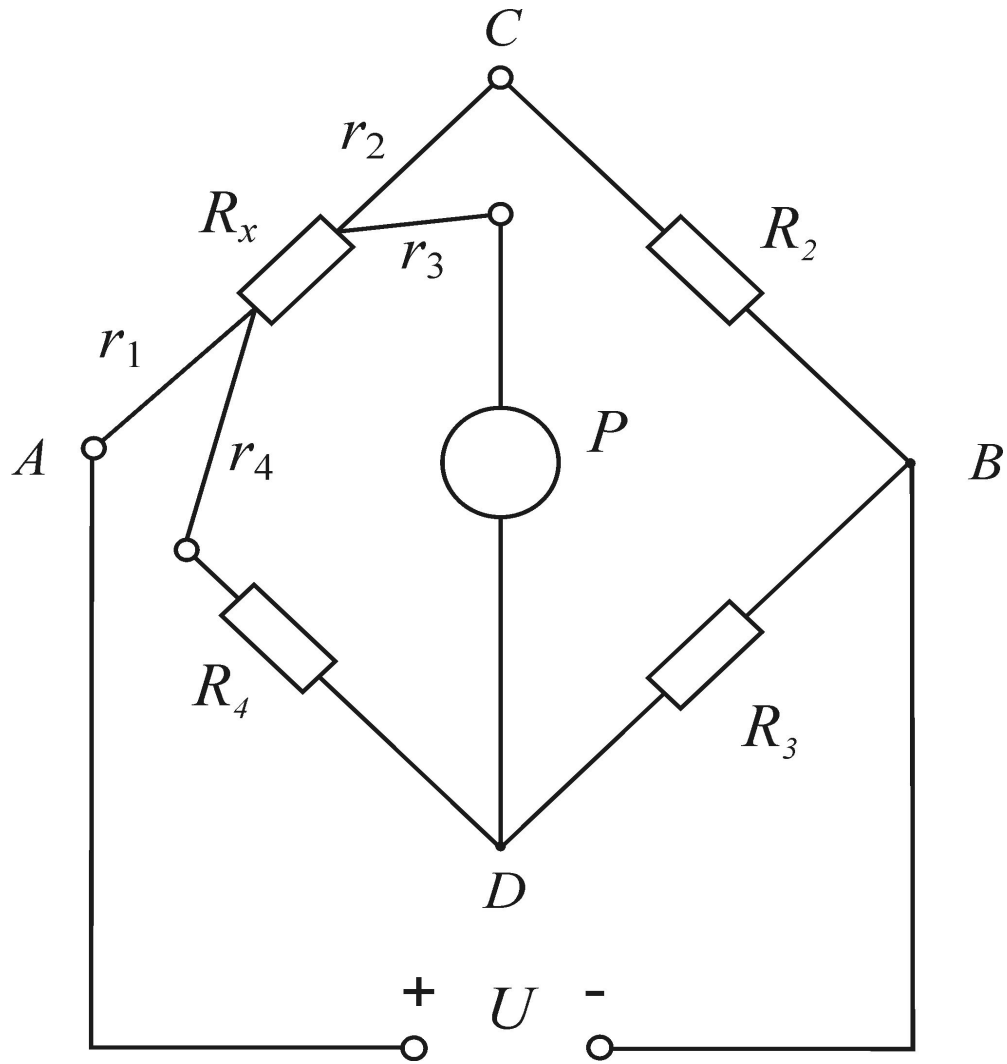


Рис. 2 Схема одинарного моста при четырехзажимном подключении

Сопротивления контактов и проводов r_1 и r_3 включены в диагонали моста и не влияют на результат измерения.

Сопротивление r_2 включено последовательно с сопротивлением плеча R_2 , а сопротивление r_4 последовательно с сопротивлением плеча R_4 .

Если выполняются условия: $R_2 \gg r_2$ и $R_4 \gg r_4$, очевидно, что влияние r_2 и r_4 на результат будет незначительным.

Двойные мосты

Для измерения с большой точностью малых сопротивлений ($< 10 \text{ Ом}$) применяют так называемые двойные мосты, устройство и принцип действия которых поясняется схемой, показанной на рис. 3.

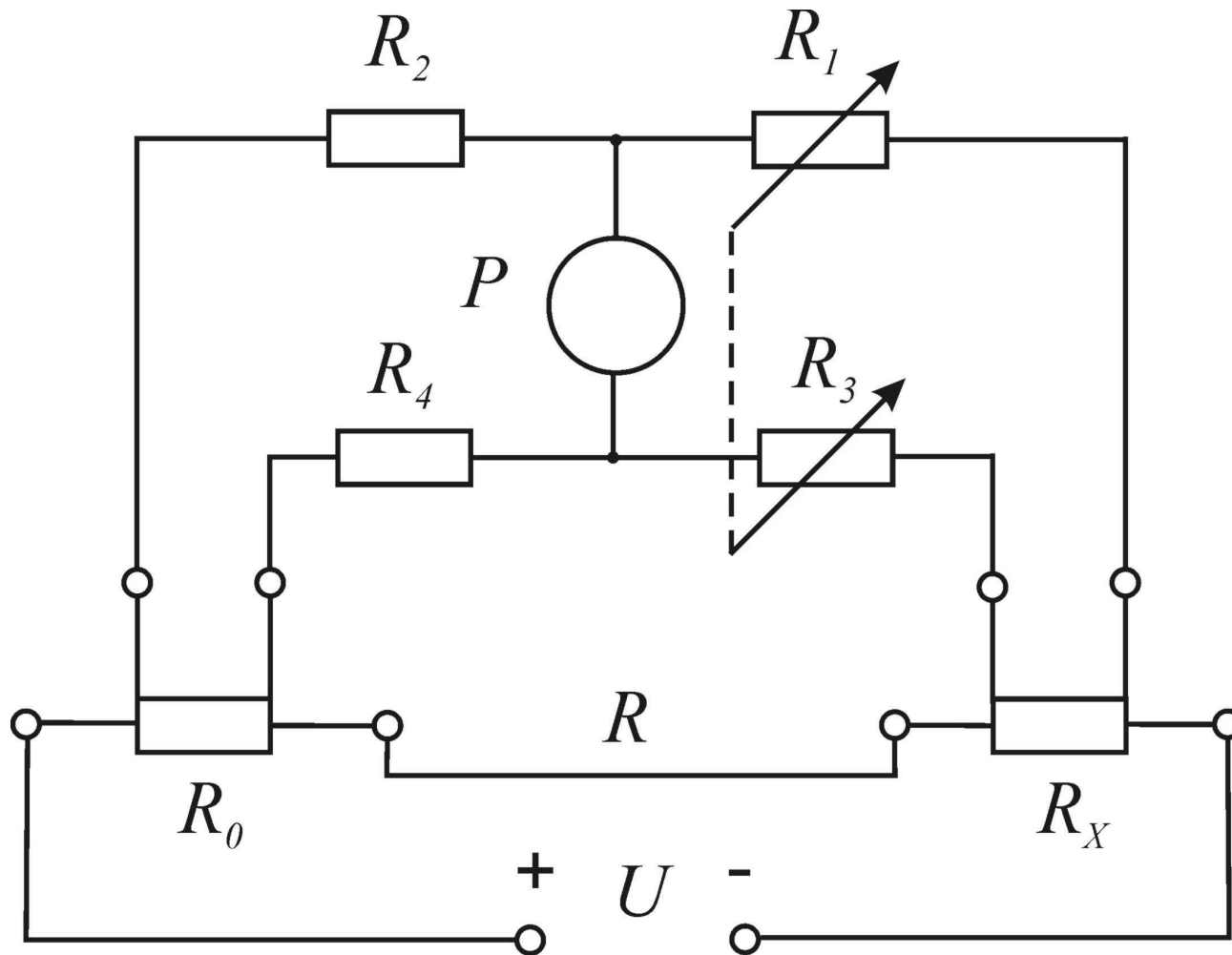


Рис. 3 Схема двойного моста постоянного тока

Показанный на рис. 3 двойной (шестиплечий) мост работает по принципу сравнения измеряемого сопротивления R_x , с мерой сопротивления R_0 .

Для уменьшения влияния переходных сопротивлений контактов измеряемое сопротивление включается в цепь через специальное четырехзажимное приспособление.

Плечами двойного моста служат: измеряемое сопротивление R_x , образцовое сопротивление R_0 и две пары сопротивлений R_1, R_3 и R_2, R_4 , которые имеют значения не меньше 10 Ом каждое.

Благодаря этому сопротивления соединительных проводов и контактов, относящихся к этим плечам, практически не оказывают влияния на результат измерения, поскольку обладают существенно меньшими величинами (тысячные доли Ома).

Условие равновесия двойного моста, решенное относительно измеряемого сопротивления, имеет вид двучлена

$$R_X = R_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{RR_4}{R + R_3 + R_4} (5) \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Для приведения этого уравнения к виду, удобному для практического применения, необходимо второе слагаемое сделать равным нулю, т.е. получить условие

$$\frac{RR_4}{R + R_3 + R_4} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) = 0$$

Это условие удовлетворяется или при $R = 0$, т.е. когда сопротивление проводника, соединяющего R_0 с R_X , равно нулю,

или при $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$, когда попарно равны

$$R_1 = R_3 \text{ и } R_2 = R_4.$$

Практически это достигается следующим образом.

Соединительный проводник выполняют коротким и большого сечения, поэтому его сопротивление очень мало (порядка $1 \cdot 10^{-6}$ Ом).

Сопротивления же R_1, R_3 и R_2, R_4 выбирают попарно равными, причем переключающее устройство, предназначенное для регулирования сопротивлений R_1 и R_3 , конструктивно выполнено так, что оба эти сопротивления можно регулировать только одновременно и строго одинаково.

Благодаря таким мерам величиной второго слагаемого в формуле условия равновесия можно пренебречь и тогда условие равновесия принимает простой вид:

$$R_X = R_0 \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_0}{(7)} \frac{R_3}{R_4}$$

Как видно из этого условия, в двойном мосте имеется одно плечо сравнения R_0 и две

пары плеч отношения $\frac{R_1}{R_2}$ и $\frac{R_3}{R_4}$. Именно

При работе с двойными мостами следует иметь в виду, что при протекании рабочего тока по цепи R_X и R_0 возможно появление термо – ЭДС в местах контакта разных металлов при их нагревании.

Для исключения влияния этих эффектов на результат измерения, каждое измерение на двойном мосте должно производиться обязательно дважды, при различных направлениях тока. Это приводит к тому, что возникающие термо – ЭДС сначала увеличивают, а затем уменьшают результат измерения, а среднее арифметическое двух замеров позволяет полностью устранить их влияние.

2 Мосты переменного тока

Мосты переменного тока используются для точных измерений емкости C и тангенса угла потерь $tg\delta$ конденсаторов, индуктивности L и добротности Q катушек и некоторых других величин.

Наибольшее распространение получили четырехплечие мосты переменного тока, работающие в равновесном режиме.

Мост переменного тока отличается от одинарного моста постоянного тока тем, что:

1) в диагональ питания подключается источник переменного синусоидального напряжения (обычно повышенной частоты);

2) сопротивления плеч в общем случае являются **КОМПЛЕКСНЫМИ**.

Обобщенная электрическая схема моста представлена на рис. 4.

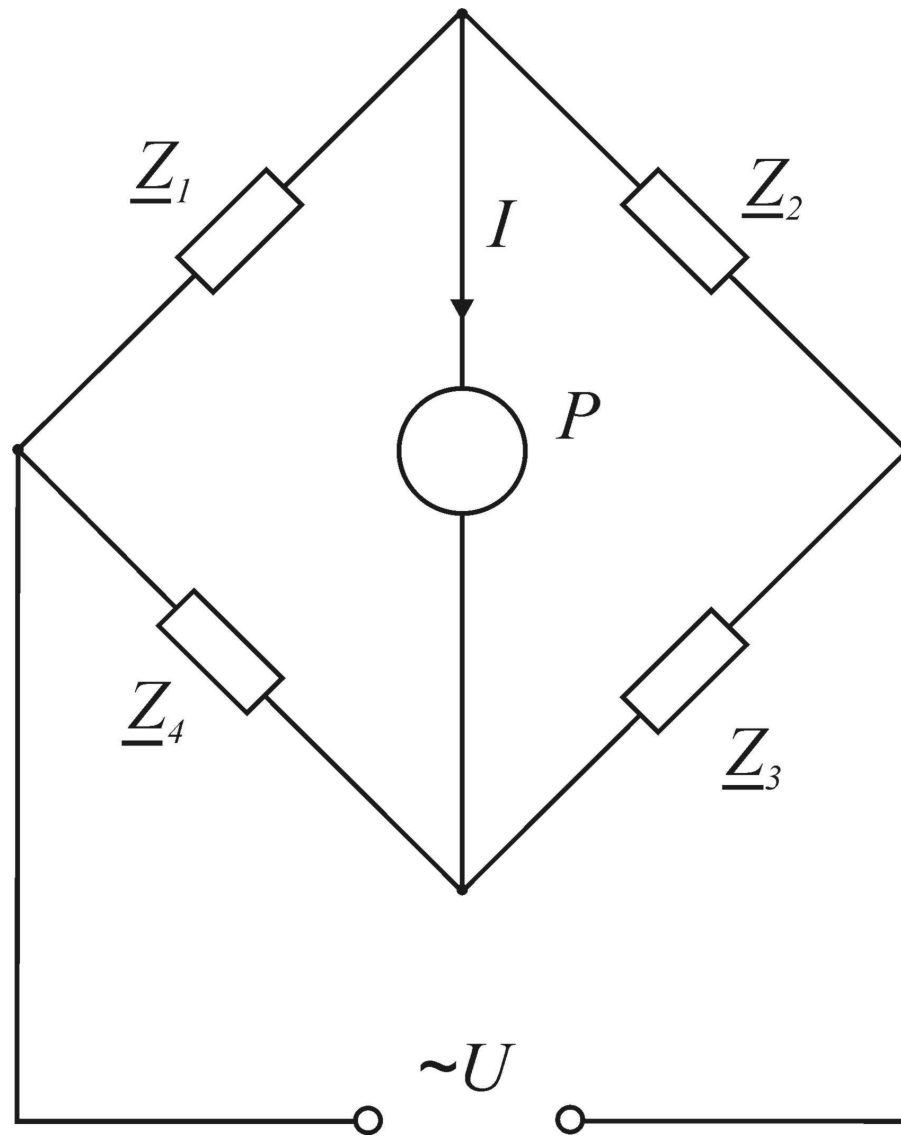


Рис. 4 Схема моста переменного тока

Действуя аналогично, как в случае с
одинарным мостом постоянного тока,
можно получить условие равновесия
моста переменного тока:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_3 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_4$$

Таким образом, для равновесия моста
переменного тока необходимо равенство
произведений комплексных сопротивлений
противолежащих плеч.

Записав комплексы сопротивлений плеч моста в показательной форме

$$\underline{Z}_1 = Z_1 e^{j\varphi_1} \quad ; \quad \underline{Z}_2 = Z_2 e^{j\varphi_2}$$

$$\underline{Z}_3 = Z_3 e^{j\varphi_3} \quad , \quad \underline{Z}_4 = Z_4 e^{j\varphi_4}$$

где Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 — модули комплексов, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и φ_4 — углы сдвига токов относительно напряжений в соответствующих плечах моста.

Подставляя эти выражения в общее условие равновесия, получаем условие равновесия моста переменного тока в показательной форме

$$Z_1 Z_3 \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 Z_4 \cdot e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}$$

Поскольку комплексы могут быть равными только при одновременном равенстве их модулей и аргументов, из предыдущего равенства получаем два отдельных и обязательных условия равновесия моста переменного тока:

$$\text{по модулям } Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

$$\text{и фазам } \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4$$

Из этих уравнений следует, что для равновесия моста переменного тока необходимо, чтобы произведения модулей и суммы фазовых углов сопротивлений противолежащих плеч были равны одновременно.

Фазовое условие показывает, что уравновесить мост переменного тока можно только при определенном характере сопротивлений его плеч и при определенном их включении.

Для упрощения схемы моста два его плеча обычно выполняются чисто активными, а два других плеча содержат сравниваемые реактивные сопротивления (измеряемое и образцовое).

Если активные сопротивления включены в смежные плечи моста, например, R_2 и R_3 , то мост уравнивается только при условии, если сопротивления оставшейся смежной пары плеч будут давать одинаковый по фазе сдвиг.

Действительно, по фазовому условию равновесия для данного случая

$$\varphi_2 = \varphi_3 = 0. \text{ и } \varphi_1 = \varphi_4$$

Следовательно, при таком включении активных сопротивлений измерения емкости и индуктивности могут производиться лишь путем их сравнения с образцовыми емкостью и индуктивностью соответственно.

Если активные сопротивления включены в противоположащие плечи моста, например R_2 и R_4 , то мост уравнивается лишь в том случае, если в оставшуюся пару противоположащих плеч будут включены сопротивления, дающие сдвиги противоположных фаз.

В данном случае $\varphi_2 = \varphi_4 = 0$ и $\varphi_1 = -\varphi_3$. Таким образом, если в одно из оставшихся противоположащих плеч включена емкость C , то второе из них должно содержать индуктивность L .

3 Компенсаторы постоянного тока

Компенсаторы – приборы сравнения, в основу работы которых положен принцип компенсации э.д.с. или напряжения.

Сущность измерения, основанного на принципе компенсации, можно пояснить на примере электрической цепи, показанной на рис. 5.

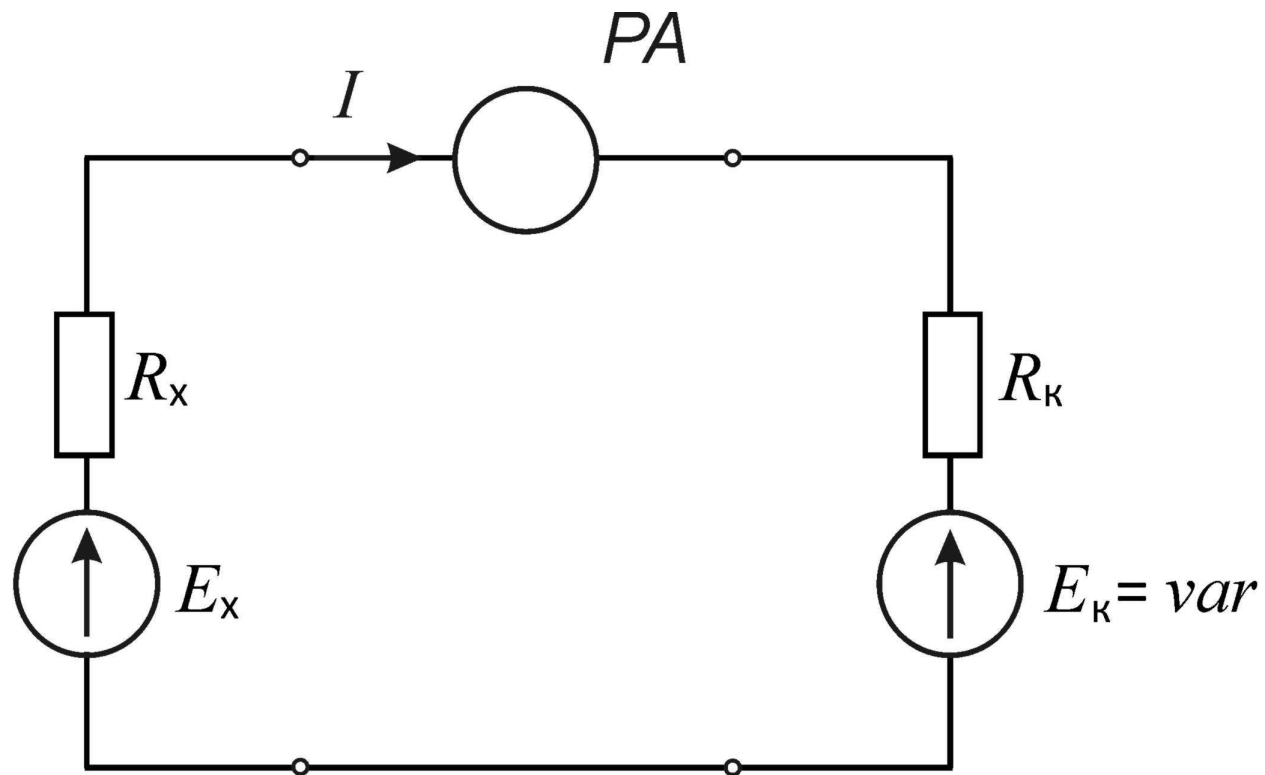


Рис. 5 Схема компенсационной цепи

Здесь: E_x – измеряемая э.д.с. с внутренним сопротивлением R_x ; E_k – компенсирующая э.д.с. с внутренним сопротивлением R_k ; PA – нуль-индикатор, в качестве которого можно использовать, например, гальванометр высокой чувствительности или электронный прибор.

Очевидно, что если $E_X = E_K$, то ток в данной электрической цепи протекать не будет ($I = 0$).

Таким образом, сущность измерения заключается в том, что изменяя E_K добиваются нулевого показания нуль-индикатора PA и по величине E_K судят о величине E_X .

В качестве регулируемой компенсирующей э.д.с. обычно используется падение напряжения на точно известном регулируемом сопротивлении (многозначной мере сопротивления) при протекании по нему точно известного тока.

Упрощенная схема компенсатора постоянного тока приведена на рис. 6.

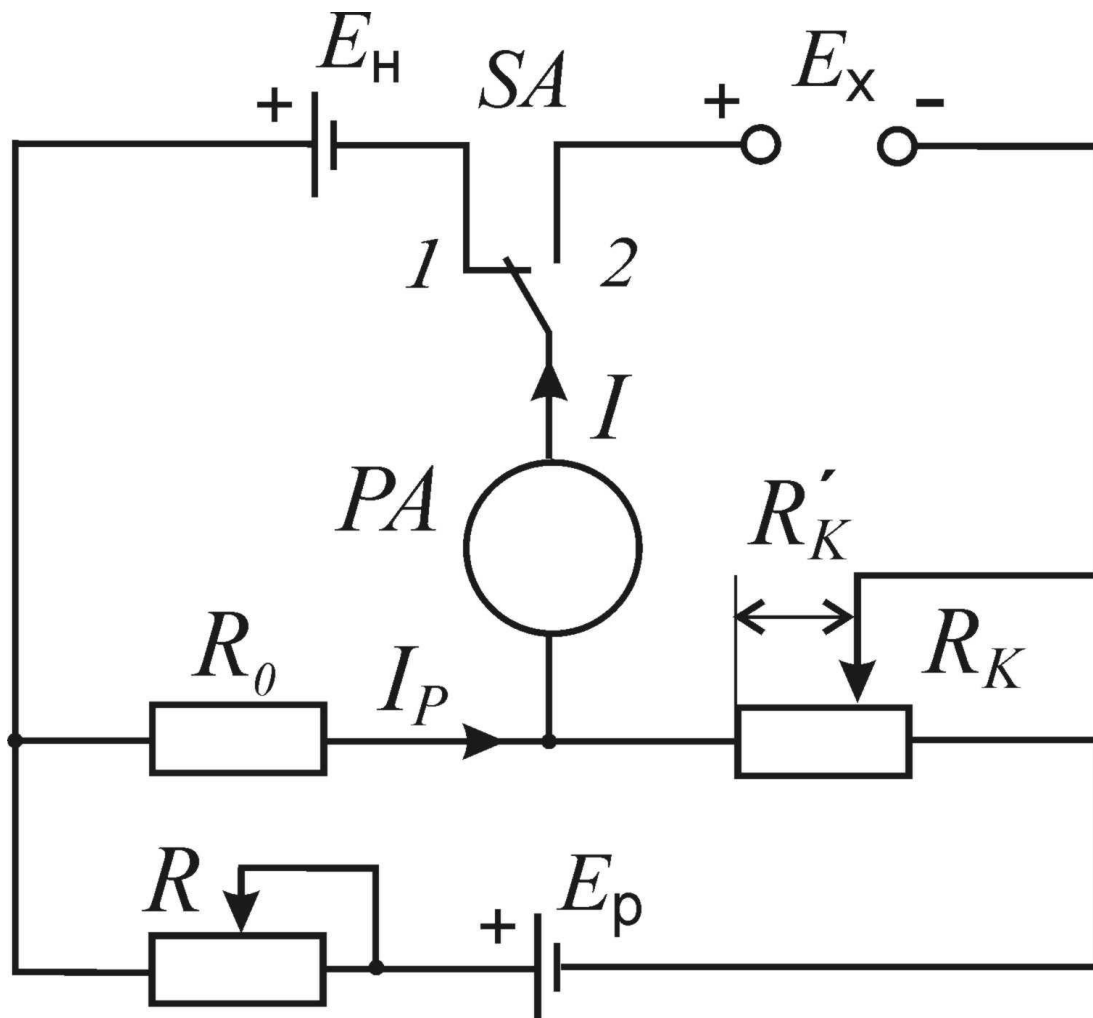


Рис. 6 Компенсатор постоянного тока

Здесь: E_H – нормальный элемент (мера э.д.с.); E_X – измеряемая э.д.с.; PA – нуль-индикатор; R_0 – образцовый резистор (мера сопротивления); R_K – резистор с точно известным регулируемым сопротивлением (многозначная мера сопротивления); E_P – источник рабочего тока.

Процесс измерения э.д.с. компенсатором состоит из двух этапов: 1) установления рабочего тока; 2) компенсации измеряемой э.д.с. или напряжения.

На первом этапе переключатель SA ставят в положение I и, изменяя сопротивление R , добиваются, чтобы ток I равнялся нулю, т.е. чтобы нуль-индикатор PA установился в нулевое положение.

При этом будет выполняться равенство
(по II-му закону Кирхгофа):

$$E_H = I_P R_0$$

откуда

$$I_P = \frac{E_H}{R_0}$$

Затем переключатель SA ставят в положение 2 и, перемещая движок R_K , добиваются отсутствия тока I (нулевого показания прибора PA). Это будет при некотором положении движка R_K . Так как ток I равен нулю, то через R_K будет протекать тот же рабочий ток I_P , что был установлен на первом этапе.

При этом

$$I_P R'_K = \frac{E_X}{E_H} \quad (14)$$

Подставив в (14) значение I_P из (13), получим:

$$E_X = E_H \frac{R'_K}{R_0} \quad (15)$$

Из выражения (15) видно, что точность измерения E_X определяется точностью э. д.с. нормального элемента E_H и точностью резисторов R_K и R_0 , которые могут выполняться с малыми погрешностями.

Это позволяет проводить измерения э. д.с. и напряжения с весьма высокой точностью (с основной приведенной погрешностью не превышающей 0,0005 %).

Резистор R_K обычно изготавливается в виде многодекадного магазина сопротивлений так, чтобы его сопротивление рабочему току I_P не зависело от положения декадных переключателей, которые обычно градуируются в единицах измеряемой величины – вольтах.

Это позволяет сразу по положению декадных переключателей считать значение измеряемой величины.

Отличительной особенностью измерения компенсатором является то, что в режиме полной компенсации ток через нуль-индикатор не протекает, а значит, прибор в момент измерения не потребляет мощность из измеряемой цепи, т.е. входное сопротивление компенсатора (со стороны измеряемой величины – э.д.с. или напряжения) равно бесконечности.

Диапазон измерения компенсаторов постоянного тока не превышает 2 В, для измерения больших напряжений применяют делители напряжения.

Применение делителей позволяет расширить диапазон измерения до 1000 В, но при этом компенсатор будет потреблять мощность из измеряемой цепи.

Благодаря высокой точности компенсаторы используются также при косвенных измерениях постоянных токов, а также сопротивлений.