

## Масштабные измерительные преобразователи.

### Измерение электрических величин

1. Масштабные измерительные преобразователи. Переменные резисторы, ЛАТРы, делители напряжения. Шунтирующие и добавочные резисторы.
2. Измерение силы тока, напряжения, мощности. Приборы.
3. Измерение коэффициента мощности и частоты.
4. Измерение индуктивности и емкости.

1

Масштабные измерительные преобразователи – это устройства, предназначенные для изменения измеряемой величины в заданное число раз. Несмотря на то, что МИП не являются измерительными приборами, их свойства оказывают существенное влияние на результаты измерений.

К масштабным измерительным преобразователям относятся: переменные резисторы (реостаты), автотрансформаторы, делители напряжения и фазорегуляторы.

Переменные резисторы служат для плавного регулирования силы тока и напряжения в измерительных цепях постоянного и переменного тока. Наибольшее распространение получили проволочные резисторы с подвижным контактом.

*Для регулирования силы тока* резистор включается в цепь последовательно с разрывом или без него (рис.1). Перемещая скользящий контакт, изменяют сопротивление цепи и, следовательно, при одном и том же приложенном напряжении регулируют силу тока.

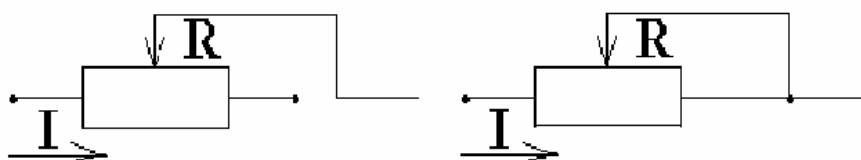


Рис. 1

Переменные резисторы выбирают по напряжению питания  $U_p$  и пределам регулирования тока от  $I_{min}$  до  $I_{max}$ .

Так, номинальное сопротивление реостата

$$R_n \geq \frac{U_n}{I_n}$$

Номинальный ток реостата

$$I_n \geq I_{max}$$

Регулирование тока при помощи одного реостата не обеспечивает необходимой плавности. Поэтому включают *последовательно несколько реостатов*, иногда с разным сопротивлением.

Реостат может быть использован и *для регулирования напряжения*. В этом случае его включают параллельно источнику (рис. 2).

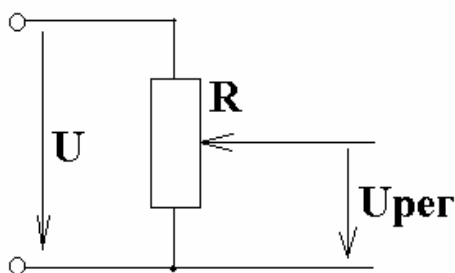


Рис. 2

Тогда параметры резистора должны удовлетворять условию:

$$I_p R \geq U_n$$

Где  $I_p$  – допустимый ток резистора.

Ступенчатое преобразование напряжения измерительной цепи осуществляется при помощи **делителей напряжения**. Делитель напряжения постоянного тока собирается на резисторах (рис.3), а переменного – на конденсаторах (рис.4).

Основным параметром делителей напряжения является коэффициент делителя

$$K_D = \frac{U_{вх}}{U_{вых}}$$

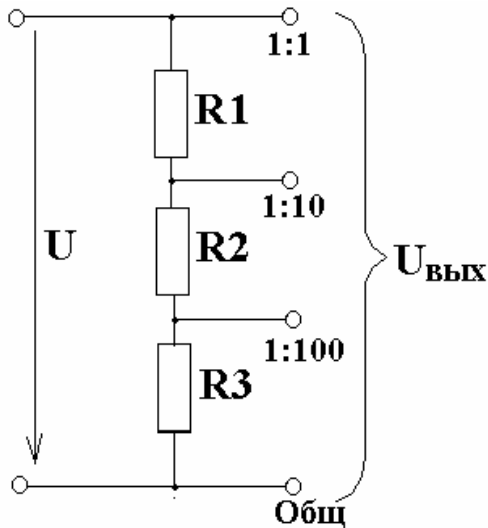


Рис.3

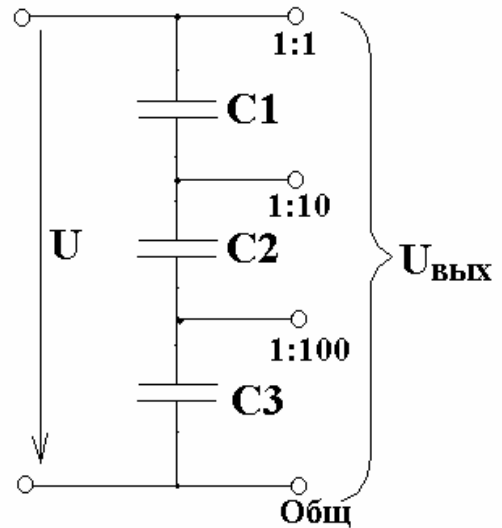


Рис.4

Недостатки делителей напряжения – постоянного тока – большое потребление энергии; переменного тока – остаточное напряжение после снятия питания с цепи.

**Лабораторные автотрансформаторы (ЛАТРы)** используют для плавного регулирования переменного напряжения и силы тока до 10А. Такой трансформатор представляет собой катушку, выполненную в виде кольца (тора), по которому перемещается скользящий контакт (рис. 5). Подвижный контакт механически связан со стрелочным указателем, перемещающимся над шкалой. Некоторые ЛАТРы комплектуются вольтметрами, вмонтированными в корпус.

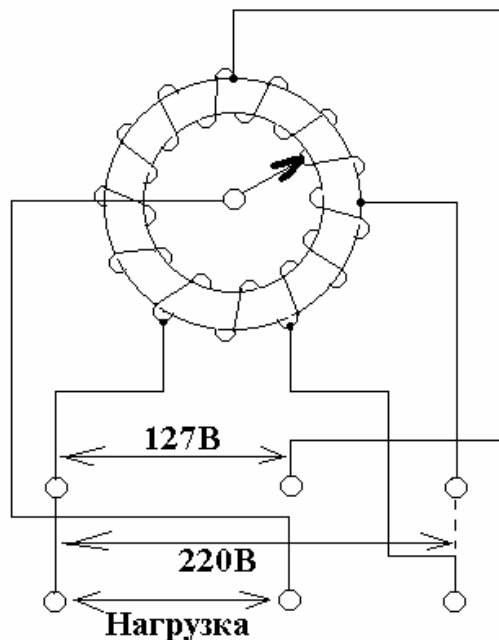


Рис. 5.

Измерительные приборы не всегда можно включать непосредственно в измерительную цепь, так как диапазон их измерений ограничен. Каждый прибор имеет свой предел измерений (по току и напряжению). Поэтому, чтобы расширить диапазон измерений приборов используют постоянные резисторы, включенные в измерительную цепь по различным схемам.

1. Шунтирующие резисторы (шунты) служат для расширения пределов измерения по току. Измерительные приборы включают с такими резисторами *параллельно* (рис.6).

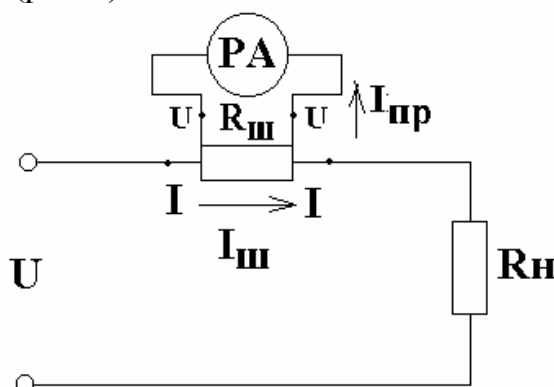


Рис. 6

Сопротивление шунтирующего резистора определяется из соотношения

$$I_{ш}R_{ш} = I_{пр}R_{пр}$$

Где  $I_{ш}$  – ток шунтирующего резистора;

$I_{пр}$  – допустимый ток прибора;

$R_{пр}$  – входное сопротивление прибора.

$$R_{ш} = \frac{I_{пр}R_{пр}}{I_{ш}}$$

По первому закону Кирхгофа  $I_{ш} = I - I_{пр}$

Тогда 
$$R_{ш} = \frac{R_{пр}}{n-1}$$

Где  $n = \frac{I}{I_{np}}$  - коэффициент шунтирования

Тогда сила тока, измеряемая амперметром, будет

$$I = nI_{np}$$

Шунтирующие резисторы, рассчитанные на небольшие токи, устанавливают в корпусе прибора, а рассчитанные на большие токи поставляют отдельно от прибора (*наружные шунты*). Наружные шунты рассчитывают на определенные напряжения. Для этого их калибруют.

Для уменьшения погрешности шунты изготавливают из *манганина* и снабжают двумя парами контактов – *потенциальными* и *токовыми*

Преимущественное распространение шунты получили для *расширения пределов по току магнитоэлектрических приборов, используемых в цепях постоянного тока*.

Шунтирующие резисторы изготавливаются на следующие классы точности:

0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0.

2. Добавочные резисторы служат для расширения пределов измерений по напряжению. Их включают *последовательно* с измерительным прибором (вольтметром) (рис. 7).

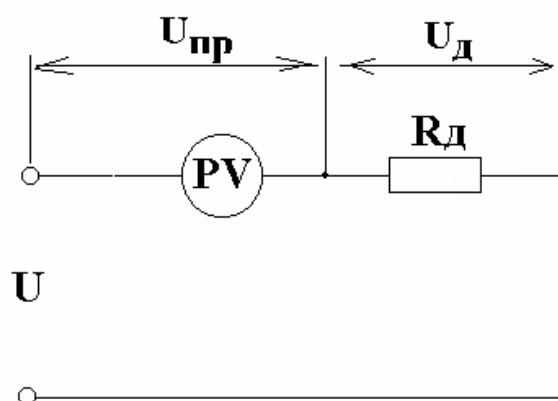


Рис. 7

Сопротивление добавочного резистора должно быть таким, чтобы сила тока в цепи не превышала значения

$$I = \frac{U_{np}}{R_{np}} = \frac{U}{R_{np} + R_{\partial}} = \frac{mU_{np}}{R_{np} + R_{\partial}}$$

$$R_{\partial} = R_{np}(m - 1)$$

Добавочные резисторы как и шунты изготавливают как встроенными в прибор, так и наружными. Классы точности у них такие же как и у шунтов.

Несмотря на большой диапазон расширения пределов измерений при помощи шунтов и добавочных сопротивлений, возможности их ограничены. Так, шунты предназначены для преобразований токов до 5000 А, а добавочные резисторы – напряжений до 30 кВ. Поэтому в цепях высокого напряжения переменного тока возможности приборов расширяют с применением *измерительных трансформаторов тока и напряжения*. Подробно измерительные трансформаторы рассмотрены на лабораторном занятии.

## 2

**Измерение силы тока и напряжения - наиболее распространенный вид измерений электрических величин.** В зависимости от рода тока и частоты методы и средства измерения здесь различны. Для измерения указанных величин с наивысшей точностью применяют такие средства как компенсаторы переменного и постоянного токов, электронные и цифровые приборы. Для измерения с меньшей точностью применяют стрелочные электромеханические приборы.

### Измерение силы тока и напряжения в цепях постоянного тока

В измерительной практике в цепях постоянного тока встречаются токи в диапазоне от  $10^{-17}$  до  $10^6$  А и напряжения от  $10^{-7}$  до  $10^8$  В.

*Малые токи и напряжения* измеряют приборами высокой чувствительности - **магнитоэлектрическими гальванометрами**. Эти приборы позволяют выявить присутствие или отсутствие тока в цепи. Гальванометры включают также через шунтирующие и добавочные резисторы для расширения пределов измерений.

*Постоянные токи силой не более 200 мА* измеряют **магнитоэлектрическими миллиамперметрами**. Если значение измеряемого тока превосходит значение диапазона измерений, используют шунты, как одиночные, так и многопредельные. Класс точности выбранного шунта должен соответствовать классу точности прибора.

Для непосредственного измерения напряжений в цепях постоянного тока наибольшее распространение получили **магнитоэлектрические вольтметры**. Ими можно измерять напряжения до 600 В. Для расширения пределов измерения таких вольтметров можно использовать добавочные резисторы.

Для более точного измерения напряжений используют компенсаторы постоянного тока, а также электронные и цифровые приборы. *Диапазон измерений компенсатора расширяют при помощи делителей напряжения.*

Электронные вольтметры со стрелочным или цифровым отсчетом имеют по сравнению с магнитоэлектрическими более высокую чувствительность и меньшее собственное потребление.

### Измерение в цепях переменного тока

Измерения в цепях синусоидального тока связаны с определением амплитудного, среднего и действующего значений тока и напряжения.

Для измерения средних значений тока и напряжения применяют **выпрямительные, электронные и цифровые приборы**.

Для измерения действующих значений тока и напряжения в цепях синусоидального тока промышленной частоты используют **электромагнитные, электро- и ферродинамические приборы**. Для измерения напряжений ограничено используются **электростатические вольтметры**.

Так как диапазоны измерений перечисленных приборов ограничены ( $\approx 100\text{A}$  и  $600\text{V}$ ), для измерения больших токов и напряжений используют включение приборов через измерительные трансформаторы тока и напряжения. При этом класс точности трансформатора должен соответствовать классу точности измерительного прибора.

Для измерения силы тока и напряжения с высокой точностью используют **компенсаторы переменного тока**, а также специальные устройства - **компараторы**, представляющие собой компенсаторы с преобразователями переменного тока в постоянный. На вход преобразователя подается измеряемая переменная величина, которая сравнивается в приборе с эталонной постоянной величиной.

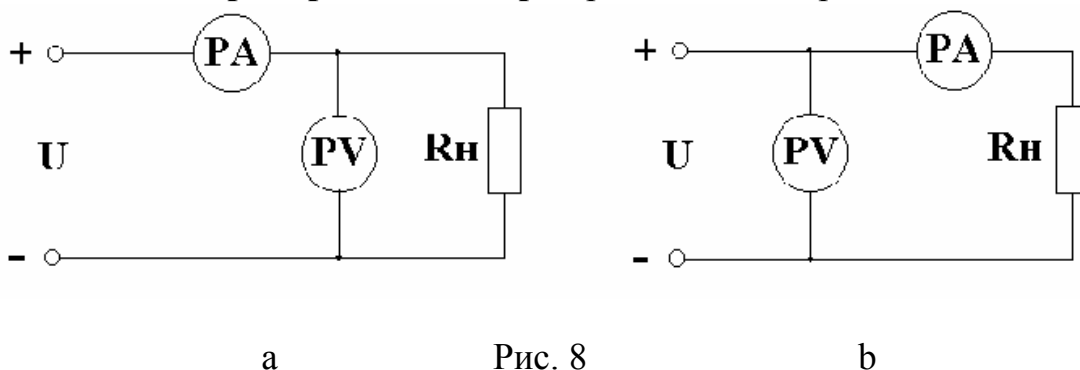
В трехфазных цепях переменного тока измерение токов и напряжений зависит от того, симметричная система или несимметричная. В симметричной системе для измерения линейных токов и напряжений ограничиваются включением одного амперметра или вольтметра. В несимметричной амперметры и вольтметры включаются в каждую из фаз.

### Измерение мощности

#### 1. Измерение мощности в цепях постоянного тока.

Здесь существует два способа измерения - *косвенный* - метод амперметра-вольтметра и *прямой* - при помощи электродинамического ваттметра.

Метод амперметра-вольтметра представлен на рис.8.



Здесь мощность определяют исходя из произведения  $P = UI$ , где  $U$  и  $I$  - измеренные значения тока и напряжения, которые определяются при помощи магнитоэлектрических амперметров и вольтметров. При этом возможны две схемы включения приборов. Первую схему (а) применяют, когда сопротивление нагрузки значительно меньше сопротивления вольтметра. При большом сопротивлении нагрузки применяют схему (б).

## 2. Измерение мощности в цепях переменного тока.

### 2.1. Измерение мощности в однофазных цепях.

Здесь активную мощность измеряют электродинамическими и ферродинамическими ваттметрами. При измерении мощности ваттметром необходимо следить, чтобы он не был перегружен, т.е. сила тока через последовательную цепь и напряжение на параллельной цепи не должны превышать допустимых значений. В связи с этим в измерительную цепь включают также приборы контроля тока и напряжения (см. лабораторную работу №8).

В цепях с силой тока и напряжением, превышающим диапазон измерений по току и напряжению, ваттметры необходимо включать через *измерительные трансформаторы тока и напряжения*.

Для измерения **реактивной мощности** в цепи синусоидального тока необходимо. Чтобы угол сдвига фаз между векторами тока и напряжения подвижной катушки ваттметра был равен  $\pi/2$  ( $\varphi_U = 90^\circ$ ). Такой сдвиг достигается включением в параллельную цепь прибора дополнительных резистора и катушки (рис.9).

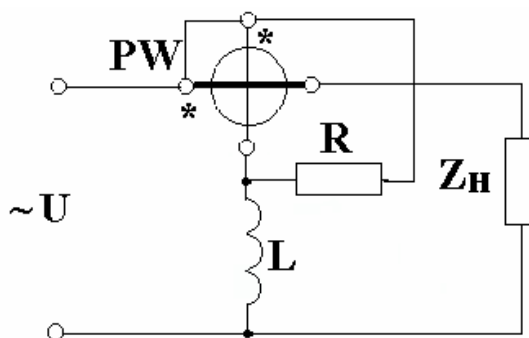


Рис. 9

Измерение реактивной мощности в однофазных цепях производят только в лабораторных условиях. Для измерения используют электродинамические и ферродинамические ваттметры с дополнительными реактивными элементами.

### 2.2. Измерение мощности в трехфазных цепях.

**Активную мощность** в трехфазных цепях измеряют в зависимости от вида трехфазной цепи (трех- или четырехпроводная), ее симметричности и



схемы соединения фаз потребителя (звезда или треугольник) (см. лабораторную работу №8).

**Реактивную мощность в трехфазной цепи** измеряют однофазными ваттметрами, включаемыми определенным образом (рис.10).

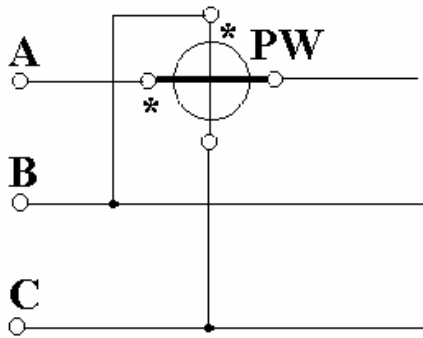


Рис.10

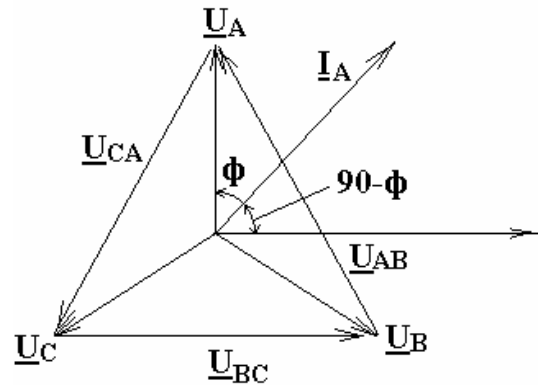


Рис.11.

Такая схема включения используется для получения фазового сдвига. В этом случае перемещение подвижной части прибора пропорционально реактивной мощности

$$P_w = U_{bc} I_A \cos(U_{BC}; I_A) = U_{bc} I_A \cos(\pi / 2 - \varphi) = U_{bc} I_A \sin \varphi = Q$$

(см. векторную диаграмму на рис. 11).

Единица измерения реактивной мощности - Вар (вольт-ампер реактивный).

Недостаток схемы с одним ваттметром - большая погрешность. Реактивную мощность трехфазной цепи можно также определить по показанию двух ваттметров (рис. 12)

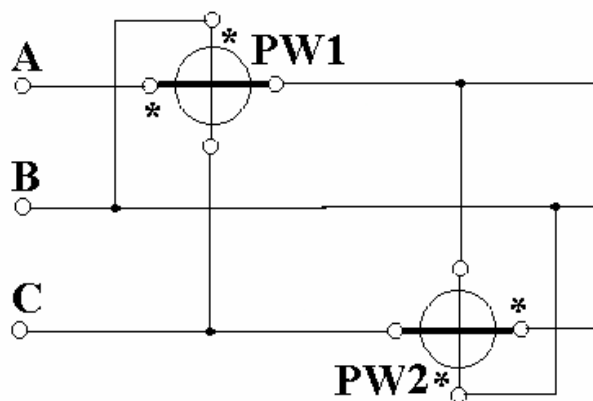


Рис. 12

Тогда реактивная мощность

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2} (P_{W1} + P_{W2})$$

Реактивную мощность трехфазной системы можно также определить, собрав схему для измерения активной мощности (рис. 13).

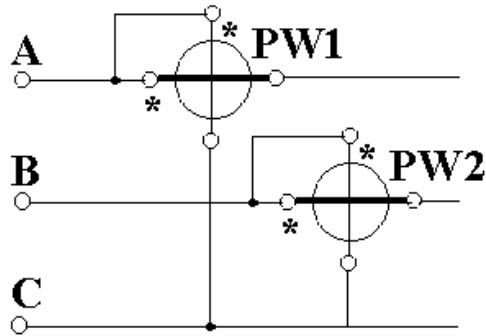


Рис. 13

При этом реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} (P_{W1} + P_{W2})$$

В четырехпроводной трехфазной цепи реактивная мощность может быть определена по показаниям трех ваттметров (рис. 14)

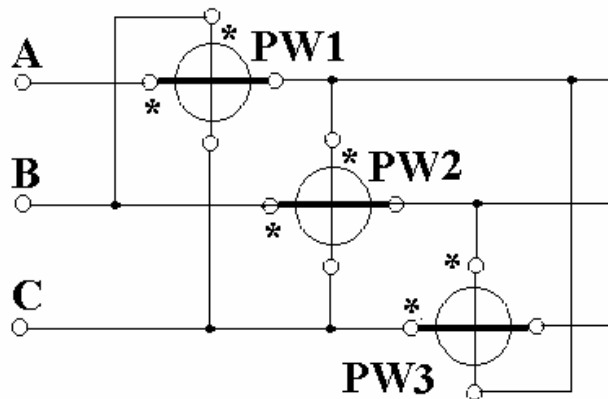


Рис. 14

$$Q = \frac{P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}}{\sqrt{3}}$$

3

**Коэффициент мощности** можно измерить непосредственно и косвенно.

**Косвенно** в цепях однофазного тока  $\cos \varphi$  рассчитывают по показаниям ваттметра, амперметра и вольтметра (Рис. 15):

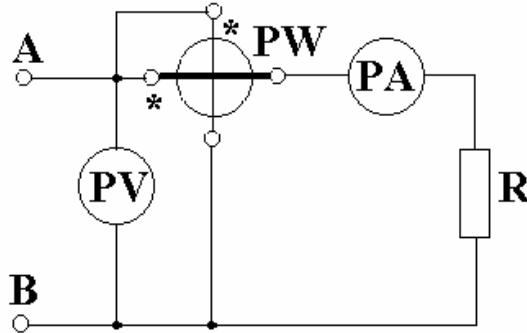


Рис.15

Тогда 
$$\cos \varphi = \frac{P_W}{U_V I_A}$$

В симметричных трехфазных цепях  $\cos \varphi$  рассчитывают по результатам измерения активной мощности и линейных значений силы тока и напряжения:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{л} I_{л}}$$

Точность такого метода невелика, т.к. общая относительная погрешность измерения равна сумме относительных погрешностей каждого прибора.

Коэффициент мощности можно также измерить **при помощи электронного осциллографа**. Наиболее это просто осуществить при помощи двухлучевого осциллографа с использованием эллиптической развертки (рис. 16).

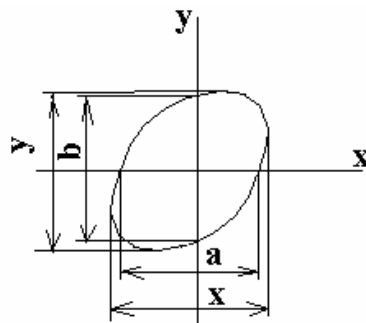


Рис. 16

$$\varphi = \arcsin \frac{a}{x} = \arcsin \frac{b}{y}$$

**Непосредственно коэффициент** мощности измеряют при помощи электродинамических, ферродинамических и электронных **фазометров**.

**Электродинамический фазометр** представляет собой логометрический прибор, у которого в ветвях подвижных катушек включены элементы с реактивным сопротивлением (рис. 17).

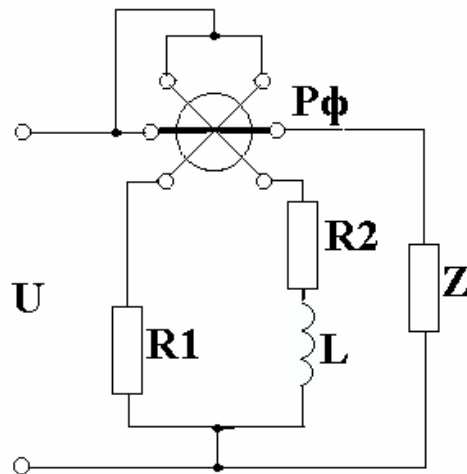


Рис. 17

При неизменности сопротивлений подвижных катушек

$$\alpha = F(\varphi)$$

Поэтому отсчетное устройство фазометра градуируется в единицах измерения  $\varphi$  или  $\cos \varphi$ .

Измерение  $\cos \varphi$  в трехфазных цепях осуществляют при помощи **трехфазных фазометров**.

В **электронных фазометрах** фаза исследуемого напряжения сравнивается со стабильным уровнем напряжения. Полученный временной сдвиг преобразуется в напряжение постоянного тока, поступающее на магнитоэлектрический прибор, отсчетное устройство которого градуируется в единицах  $\varphi$  или  $\cos \varphi$ .

## Измерение частоты

### 1. Косвенные методы измерения частоты

#### 1.1. Осциллографический метод (метод фигур Лиссажу)

Этот метод используется для измерения частоты синусоидальных напряжений.

На один из входов осциллографа (например, на вход канала Y) подается напряжение с измеряемой частотой  $f_x$ . На вход канала X подается напряже-

ние образцовой частоты  $f_0$ . Изменением образцовой частоты при выключенном генераторе развертки осциллографа на экране получают *фигуру Лиссажу*. Форма фигур Лиссажу определяется соотношением частот и амплитуд, а также - фазовым сдвигом между образцовым и исследуемым сигналами. Для определения частоты необходимо подсчитать наибольшее число точек пересечений фигуры Лиссажу с осями X и Y. При этом

$$\frac{f_0}{f_x} = \frac{N_x}{N_y}$$

где  $N_x$  - кол-во точек пересечения фигуры с осью X;  
 $N_y$  - кол-во точек пересечения фигуры с осью Y;

Отсюда 
$$f_x = f_0 \frac{N_x}{N_y}$$

Например, 
$$f_x = \frac{2}{4} f_0 = \frac{1}{2} f_0$$

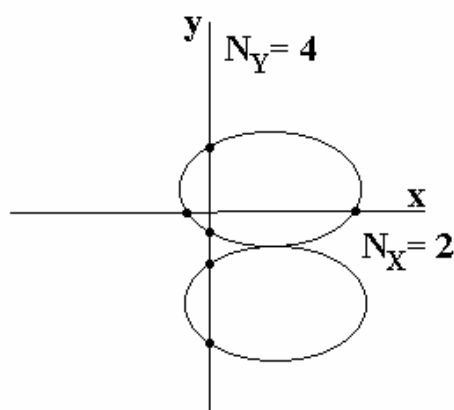


Рис. 18

**2. Непосредственное измерение частоты.** Выполняется при помощи различных частотомеров - электромеханических (вибрационных, электромагнитных, электро- и ферродинамических), а также - электронных и цифровых. Электродинамический частотомер показан на рис. 19. Здесь конденсатор С1 служит для создания фазового сдвига между напряжением и током, близкий к  $\pi/2$ . Конденсатор С2 вместе с катушкой и резистором образуют резонансный контур. Его резонансная частота выбрана в середине диапазона частот, измеряемых прибором. Поэтому в момент резонанса подвижная часть находится в среднем положении.

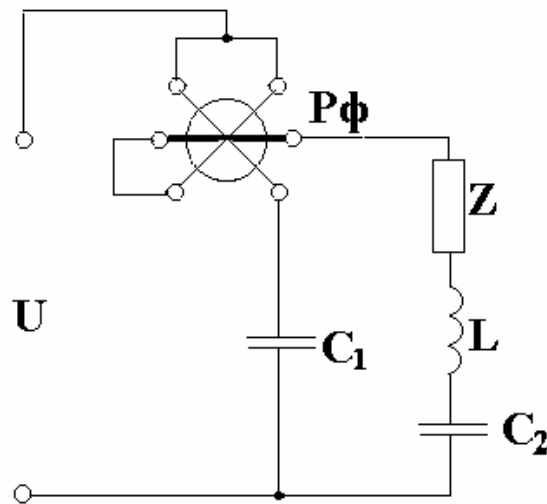


Рис. 19.

При отклонении частоты от резонансной изменяется фаза тока  $I_2$ , что приводит к возникновению вращающего момента и перемещению подвижной части на определенный угол.

### Измерение индуктивности и взаимной индуктивности

**1. Косвенный метод** измерения состоит в измерении силы тока, напряжения и мощности цепи с индуктивностью с последующими расчетами: по показаниям амперметра и вольтметра - *полного сопротивления* катушек:

$$Z = \frac{U}{I}$$

Из формулы, определяющей значение мощности потерь

$$P = I^2 R_x$$

вычисляют активное сопротивление катушки индуктивности по показаниям ваттметра и амперметра

$$R_x = \frac{P}{I^2}$$

Тогда индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = \sqrt{(Z^2 - R^2)}$$

Зная угловую частоту источника питания  $\omega$ , можно вычислить индуктивность

$$L_x = \frac{X_L}{\omega} = \frac{2\pi f X_L}{\omega}$$

Определить взаимную индуктивность косвенным методом можно по разному. Один из способов - при помощи **амперметра, вольтметра и ваттметра**. (рис. 20).

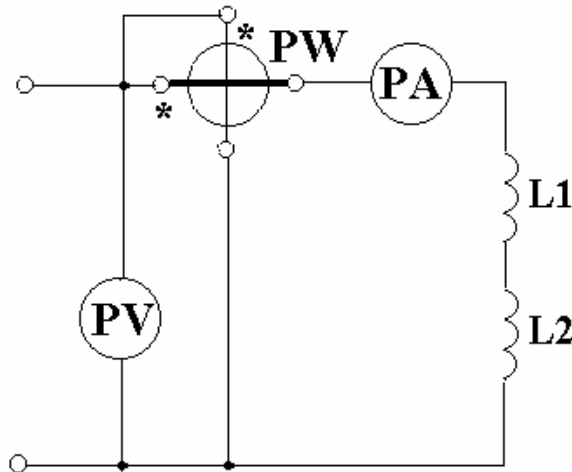


Рис. 20

Для этого нужно выполнить два опыта: определить ток, напряжение и мощность в цепи при *согласном* и при *встречном* соединении катушек. Тогда **значение взаимной индуктивности** можно определить по формуле:

$$M_{1,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)_C^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)_C^2} - \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)_B^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)_B^2}}{4\omega}$$

### Измерение емкости

Здесь также применяются косвенный и прямой методы.

Косвенный метод состоит в измерении параметров цепи с неизвестным конденсатором и расчета значения его емкости (рис. 21).

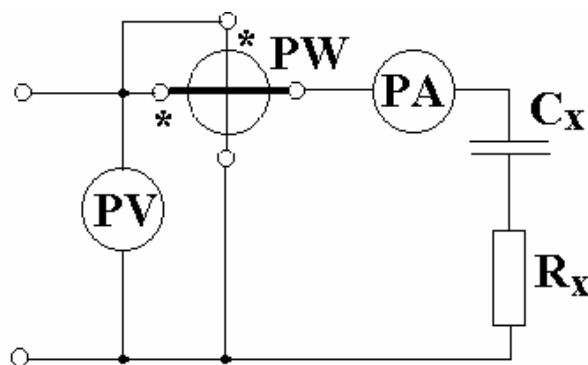


Рис. 21

В этом случае **искомая емкость** определится как:

$$C_x = \frac{1}{\omega \sqrt{(Z^2 - R^2)}} = \frac{I^2}{\omega \sqrt{U^2 I^2 - P^2}}$$

Недостаток этого метода - невысокая точность. Поэтому применяется он редко.

Широкое распространение получило **измерение емкости с помощью моста переменного тока** (лабораторная работа).

Для **непосредственного** измерения емкости применяют *фарадометры* (**РАЗОБРАТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНО**).