

# МЕТРОЛОГИЯ И ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

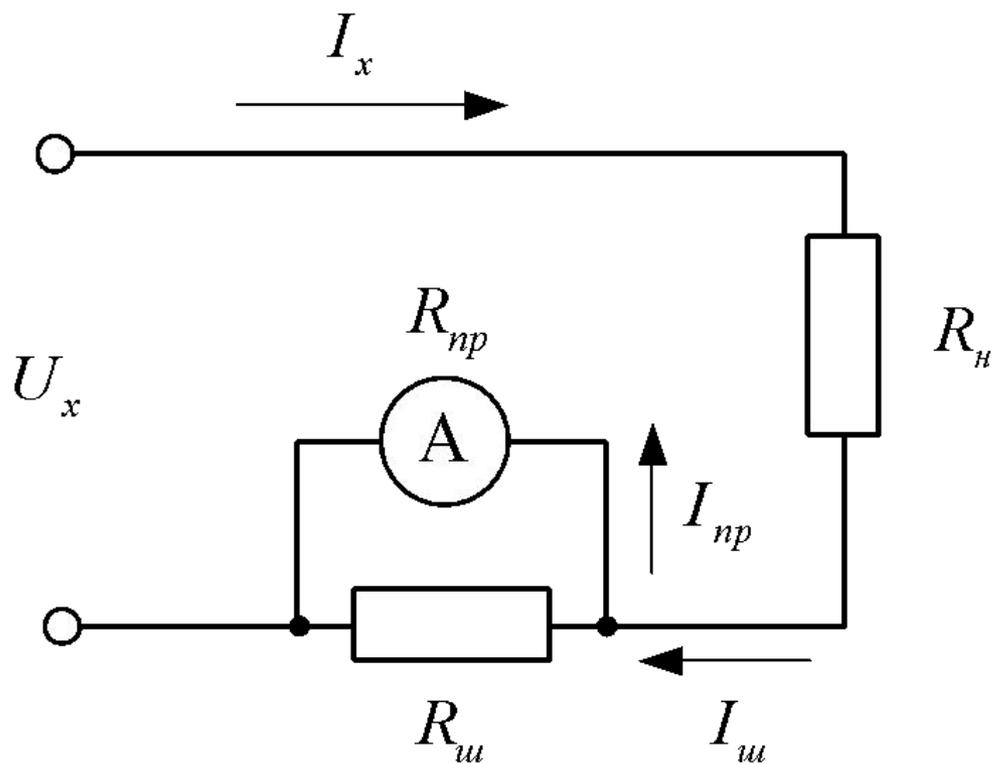
---

Лекция 15. Основные элементы  
электрорадиоизмерительных приборов. Масштабные  
измерительные преобразователи

# ШУНТ

К преобразовательным устройствам, осуществляющим функции масштабного преобразования, принято относить шунты, добавочные резисторы, делители напряжения, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители.

Шунты предназначены для расширения пределов измерения по току и представляют собой калиброванные резисторы (меры). Схема включения шунта к измерительному прибору показана на рисунке.



# Шунт

Сопротивление шунта выбирается таким, чтобы большая часть тока протекала по шунту. Конкретное сопротивление шунта можно определить из равенства

$$I_{np} R_{np} = I_{ш} R_{ш}$$

откуда

$$R_{ш} = R_{np} (I_{np} / I_{ш})$$

Учитывая, что  $I_{np} = I_{ш} + I_x$ , можно записать

$$R_{ш} = R_{np} \left( \frac{I_{np}}{I_{ш}} - 1 \right) = \frac{R_{np}}{I_x / I_{np} - 1} = \frac{R_{np}}{n - 1}$$

Коэффициент  $n = I_{np} / I_x$  принято называть коэффициентом шунтирования. Из равенства также следует  $n = (R_{ш} + R_{np}) / R_{ш}$ .

Шунты применяют в основном с магнитоэлектрическими измерительными механизмами в цепях постоянного тока. На переменном токе сопротивление шунта и сопротивление измерительного механизма при изменении частоты измеряемого сигнала изменяются неодинаково, что приводит к дополнительной погрешности.

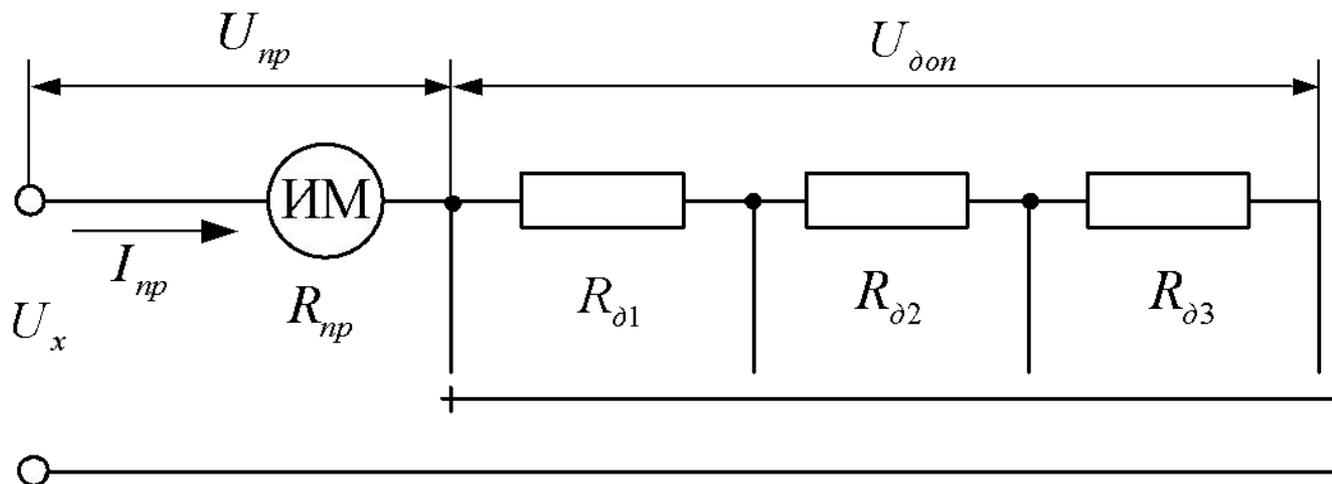
Конструктивно различают внутренние и наружные шунты. Внутренние шунты применяют обычно в амперметрах для измерения небольших токов (до 30 А). Они располагаются, как правило, внутри корпуса прибора. Наружные (внешние) шунты используют с приборами для измерения больших токов (до 6000 А). В этом случае мощность, рассеиваемая шунтом, не нагревает прибор.

Основные параметры шунтов регламентируются. По точности различают следующие классы шунтов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Класс точности означает допустимое отклонение сопротивления шунта от его номинального значения, выраженное в процентах.

## Добавочный резистор

Добавочные резисторы предназначены для расширения пределов измерения по напряжению электроизмерительных механизмов, т.е. они ограничивают ток в цепи измерительного механизма и позволяют использовать его для измерения больших значений напряжения.

Добавочные резисторы включают последовательно с измерительным механизмом



## Добавочный резистор

Расширение пределов измерения прибора за счет добавочного резистора принято оценивать коэффициентом расширения (множителем шкалы)

$$m = \frac{U_x}{U_{np}}$$

Сопротивление добавочного резистора  $R_{доб}$  можно определить исходя из равенства

$$U_{np} = U_{доб} + U_{np} = I_{np} R_{np} + I_{np} R_{доб}$$

Откуда

$$R_{доб} = \frac{U_x}{I_{np}} - R_{np} = \left(\frac{U_x}{U_{np}} - 1\right) R_{np} = (m - 1) R_{np}$$

Добавочные резисторы выполняют обычно однопредельными для щитовых приборов и многопредельными для переносных. По точности добавочные резисторы подразделяют на классы: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Класс точности добавочных резисторов определяется отношением абсолютной погрешности значения сопротивления к его номинальному значению:

$$\delta = \pm \frac{\Delta R}{R_{ном}} \cdot 100\%$$

## Добавочный резистор

Делители напряжения предназначены для понижения напряжения в определенное число раз.

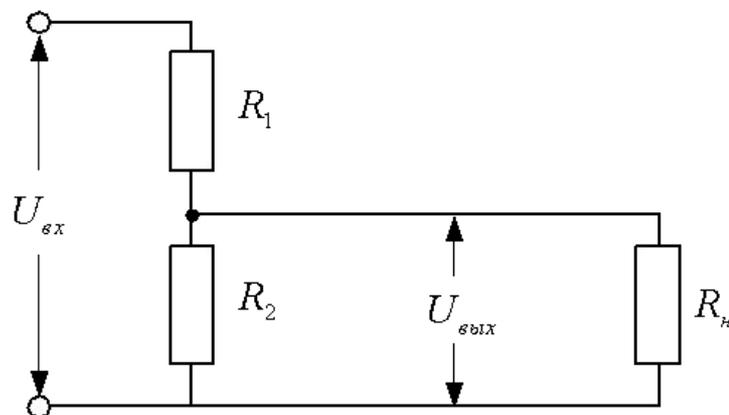
Основными показателями делителей напряжения являются коэффициент деления (коэффициент передачи)  $K_D$ ; частотный диапазон, в котором сохраняется постоянство  $K_D$ ; допустимая мощность рассеивания; погрешность деления.

Коэффициент деления для простейшего резистивного делителя можно записать в виде

$$K_D = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

При относительно невысоком сопротивлении нагрузки коэффициент деления зависит от  $R_n$ , и в формуле вместо  $R_2$  нужно использовать

$$R'_2 = \frac{R_2 R_n}{R_2 + R_n}$$

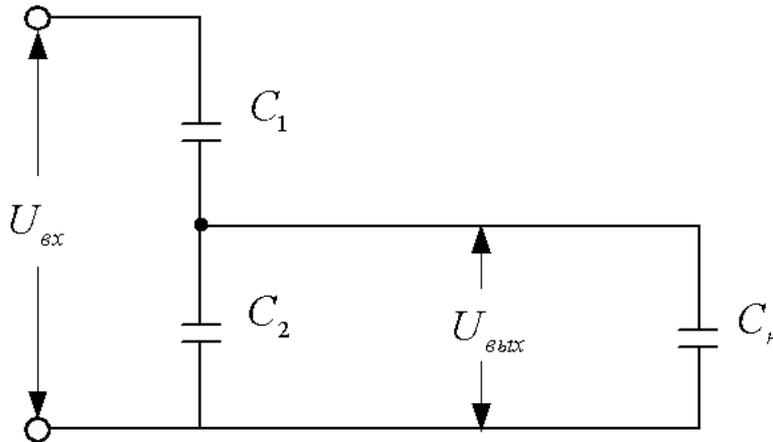


# Делители напряжения

Коэффициент деления для емкостного делителя при условии, что  $C_2 \ll C_H$  определяется выражением

$$K_D = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Если же это условие не выполняется, то расчет ведется с учетом  $C_H$ . Емкостные делители используют в высокочастотных цепях, так как они обладают свойствами неизменности коэффициента деления в диапазоне до сотен мегагерц.

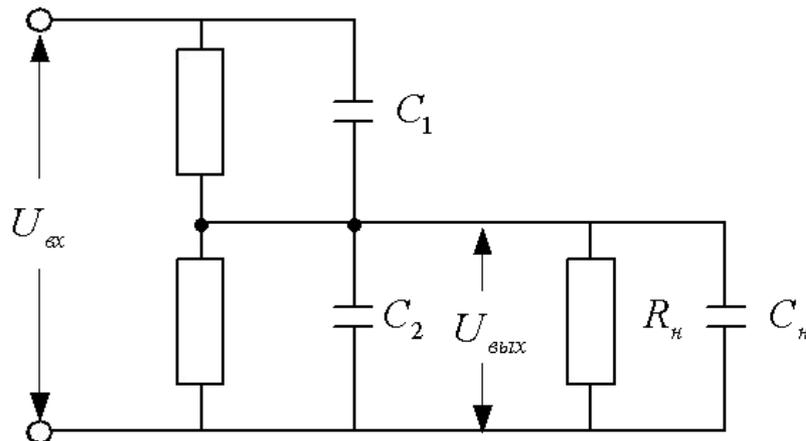


# Делители напряжения

Элементы, входящие в делители (резисторы, конденсаторы), за счет паразитных связей реактивного характера приводят к неравномерности коэффициента передачи в рабочей полосе частот. Уменьшить эти неравномерности позволяют делители, собранные по схеме, частотно-независимого делителя. Конденсаторы в данном случае выбираются из условия

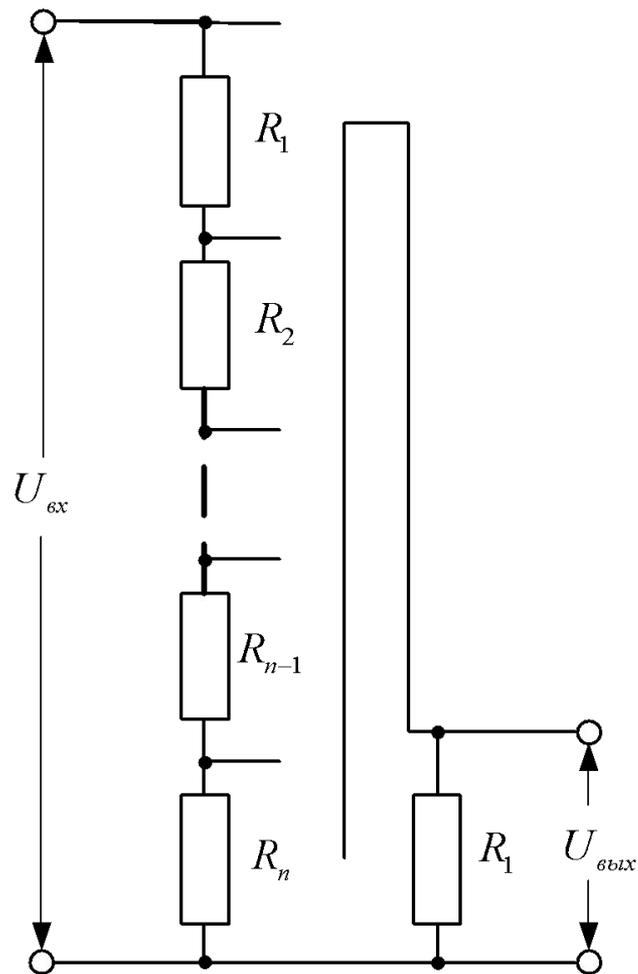
$$R_1 C_1 = R_2 C_2.$$

На низких частотах емкостное сопротивление делителя  $X_{C_1}$  и  $X_{C_2}$  много больше сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , поэтому деление осуществляется в основном делителем, состоящим только из активных резисторов. В области высоких частот  $X_{C_1,2} \ll R_{1,2}$  и деление осуществляется в основном емкостным делителем.

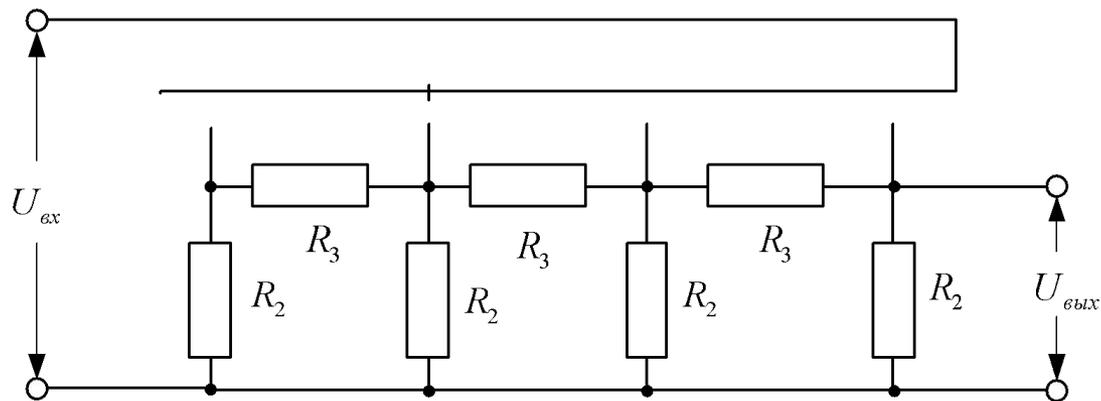


# Делители напряжения

Реально делители напряжений, используемые в измерительных приборах, выполняют по более сложной схеме. Широко используют секционированные и ступенчатые делители



секционированный



ступенчатый

# Аттенюаторы

Аттенюаторы (ослабители) предназначены для понижения напряжения в требуемое число раз. С помощью аттенюаторов осуществляется нормирование малых уровней сигналов. Как и делители, они характеризуются диапазоном рабочих частот, входным и выходным сопротивлениями, допустимой мощностью рассеивания, погрешностью деления.

Ослабление, вносимое аттенюатором, принято выражать в децибелах:

$$A = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \text{ [дБ]}$$

Входное сопротивление аттенюатора, в отличие от делителя напряжения, в процессе регулировки ослабления не изменяется при постоянном сопротивлении нагрузки.

В зависимости от диапазона частот используют аттенюаторы, выполненные на резисторах, конденсаторах или на основе линий с распределенными постоянными предельного и поглощающего токов.

Резистивные аттенюаторы применяют в диапазоне до нескольких десятков мегагерц. Они выполняются из звеньев, представляющих собой Т- или П-образные четырехполюсники. Число звеньев может меняться с помощью переключателя.

Емкостные аттенюаторы используют на частотах до сотен мегагерц, а выполненные на элементах с распределенными постоянными – в диапазоне сверхвысоких частот.

# Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы предназначены для преобразования больших напряжений и токов в относительно малые напряжения и токи с целью последующего их использования для измерения типовыми приборами.

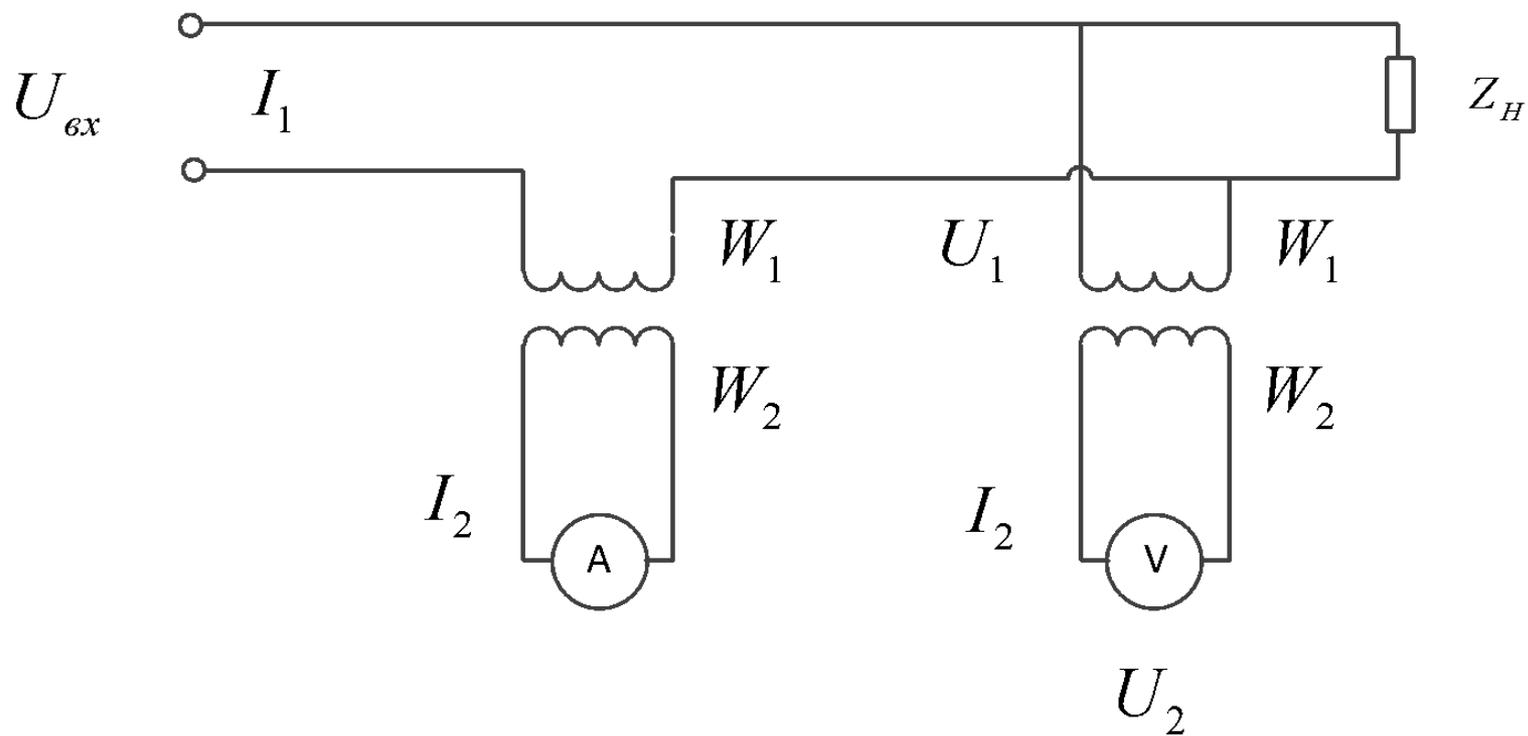
Конструктивно измерительный трансформатор представляет собой замкнутый сердечник из магнитомягкого материала, на котором размещены две изолированные обмотки с числом витков  $W_1$  и  $W_2$ . В трансформаторах тока обычно первичный ток  $I_1$  больше вторичного  $I_2$ , поэтому  $W_1 < W_2$ , а в трансформаторах напряжения первичное напряжение  $U_1$  больше вторичного  $U_2$ , поэтому у них  $W_1 > W_2$ .

Значения измеряемых токов  $I_x$  и напряжений  $U_x$  определяют по показаниям приборов с учетом номинальных значений коэффициентов трансформации по току  $K_{I_H}$  и напряжению  $K_{U_H}$ .

$$I_x = K_{I_H} I_2, \quad U_x = K_{U_H} U_2$$

где  $K_{I_H} = I_{1H} / I_{2H}$ ;  $K_{U_H} = U_{1H} / U_{2H}$ ;  $I_2$ ,  $U_2$  – значения измеренного тока и напряжения соответственно;  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$ ,  $U_{1H}$ ,  $U_{2H}$  – номинальные значения токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора тока соответственно.

# Схема включения измерительных трансформаций



## Погрешности измерительных трансформаторов

В реальных условиях эксплуатации измерительных трансформаторов номинальное значение коэффициента трансформации не равно реальному коэффициенту ( $K_I, K_U$ ),  $K_{I_H} \neq K_I$ ,  $K_{U_H} \neq K_U$  что объясняется различными значениями измеряемых токов и напряжений, характером и значением нагрузки во вторичной цепи, конструкцией трансформатора и другими причинами. Поэтому определение измеряемых величин по номинальным коэффициентам трансформации приводит к погрешностям.

Для трансформатора тока относительная погрешность

$$\delta_I = \frac{I_x - I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{K_{I_H} - K_I}{K_I} \cdot 100$$

а для трансформатора напряжения

$$\delta_U = \frac{U_x - U_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{K_{U_H} - K_U}{K_U} \cdot 100$$

Кроме токовой погрешности  $\delta_I$  и погрешности по напряжению  $\delta_U$ , у измерительных трансформаторов имеется угловая погрешность, вызванная неточностью передачи фазы из одной обмотки в другую. Угловая погрешность измерительных трансформаторов оказывает влияние на погрешность измерительных приборов, показания которых зависят от фазовых сдвигов токов в этих приборах (фазометры, ваттметры).

С учетом указанных погрешностей введены четыре класса точности измерительных трансформаторов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5.

# Погрешности измерительной трансформаторов

Для обеспечения нормальной работы измерительного трансформатора тока общее сопротивление его вторичной цепи не должно превышать номинальной нагрузки, которая нормирована (0,2; 0,6; 0,8; 1,2; 2 Ом). Увеличение сопротивления вторичной обмотки может вызвать перенапряжение и пробой изоляции. Таким образом, нормальная работа измерительного трансформатора тока обеспечивается в режиме короткого замыкания, а режим холостого хода является аварийным.

У измерительных трансформаторов напряжения вторичная обмотка нагружена на большое сопротивление, поэтому нормальная работа такого трансформатора обеспечивается в режиме, близком к холостому ходу, а уменьшение нагрузки приводит к аварийной ситуации.

Применение измерительных трансформаторов в цепях высокого напряжения обеспечивает также безопасный режим работы обслуживающего персонала, так как измерительные приборы включают в цепь низкого напряжения, имеющего заземление.

# Согласующие трансформаторы

Согласующие трансформаторы предназначены для сохранения неизменной величины сопротивления на их входе при разных сопротивлениях, нагружающих их выход. Обеспечивая преобразование сопротивлений, согласующие трансформаторы одновременно выполняют функции буферного согласования с нагрузкой и регулировки напряжения.

Свойства и конструкции согласующих трансформаторов определяются диапазоном частот, в котором они используются. Вторичную обмотку низкочастотного согласующего трансформатора делают секционированной. При изменении величины нагрузок ее переключают на соответствующую секцию, при этом сопротивление в первичной обмотке трансформатора остается неизменным.

В диапазоне СВЧ применяются согласующие трансформаторы в виде отрезков волновода или коаксиальной линии.

# Измерительные усилители

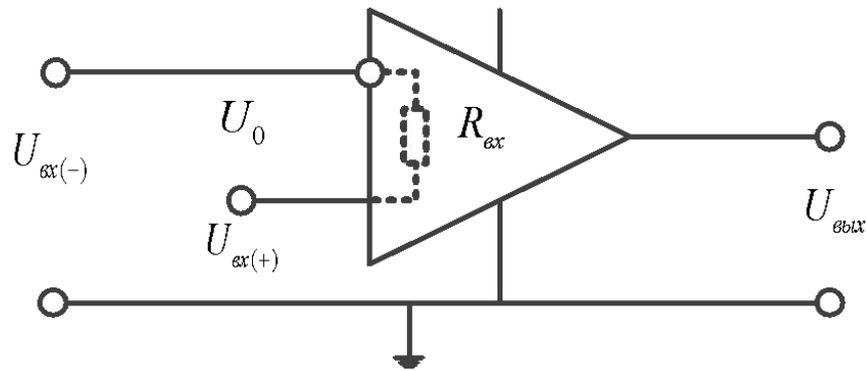
Измерительные усилители решают функции масштабирования и нормирования сигналов, обеспечивают поддержание на заданном уровне и с определенной точностью значение измерительных сигналов. Кроме того, измерительные усилители обеспечивают развязку отдельных трактов и линейный режим работы измерительных цепей, обнаружение малых токов и напряжений в измерительных цепях (нулевые усилители), согласование входов измерительных приборов с источниками сигналов.

Измерительные усилители должны обладать стабильными метрологическими характеристиками. К усилителям предъявляют следующие основные требования:

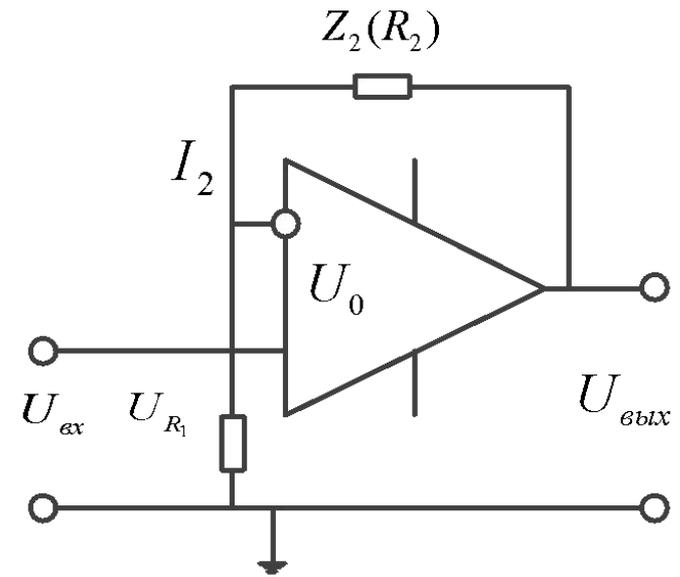
- линейность и стабильность преобразования сигнала, обеспечивающие заданную погрешность;
- обеспечение заданного диапазона усиления;
- обеспечение заданной частотной избирательности;
- малые начальные токи и др.

# Измерительные усилители

В современной измерительной технике используют в основном интегральные операционные усилители (ОУ) различных типов, представляющие собой усилители постоянного тока с большим коэффициентом усиления.



Эквивалентная схема



неинвертируемая схема

# Измерительные усилители

Операционные усилители имеют большое входное сопротивление (сотни МОм) и малое выходное (единицы Ом). Большое входное сопротивление обычно обеспечивается использованием во входном дифференциальном каскаде полевых и биполярных транзисторов, работающих в режиме микротоков. На эквивалентной схеме ОУ  $R_{ex}$  имитирует входное сопротивление, протекание тока через которое вызывается разностью напряжений между входами. Для эквивалентной схемы справедливо следующее:

- входное дифференциальное напряжение определяется разностью

$$U_0 = U_{ex(+)} - U_{ex(-)}$$

- коэффициент усиления по напряжению

$$K_H = \frac{U_{вых}}{U_0} \approx 10^4 \dots 10^7$$

Для идеальной эквивалентной схемы  $K_H = \infty$ ;  $R_{ex} = \infty$ ;  $R_{вых} = 0$ ;  $U_0 = 0$ ;  $I_0 = 0$ .

Для неинвертирующего ОУ справедливо следующее:

$$-U_{ex} = U_0 - U_{R_1}; \quad U_{вых} = (1 + Z_2 / Z_1)U_{ex};$$

для режима постоянного тока

$$U_{вых} = (1 - R_2 / R_1)U_{ex};$$

если  $R_2 = 0$ , то  $U_{вых} = U_{ex}$  и ОУ выполняет роль повторителя напряжения.

Кроме задач масштабного преобразования (усиления), ОУ могут использоваться в качестве компараторов, интеграторов и др.