

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ**

**ИЗМЕРЕНИЯ В**

**СИСТЕМАХ**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИ**

**Я**

Преподаватель: к.т.н., доцент кафедры ЭПП

***Буякова Наталья Васильевна***

Электротехнические измерения представляют собой совокупность электрических и электронных измерений, которые можно рассматривать как один из разделов метрологии. Название «метрология» образовано от двух греческих слов: metron — мера и logos — слово, учение; дословно: учение о мере.

В современном понимании **метрологией** называют науку об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В реальной жизни метрология не только наука, но и область практической деятельности, связанной с изучением физических величин.

Предметом метрологии является получение количественной информации о свойствах объектов и процессов, т.е. измерение свойств объектов и процессов с требуемой точностью и достоверностью .

Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком.

Они дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая человеку действующие в природе закономерности.

Под измерением понимают совокупность операций, выполняемых с помощью специального технического средства, хранящего единицу измеряемой величины, позволяющего сопоставить измеряемую величину с ее единицей и получить значение этой величины.

Результат измерений величины  $X$  записывается в виде

$$X=A[X],$$

где  $A$  – безразмерное число, называемое числовым значением физической величины;  $[X]$  – единица физической величины .

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение электрических величин, таких, как напряжение, сопротивление, сила тока, мощность производится с помощью различных средств - измерительных приборов, схем и специальных устройств.

Тип измерительного прибора зависит от вида и размера (диапазона значений) измеряемой величины, а также от требуемой точности измерения.

В электрических измерениях используются основные единицы системы СИ: вольт (В), ом (Ом), фарада (Ф), генри (Г), ампер (А) и секунда (с).

# ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Электрическое измерение - это нахождение (экспериментальными методами) значения физической величины, выраженного в соответствующих единицах (например, 3 А, 4 В).

Значения единиц электрических величин определяются международным соглашением в соответствии с законами физики и единицами механических величин.

Поскольку "поддержание" единиц электрических величин, определяемых международными соглашениями, сопряжено с трудностями, их представляют "практическими" эталонами единиц электрических величин.

Такие эталоны поддерживаются государственными метрологическими лабораториями разных стран.

Все общепринятые электрические и магнитные единицы измерения основаны на метрической системе.

В согласии с современными определениями электрических и магнитных единиц все они являются производными единицами, выводимыми по определенным физическим формулам из метрических единиц длины, массы и времени.

Поскольку же большинство электрических и магнитных величин не так-то просто измерять, пользуясь упомянутыми эталонами, было сочтено, что удобнее установить путем соответствующих экспериментов производные эталоны для некоторых из указанных величин, а другие измерять, пользуясь такими эталонами.

## Единицы системы СИ

• Ампер, единица силы электрического тока, - одна из шести основных единиц системы СИ.

Ампер (А) - сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины с ничтожно малой площадью кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 * 10^{-7}$  Н.

Вольт, единица разности потенциалов и электродвижущей силы.

Вольт (В) - электрическое напряжение на участке электрической цепи с постоянным током силой 1 А при затрачиваемой мощности 1 Вт.

Кулон, единица количества электричества (электрического заряда).

Кулон (Кл) - количество электричества, проходящее через поперечное сечение проводника при постоянном токе силой 1 А за время 1 с.

Фарада, единица электрической емкости.

Фарада (Ф) - емкость конденсатора, на обкладках которого при заряде 1 Кл возникает электрическое напряжение 1 В.

Генри, единица индуктивности.

Генри равен индуктивности контура, в котором возникает ЭДС самоиндукции в 1 В при равномерном изменении силы тока в этом контуре на 1 А за 1 с.



Вебер, единица магнитного потока.

Вебер (Вб) - магнитный поток, при убывании которого до нуля в сцепленном с ним контуре, имеющем сопротивление 1 Ом, протекает электрический заряд, равный 1 Кл.

Тесла, единица магнитной индукции.

Тесла (Тл) - магнитная индукция однородного магнитного поля, в котором магнитный поток через плоскую площадку площадью 1 м<sup>2</sup>, перпендикулярную линиям индукции, равен 1 Вб.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электроизмерительные приборы чаще всего измеряют мгновенные значения либо электрических величин, либо неэлектрических, преобразованных в электрические.

Все приборы делятся на аналоговые и цифровые.

Первые обычно показывают значение измеряемой величины посредством стрелки, перемещающейся по шкале с делениями.

Вторые снабжены цифровым дисплеем, который показывает измеренное значение величины в виде числа.

Цифровые приборы в большинстве измерений более предпочтительны, так как они более точны, более удобны при снятии показаний и, в общем, более универсальны.

Цифровые универсальные измерительные приборы ("мультиметры") и цифровые вольтметры применяются для измерения со средней и высокой точностью сопротивления постоянному току, а также напряжения и силы переменного тока.

Аналоговые приборы постепенно вытесняются цифровыми, хотя они еще находят применение там, где важна низкая стоимость и не нужна высокая точность.

Для самых точных измерений сопротивления и полного сопротивления (импеданса) существуют измерительные мосты и другие специализированные измерители.

Для регистрации хода изменения измеряемой величины во времени применяются регистрирующие приборы - ленточные самописцы и электронные осциллографы, аналоговые и цифровые.

# ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

Во всех цифровых измерительных приборах (кроме простейших) используются усилители и другие электронные блоки для преобразования входного сигнала в сигнал напряжения, который затем преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Число, выражающее измеренное значение, выводится на светодиодный (СИД), вакуумный люминесцентный или жидкокристаллический (ЖК) индикатор (дисплей).

Прибор обычно работает под управлением встроенного микропроцессора, причем в простых приборах микропроцессор объединяется с АЦП на одной интегральной схеме.

Цифровые приборы хорошо подходят для работы с подключением к внешнему компьютеру. В некоторых видах измерений такой компьютер переключает измерительные функции прибора и дает команды передачи данных для их обработки.

# Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

Существуют три основных типа АЦП: интегрирующий, последовательного приближения и параллельный.

Интегрирующий АЦП усредняет входной сигнал по времени. Из трех перечисленных типов это самый точный, хотя и самый "медленный". Время преобразования интегрирующего АЦП лежит в диапазоне от 0,001 до 50 с и более, погрешность составляет 0,1-0,0003%.

Погрешность АЦП последовательного приближения несколько больше (0,4-0,002%), но зато время преобразования - от 10мкс до 1 мс.

Параллельные АЦП - самые быстродействующие, но и наименее точные: их время преобразования порядка 0,25 нс, погрешность - от 0,4 до 2%.

# Интегрирующий АЦП на базе ПНЧ

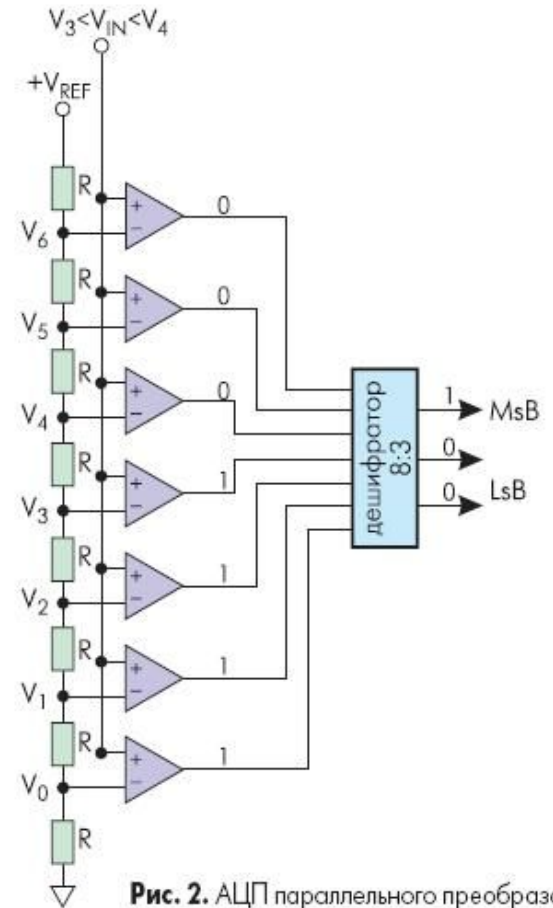
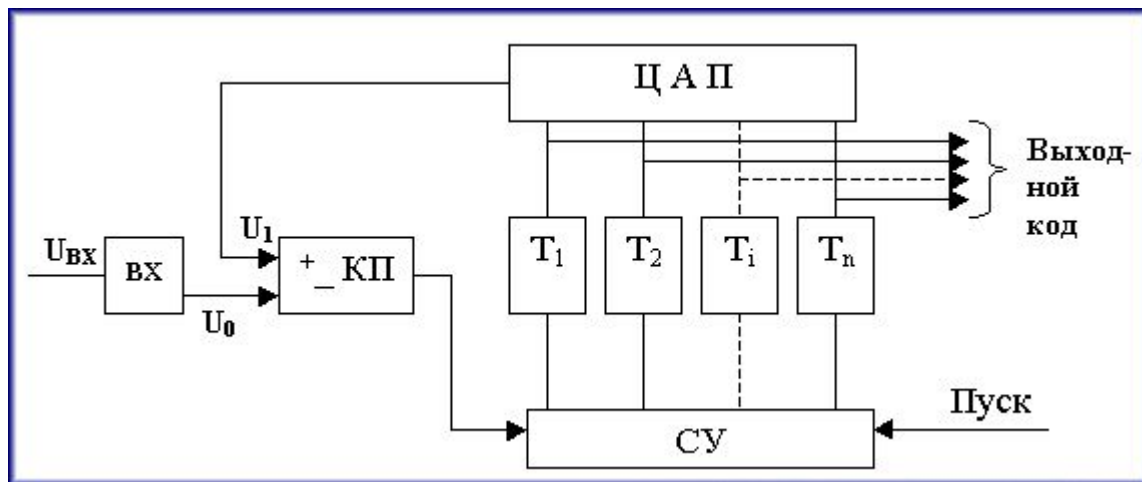
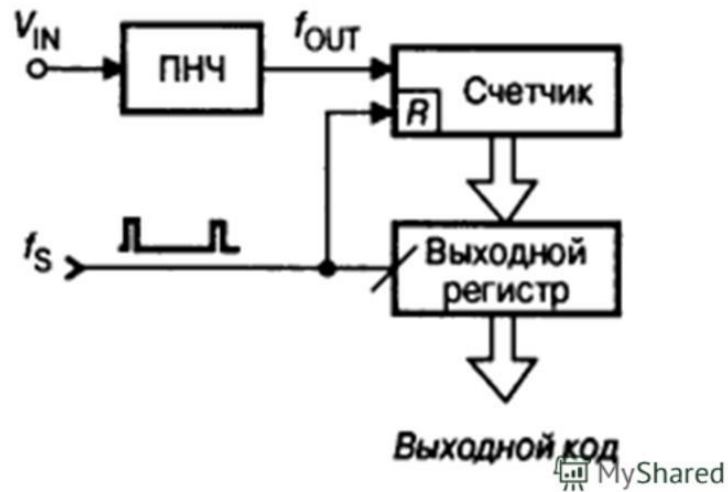


Рис. 2. АЦП параллельного преобразования

## Методы дискретизации

Сигнал дискретизируется по времени путем быстрого измерения его в отдельные моменты времени и удержания (сохранения) измеренных значений на время преобразования их в цифровую форму.

Последовательность полученных дискретных значений может выводиться на дисплей в виде кривой, имеющей форму сигнала; возводя эти значения в квадрат и суммируя, можно вычислять среднеквадратическое значение сигнала; их можно использовать также для вычисления времени нарастания, максимального значения, среднего по времени, частотного спектра и т.д.

Дискретизация по времени может производиться либо за один период сигнала ("в реальном времени"), либо (с последовательной или произвольной выборкой) за ряд повторяющихся периодов.

# Цифровые вольтметры и мультиметры

Цифровые вольтметры и мультиметры измеряют квазистатическое значение величины и указывают его в цифровой форме.

Вольтметры непосредственно измеряют только напряжение, обычно постоянного тока, а мультиметры могут измерять напряжение постоянного и переменного тока, силу тока, сопротивление постоянному току и иногда температуру.

Эти самые распространенные контрольно-измерительные приборы общего назначения с погрешностью измерения от 0,2 до 0,001% могут иметь 3,5- или 4,5-значный цифровой дисплей.

"Полуцелый" знак (разряд) - это условное указание на то, что дисплей может показывать числа, выходящие за пределы номинального числа знаков. Например, 3,5-значный (3,5-разрядный) дисплей в диапазоне 1-2 В может показывать напряжение до 1,999 В.





## Измерители полных сопротивлений

Это специализированные приборы, измеряющие и показывающие емкость конденсатора, сопротивление резистора, индуктивность катушки индуктивности или полное сопротивление (импеданс) соединения конденсатора или катушки индуктивности с резистором.

Имеются приборы такого типа для измерения емкости от 0,00001 пФ до 99,999 мкФ, сопротивления от 0,00001 Ом до 99,999 кОм и индуктивности от 0,0001 мГ до 99,999 Г.

Измерения могут проводиться на частотах от 5 Гц до 100 МГц, хотя ни один прибор не перекрывает всего диапазона частот. На частотах, близких к 1 кГц, погрешность может составлять лишь 0,02%, но точность снижается вблизи границ диапазонов частоты и измеряемых значений.

Большинство приборов могут показывать также производные величины, такие, как добротность катушки или коэффициент потерь конденсатора, вычисляемые по основным измеренным значениям.



# АНАЛОГОВЫЕ ПРИБОРЫ

Для измерения напряжения, силы тока и сопротивления на постоянном токе применяются аналоговые магнитоэлектрические приборы с постоянным магнитом и многовитковой подвижной частью.

Такие приборы стрелочного типа характеризуются погрешностью от 0,5 до 5%.

Они просты и недороги (пример - автомобильные приборы, показывающие ток и температуру), но не применяются там, где требуется сколько-нибудь значительная точность.

# Магнитоэлектрические приборы

В таких приборах используется сила взаимодействия магнитного поля с током в витках обмотки подвижной части, стремящаяся повернуть последнюю.

Момент этой силы уравнивается моментом, создаваемым противодействующей пружиной, так что каждому значению тока соответствует определенное положение стрелки на шкале. Подвижная часть имеет форму многовитковой проволочной рамки с размерами от 3-5 до 25-35 мм и делается как можно более легкой.

Подвижная часть, установленная на каменных подшипниках или подвешенная на металлической ленточке, помещается между полюсами сильного постоянного магнита.

Две спиральные пружинки, уравнивающие крутящий момент, служат также токопроводами обмотки подвижной части.

Магнитоэлектрический прибор реагирует на ток, проходящий по обмотке его подвижной части, а потому представляет собой амперметр или, точнее, миллиамперметр (так как верхний предел диапазона измерений не превышает примерно 50 мА).

Его можно приспособить для измерения токов большей силы, присоединив параллельно обмотке подвижной части шунтирующий резистор с малым сопротивлением, чтобы в обмотку подвижной части ответвлялась лишь малая доля полного измеряемого тока.

Такое устройство пригодно для токов, измеряемых многими тысячами ампер. Если последовательно с обмоткой присоединить добавочный резистор, то прибор превратится в вольтметр.

Падение напряжения на таком последовательном соединении равно произведению сопротивления резистора на ток, показываемый прибором, так что его шкалу можно проградуировать в вольтах.

Чтобы сделать из магнитоэлектрического миллиамперметра омметр, нужно присоединять к нему последовательно измеряемые резисторы и подавать на это последовательное соединение постоянное напряжение, например от батареи питания.

Ток в такой схеме не будет пропорционален сопротивлению, а потому необходима специальная шкала, корректирующая нелинейность. Тогда можно будет производить по шкале прямой отсчет сопротивления, хотя и с не очень высокой точностью.

# Гальванометры

К магнитоэлектрическим приборам относятся и гальванометры - высокочувствительные приборы для измерения крайне малых токов.

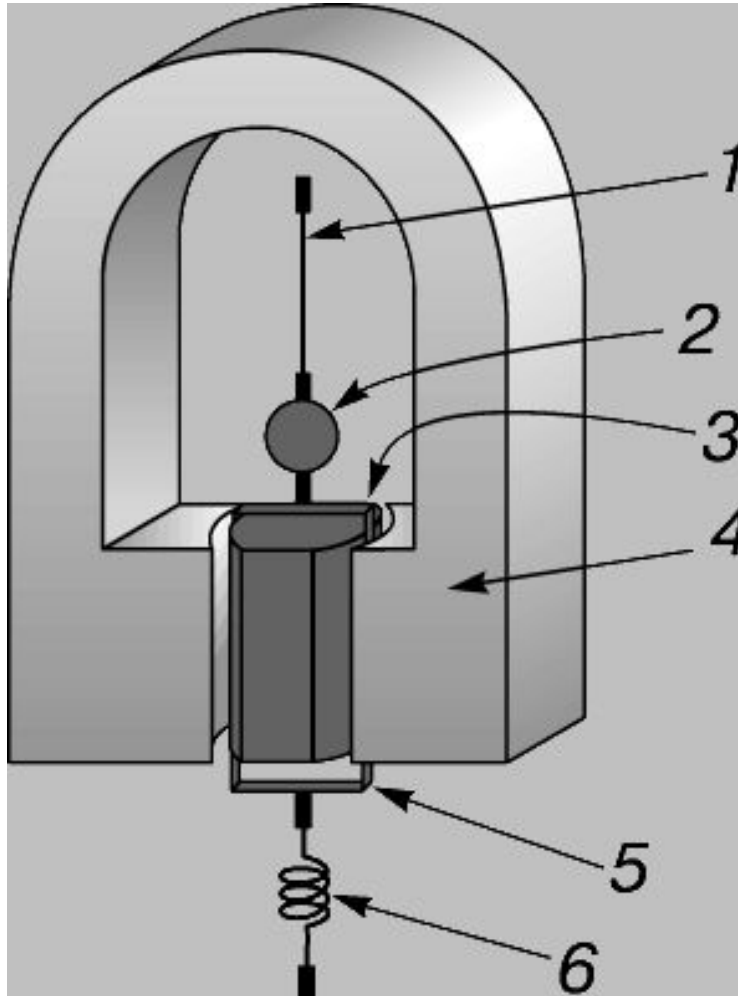
В гальванометрах нет подшипников, их подвижная часть подвешена на тонкой ленточке или нити, используется более сильное магнитное поле, а стрелка заменена зеркальцем, приклеенным к нити подвеса (рис. 1).

Зеркальце поворачивается вместе с подвижной частью, а угол его поворота оценивается по смещению отбрасываемого им светового зайчика на шкале, установленной на расстоянии около 1 м.

Самые чувствительные гальванометры способны давать отклонение по шкале, равное 1 мм, при изменении тока всего лишь на 0,00001 мкА.



*Рисунок 1. ЗЕРКАЛЬНЫЙ ГАЛЬВАНОМЕТР измеряет ток, проходящий через обмотку его подвижной части, помещенной в магнитное поле, по отклонению светового зайчика.*



1 - подвес;  
2 - зеркальце;  
3 - зазор;  
4 - постоянный магнит;  
5 - обмотка подвижной части;  
6 - пружинка подвеса.

# РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Регистрирующие приборы записывают "историю" изменения значения измеряемой величины.

К таким приборам наиболее распространенных типов относятся ленточные самописцы, записывающие пером кривую изменения величины на диаграммной бумажной ленте, аналоговые электронные осциллографы, развертывающие кривую процесса на экране электронно-лучевой трубки, и цифровые осциллографы, запоминающие однократные или редко повторяющиеся сигналы.

Основное различие между этими приборами - в скорости записи. Ленточные самописцы с их движущимися механическими частями наиболее подходят для регистрации сигналов, изменяющихся за секунды, минуты и еще медленнее. Электронные осциллографы же способны регистрировать сигналы, изменяющиеся за время от миллионных долей секунды до нескольких секунд.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ

Измерительный мост - это обычно четырехплечая электрическая цепь, составленная из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, предназначенная для определения отношения параметров этих компонентов.

К одной паре противоположных полюсов цепи подключается источник питания, а к другой - нуль-детектор.

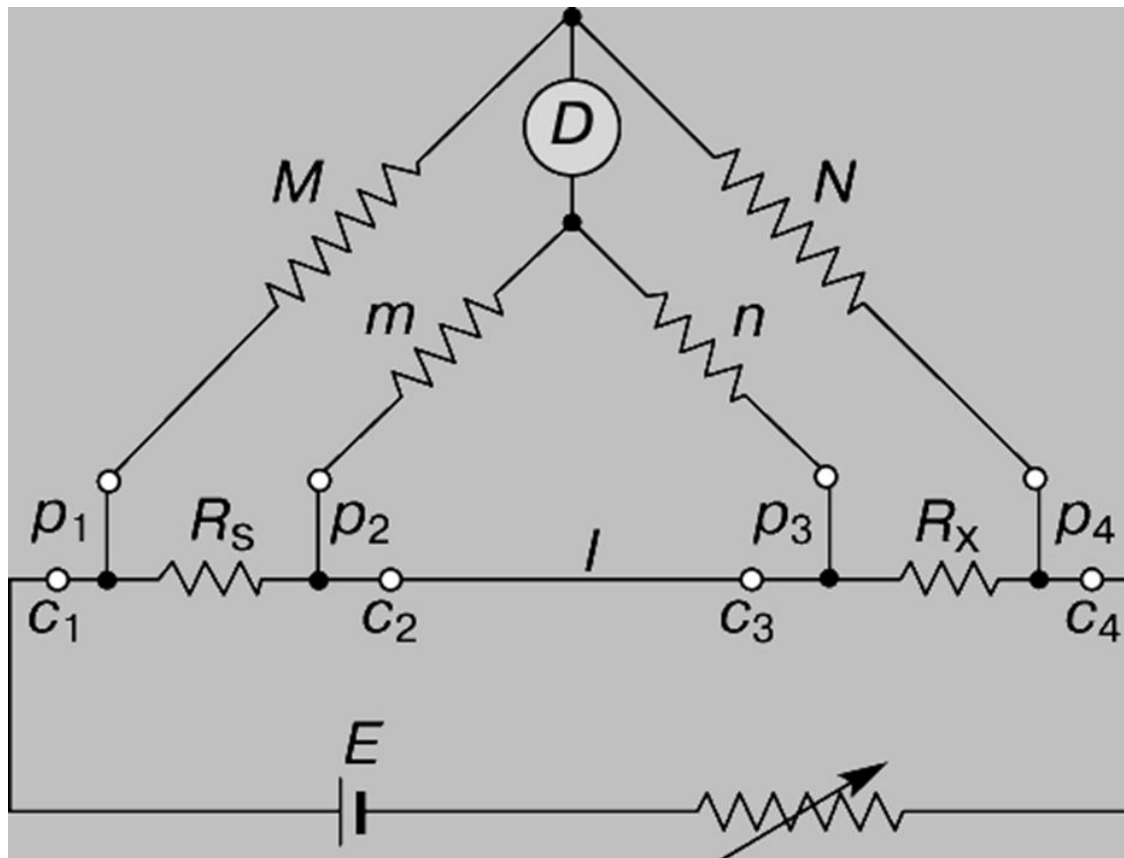
Измерительные мосты применяются только в тех случаях, когда требуется наивысшая точность измерения. (Для измерений со средней точностью лучше пользоваться цифровыми приборами, поскольку они проще в обращении.)

Наилучшие трансформаторные измерительные мосты переменного тока характеризуются погрешностью (измерения отношения) порядка 0,0000001%.

Простейший мост для измерения сопротивления носит имя своего изобретателя Ч.Уитстона

## Двойной измерительный мост постоянного тока

Рисунок 2. ДВОЙНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ (мост Томсона) - более точный вариант моста Уитстона, пригодный для измерения сопротивления четырехполюсных эталонных резисторов в области микроом.



К резистору трудно подсоединить медные провода, не привнеся при этом сопротивления контактов порядка 0,0001 Ом и более.

В случае сопротивления 1 Ом такой токоподвод вносит ошибку порядка всего лишь 0,01%, но для сопротивления 0,001 Ом ошибка будет составлять 10%.

Двойной измерительный мост (мост Томсона), схема которого представлена на рис. 2, предназначен для измерения сопротивления эталонных резисторов малого номинала.

Сопротивление таких четырехполюсных эталонных резисторов определяют как отношение напряжения на их потенциальных зажимах ( $p_1$ ,  $p_2$  резистора  $R_s$  и  $p_3$ ,  $p_4$  резистора  $R_x$  на рис. 2) к току через их токовые зажимы ( $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$ ,  $c_4$ ).

При такой методике сопротивление присоединительных проводов не вносит ошибки в результат измерения искомого сопротивления.

Два дополнительных плеча  $m$  и  $n$  исключают влияние соединительного провода 1 между зажимами  $c_2$  и  $c_3$ .

Сопротивления  $m$  и  $n$  этих плеч подбирают так, чтобы выполнялось равенство  $M/m = N/n$ . Затем, изменяя сопротивление  $R_s$ , сводят разбаланс к нулю и находят  $R_x = R_s(N/M)$ .

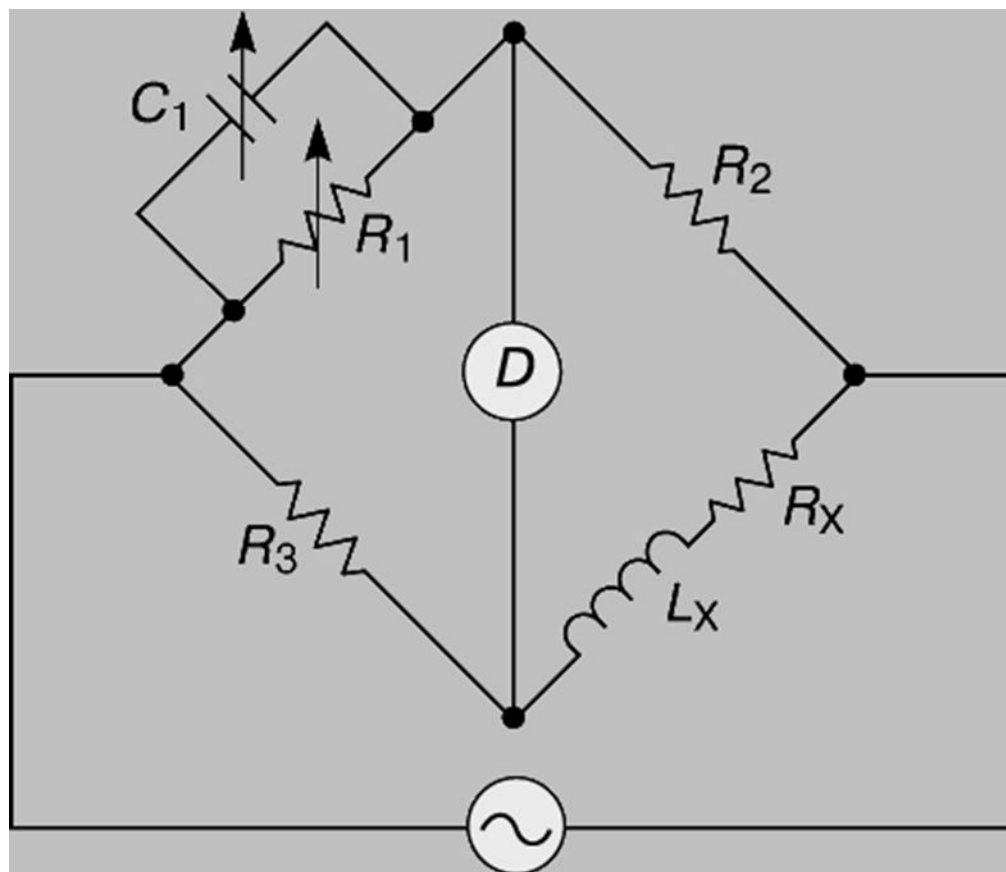
## Измерительные мосты переменного тока

Наиболее распространенные измерительные мосты переменного тока рассчитаны на измерения либо на сетевой частоте 50-60 Гц, либо на звуковых частотах (обычно вблизи 1000 Гц); специализированные же измерительные мосты работают на частотах до 100 МГц.

Как правило, в измерительных мостах переменного тока вместо двух плеч, точно задающих отношение напряжений, используется трансформатор. К исключениям из этого правила относится измерительный мост Максвелла - Вина.

## Измерительный мост Максвелла - Вина

Рисунок 3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ МАКСВЕЛЛА - ВИНА для сравнения параметров эталонных катушек индуктивности ( $L$ ) и конденсаторов ( $C$ ).



Такой измерительный мост позволяет сравнивать эталоны индуктивности ( $L$ ) с эталонами емкости на неизвестной точно рабочей частоте.

Эталонь емкости применяются в измерениях высокой точности, поскольку они конструктивно проще прецизионных эталонов индуктивности, более компактны, их легче экранировать, и они практически не создают внешних электромагнитных полей.

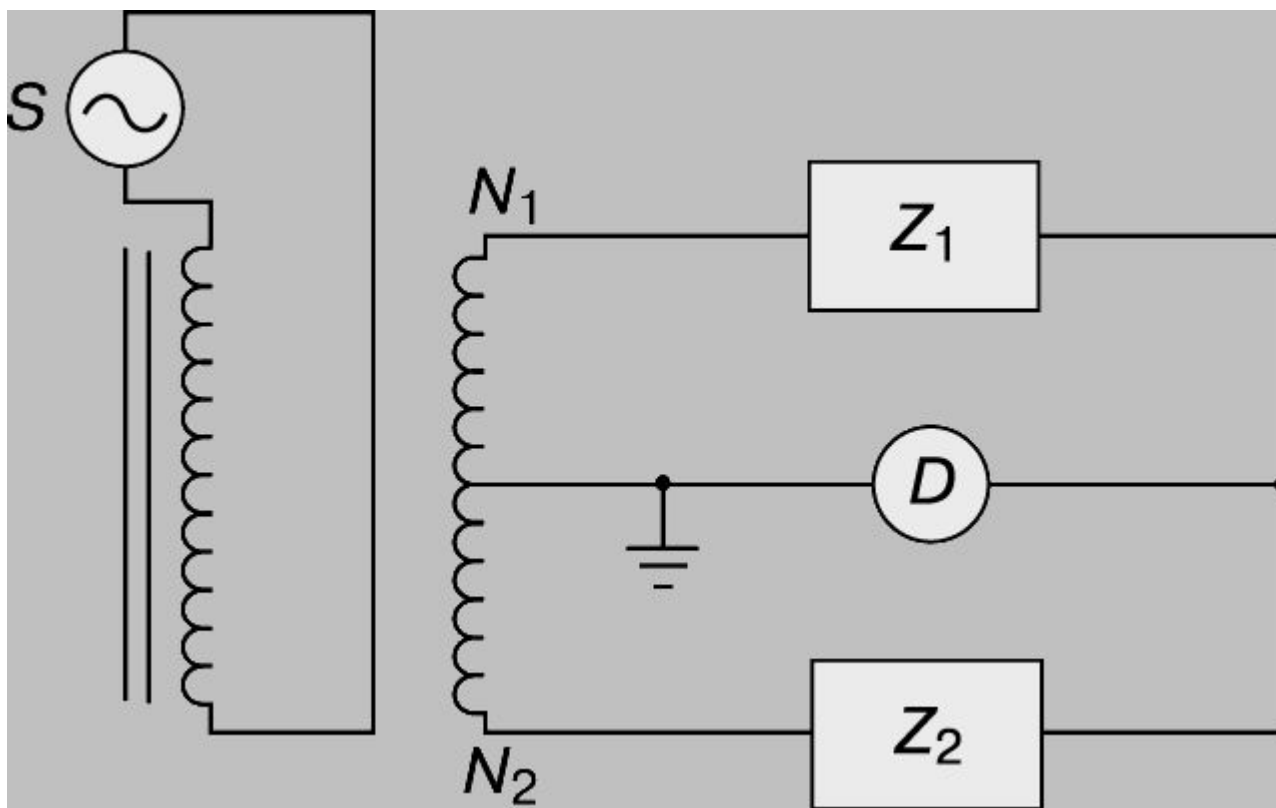
Условия равновесия этого измерительного моста таковы:  $L_x = R_2 \cdot R_3 \cdot C_1$  и  $R_x = (R_2 \cdot R_3) / R_1$  (рис.3).

Мост уравнивается даже в случае "нечистого" источника питания (т.е. источника сигнала, содержащего гармоники основной частоты), если величина  $L_x$  не зависит от частоты.



# Трансформаторный измерительный мост

Рисунок 4. ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ переменного тока для сравнения одностипных полных сопротивлений



Одно из преимуществ измерительных мостов переменного тока - простота задания точного отношения напряжений посредством трансформатора.

В отличие от делителей напряжения, построенных из резисторов, конденсаторов или катушек индуктивности, трансформаторы в течение длительного времени сохраняют постоянным установленное отношение напряжений и редко требуют повторной калибровки.

На рис. 4 представлена схема трансформаторного измерительного моста для сравнения двух одностипных полных сопротивлений.

К недостаткам трансформаторного измерительного моста можно отнести то, что отношение, задаваемое трансформатором, в какой-то степени зависит от частоты сигнала.

Это приводит к необходимости проектировать трансформаторные измерительные мосты лишь для ограниченных частотных диапазонов, в которых гарантируется паспортная точность.

# ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В случае изменяющихся во времени сигналов переменного тока обычно требуется измерять некоторые их характеристики, связанные с мгновенными значениями сигнала.

Чаще всего желательно знать среднеквадратические (эффективные) значения электрических величин переменного тока, поскольку мощности нагревания при напряжении 1В постоянного тока соответствует мощность нагревания при напряжении 1 В переменного тока.

Наряду с этим могут представлять интерес и другие величины, например максимальное или среднее абсолютное значение.

Среднеквадратическое (эффективное) значение напряжения (или силы переменного тока) определяется как корень квадратный из усредненного по времени квадрата напряжения (или силы тока):

$$Y_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} Y^2(t) dt},$$

где  $T$  - период сигнала  $Y(t)$ .

Максимальное значение  $Y_{\text{макс}}$  - это наибольшее мгновенное значение сигнала, а среднее абсолютное значение  $Y_{\text{АА}}$  - абсолютное значение, усредненное по времени.

При синусоидальной форме колебаний  $Y_{\text{эфф}} = 0,707 Y_{\text{макс}}$  и  $Y_{\text{АА}} = 0,637 Y_{\text{макс}}$ .

## Измерение напряжения и силы переменного тока

Почти все приборы для измерения напряжения и силы переменного тока показывают значение, которое предлагается рассматривать как эффективное значение входного сигнала.

Однако в дешевых приборах зачастую на самом деле измеряется среднее абсолютное или максимальное значение сигнала, а шкала градуируется так, чтобы показание соответствовало эквивалентному эффективному значению в предположении, что входной сигнал имеет синусоидальную форму.

Не следует упускать из виду, что точность таких приборов крайне низка, если сигнал несинусоидален.

Приборы, способные измерять истинное эффективное значение сигналов переменного тока, могут быть основаны на одном из трех принципов: электронного умножения, дискретизации сигнала или теплового преобразования.

Приборы, основанные на первых двух принципах, как правило, реагируют на напряжение, а тепловые электроизмерительные приборы - на ток.

При использовании добавочных и шунтовых резисторов всеми приборами можно измерять как ток, так и напряжение.

## Тепловые электроизмерительные приборы

Наивысшую точность измерения эффективных значений напряжения и тока обеспечивают тепловые электроизмерительные приборы. В них используется тепловой преобразователь тока в виде небольшого откачанного стеклянного баллончика с нагревательной проволочкой (длиной 0,5-1 см), к средней части которой крохотной бусинкой прикреплен горячий спай термопары.

Бусинка обеспечивает тепловой контакт и одновременно электроизоляцию.

При повышении температуры, прямо связанном с эффективным значением тока в нагревательной проволочке, на выходе термопары возникает термо-ЭДС (напряжение постоянного тока).

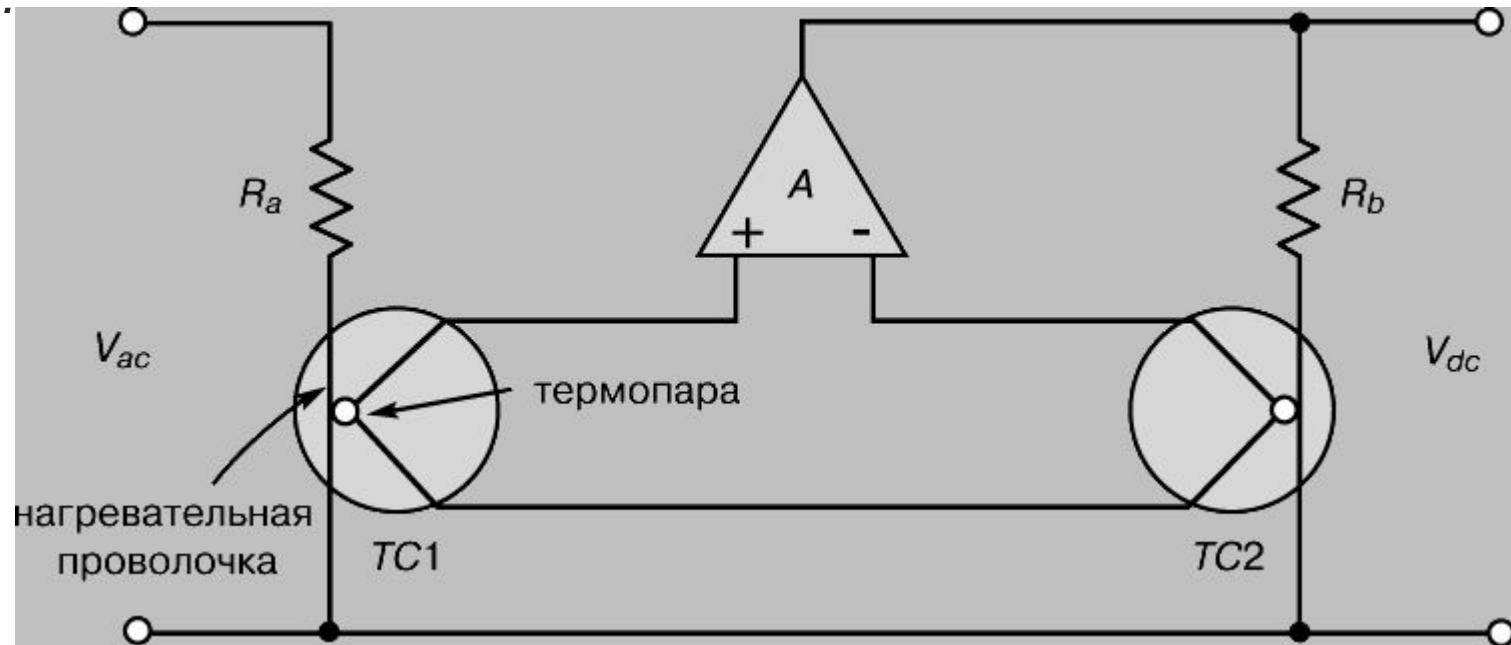
Такие преобразователи пригодны для измерения силы переменного тока с частотой от 20 Гц до 10 МГц.

На рис. 5 показана принципиальная схема теплового электроизмерительного прибора с двумя подобранными по параметрам тепловыми преобразователями тока.

При подаче на вход схемы напряжения переменного тока  $U_{ac}$  на выходе термопары преобразователя ТС1 возникает напряжение постоянного тока, усилитель А создает постоянный ток в нагревательной проволочке преобразователя ТС2, при котором термопара последнего дает такое же напряжение постоянного тока, и обычный прибор постоянного тока измеряет выходной ток.



Рисунок 5. ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР для измерения эффективных значений напряжения и силы переменного тока.



С помощью добавочного резистора описанный измеритель тока можно превратить в вольтметр. Поскольку тепловые электроизмерительные приборы непосредственно измеряют токи лишь от 2 до 500 мА, для измерения токов большей силы необходимы резисторные шунты.

## Измерение мощности и энергии переменного тока

Мощность, потребляемая нагрузкой в цепи переменного тока, равна среднему по времени произведению мгновенных значений напряжения и тока нагрузки.

Если напряжение и ток изменяются синусоидально (как это обычно и бывает), то мощность  $P$  можно представить в виде  $P = EI \cos j$ , где  $E$  и  $I$  - эффективные значения напряжения и тока, а  $j$  - фазовый угол (угол сдвига) синусоид напряжения и тока.

Если напряжение выражается в вольтах, а ток в амперах, то мощность будет выражена в ваттах.

Множитель  $\cos j$ , называемый коэффициентом мощности, характеризует степень синхронности колебаний напряжения и тока.

С экономической точки зрения, самая важная электрическая величина - энергия.

Энергия  $W$  определяется произведением мощности на время ее потребления. В математической форме это записывается так:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} e i dt.$$

Если время ( $t_1 - t_2$ ) измеряется в секундах, напряжение  $e$  - в вольтах, а ток  $i$  - в амперах, то энергия  $W$  будет выражена в ватт-секундах, т.е. джоулях ( $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ ).

Если же время измеряется в часах, то энергия - в ватт-часах. На практике электроэнергию удобнее выражать в киловатт-часах ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ ).

## Индукционные счетчики электроэнергии

Индукционный счетчик представляет собой не что иное, как маломощный электродвигатель переменного тока с двумя обмотками - токовой и обмоткой напряжения.

Проводящий диск, помещенный между обмотками, вращается под действием крутящего момента, пропорционального потребляемой мощности.

Этот момент уравновешивается токами, наводимыми в диске постоянным магнитом, так что частота вращения диска пропорциональна потребляемой мощности.

Число оборотов диска за то или иное время пропорционально полной электроэнергии, полученной за это время потребителем.

Число оборотов диска считает механический счетчик, который показывает электроэнергию в киловатт-часах.

Приборы такого типа широко применяются в качестве бытовых счетчиков электроэнергии.

Их погрешность, как правило, составляет 0,5%; они отличаются большим сроком службы при любых допустимых уровнях тока.

**Спасибо за внимание!**