

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:27:26

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

1. Обработка результатов измерений	4
2. Расчёт масштабных преобразователей	10
3. Измерение активной мощности в трехфазных цепях.	14
4. Измерение реактивной мощности в трехфазных цепях.	19
5. Расчет мостовых схем.	22
6. Электрические измерения неэлектрических величин	29
Рекомендуемая литература	32

Раздел 1.1.

Информационно-измерительная техника. Методы измерений

Тема 1.1.1.

1. Обработка результатов измерений

1.1. Количественная оценка свойств физических объектов или процессов осуществляется измерением физических величин. По своей сути «Измерение» - это познавательный процесс, заключающийся в сравнении опытным путём измеряемой величины с некоторым её значением, принятым за единицу.

Любое измерение производится с некоторой погрешностью (ошибкой), которая искажает результат измерения и позволяет лишь приблизительно оценить значение измеряемой величины.

Задачей экспериментатора и аналитика является учёт всех возможных погрешностей и обработка результатов измерений с целью их максимального приближения к действительному значению измеряемой величины.

По способу числового выражения различают абсолютные погрешности ΔA , выраженные в единицах измеряемой величины, и относительные δ , выраженные в % или долях от действительного значения.

$$\Delta A = A_x - A ,$$

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} , \text{ где}$$

A_x – измеренное значение,

A – действительное значение.

Если достоверна известна погрешность ΔA (влияние температуры, влажности, превышение над уровнем моря и т.д.), то в результат измерения следует внести поправку

$$A = A_x + \Delta C , \text{ где}$$

$\Delta C = -\Delta A$ – поправка: взятая с обратным знаком погрешность измерения.

Опыт показывает, погрешности подчиняются определённым статистическим законам.

Статистическая зависимость частоты или вероятности появления тех или иных случайных погрешностей (ошибок) от их величины называется законом распределения этих погрешностей (ошибок).

Так оказывается:

- погрешности измерения могут принимать непрерывный ряд значений;
- вероятность появления случайных погрешностей, равных по абсолютной величине, но противоположных по знаку, одинакова;
- вероятность появления малых случайных погрешностей больше вероятности появления больших случайных погрешностей (т.е. малые случайные погрешности встречаются чаще, чем большие).

На основании вышеизложенного и был получен так называемый нормальный закон (закон Гаусса) распределения погрешностей, который описывается формулой Гаусса:

$$\varphi_{(\Delta)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a_i - A)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)^2}, \text{ где}$$

$\varphi_{(\Delta)}$ - плотность вероятности распределения погрешностей,

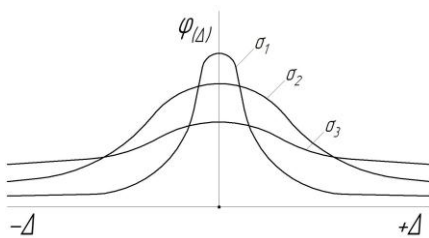
a_i - результат отдельного измерения.

σ – среднеквадратичная погрешность ряда измерений:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_i^2 + \Delta_n^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2}{n}}, \text{ где}$$

Δ_i - случайная абсолютная погрешность отдельного измерения ($\Delta_i = a_i - A$).

Графически нормальный закон распределения погрешностей выглядит следующим образом:



где $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$, т.е. малому значению σ соответствует преобладание малых случайных погрешностей.

На практике вместо действительного значения измеряемой величины A берётся его среднее арифметическое значение:

$$\bar{A} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots + a_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}.$$

По аналогии со случайной абсолютной погрешностью отдельного измерения Δ_i вводится понятие отклонения результата измерения от среднего значения

$$v_i = a_i - \bar{A}$$

v_i в метрологии называют остаточной погрешностью.

$\bar{A} \rightarrow A$ при бесконечном числе измерений. В реальности же среднеквадратичная погрешность определяется по формуле:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}.$$

Для оценки погрешности отдельного измерения кроме среднеквадратичной погрешности пользуются вероятной погрешностью отдельного измерения ρ , под которой понимают погрешность, которая делит пополам все случайные погрешности на две равные части: в первой находится половина случайных погрешностей больших ρ ; во второй – половина случайных погрешностей меньших ρ .

$$\rho = \pm 0,6745\sigma \approx \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}.$$

Кроме σ и ρ в некоторых случаях используют среднеарифметическую погрешность θ :

$$\Theta = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{\sqrt{n(n-1)}}.$$

В теории ошибок доказывается, что $\Theta = \pm 0,8\sigma$.

Большое значение имеет т.н. максимальная погрешность измерения $M = \pm 3\sigma$.

Измерения с погрешностью $> 3\sigma$ значительно искажают результат. Такие измерения называют промахом и они должны быть исключены, как недостоверные.

Если произвести K серий измерений и в каждой серии выполнить n измерений с одинаковой точностью; затем для каждой серии вычислить среднеарифметическое значение измеряемой величины $\bar{A}$, то окажется, что эти среднеарифметические отличаются друг от друга в разных сериях k_i . Более того, они будут отличаться от истинного значения измеряемой величины A на случайную ошибку.

Чтобы судить о случайном разбросе среднеарифметического, необходимо вычислить среднеквадратическую погрешность определения среднеквадратического. В теории ошибок доказывается, что эта погрешность будет в $\sqrt{n}$ раз меньше среднеквадратической погрешности отдельного измерения:

$$\sigma_{\bar{A}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n \cdot (n-1)}},$$

$$\rho_{\bar{A}} = \frac{\rho}{\sqrt{n}} = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n \cdot (n-1)}},$$

$$\Theta_{\bar{A}} = \frac{\Theta}{\sqrt{n}} = \pm 0,8 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{n \cdot (n-1)}},$$

$$M_{\bar{A}} = \pm 3\sigma_{\bar{A}} = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n \cdot (n-1)}}.$$

Оценку погрешности отдельного измерения обычно проводят с помощью среднеквадратичной погрешности σ , а также максимальной погрешности M .

Среднеарифметическая погрешность отдельного измерения используется в том случае, если подозревается наличие систематической погрешности. В этом случае среднеарифметическая погрешность отдельного измерения определяется по двум формулам:

$$\Theta_1 = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |v_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \text{ и}$$

$$\Theta_2 = \pm 0,8\sigma.$$

Если вычисленные значения Θ_1 и Θ_2 значительно отличаются друг от друга (конкретное отличие определяется нормативом), то в данном ряде измерений предполагается наличие систематической погрешности.

Пример обработки результатов измерений

Измерить индуктивность силового реактора высокочастотного заградителя ВЗ-630-0,5 У1 и путём обработки полученных данных, определить её значение.

Был произведен ряд замеров индуктивности соленоида высокочастотного заградителя ВЗ-630-0,5 У1 производства Пятигорского опытного завода НПО «Энергоавтоматика» зав.№57.

Измерения проводились «Измерителем импеданса Е7-15», зав.№17, гос. поверка ФГУ «Пятигорский ЦСМ», 5 ноября 2013 г.

Замеры дали следующие результаты, [мГн]:

0,54721;
 0,54734;
 0,54757;
 0,54718;
 0,54723;
 0,54724;
 0,54739;
 0,54722;
 0,54717;
 0,54724;
 0,54749;
 0,54709;
 0,54712;
 0,54716;
 0,54729.

2.1. Обработка результатов измерений.

2.1.1. Определяем среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{0,54721 + 0,54734 + 0,54757 + 0,54718 + 0,54723 + 0,54724 + 0,54739 + 0,54722 + 0,54717 + 0,54724 + 0,54749 + 0,54709 + 0,54712 + 0,54716 + 0,54729}{15} = 0,54726$$

2.1.2. Определяем $a_i - \bar{A}$; $(a_i - \bar{A})^2$ и результаты сводим в таблицу:

№№ измерения	a_i	$a_i - \bar{A}$	$(a_i - \bar{A})^2$
1.	0,54721	-0,00005	$0,25 \cdot 10^{-8}$
2.	0,54734	+0,00008	$0,64 \cdot 10^{-8}$
3.	0,54757	+0,00031	$9,61 \cdot 10^{-8}$
4.	0,54718	-0,00008	$0,64 \cdot 10^{-8}$

5.	0,54723	-0,00003	$0,09 \cdot 10^{-8}$
6.	0,54724	-0,00002	$0,04 \cdot 10^{-8}$
7.	0,54739	+0,00013	$1,69 \cdot 10^{-8}$
8.	0,54722	-0,00004	$0,16 \cdot 10^{-8}$
9.	0,54717	-0,00009	$0,81 \cdot 10^{-8}$
10.	0,54724	-0,00002	$0,04 \cdot 10^{-8}$
11.	0,54749	+0,00023	$5,29 \cdot 10^{-8}$
12.	0,54709	-0,00017	$2,89 \cdot 10^{-8}$
13.	0,54712	-0,00014	$1,96 \cdot 10^{-8}$
14.	0,54716	-0,00010	$1,00 \cdot 10^{-8}$
15.	0,54719	-0,00007	$0,49 \cdot 10^{-8}$
	$\sum_{i=1}^{15} v_i = \sum_{i=1}^{15} a_i - \bar{A} $	$15,6 \cdot 10^{-4}$	
	$\sum_{i=1}^{15} v_i^2 = \sum (a_i - A)^2$		$25,6 \cdot 10^{-8}$

3.1.3. Определяем среднеквадратическую погрешность измерения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{A})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{25,6 \cdot 10^{-8}}{15-1}} = 1,8 \cdot 10^{-4} = 0,00018$$

2.1.4. Определяем наличие промаха в данном ряду:

$$M = \pm 3\sigma = \pm 0,00054$$

Промеха в проведенных измерениях нет.

2.1.5. Определяем среднеарифметическую погрешность отдельного измерения:

$$\Theta_1 = \pm 0,8\sigma = \pm 0,00014$$

$$\Theta_2 = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |a_i - \bar{A}|}{\sqrt{n(n-1)}} = \pm 0,00011$$

Разница между Θ_1 и Θ_2 указывает на наличие небольшой систематической погрешности.

2.1.6. Определяем суммарную возможную ошибку среднего арифметического:

$$M_{\bar{A}} = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{A})^2}{n \cdot (n-1)}} = \pm 0,00011$$

2.1.7. Определяем вероятностную погрешность одного измерения:

$$\rho_{\bar{A}} = \pm \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (a_i - \bar{A})^2}{n \cdot (n-1)}} = \pm 0,00002$$

Таким образом, индуктивность реактора высокочастотного заградителя:

$$L = 0,54726 \pm 0,00002 \text{ мГн}$$

и вероятно не будет превышать:

$$L = 0,54726 \pm 0,00011 \text{ мГн}$$

$$L = 0,54726 \pm 0,00011 \text{ [мГн]}.$$

Раздел 1.2.

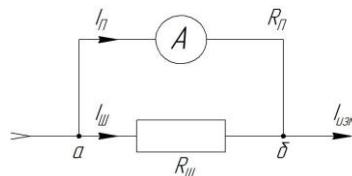
Измерительные преобразователи и аналоговые электрохимические измерительные приборы

Тема 1.2.1.

2. Расчёт масштабных преобразователей

2.1. Для измерения больших токов применяют т.н. масштабные преобразователи (шунты), сопротивление которых должно быть значительно меньше сопротивления прибора.

Шунт конструктивно имеет токовые контакты, которыми он включается в разрыв исследуемой цепи и потенциометрические контакты, к которым подключается измерительный прибор (амперметр)



Так как $I_{\pi} R_{\pi} = I_{ш} R_{ш}$, а $I_{ш} = I_{изм} - I_{\pi}$, то $I_A \cdot R_A = (I_{изм} - I_{\pi}) \cdot R_{ш}$; откуда:

$$R_{ш} = \frac{I_A \cdot R_A}{I_{изм} - I_{\pi}}.$$

Пример расчёта шунта для амперметра магнитоэлектрической системы

Имеем:

-амперметр магнитоэлектрической системы с пределом измерения 50μА;

-сопротивление рамки прибора 5 Ом.

Необходимо:

-рассчитать сопротивление шунта для измерения тока с пределом 5 А,

-разработать конструкцию шунта,

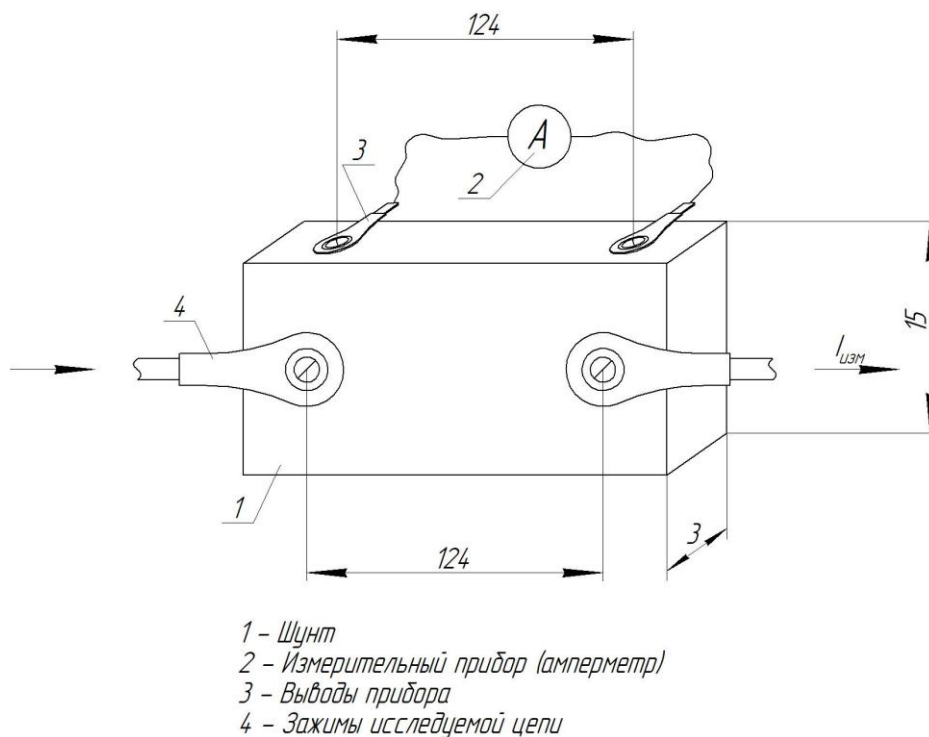
-переградуировать шкалу прибора.

$$R = \frac{I_{\pi} \cdot R_{\pi}}{I_{изм} - I_{\pi}} = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{5 - 50 \cdot 10^{-6}} = 5 \cdot 10^{-5} [\text{Ом}].$$

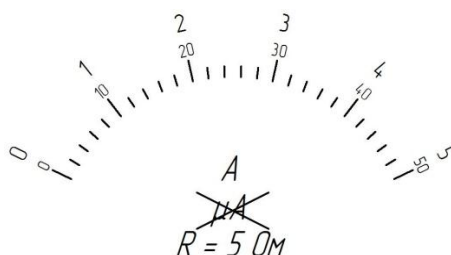
Конструктивно шунт можно выполнить из калиброванной медной шины 15х3 мм, удельное сопротивление которой

$$\rho_{Cu} = 0,0182 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}.$$

$$\text{Определим её длину. Т.к. } R = \rho \frac{l}{s}, \text{ то } l = \frac{R \cdot s}{\rho} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot 3}{0,0182} = 0,124 [\text{м}] = 124 \text{ мм}.$$



Шкала электроизмерительного прибора после переградуировки должна выглядеть следующим образом:



2.2 Для измерения напряжения последовательно с рамкой измерительного прибора необходимо включить добавочное сопротивление, рассчитанное таким образом, чтобы ток через него и рамку измерительного прибора не превышал предела измерения, указанного на шкале.

Если необходимо изготовить многопредельный вольтметр, то количество добавочных сопротивлений должно соответствовать числу пределов измерений.

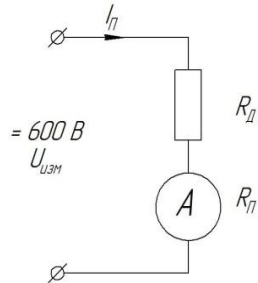
Пример расчета добавочного сопротивления для вольтметра магнитоэлектрической системы.

Имеем:

- амперметр магнитоэлектрической системы с пределом измерения ($50 \mu\text{A}$);
- сопротивление рамки прибора 5 Ом .

Необходимо:

- рассчитать добавочные сопротивления для измерения напряжения постоянного тока с пределами 60В, 150В, 300В, 600В;
- представить схему измерительного прибора;
- проградуировать шкалу.



Ток через соединенные последовательно R_d и амперметр при приложении к ним максимального напряжения не должен превышать 50 мкА. Следовательно

$$(R_d + R_{\Pi}) \cdot I_{\Pi} = U_{изм}, \text{откуда}$$

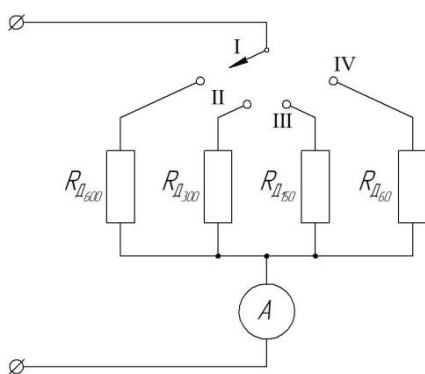
$$R_d = \frac{U_{изм} - I_{\Pi} \cdot R_{\Pi}}{I_{\Pi}}$$

$$R_{d_{600}} = \frac{600 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{50 \cdot 10^{-6}} = 12000000 [Ом] = 12 МОм,$$

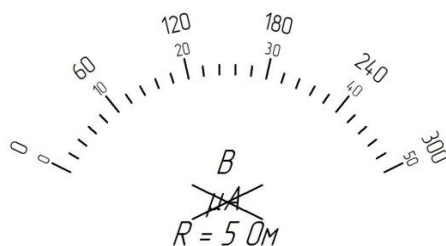
$$R_{d_{300}} = \frac{300 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{50 \cdot 10^{-6}} = 6000000 [Ом] = 6 МОм$$

$$R_{d_{150}} = \frac{150 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{50 \cdot 10^{-6}} = 3000000 [Ом] = 3 МОм,$$

$$R_{d_{60}} = \frac{60 - 50 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{50 \cdot 10^{-6}} = 1200000 [Ом] = 1,2 МОм.$$



Шкала электроизмерительного прибора после переградуировки должна выглядеть следующим образом:



Если переключатель прибора установлен в положение «I» (диапазон измеряемого напряжения 0...600 В), то показания прибора следует удвоить.

Если переключатель прибора установлен в положение «II» (диапазон измеряемого напряжения 0...300 В), то показания прибора соответствуют измеряемому напряжению.

Если переключатель прибора установлен в положение «III» (диапазон измеряемого напряжения 0...150 В), то показания прибора следует разделить на 2.

Если переключатель прибора установлен в положение «IV» (диапазон измеряемого напряжения 0...60 В), то показания прибора следует разделить на 5.

Раздел 1.2.

Измерительные преобразователи и аналоговые электромеханические измерительные приборы

Тема 1.2.2.

3. Измерение активной мощности в трехфазных цепях.

Как известно, активная мощность трехфазной системы определяется выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P_i dt = U_{A\phi} \cdot I_{A\phi} \cdot \cos \varphi_A + U_{B\phi} \cdot I_{B\phi} \cdot \cos \varphi_B + U_{C\phi} \cdot I_{C\phi} \cdot \cos \varphi_C, [3.1]$$

Это выражение и определяет в практическом плане схемы включения ваттметров в трехфазную систему для измерения ее активной мощности.

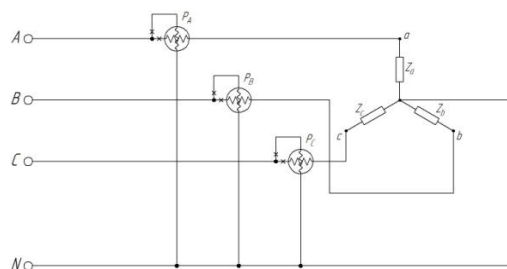


Рис.3.1. Схема измерения активной мощности трёхфазной системы тремя ваттметрами.

В несимметричной трехфазной системе с нулевым проводом активная мощность может быть измерена тремя ваттметрами, включенную в каждую фазу по схеме Рис. 3.1. При этом

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3 = I_A \cdot U_A \cdot \cos \varphi_A + I_B \cdot U_B \cdot \cos \varphi_B + I_C \cdot U_C \cdot \cos \varphi_C, \quad [3.2]$$

т.е. формула [3.2] соответствует базовой [3.1]

В несимметричной трехфазной системе без нулевого провода активная мощность может быть измерена и двумя ваттметрами, причем независимо от схемы соединения нагрузки.

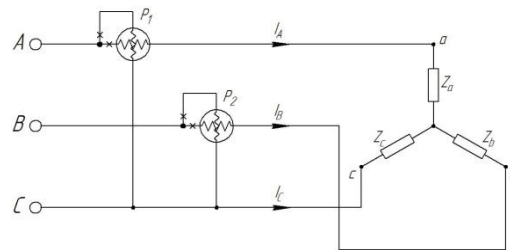


Рис.3.2. Схема измерения активной мощности трёхфазной системы при соединении нагрузки «звездой» двумя ваттметрами.

Так при соединении нагрузки «звездой»

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 = I_A \cdot U_{AC} + I_B \cdot U_{BC} = I_A(U_A - U_C) + I_B(U_B - U_C) = I_A \cdot U_A + I_B \cdot U_B + U_C(-I_A - I_B), \quad [3.3]$$

Согласно первому закону Кирхгофа,

$$I_A + I_B + I_C = 0, \text{ откуда}$$

$$I_C = -I_A - I_B$$

и формула [3.3] принимает вид

$$P_{3\phi} = I_A \cdot U_A + I_B \cdot U_B + I_C \cdot U_C, \quad [3.4]$$

Если нагрузка не чисто активная, то активная мощность, измеренная двумя ваттметрами может быть представлена формулой

$$P_{3\phi\lambda} = I_A \cdot U_A \cdot \cos \varphi_A + I_B \cdot U_B \cdot \cos \varphi_B + I_C \cdot U_C \cdot \cos \varphi_C, \quad [3.5]$$

При этом формула [3.5] также соответствует формуле [3.1]

При соединении нагрузки «треугольником»

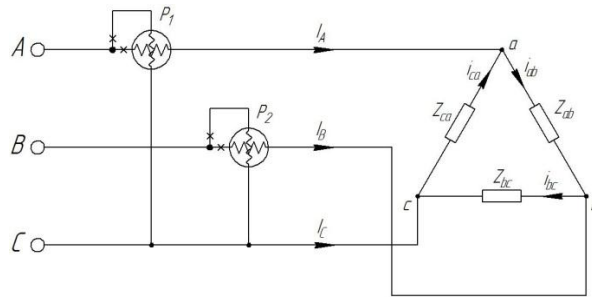


Рис.3.3. Схема измерения активной мощности трёхфазной системы при соединении нагрузки «треугольником» двумя ваттметрами.

$$\begin{aligned}
 P_{3\phi} &= U_{AB} \cdot i_{ab} + U_{BC} \cdot i_{bc} + U_{CA} \cdot i_{ca} = (U_A - U_B) \cdot i_{ab} + (U_B - U_C) \cdot i_{bc} + (U_C - U_A) \cdot i_{ca} = \\
 &= U_A \cdot i_{ab} - U_B \cdot i_{bc} + U_B \cdot i_{bc} - U_C \cdot i_{bc} + U_C \cdot i_{ca} - U_A \cdot i_{ca} = \\
 &= U_A \cdot (i_{ab} - i_{ca}) + U_B \cdot (i_{bc} - i_{ab}) + U_C \cdot (i_{ca} - i_{bc}), \quad [3.6] \\
 &\text{но согласно первому закону Кирхгофа,}
 \end{aligned}$$

$$i_{ab} - i_{ca} = I_A,$$

$$i_{bc} - i_{ab} = I_B,$$

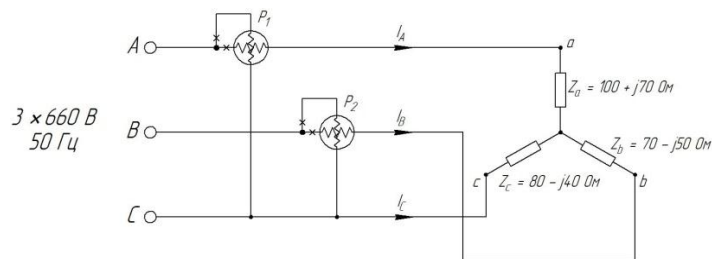
$$i_{ca} - i_{bc} = I_C$$

и даже в случае комплексной нагрузки формула [3.6] принимает вид

$$P_{3\phi\Delta} = I_A \cdot U_A \cdot \cos \varphi_A + I_B \cdot U_B \cdot \cos \varphi_B + I_C \cdot U_C \cdot \cos \varphi_C, \quad [3.7]$$

Таким образом, и формула [3.7] соответствует формуле [3.1].

Пример расчета активной мощности трехфазной системы при соединении нагрузки «звездой», измеренной двумя ваттметрами.



$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 = \operatorname{Re} \left[\hat{I}_A \cdot \dot{U}_{AC} \right] + \operatorname{Re} \left[\hat{I}_B \cdot \dot{U}_{BC} \right]$$

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C}$$

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_{00'}$$

$$\dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_{00'}$$

$$\dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_{00'}$$

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$\dot{E}_A = 660 \cdot e^{j0^\circ} \text{ B,}$$

$$\dot{E}_B = 660 \cdot e^{j120^\circ} \text{ B,}$$

$$\dot{E}_C = 660 \cdot e^{j240^\circ} \text{ B.}$$

$$Z_a = 100 + j70 = 122,0655 \cdot e^{j34,99^\circ} \text{ Ом,}$$

$$Z_b = 70 - j50 = 86,0233 \cdot e^{-j35,34^\circ} \text{ Ом,}$$

$$Z_c = 80 - j40 = 89,4427 \cdot e^{-j26,57^\circ} \text{ Ом.}$$

$$Y_a = \frac{1}{Z_a} = \frac{1}{122,0655 \cdot e^{j34,99^\circ}} = 0,00819 \cdot e^{-j34,99^\circ} = 0,00671 - j0,00469 \text{ [CM],}$$

$$Y_b = \frac{1}{Z_b} = \frac{1}{86,0233 \cdot e^{-j35,34^\circ}} = 0,01162 \cdot e^{j35,34^\circ} = 0,00945 + j0,00675 \text{ [CM],}$$

$$Y_c = \frac{1}{Z_c} = \frac{1}{89,4427 \cdot e^{-j26,57^\circ}} = 0,01118 \cdot e^{j26,57^\circ} = 0,01000 + j0,00500 \text{ [CM],}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{00'} &= \frac{660 \cdot e^{j0^\circ} \cdot 0,00819 \cdot e^{-j34,99^\circ} + 660 \cdot e^{j120^\circ} \cdot 0,01162 \cdot e^{-j35,34^\circ} + 660 \cdot e^{j240^\circ} \cdot 0,01118 \cdot e^{j26,57^\circ}}{0,00671 - j0,00469 + 0,00945 + j0,00675 + 0,01 + j0,005} = \\ &= \frac{5,4054 \cdot e^{-j34,99^\circ} + 7,6692 \cdot e^{j155,54^\circ} + 7,3788 \cdot e^{j266,57^\circ}}{0,02616 + j0,00706} = \\ &= \frac{4,4284 - j3,0996 - 6,9809 + j3,1755 - 0,4415 - j7,3657}{0,02616 + j0,00706} = \\ &= \frac{-2,994 - j7,2898}{0,02616 + j0,00706} = \frac{7,8807 \cdot e^{j246,67^\circ}}{0,0271 \cdot e^{j15,10^\circ}} = \\ &= 290,8007 \cdot e^{j231,57^\circ} = -180,7495 - j227,804[B]. \end{aligned}$$

$$\dot{U}_a = 660 - j0 - (-180,7495 - j227,804) = 840,7495 + j227,804 = 871,0651 \cdot e^{j15,16^\circ} [B],$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_b &= -330 + j571,5768 - (-180,7495 - j227,804) = \\ &= -149,2505 + j799,3808 = 813,1945 \cdot e^{j100,58^\circ} [B],\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_c &= -330 - j571,5768 - (-180,7495 - j227,804) = \\ &= -149,2505 - j343,7728 = 374,7739 \cdot e^{j246,53^\circ} [B].\end{aligned}$$

$$\dot{I}_a = \frac{871,0651 \cdot e^{j15,16^\circ}}{122,0655 \cdot e^{j34,99^\circ}} = 7,136 \cdot e^{-j19,83^\circ} = 6,7129 - j2,4207 [A],$$

$$\dot{I}_b = \frac{813,1945 \cdot e^{j100,58^\circ}}{86,0233 \cdot e^{-j35,54^\circ}} = 9,453 \cdot e^{j136,12^\circ} = -6,8137 + j6,5523 [A]$$

$$\dot{I}_c = \frac{374,7739 \cdot e^{j246,53^\circ}}{89,4427 \cdot e^{-j26,57^\circ}} = 4,1901 \cdot e^{j273,10^\circ} = 0,2264 - j4,1840 [A]$$

$$P_1 = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \cdot 7,136 \cdot e^{j19,83^\circ}] = \operatorname{Re}[8157,544 \cdot e^{j49,83^\circ}] = 5262,086 [Bm]$$

$$P_2 = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 9,453 \cdot e^{-j136,12^\circ}] = \operatorname{Re}[10806,230 \cdot e^{-j46,12^\circ}] = 7490,341 [Bm]$$

$$P_{3\phi} = 12752,427 [Bm]$$

Проверку расчета произведем по формуле [3.1.]

$$P_1 = \operatorname{Re}[871,0651 \cdot e^{j15,16^\circ} \cdot 7,136 \cdot e^{j19,83^\circ}] = \operatorname{Re}[6215,92055 \cdot e^{j34,99^\circ}] = 5092,406 [Bm]$$

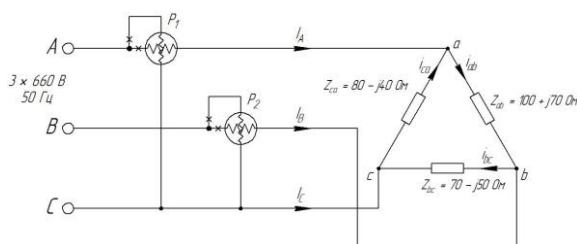
$$P_2 = \operatorname{Re}[813,1945 \cdot e^{j100,58^\circ} \cdot 9,453 \cdot e^{-j136,12^\circ}] = \operatorname{Re}[7687,128 \cdot e^{-j35,54^\circ}] = 6255,092 [Bm]$$

$$P_3 = \operatorname{Re}[374,7739 \cdot e^{j246,53^\circ} \cdot 4,1901 \cdot e^{-j273,1^\circ}] = \operatorname{Re}[1570 \cdot e^{-j26,57^\circ}] = 1404,190 [Bm]$$

$$P'_{3\phi} = 12751,688 [Bm]$$

$$P_{3\phi} \approx P'_{3\phi}$$

Пример расчета активной мощности трехфазной системы при соединении нагрузки «Треугольником», измеренной двумя ваттметрами.



$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 = \operatorname{Re}[\dot{I}_A \cdot \dot{U}_{AB}] + \operatorname{Re}[\dot{I}_B \cdot \dot{U}_{BC}]$$

$$\dot{I}_A = i_{ab} - i_{ca},$$

$$\dot{I}_B = i_{bc} - i_{ab},$$

$$\dot{I}_C = i_{ca} - i_{bc};$$

$$i_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{ab}} = \frac{660 \cdot e^{-j30^\circ} \cdot \sqrt{3}}{122,0655 \cdot e^{j34,99^\circ}} = 9,365 \cdot e^{-j64,99^\circ} = 3,959 - j8,487 [A]$$

$$i_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}} = \frac{660 \cdot e^{j90^\circ} \cdot \sqrt{3}}{86,0233 \cdot e^{-j35,54^\circ}} = 13,289 \cdot e^{j125,289^\circ} = -7,724 + j10,813 [A]$$

$$i_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{ca}} = \frac{660 \cdot e^{j210^\circ} \cdot \sqrt{3}}{89,4427 \cdot e^{-j26,57^\circ}} = 12,781 \cdot e^{j236,57^\circ} = -7,041 - j10,667 [A]$$

$$\dot{I}_A = 3,959 - j8,487 - (-7,041 - j10,667) = 11,000 + j2,180 = 11,214 \cdot e^{j11,21^\circ} [A]$$

$$\dot{I}_B = -7,724 + j10,813 - (3,959 - j8,487) = 11,683 + j19,3 = 22,561 \cdot e^{j121,19^\circ} [A]$$

$$\dot{I}_C = -7,041 - j10,667 - (-7,724 + j10,813) = 0,683 - j21,48 = 21,491 \cdot e^{-j88,18^\circ} [A]$$

$$P_1 = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \cdot 11,214 \cdot e^{-j11,21^\circ}] = \operatorname{Re}[12819,324 \cdot e^{j18,79^\circ}] = 12136,124 [Bm]$$

$$P_2 = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 22,561 \cdot e^{-j121,19^\circ}] = \operatorname{Re}[25790,687 \cdot e^{-j31,19^\circ}] = 22062,763 [Bm]$$

$$P_{3\phi} = 34198,887 [Bm]$$

Проверку расчета произведем по формуле [3.1.]

$$P_1 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{ab} \cdot \dot{i}_{ab}] = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j30^\circ} \cdot 9,365 \cdot e^{j64,99^\circ}] = \operatorname{Re}[10705,633 \cdot e^{j34,99^\circ}] = 8770,613 [Bm],$$

$$P_2 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{bc} \cdot \dot{i}_{bc}] = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 13,289 \cdot e^{-j125,54^\circ}] = \operatorname{Re}[15191,367 \cdot e^{-j35,54^\circ}] = 12361,366 [Bm],$$

$$P_3 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{ca} \cdot \dot{i}_{ca}] = \operatorname{Re}[660 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j210^\circ} \cdot 12,781 \cdot e^{-j236,57^\circ}] = \operatorname{Re}[14610,645 \cdot e^{-j26,57^\circ}] = 13067,594 [Bm],$$

$$P_{3\phi} = 34199,573 [Bm].$$

Таким образом $P_{3\phi_\Delta} \approx P_{3\phi}$

Раздел 1.2.

Измерительные преобразователи и аналоговые электромеханические измерительные приборы

Тема 1.2.2.

4. Измерение реактивной мощности в трехфазных цепях.

Несмотря на то, что реактивная мощность не определяет ни совершаемой работы, ни передаваемой энергии за единицу времени, измерение её имеет большое значение в электроэнергетике, т.к. наличие реактивной мощности приводит к дополнительным потерям электрической энергии в линиях электропередач, трансформаторах и генераторах.

Как известно, под реактивной мощностью трехфазной системы понимается:

$$Q_{3\phi} = U_{A\phi} \cdot I_{A\phi} \cdot \sin \varphi_A + U_{B\phi} \cdot \sin \varphi_B + U_{C\phi} \cdot I_{C\phi} \cdot \sin \varphi_C [4.1].$$

Реактивная мощность трехфазной системы может быть измерена двумя ваттметрами активной мощности по схеме:

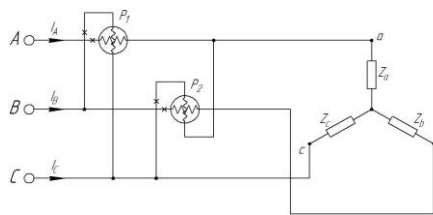


Рис. 4.1. Схема измерения реактивной мощности трехфазной системы двумя ваттметрами активной мощности.

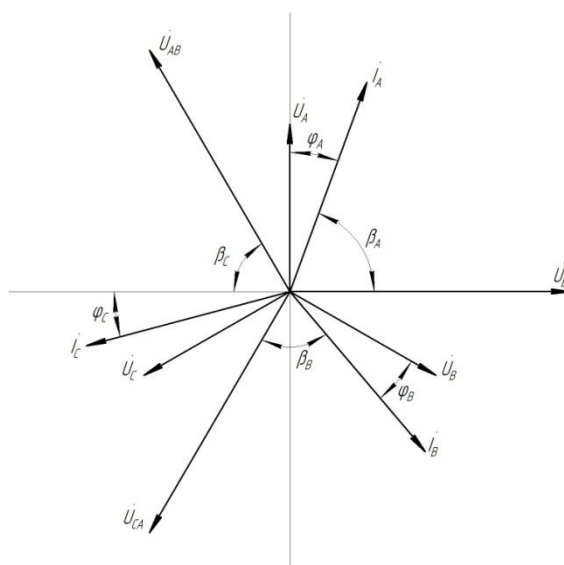


Рис. 4.2. Векторная диаграмма токов и напряжений для схемы Рис.4.1.

Следует оговориться, что измерения по данной схеме дают приемлемый результат лишь при симметричной нагрузке и при небольшой асимметрии. Поэтому полагаем, что $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$ и соответственно $\beta_A = \beta_B = \beta_C$, где $\beta = 90^\circ - \varphi$. Тогда :

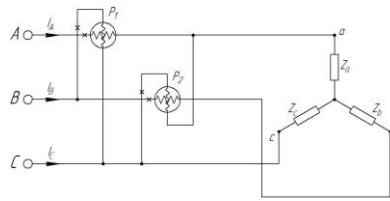
$$P_1 + P_2 = U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos \beta_A + U_{CA} \cdot I_B \cdot \cos \beta_A$$

С учетом вышеизложенного

$$P_1 + P_2 = U_L \cdot I_L \cdot \cos(90^\circ - \varphi) + U_L \cdot I_L \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = 2 \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$

Для получения реактивной мощности трехфазной системы сумму показаний двух ваттметров нужно умножить на $\sqrt{3} / 2$

Пример расчета реактивной мощности трехфазной системы измеренной двумя ваттметрами активной мощности.



Дано:

$$\dot{U}_A = 127 \cdot e^{j0^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_B = 127 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_C = 127 \cdot e^{j240^\circ} \text{ В}.$$

$$Z_a = Z_b = Z_c = 8 - j12 \text{ [Ом]}$$

Определить реактивную мощность трёхфазной системы по показаниям двух ваттметров активной мощности и сравнить её с реактивной мощностью, рассчитанной классическим методом.

$$Q_{3\phi} = \text{Im}[\dot{U}_a \cdot \dot{I}_a] + \text{Im}[\dot{U}_b \cdot \dot{I}_b] + \text{Im}[\dot{U}_c \cdot \dot{I}_c]$$

Т.к. система симметрична, то $\dot{U}_{oo'} = 0$ и

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A,$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B,$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_c.$$

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}, \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}$$

$$Z_a = Z_b = Z_c = 8 - j12 = 14,422 \cdot e^{-j56,31^\circ} [Ом].$$

$$\dot{I}_a = \frac{127 \cdot e^{j0^\circ}}{14,422 \cdot e^{-j56,31^\circ}} = 8,806 \cdot e^{j56,31^\circ} [A],$$

$$\dot{I}_b = \frac{127 \cdot e^{j120^\circ}}{14,422 \cdot e^{-j56,31^\circ}} = 8,806 \cdot e^{j176,31^\circ} [A],$$

$$\dot{I}_c = \frac{127 \cdot e^{j240^\circ}}{14,422 \cdot e^{-j56,31^\circ}} = 8,806 \cdot e^{j296,31^\circ} [A],$$

$$Q_{3\phi} = \text{Im}[127 \cdot e^{j0^\circ} \cdot 8,806 \cdot e^{-j56,31^\circ}] + \text{Im}[127 \cdot e^{j120^\circ} \cdot 8,806 \cdot e^{-j176,31^\circ}] + \text{Im}[127 \cdot e^{j240^\circ} \cdot 8,806 \cdot e^{-j296,31^\circ}] = \\ = 3 \cdot \text{Im}[1118,362 \cdot e^{-j56,31^\circ}] = -2791,602 [B \cdot Ap].$$

Показания ваттметров активной мощности P_1 и P_2 могут быть рассчитаны по формулам:

$$P_1 = \text{Re}[\dot{U}_{BC} * \dot{I}_A], \quad P_2 = \text{Re}[\dot{U}_{CA} * \dot{I}_B]$$

И, хотя в расчетах мы берем реальную часть полной мощности, но, как это было доказано в преамбуле раздела 4, ваттметр активной мощности в силу особенности его включения в трехфазную схему, показывает реактивную мощность.

$$P_1 = \text{Re}[220 * e^{j90^\circ} * 8,806 * e^{-j56,31^\circ}] = \text{Re}[1937,32 * e^{j33,69^\circ}] = 1611,949 [B * Ap]$$

$$P_2 = \text{Re}[220 * e^{j210^\circ} * 8,806 * e^{-j176,31^\circ}] = \text{Re}[1937,32 * e^{j33,69^\circ}] = 1611,949 [B * Ap]$$

Т.о. реактивная мощность трехфазной системы, измеренная двумя ваттметрами активной мощности составит:

$$Q_{3\phi_p} = \frac{\sqrt{3}}{2} (1611,949 + 1611,949) = 2791,977 [B \cdot Ap],$$

что соответствует значению, рассчитанному классическим методом.

Раздел 1.2.

Измерительные преобразователи и аналоговые электрохимические измерительные приборы

Тема 1.2.3.

Потенциометры и измерительные мосты

5. Расчет мостовых схем.

Мостовые схемы широко применяются в электроизмерительной технике для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности катушек, угла потерь конденсаторов, взаимной индуктивности и частоты.

На основе мостовых схем создаются приборы для измерения неэлектрических величин (температуры, малых перемещений, и т.д.)

Схема одинарного моста переменного тока приведена на Рис. 5.1.

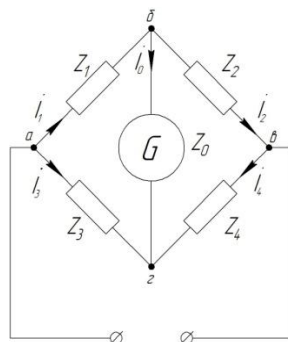


Рис. 5.1. Схема одинарного моста переменного тока.

В диагональ б-г, называемую выходной, включается нагрузка (гальванометр или, в общем случае, нуль-индикатор) с сопротивлением Z_0

Расчет тока в выходной диагонали моста.

Ток в диагонали моста наиболее рационально можно рассчитать методом эквивалентного генератора.

$$\dot{I}_{бз} = \frac{\dot{U}_{бзхх}}{Z_{вх} + Z_0}$$

Для определения $U_{бзхх}$ мысленно «разрываем» диагональ моста и производим расчет по схеме Рис. 5.2.

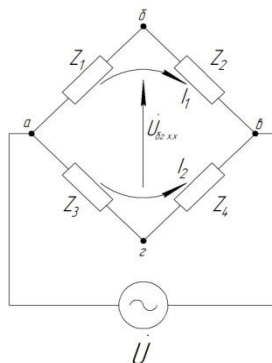


Рис. 5.2. Схема моста для расчета $U_{бзхх}$

Согласно второго закона Кирхгофа

$$-\dot{U}_{\delta z, x, x} - \dot{I}_2 \cdot Z_3 + \dot{I}_1 \cdot Z_1 = 0.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\delta z, x, x} &= \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{I}_2 \cdot Z_3 = \dot{U} \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) = \dot{U} \cdot \left[\frac{Z_1 \cdot Z_3 + Z_1 \cdot Z_4 - Z_1 \cdot Z_3 - Z_2 \cdot Z_3}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4)} \right] = \\ &= \dot{U} \cdot \left[\frac{Z_1 \cdot Z_4 - Z_2 \cdot Z_3}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4)} \right] \end{aligned}$$

Входное сопротивление моста при замкнутых ЭДС рассчитывается по схеме Рис. 5.3.

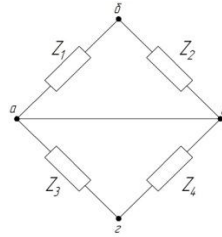


Рис. 5.3. Схема электрическая принципиальная для расчёта входного сопротивления моста.

$$Z_{\text{вх}} = Z_{\delta c} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} = \frac{(Z_1 \cdot Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4) + (Z_3 \cdot Z_4) \cdot (Z_1 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)},$$

$$Z_{\text{вх}} + Z_0 = \frac{Z_0(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4) + (Z_1 \cdot Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4) + (Z_3 \cdot Z_4) \cdot (Z_1 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4)}.$$

Таким образом:

$$\dot{I}_0 = \dot{U} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_4 - Z_2 \cdot Z_3}{Z_0 \cdot (Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4) + (Z_1 \cdot Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4) + (Z_3 \cdot Z_4) \cdot (Z_1 + Z_2)}$$

Равновесие моста имеет место при подборе плеч таким образом, чтобы $\dot{I}_0 = 0$, а это возможно лишь при

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

Т.к. $Z_1 = R_1 + jX_1$, $Z_2 = R_2 + jX_2$, $Z_3 = R_3 + jX_3$, $Z_4 = R_4 + jX_4$, то, подставив выражения комплексных сопротивлений в уравнение равновесия моста, получим два равенства мнимых и вещественных членов:

$$R_1 \cdot R_4 - X_1 \cdot X_4 = R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_3,$$

$$R_1 \cdot jX_4 + R_4 \cdot jX_1 = R_2 \cdot jX_3 + R_3 \cdot jX_2.$$

Наличие двух уравнений равновесия свидетельствует о необходимости регулирования не менее двух параметров моста переменного тока для достижения его равновесия.

Комплексные сопротивления плеч моста могут быть представлены и в показательной форме:

$$Z_1 = z_1 \cdot e^{j\varphi_1}, \quad Z_2 = z_2 \cdot e^{j\varphi_2}, \quad Z_3 = z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \quad Z_4 = z_4 \cdot e^{j\varphi_4},$$

Тогда равновесие моста возможно при

$$z_1 \cdot z_4 \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 \cdot z_3 \cdot e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)},$$

Или

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3,$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Последнее условие $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ указывает при каком расположении плеч, в зависимости от их характера, можно уравновесить мост. Если смежные плечи, например третье и четвертое, имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 , т.е. $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$ то два других смежных плеча (первое и второе) должны иметь одно индуктивный, а другое ёмкостный характер. Если противоположные плечи имеют чисто активный характер, то одно из двух противоположных должно иметь индуктивный характер, а другое - ёмкостный.

Эти требования и определяют различные схемы для измерения физических величин, перечень которых был указан в начале раздела.

5.1. Схема моста переменного тока для измерения ёмкости конденсатора, обладающего малыми потерями

$$Z_1 = R_x + j \frac{1}{\omega C_x},$$

$$Z_2 = R_1,$$

$$Z_3 = R_n + j \frac{1}{\omega C_n}$$

$$Z_4 = R_2,$$

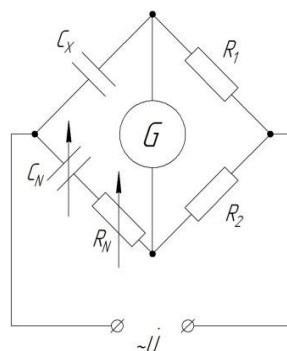


Рис. 5.4. Схема электрическая принципиальная моста переменного тока для измерения ёмкости конденсатора, обладающего малыми потерями.

Условие равновесия моста

$$(R_x + j \frac{1}{\omega C_x}) \cdot R_2 = (R_N + j \frac{1}{\omega C_N}) \cdot R_1$$

Или

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_1}{R_2}, C_x = C_N \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$\operatorname{tg} \Delta = \omega \cdot R_x \cdot C_x = \omega \cdot R_N \cdot C_N$$

5.2. Схема моста переменного тока для измерения ёмкости конденсатора, обладающего большими потерями

$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_x},$$

$$Z_2 = R_1,$$

$$Z_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_N},$$

$$Z_4 = R_2,$$

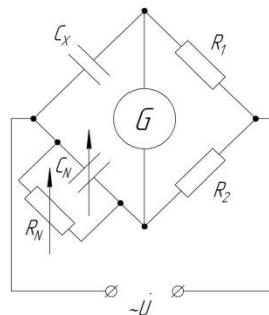


Рис. 5.5. Схема электрическая принципиальная моста переменного тока для измерения ёмкости конденсатора, обладающего большими потерями.

$$\frac{R_2}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_x} = \frac{R_L}{\frac{1}{R_x} + j \omega C_N}$$

или

$$R_X = R_N \frac{R_1}{R_2}, \quad C_X = C_N \frac{R_2}{R_1}.$$

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{1}{\omega \cdot R_N \cdot C_N} = \frac{1}{\omega \cdot R_X \cdot C_X}$$

5.3. Схема моста переменного тока для определения потерь в диэлектрике (например в кабелях высокого напряжения)

$$Z_1 = R_X + j \frac{1}{\omega C_X}$$

$$Z_2 = R_1,$$

$$Z_3 = j \frac{1}{\omega C_N},$$

$$Z_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}$$

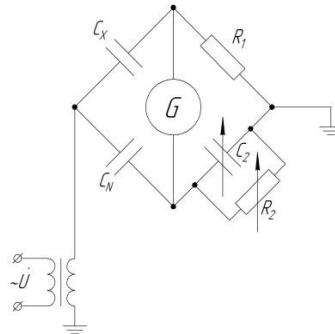


Рис. 5.6. Схема электрическая принципиальная моста переменного тока для измерения потерь в диэлектрике.

Условия равновесия моста

$$\frac{R_X + \frac{1}{j\omega C_X}}{R_1} = \frac{1}{j\omega C_N} \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right)$$

Или

$$R_X = R_1 \frac{C_2}{C_N}, \quad C_X = C_N \frac{R_2}{R_1},$$

$$\operatorname{tg} \Delta = \omega \cdot C_X \cdot R_X$$

5.4. Схемы мостов переменного тока для измерения индуктивности катушек с малым активным сопротивлением $R_x \ll R_N$ и большим активным сопротивлением $R_x \gg R_N$.

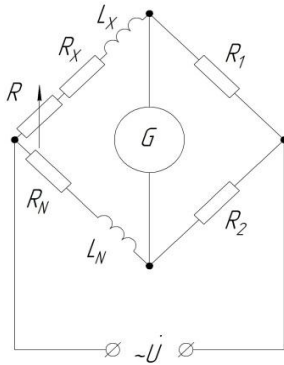


Рис.5.7. Схема электрическая моста переменного тока для измерения индуктивности катушек с малым активным сопротивлением $R_x \ll R_N$.

$$Z_1 = R + R_x + j\omega L_x,$$

$$Z_2 = R_1,$$

$$Z_3 = R_N + j\omega L_N,$$

$$Z_4 = R_2,$$

Условие равновесия моста:

$$(R + R_x + j\omega L_x) \cdot R_2 = (R_N + j\omega L_N) \cdot R_1,$$

Или

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} - R; \quad L_x = L_N \frac{R_1}{R_2}$$

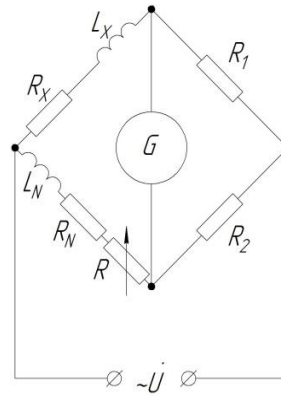


Рис.5.8. Схема электрическая принципиальная моста переменного тока для измерения индуктивности катушек с большим активным сопротивлением $R_x \gg R_N$.

$$Z_1 = R_x + j\omega L_x,$$

$$Z_2 = R_1,$$

$$Z_3 = R + R_N + j\omega L_N,$$

$$Z_4 = R_2,$$

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot R_2 = (R + R_N + j\omega L_N) \cdot R_1,$$

$$R_x = (R_N + R) \frac{R_1}{R_2}, \quad L_x = L_N \frac{R_1}{R_2}.$$

5.5. Схема моста переменного тока для определения индуктивности и добротности катушки с использованием образцового конденсатора.

$$Z_1 = R_x + j\omega L_x,$$

$$Z_2 = R_1,$$

$$Z_3 = R_2,$$

$$Z_4 = \frac{R}{1 + j\omega C}.$$

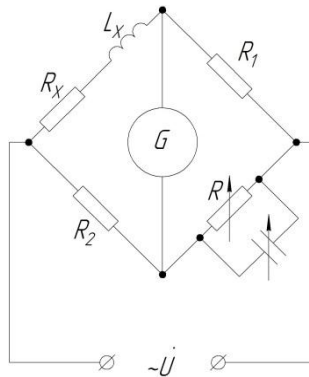


Рис.5.9. Схема электрическая принципиальная моста переменного тока для измерения индуктивности и добротности катушки с помощью образцового конденсатора.

Условие равновесия моста:

$$\frac{(R_x + j\omega L_x) \cdot R}{1 + j\omega CR} = R_1 \cdot R_2$$

Или

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R}; L_x = C \cdot R_1 \cdot R_2.$$

По полученным значениям R_x и L_x или C и R определяем добротность катушки:

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega \cdot C \cdot R.$$

На основании вышеизложенного перед непосредственным измерением следует произвести предварительные расчёты ожидаемых значений элементов моста переменного тока.

Подставив значения физических величин, не составит труда с помощью простых алгебраических действий получить результат.

Раздел 1.4.

Электрические измерения неэлектрических величин

Тема 1.4.1.

Методы электрических измерений неэлектрических величин. Измерения уровня, толщины, механических усилий, давления

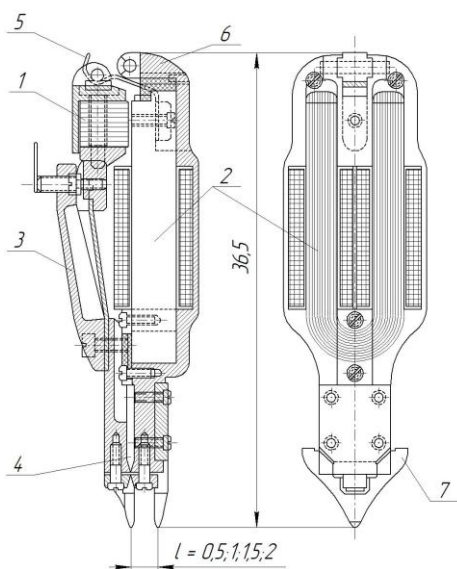
6. Электрические измерения неэлектрических величин

Одними из первых приборов, которые позволяли производить измерения неэлектрических величин путём преобразования их в величины электрические, являются тензометры.

Тензометр – прибор, предназначенный для измерения линейных и угловых деформаций.

Так как абсолютные изменения длин при деформациях могут составлять миллионные доли метра (микроны), то их необходимо преобразовать в величины электрические, которые современные средства измерений позволяют измерять с очень высокой степенью точности.

Высокой точностью, в частности отличаются магнитные методы измерений. Кроме того они отличаются простотой и кратковременностью процесса измерения.



Электромагнитный тензометр Лера

Рис.6.1. Электромагнитный тензометр.

Линейная деформация вызывает изменение величины воздушного промежутка между якорем (1) и сердечником электромагнита (2). Якорь укреплен на подвижной ножке (3), имеющей шарнир (4). Арретир тензометра состоит из плоской пружины (5) и эксцентрика (6). Дифференциальный микрометрический винт служит для установки индикатора на нуль. Прибор прижимается к детали (если необходимо измерить деформацию) или деталям (если между ними присутствует прецессия расстояния) заплечиками (7).

Пример расчёта магнитной цепи электромагнитного тензометра

Упрощённая магнитная система тензометра с катушкой представлена на Рис.6.2., на Рис.6.3. представлена кривая намагничивания материала магнитопровода.

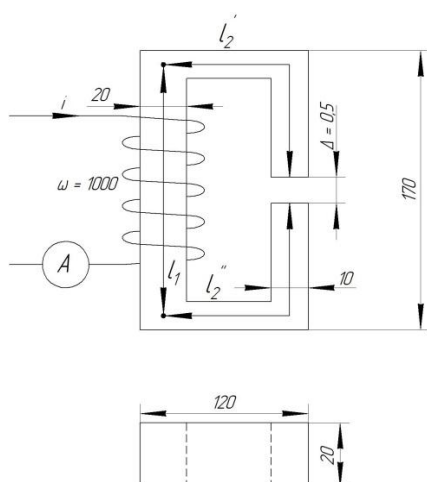


Рис.6.2. Магнитная система тензометра с катушкой.

$$l_1 = 160 \text{ мм}, \quad l_2' + l_2'' = 370 \text{ мм}, \quad S_1 = 4 \text{ см}^2, \quad S_2 = 2 \text{ см}^2, \quad S_{\Delta} = 2 \text{ см}^2.$$

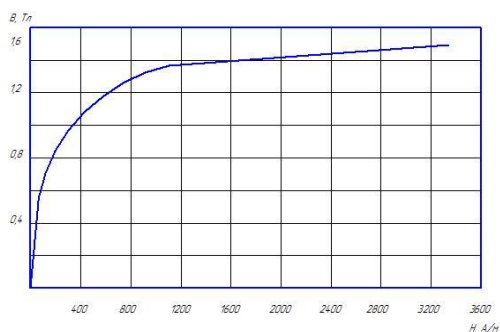


Рис.6.3. Кривая намагничивания материала магнитопровода.

Метод измерения деформации (прецессии расстояния между деталями) можно предложить следующий:

поместим между заплечиками (7) тензометра датчик магнитометра и, автоматическим изменением тока в катушке, будем поддерживать индукцию в зазоре $B_{\Delta const} = 1,2 \text{ Тл}$. При изменении величины зазора (расстояния между заплечиками тензометра) будет изменяться сопротивление магнитной цепи, представленной на Рис.6.2.

Таким образом по изменению тока в катушке можно судить об изменении величины зазора (деформации).

По закону полного тока

$$I \cdot \omega = \sum_{i=1}^n H_n \cdot l_n,$$

$$\text{откуда } I = \frac{\sum_{i=1}^n H_n \cdot l_n}{\omega}.$$

Определим падение магнитного напряжения в магнитной цепи и ток в катушке при $\Delta = 0,5 \text{ мм}$.

По условию магнитная индукция в зазоре и на участке $l'_2 = l''_2$ должна быть 1,2 Тл. Этому значению индукции соответствует (согласно кривой намагничивания) напряжённость магнитного поля $H_{\Delta} = H_2 = 550 \text{ а/м}$. В соответствии с законом постоянства магнитного потока $\Phi = B_{\Delta} \cdot S_{\Delta} = B_2 \cdot S_2 = B_1 \cdot S_1$, откуда

$$B_1 = \frac{B_2 \cdot S_2}{S_1} = \frac{1,2 \cdot 2}{4} = 0,6 \text{ Тл}.$$

Значению магнитной индукции B_1 соответствует (согласно кривой намагничивания) напряжённость магнитного поля $H_1 = 100 \text{ а/м}$.

Напряжённость магнитного поля в зазоре определим из уравнения

$$B = \mu_0 \mu \cdot H.$$

$$H_{\Delta} = \frac{B_{\Delta}}{\mu_0} = \frac{1,2 \text{ Тл}}{1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}} = 9,6 \cdot 10^5 \text{ а/м}.$$

$$\sum H \cdot l_{\Delta=0,5} = 100 \cdot 0,16 + 550 \cdot 0,37 + 9,6 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 699,5 [a].$$

Откуда ток в катушке:

$$I_{\Delta=0,5} = \frac{699,5}{1000} = 0,6995 [A].$$

Пусть в результате деформации сжатия зазор уменьшился на 0,05 мм и стал равным 0,45 мм.

С уменьшением зазора уменьшится и падение магнитного напряжения:

$$\sum H \cdot l_{\Delta=0,5} = 100 \cdot 0,16 + 550 \cdot 0,37 + 9,6 \cdot 10^5 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} = 651,5 [a].$$

Для поддержания $B_{\Delta \text{const}}$ уменьшится и ток в катушке:

$$I_{\Delta=0,45} = \frac{651,5}{1000} = 0,6515 [A].$$

Зарегистрировать уменьшение тока: $\Delta I = 0,6995 - 0,6515 = 0,048 [A] = 48 \text{ мА}$ не представляет ни малейшего затруднения.

Шкалу амперметра можно проградуировать непосредственно в миллиметрах (или микронах).

Рекомендуемая литература:

Основная литература:

Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов/ В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев- М.: Высшая школа, 2011. - 0/ 5 экз.;

Лачин, В.И. Электроника: учеб. пособие/ В. И. Лачин, Н. С. Савелов- Ростов н/Д: Феникс, 2014. - 0/ 2 экз.

Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: Учебник для вузов/ Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко- М.: ИЦ "Академия", 2012. - 10/ 0 экз.

Дополнительная литература:

Муханин, Л.Г. Схемотехника измерительных устройств: учебное пособие/ Л. Г. Муханин- СПб.: "Лань", 2011. - 0/ 2 экз.

Афонский, А.А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения: А. А. Афонский, В. П. Дьяконов ; ред. В. П. Дьяконов- М.: СОЛОН-Пресс, 2009. - 0/ 1 экз.

Интернет ресурсы:

<http://ftoe.ru> – электротехнический портал.