

Проект «Инженерные кадры Зауралья»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра автоматизации производственных процессов

Методы и средства измерения электрических величин

Методические указания к практическим занятиям по курсу «Метрология,
стандартизация и сертификация»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления 220700.62 «Автоматизация технологических процессов и
производств»

Курган 2013

Кафедра автоматизации производственных процессов
Дисциплина: «Метрология, стандартизация и сертификация»
Составила: доцент, канд. техн. наук О.В. Дмитриева

Утверждено на заседании кафедры «14» ноября 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета в рамках проекта
«Инженерные кадры Зауралья» «22» ноября 2013 г.

Содержание

1. Измерительные механизмы приборов для измерений напряжения и тока.....	4
2. Метрологические характеристики электроизмерительных приборов	6
3. Измерение тока и напряжения.....	7
4. Преобразователи токов и напряжений.....	10
5. Расчет шунтов, добавочных сопротивлений и делителей напряжений.....	13
6. Измерение параметров электрических цепей.....	17
7. Измерение электрической мощности и энергии.....	21
8. Измерение частоты и фазовых сдвигов.....	23
Список использованной литературы.....	27

1. Измерительные механизмы приборов для измерений напряжения и тока

Электроизмерительные приборы предназначены для измерения тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного тока. При подаче на вход прибора измеряемой величины X возникает вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = f(X) \quad (1.1)$$

и происходит перемещение подвижных частей измерительного механизма и скручивание пружин (растяжки или подвеса).

Возникающий противодействующий момент

$$M_{\text{пр}} = W \cdot \alpha, \quad (1.2)$$

где W – удельный противодействующий момент пружины, характеризующий жесткость пружины, (Н·м)/рад; α – угол поворота подвижной части и стрелки (рад).

Условие равновесия измерительного механизма $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$. Учитывая выражения (1.1) и (1.2) уравнение преобразования измерительного прибора

$$\alpha = \frac{1}{W} f(X) \quad (1.3)$$

В *магнитоэлектрическом приборе* измеряемый ток, протекая через витки измерительного механизма, создает вращающий момент. Угол поворота α определяется равенством момента спиральных пружин и момента сил, обусловленного протеканием тока в рамке, и пропорционален измеряемому току, в котором и градуируется шкала прибора. Момент вращения для прибора в этом случае выразится как:

$$M_{\text{вр}} = BSIn \quad (1.4)$$

где B - магнитная индукция, Тл; S - площадь поперечного сечения катушки (для магнитоэлектрического прибора - активная площадь обмотки рамки), м²; I - ток, протекающий по проводнику, А; n - количество витков обмотки.

Уравнение преобразования магнитоэлектрического прибора

$$\alpha = \frac{BSn}{W} I. \quad (1.5)$$

Обычно сопротивление обмотки рамки составляет 100...1000 Ом, ток полного отклонения - 100 мкА...1 А и при непосредственном включении рамки в цепь прибор можно использовать в качестве микроамперметра, миллиамперметра или милливольтметра в цепях постоянного тока. О расширении пределов измерения по току и напряжению будет рассказано ниже.

Принцип действия приборов *электромагнитной системы* основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток, с подвижным ферромагнитным сердечником специальной формы, соединенным со стрелкой. В электромагнитном приборе вращающий момент пропорционален квадрату тока. Противодействующий момент, создаваемый пружиной, пропорционален

углу поворота подвижной части прибора. Уравнение преобразования электромагнитного прибора

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha} \quad (1.6)$$

где W - удельный противодействующий момент, (Н·м)/рад; I - измеряемый ток, А; L – индуктивность, Гн. Шкала неравномерна и носит квадратичный характер. Для уменьшения неравномерности шкалы прибора необходимо, чтобы чувствительность была также неравномерна в зависимости от угла поворота. Это достигается выбором формы лепестка.

Принцип действия **электростатических приборов** основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Энергия электростатического поля конденсатора $W = \frac{CU^2}{2}$. При круговом движении пластин конденсатора возникает вращающий момент $M_{вр}$. Уравнение преобразования электростатического прибора

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{\partial C}{\partial \alpha}. \quad (1.8)$$

где W - удельный противодействующий момент, (Н·м)/рад; U - измеряемое напряжение, В; C - емкость, Ф.

Задачи

1.1. Определить внутреннее сопротивление комбинированного аналогового прибора, имеющего магнитоэлектрический механизм, ток полного отклонения рамки 50 мкА, падение напряжения на рамке 75 мВ при измерении постоянного тока на пределах 50 мкА, 10 мА, 100 мА, 1 А.

1.2. Определить величину систематической относительной погрешности миллиамперметра магнитоэлектрической системы с номинальным током $I_n=100$ мА и сопротивлением $R_A=2$ Ом при температуре 20 °С, используемого для измерения тока 5 А и работающего в помещении с температурой 45°С. Температурный коэффициент сопротивления меди $4,23 \cdot 10^{-4}$ 1/°С. Обмотка рамки медная, температурная компенсация отсутствует.

1.3. Рамка магнитоэлектрического прибора, состоящая из 30 витков, расположена в радиальном магнитном поле, индукция которого 0,3 Тл. При токе 0,001 А рамка повернулась на 90°. Определить удельный противодействующий момент пружины, если высота рамки $h=4$ см, ширина $b=2$ см.

1.4. Известны следующие параметры механизма магнитоэлектрического прибора; индукция в воздушном зазоре $B=0,232$ Тл, ток полного отклонения $I_n=0,094 \cdot 10^{-6}$ А, число витков $n=1200,5$, рамка выполнена из медного провода ПЭВ-1 диаметром $d=0,02$ мм, сопротивление растяжек $R_p=24,5$ Ом, средняя квадратичная площадь рамки $S=4$ см², длина витка $l=60$ мм. Определите: 1) вращающий момент, соответствующий полному углу отклонения; 2) собственное потребление мощности механизма.

1.5. Определите удельный противодействующий момент механизма магнитоэлектрического гальванометра, если рамка, состоящая из n витков (табл.1.1), расположенная в радиальном магнитном поле, индукция которого B при токе I , повернулась на угол α . Активная площадь обмотки рамки S .

Таблица 1.1

Параметры магнитоэлектрического механизма

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
n	85	47	54	98	76
$B, \text{Тл}$	0,071	0,059	0,067	0,087	0,075
$I, \text{А}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$
$\alpha, \text{град}$	10°	15°	17°	14°	11°
$S, \text{см}^2$	1,34	2,11	1,76	1,98	1,53

1.6. Определите, какая индукция должна быть в воздушном зазоре постоянного магните магнитоэлектрического механизма, чтобы при токе 3 мА, площади рамки 3 см², удельном противодействующем моменте $35 \cdot 10^{-8}$ (Н·м/град) и числе витков 50,5 подвижная часть повернулась на 20° .

2. Метрологические характеристики электроизмерительных приборов

Чувствительностью S прибора к измеряемой величине называется производная от положения указателя по измеряемой величине:

$$S = d\alpha / dX \quad (2.1)$$

Для приборов с равномерной шкалой чувствительность постоянна. Величина, обратная чувствительности, называется постоянной прибора (ценой деления прибора):

$$C = 1 / S. \quad (2.2)$$

Различают чувствительность по току:

$$S_I = \alpha / I. \quad (2.3)$$

где I - ток, протекающий по проводнику, А;

и чувствительность по напряжению:

$$S_U = \alpha / U = S_I / R. \quad (2.4)$$

где R - сопротивление катушки механизма, Ом.

Период собственных колебаний подвижной части T_0 может быть вычислен из соотношения:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{W}} \quad (2.5)$$

где J - момент инерции подвижной части, W - удельный противодействующий момент.

Задачи

2.1. Миллиамперметр рассчитан на ток $I=500$ мА и имеет чувствительность по току 0,2 дел/мА. Определить число делений шкалы, цену

деления и ток, если стрелка миллиамперметра отклонилась на 60 делений.

2.2. Определить чувствительность по напряжению магнитоэлектрического прибора на 3 мА с внутренним сопротивлением 10 Ом и шкалой на 150 делений. Каким сопротивлением должен обладать прибор, чтобы при той же чувствительности по току чувствительность по напряжению составила 2 дел/мВ?

2.3. Какова чувствительность по току магнитоэлектрического прибора на 45 мВ с внутренним сопротивлением 10 Ом и шкалой на 100 делений? Как изменится чувствительность прибора по току и напряжению, если число витков на рамке прибора увеличить вдвое, оставив диаметр провода прежним?

2.4. Можно ли измерить ток 1500 мА магнитоэлектрическим милливольтметром с пределом измерения $U_V=75$ мВ и внутренним сопротивлением $R_V=5$ Ом? Чему равна цена деления по току, если шкала имеет 150 делений?

2.5. Механизм магнитоэлектрического стрелочного гальванометра характеризуется следующими параметрами: индукция в зазоре постоянного магнита B (табл. 2.1), активная площадь обмотки S , число витков n , удельный противодействующий момент W , средняя длина витка рамки l_{cp} , диаметр провода d , удельное электрическое сопротивление провода ρ , момент инерции подвижной части J , угол полного отклонения α_i , или N делений шкалы. Определите чувствительность прибора по току (рад/А, дел./А); ток, протекающий по обмотке рамки; сопротивление обмотки; постоянную по току; период колебаний.

Таблица 2.1

Параметры магнитоэлектрического механизма

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
N	32	65	23	43	65
α_i	15°	43°	23°	34°	48°
$l_{cp}, \text{ мм}$	76	56	38	95	67
$B, \text{ Тл}$	0,155	0,139	0,273	0,209	0,149
n	13,5	14	25	12	26
$J, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$0,87\cdot 10^{-7}$	$0,45\cdot 10^{-7}$	$0,54\cdot 10^{-7}$	$0,76\cdot 10^{-7}$	$0,46\cdot 10^{-7}$
$W, (\text{Н}\cdot\text{м})/\text{рад}$	$78\cdot 10^{-7}$	$32\cdot 10^{-7}$	$65\cdot 10^{-7}$	$37\cdot 10^{-7}$	$96\cdot 10^{-7}$
$d, \text{ мм}$	0,1	0,1	0,12	0,15	0,15
$\rho, \text{ Ом/м}$	3,57	54,8	2,48	1,58	24,3
$S, \text{ см}$	1,66	1,85	2,00	1,32	1,45

3. Измерение тока и напряжения

При измерении переменных напряжений и токов пользуются следующими значениями: средним, средневыпрямленным, среднеквадратический (действующим), амплитудным (пиковым). В качестве

стандартной формы при градуировке шкал приборов используют синусоидальные напряжения или токи.

Среднее значение периодического напряжения определяют по формуле

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3.1)$$

где T - период напряжения, $u(t)$ - мгновенное значение напряжения.

Средневыпрямленное значение напряжения определяется средним значением модуля напряжения

$$U_{cp.e} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (3.2)$$

Среднеквадратическое (действующее) значение напряжения равно

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (3.3)$$

Связь между амплитудным, средним (или средневыпрямленным) и действующим значениями напряжения устанавливают при помощи специальных коэффициентов амплитуды, формы и усреднения. Коэффициент амплитуды устанавливает соотношение между амплитудным (пиковым) и действующим значениями напряжения

$$K_a = U_m / U; \quad (3.4)$$

коэффициент формы - между действующим и средним значениями

$$K_\phi = U / U_{cp.e}; \quad (3.5)$$

а коэффициент усреднения - между амплитудным и средним значениями

$$K_y = U_m / U_{cp.e}. \quad (3.6)$$

Таблица 3.1

Значения коэффициентов амплитуды, формы и усреднения для некоторых форм напряжения

Форма напряжения	Коэффициент		
	K_a	K_ϕ	K_y
Синусоидальная	$\sqrt{2} \approx 1,41$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$	$\frac{\pi}{2} \approx 1,57$
Прямоугольная	1,00	1,00	1,00
Треугольная	$\sqrt{3} \approx 1,73$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,16$	2,00

При изменении направления тока, протекающего через измерительный прибор *магнитоэлектрической системы*, меняется отклонение подвижной части. Такие приборы предназначены для измерения силы тока и напряжения только в цепях постоянного тока.

При протекании через катушку прибора *электромагнитной системы* переменного синусоидального тока отклонение стрелки будет определяться средним квадратом тока.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.7)$$

Шкала прибора градуируется в действующих значениях синусоидального тока. Показания приборов электромагнитной системы определяются квадратом тока и не зависят от его направления (т.к. при любом направлении тока через катушку сердечник будет втягиваться в нее). Это позволяет использовать приборы электромагнитной системы в цепях постоянного и переменного тока.

Задачи

3.1. Определить показания магнитоэлектрического, электромагнитного и электродинамического амперметров, включенных последовательно в электрическую цепь, если ток в цепи изменяется по закону $i(t) = 3 + 4\sqrt{2} \sin \omega t$.

3.2. Определить показания электродинамического A_1 и электромагнитного A_2 амперметров, включенных в последовательную RC -цепь, если напряжение на входе цепи изменяется по закону $u(t) = (100 + 200 \sin \omega t) \text{ В}$. Параметры цепи: $R=10 \text{ Ом}$; $X_C=10 \text{ Ом}$.

3.3. Определить показания электродинамического A_1 и электромагнитного A_2 амперметров, включенных в последовательную RL -цепь, если напряжение на входе цепи изменяется по закону $u(t) = 25 + 50 \sin \omega t$. Параметры цепи: $R=10 \text{ Ом}$; $X_L=10 \text{ Ом}$.

3.4. Определить показания магнитоэлектрического амперметра ($R_A = 0$) (рис.3.1), если напряжение на входе цепи изменяется по закону $u(t) = 100 + 21 \sin(\omega t + 30^\circ)$. Параметры цепи: $R = 1000 \text{ Ом}$, $X_C=100 \text{ Ом}$.

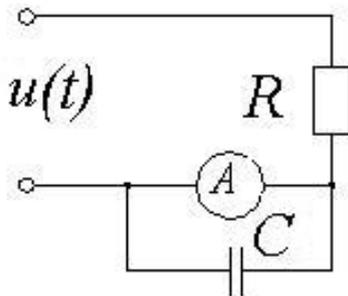


Рис.3.1. Схема включения измерительного прибора

3.4. Определить показания электродинамического вольтметра, если на его вход подано напряжение пилообразной формы (рис.3.2,а), максимальное значение которого $U_m = 141 \text{ В}$, частота сигнала $f=50 \text{ Гц}$.

3.5. Чему равны показания магнитоэлектрического вольтметра, если напряжение сигнала изменяется по кривой, изображенной на рисунке 3.2,б?

3.6. Измеряемый ток имеет форму кривой, изображенной на рисунке 3.2,в. Определите, что покажет электромагнитный амперметр. Погрешностями прибора пренебречь.

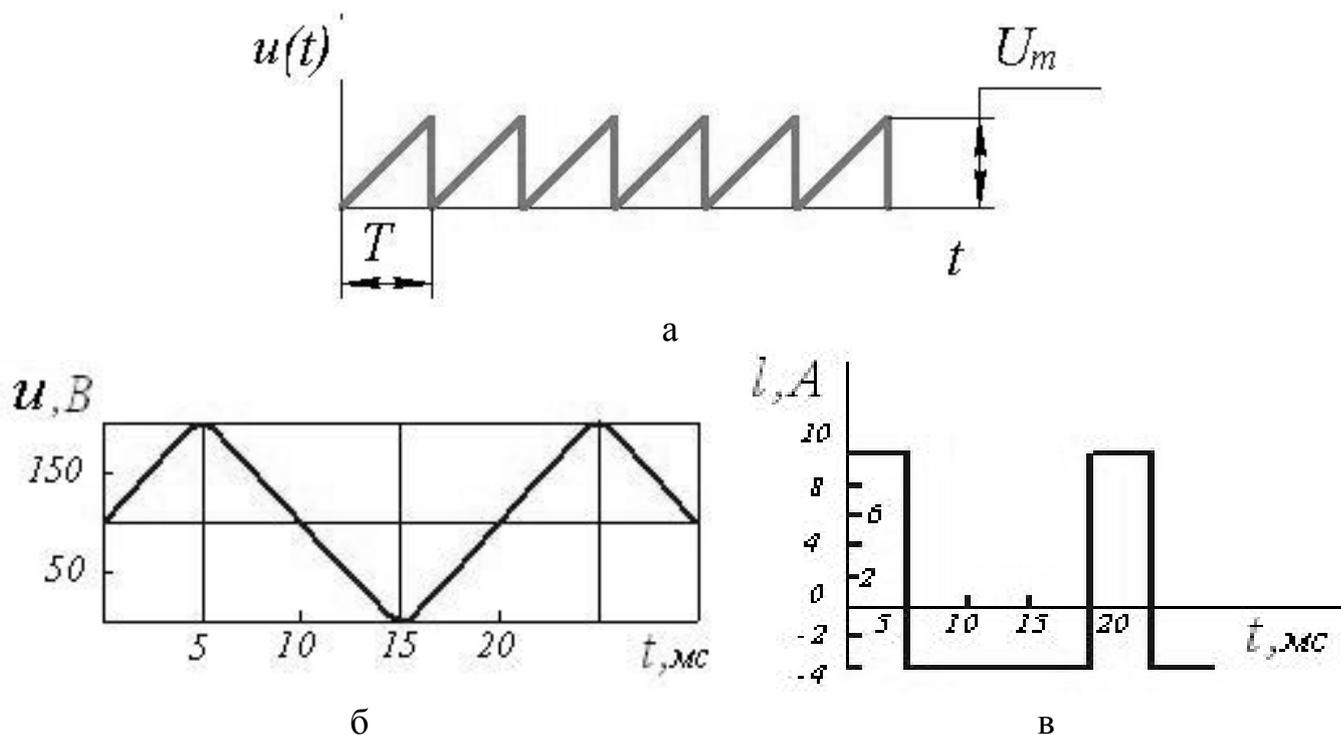


Рис.3.2. Формы измеряемых сигналов

4. Преобразователи токов и напряжений

Для измерения переменных напряжений и токов во входную цепь магнитоэлектрического измерительного механизма включают выпрямители. Основные схемы выпрямителей приведены на рисунках 4.1 и 4.2.

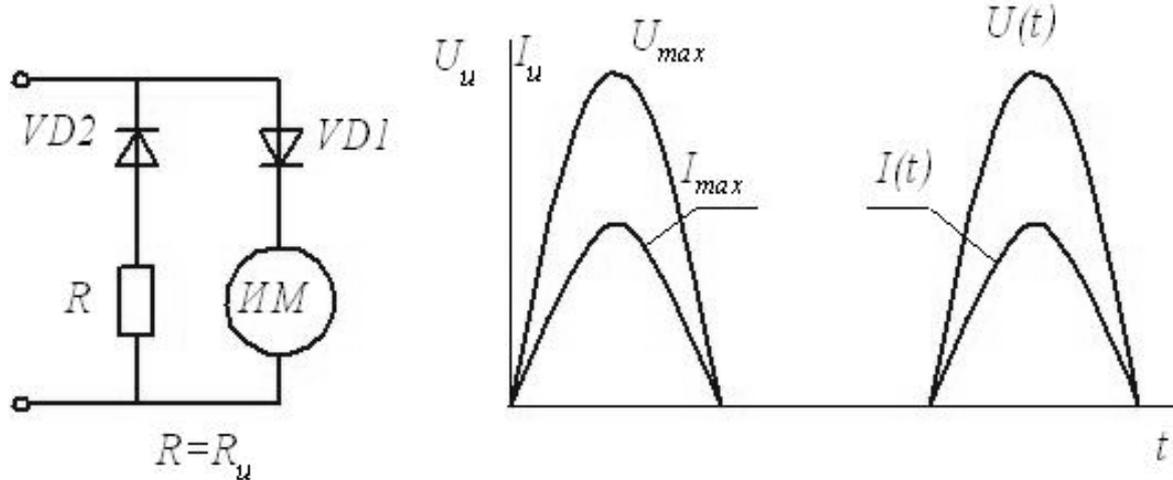


Рис.4.1. Однополупериодная схема выпрямления

В приведенной схеме применен **однополупериодный выпрямитель**, выполненный на диоде VD1. Диод VD2 и резистор R необходимы для выравнивания воздействия прибора на измеряемую цепь при прохождении отрицательного полупериода тока (напряжения).

В случае однополупериодного выпрямления, средневыврямленное значение тока:

$$I_{cp.с} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi} = \frac{i}{2K_\phi} = 0,45 \cdot I \quad (4.1)$$

где K_ϕ - коэффициент формы (для синусоиды 1,11); 0,45 - коэффициент градуировки шкалы.

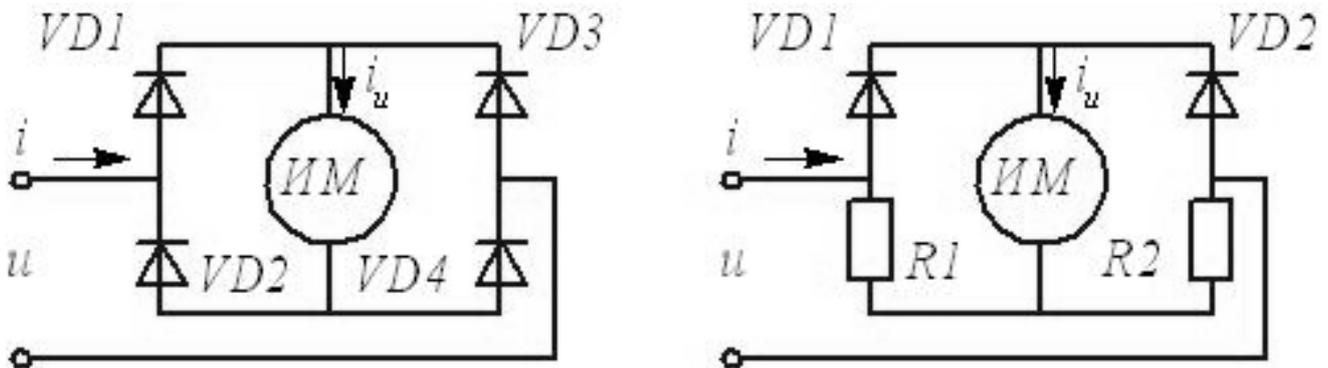


Рис.4.2. Двухполупериодная схема выпрямления

В случае применения **двухполупериодных схем** (рис.4.2) ток, протекающий через измерительный механизм, определяется как:

$$I_{cp.с} = \frac{I_m}{K_\phi} = 0,9 \cdot I \quad (4.2)$$

где 0,9 - коэффициент градуировки шкалы.

В состав **электронного вольтметра** переменного напряжения входят преобразователь переменного напряжения в постоянное, усилитель и магнитоэлектрический индикатор. В зависимости от вида преобразования показание вольтметра может быть пропорционально амплитудному, средневыпрямленному или среднеквадратическому значению измеряемого напряжения.

Шкалу электронного вольтметра градуируют в среднеквадратических значениях напряжения синусоидальной формы. Исключение составляют импульсные вольтметры, шкалу которых градуируют в амплитудных значениях.

При измерении несинусоидального напряжения показания вольтметра зависят от схем входа, вида преобразователя и градуировки шкалы. Зависимость показаний вольтметра при подаче на вход последовательности импульсов от типа преобразователя показана в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Показания вольтметра

Тип преобразователя	Функция	Показания прибора
Амплитудный с закрытым входом	$U_{max}' = U_{max} - U_0$	$\frac{U_{max} - U_0}{\sqrt{2}}$
Амплитудный с открытым входом	U_{max}	$\frac{U_{max}}{2}$
Средневыпрямленного значения с открытым входом	$U_0 = U_{max} \frac{\tau}{T}$	$U_0 \cdot K_\phi$
Среднеквадратического значения с открытым входом	$U = U_{max} \sqrt{\frac{\tau}{T}}$	U

U_{max} – максимальное значение сигнала; U_0 – постоянная составляющая сигнала; U – действующее значение напряжения; τ – длительность импульса; T – период; $K_\phi = U_{max}' / U_0$ – коэффициент формы. Шкала градуирована в действующих значениях синусоидального напряжения.

Задачи

4.1. Определить показания миллиамперметра с однополупериодной схемой выпрямления, включенного в цепь переменного тока, имеющего формы: 1) синусоиды; 2) изображенную на рисунке 4.3,а. Амплитуда тока $I_m = 14,1$ мА; шкала миллиамперметра проградуирована в действующих значениях синусоидального тока.

4.2. Определить показания миллиамперметров магнитоэлектрического и выпрямительного с однополупериодной схемой выпрямления со шкалой, проградуированной в действующих значениях синусоидального тока. Миллиамперметры включены в цепь переменного тока, имеющего треугольную форму импульсов (рис.4.3.б) с амплитудой $I_m = 28$ мА, частотой $f = 50$ Гц.

4.3. Определить показания миллиамперметров магнитоэлектрического и выпрямительного с однополупериодной схемой выпрямления со шкалой, проградуированной в действующих значениях синусоидального тока. Миллиамперметры включены в цепь переменного тока, имеющего прямоугольную форму типа « меандр » с амплитудой $I_m = 30$ мА, частотой $f = 50$ Гц (рис.4.3,в).

4.4. Определить показания аналогового вольтметра с преобразователем максимального значения с закрытым входом, если на его вход подано напряжение формы, показанной на рисунке 4.3,г. Максимальное значение напряжения $U_m = 100$ В. Шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения.

4.5. Определить максимальное значение поданного на вход электронного вольтметра (вход закрытый) с преобразователем среднеквадратичного значения сигнала $u(t)$ треугольной формы (рис.4.3,д), если шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения.

Показания вольтметра $U_V = 100$ В.

4.6. Определить амплитуду U_m сигнала синусоидальной формы, поданного на вход электронного вольтметра (вход открытый) с преобразователем средневыпрямленного значения. Преобразователь выполнен по схеме двухполупериодного выпрямления. Шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях синусоидального сигнала. Показания вольтметра $U_V = 10$ В.

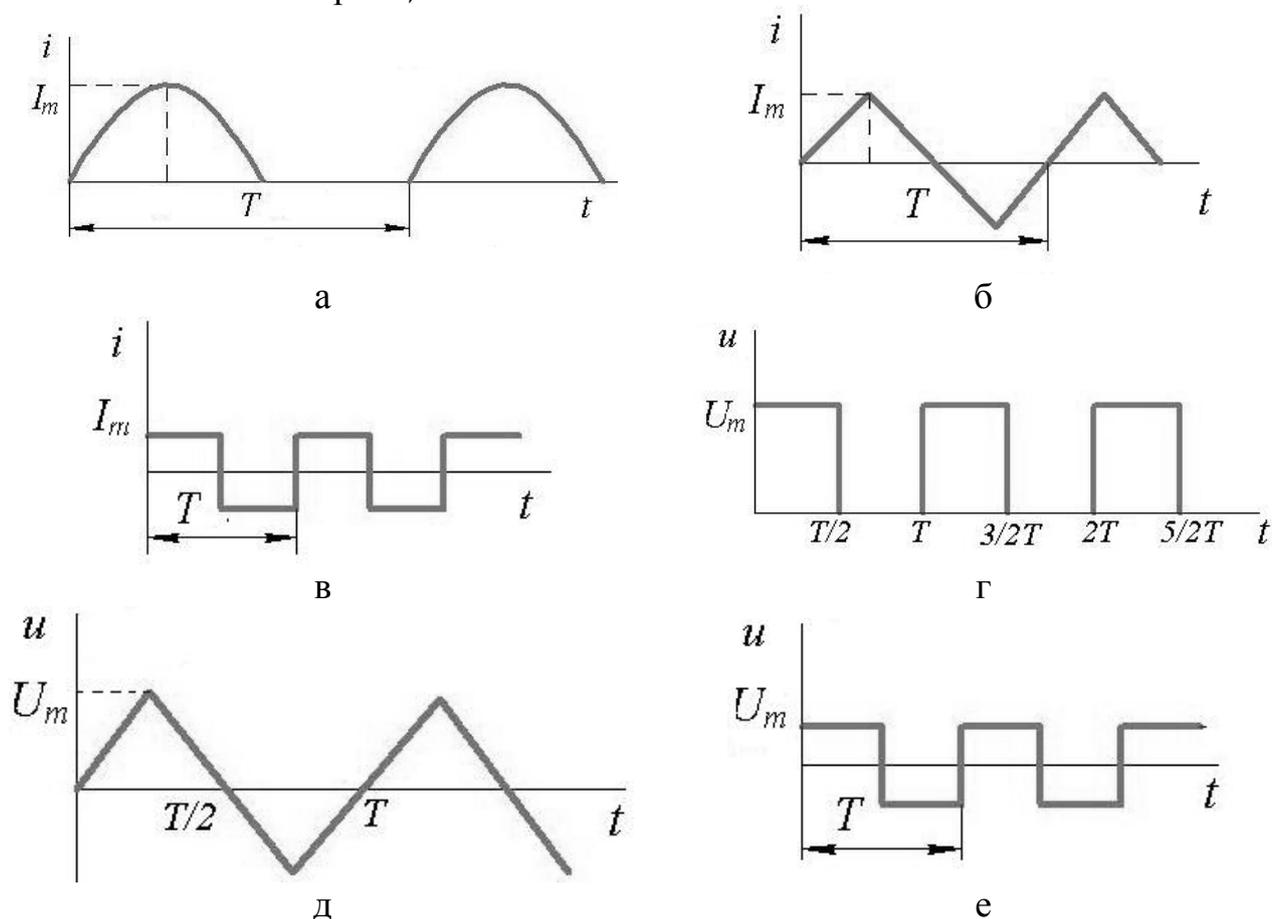


Рис.4.3 Измеряемые сигналы

4.7. Определить показания вольтметра, если на его вход подано напряжение формы «Меандр» (рис.4.3,е), максимальное значение которого $U_m = 141$ В. Вольтметр имеет квадратичный преобразователь, вход закрытый, шкалу, проградуированную в действующих значениях синусоидального напряжения.

5. Расчет шунтов, добавочных сопротивлений и делителей напряжений

Для расширения пределов измерения по току применяют шунтирование магнитоэлектрического механизма. Для этой цели используют специальные сопротивления с нормированными метрологическими свойствами, называемыми шунтами. Шунт представляет собой четырехзажимный резистор, используемый только в цепях постоянного тока. Схема шунтирования измерительного механизма показана на рисунке 5.1.

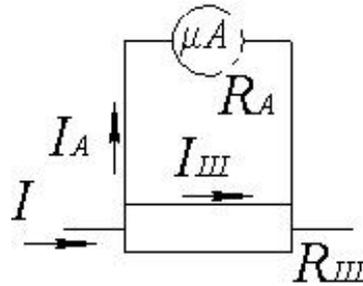


Рис.5.1. Расширение пределов измерения амперметра

Величину шунта можно рассчитать из соотношения:

$$I_A R_A = I_{ш} R_{ш} = const \quad (5.1)$$

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}, \quad (5.2)$$

где $n = \frac{I}{I_A}$ - коэффициент деления, называемый также множителем шкалы или коэффициентом шунтирования. Обычно $R_{ш} = (10^{-2} \dots 10^{-3})$ Ом.

При измерении напряжения при помощи магнитоэлектрического механизма необходимо снизить ток, протекающий через измерительный механизм. Для этого применяют добавочные сопротивления, которые включаются последовательно с измерительным механизмом. Схема включения добавочных сопротивлений показана на рисунке 5.2.

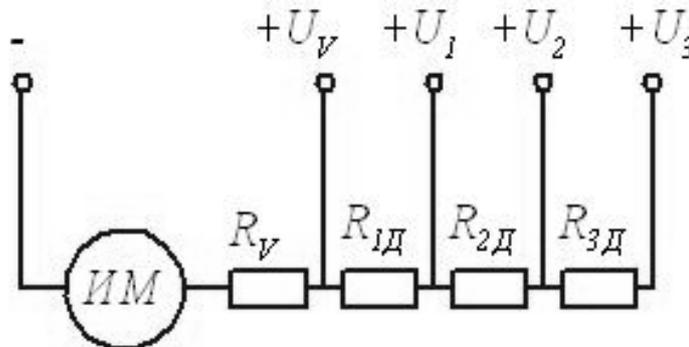


Рис.5.2 Расширение пределов измерения вольтметра

Расчет добавочных сопротивлений производится исходя из соотношений:

$$\frac{U_V}{R_V} = \frac{U}{R_V + R_{\delta}} = I_V \quad (5.3)$$

$$R_l = R_V \left[\frac{U}{U_V} - 1 \right] = R_V [n - 1] \quad (5.4)$$

где $n = \frac{U}{U_V}$ - коэффициент расширения предела измерения или множитель шкалы.

Для уменьшения напряжения в строго определенное число раз применяют делители напряжения (рис. 5.3,а).

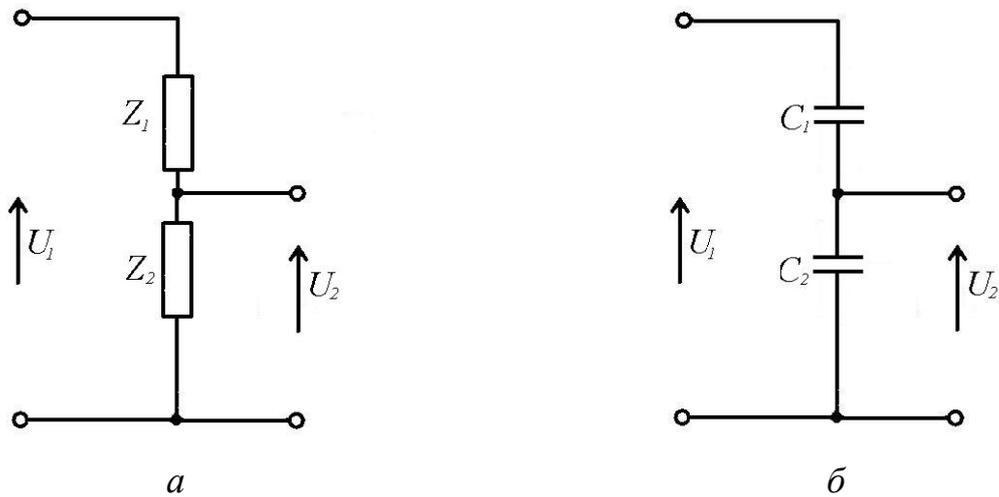


Рис. 5.3. Делители напряжения: *а* - резистивный; *б* – емкостный

Делитель напряжения является преобразователем напряжения в напряжение, имеющим номинальный коэффициент преобразования меньше единицы

$$K_n = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (5.5)$$

Делители напряжения используются для расширения верхних пределов измерения приборов с высоким входным сопротивлением. По используемым в делителях напряжения элементам различают резистивные, емкостные и индуктивные делители. Для расширения верхних пределов измерения электростатических вольтметров применяют емкостный делитель напряжения (рис. 5.3,б), что позволяет измерять напряжения до 10 кВ и более.

Такой делитель имеет $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$. При этом верхний предел измеряемой величины возрастает в $1/K$ раз. Это справедливо, когда $C_2 \gg C_1$.

В этом случае

$$U = U_B \frac{C_B + C_1 + C_2}{C_2} \quad (5.6)$$

где U_B - напряжение на входе прибора, В; C_B - емкость прибора, Ф.

Параметры емкостного делителя выбирают так, чтобы $C_B \ll C_1$.

В качестве преобразователей в цепях переменного тока, в основном, используются измерительные трансформаторы тока и напряжения, основной характеристикой которых является коэффициент трансформации. Для трансформаторов тока коэффициент трансформации

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} \quad (5.7)$$

где I_1 - номинальный ток первичной обмотки, А; I_2 - номинальный ток вторичной обмотки, А.

Для трансформатора напряжения коэффициент трансформации

$$K_I = \frac{U_1}{U_2} \quad (5.8)$$

где U_1 - номинальное напряжение первичной обмотки, В; U_2 - номинальное напряжение вторичной обмотки, В.

Задачи

5.1. Рассчитать многопредельный шунт к измерительному механизму на пределы измерения 5, 20, 30 А. Сопротивление рамки измерительного механизма 2,5 Ом. При включении любого предела наибольшее падение напряжения не должно превышать 75 мВ.

5.2. Для электромагнитного вольтметра, имеющего ток полного отклонения $I_0=3$ А, внутреннее сопротивление $R_g=30$ кОм, определите верхний предел измерения и сопротивление добавочного резистора, необходимое для расширения верхнего предела измерений до $U_n=600$ В.

5.3. Вольтметр постоянного напряжения с пределом измерения 3 В имеет внутреннее сопротивление 400 Ом. Определите сопротивление добавочных резисторов, которые нужно подключить к вольтметру, чтобы расширить пределы измерения до 15 и 75 В. Найдите ток полного отклонения указателя и зарисуйте схему включения добавочных резисторов.

5.4. Для расширения верхнего предела измерения электростатического вольтметра, имеющего верхний предел измерения $U_n=600$ В и внутреннюю емкость $C_g=35$ пФ до $U_n=6000$ В используется емкостный делитель напряжения. Определите емкость C_1 при емкости C_2 равной 600 пФ.

5.5. Рассчитать сопротивление шунта $R_{ш}$ для расширения пределов измерения магнитоэлектрического миллиамперметра с током полного отклонения $I_A=50$ А, ценой деления по току $C_1=1$ А/дел и внутренним сопротивлением $R_A=5$ Ом до 1000 А. Чему равна новая цена деления миллиамперметра?

5.6. Определить предел измерения тока I_1 в схеме двухпредельного миллиамперметра (рис.5.4.) с током полного отклонения рамки измерительного механизма $I_A=100$ мкА, внутренним сопротивлением $R_A=1,0$ кОм. Значения сопротивлений резисторов ступенчатого шунта $R_1=0,9$ Ом, $R_2=0,1$ Ом.

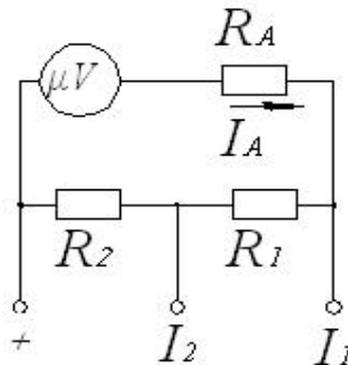


Рис.5.4. Двухпредельный амперметр

5.7. Предложить формулы расчетов сопротивлений резисторов R_1 и R_2 двухпредельного шунта (рис.5.4) для расширения пределов измерения магнитоэлектрического микроамперметра с током полного отклонения I_A и внутренним сопротивлением R_A . Новые пределы измерения токов I_1 и I_2 . ($I_1 < I_2$)

5.8. Какой наибольший ток можно измерить шунтированным гальванометром, имеющим $I_H=20 \cdot 10^{-4}$ А? Сопротивление гальванометра $R_G=10$ Ом, сопротивление шунта $R_{ш}=1,25$ Ом.

5.9. Определить значение сопротивления добавочного резистора R_d , включенного последовательно в цепь магнитоэлектрического вольтметра с пределом измерения 30 В, внутренним сопротивлением $R_V=1000$ Ом и шкалой на 150 делений для расширения предела измерения напряжения до 300 В. Чему равна новая цена деления шкалы?

5.10. Рассчитать значения емкости C_2 в емкостном делителе (рис.5.5.), если требуется расширить предел измерения электростатического вольтметра от 300 В до 6 кВ. Входная емкость вольтметра $C_V=6$ пФ, емкость параллельно включенного конденсатора $C_1=374$ пФ.

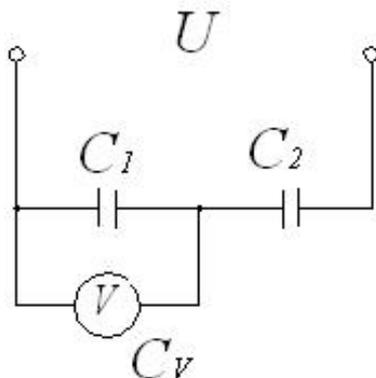


Рис.5.5. Емкостный делитель

5.11. Расширение предела измерения электростатического вольтметра осуществляется по схеме (рис.5.6). Определить величину добавочной емкости, если предел измерения вольтметра на 1,5 кВ необходимо расширить до 15 кВ, емкость вольтметра $3 \cdot 10^{-5}$ мкФ.

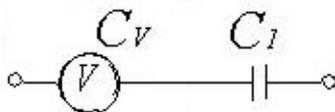


Рис.5.6. Расширение пределов измерения электростатического вольтметра

5.12. Определить входную емкость электростатического вольтметра с емкостным делителем, используемого для измерения высокого напряжения, если $C_V=4$ пФ, $C_1=40$ пФ, $C_2=20$ пФ (рис.5.5).

6. Измерение параметров электрических цепей

Мостовые схемы широко применяются для измерения параметров электрических цепей. В зависимости от вида питающего напряжения различают мосты постоянного и переменного тока.

Одинарные *мосты постоянного тока* предназначены для измерения сопротивлений величиной от 10 Ом и более. Схема одинарного моста приведена на рисунке 6.1,а.

Если мост постоянного тока уравновешен, то выполняется условие

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (6.1)$$

Измеряемое сопротивление, например, R_3 можно определить из соотношения: $R_3 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2}$.

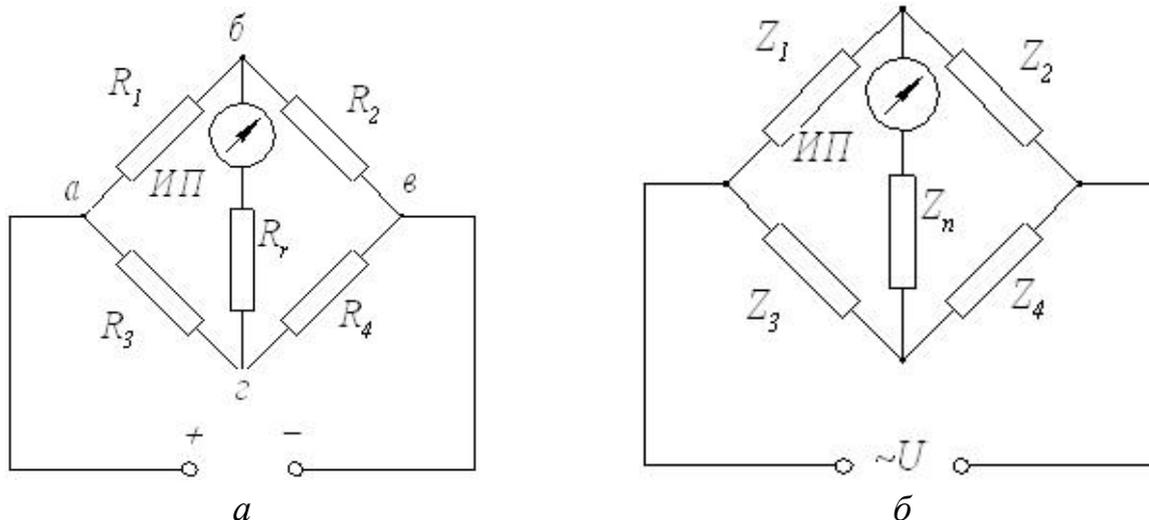


Рис.6.1 Одинарный мост: а - постоянного тока, б - переменного тока

Диагональ, обозначенная на рисунке «а-в», называется диагональю питания. В нее включен источник питания. Диагональ «б-г» называется измерительной диагональю. В нее включен указатель равновесия (гальванометр) ИП.

Возможен случай, когда мост не уравновешивают, а ограничиваются измерением тока, проходящего через измерительный прибор, по которому делают вывод о величине измеряемого сопротивления. Такой мост называется неуравновешенным, а значение тока через измерительный прибор определяется соотношением:

$$I_r = U_n \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_r (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}, \quad (6.2)$$

где I_r – ток, протекающий через гальванометр, U_n – напряжение на выходе моста.

Измерительный мост характеризуется чувствительностью, под которой понимается предел отношения приращения выходного сигнала к приращению входной величины. Чувствительность моста по току и по напряжению определяются соответственно: $S_I = \frac{\Delta I_r}{\Delta R}$ и $S_U = \frac{\Delta U_n}{\Delta R}$,

где S_I - чувствительность моста по току, $\Delta R/R$ - относительное изменение сопротивления плеча моста к полному сопротивлению этого плеча, S_U - чувствительность моста по напряжению.

Условие равновесия *моста переменного тока* (рис.6.1,б) записывается аналогично мосту постоянного тока:

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3 \quad (6.3)$$

Выразив полные сопротивления через вещественные и мнимые составляющие, получаем два условия равновесия моста:

$$R_1 \cdot R_4 - X_1 \cdot X_4 = R_2 \cdot R_3 - X_2 \cdot X_1 \quad (6.4)$$

$$R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot X_1 = R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot X_2 \quad (6.5)$$

Наличие двух уравнений равновесия означает необходимость регулирования не менее двух параметров для достижения равновесия. Дальнейшие преобразования приводят к соотношениям:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \quad (6.6)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (6.7)$$

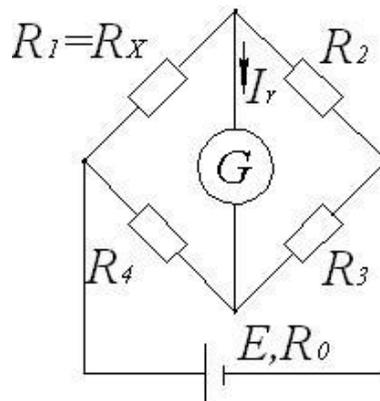


Рис.6.2 Схема измерения одинарным мостом переменного тока

При использовании мостового метода (рис.6.2) добротность катушки Q_x и тангенс угла потерь $tg \delta_x$ определяются по следующим зависимостям:

$$Q_x = \frac{\omega L}{R_x} = \frac{1}{\omega C_3 R_3} \quad (6.8)$$

$$tg \delta_x = \frac{1}{Q_x} \quad (6.9)$$

Задачи

6.1. С помощью вольтметра со шкалой на 150 В при токе 30 мА необходимо измерить сопротивление. Определить чему оно равно, если при подключении вольтметра последовательно с искомым сопротивлением в сеть с напряжением $U_1=120$ В показания вольтметра $U_2=100$ В.

6.2. Вольтметр сопротивлением $R_V=12$ кОм с помощью переключателя сначала подключается к зажимам сети, а затем к той же сети, но последовательно с искомым сопротивлением, Определить искомое сопротивление, если первое показание вольтметра 120 В, а второе 30 В. Составить схему измерения.

6.3. Определить значение сопротивления резистора R_x , включенного в первое место моста (рис.6.3.), если в уравновешенном состоянии сопротивления

других плеч моста составляют $R_2=100\text{ Ом}$; $R_3=2000\text{ Ом}$; $R_4=524\text{ Ом}$.

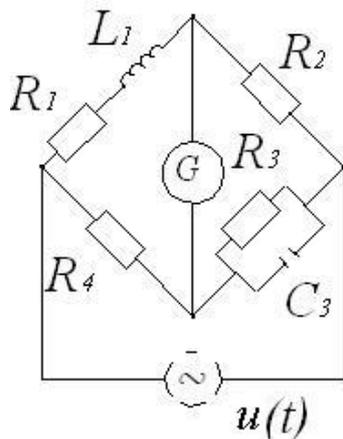


Рис.6.3 Схема измерения сопротивления одинарным мостом постоянного тока

6.4. Определить входное сопротивление $R_{вх}$ уравновешенного моста (рис.6.2.) со стороны зажимов диагонали индикатора равновесия G , если $R_1=10\text{ Ом}$, $L_1=0,01\text{ Гн}$, $R_2=100\text{ Ом}$, $R_3=1000\text{ Ом}$, $C_3=1\text{ мкФ}$, $R_4=100\text{ Ом}$. Частота f питающего моста напряжения равна 100 Гц .

6.5. Определить значения индуктивности L_1 и сопротивления R_1 неизвестной катушки, если при равновесии моста (рис.6.3) получены следующие данные: плечо множителя $R_2=100\text{ Ом}$; плечо сравнения $R_3=30\text{ кОм}$; $C_3=1\text{ мкФ}$; плечо отсчета $R_4=850\text{ Ом}$.

6.6. При подключении катушки индуктивности к источнику постоянного тока амперметр показал $I=12\text{ А}$, вольтметр $U=24\text{ В}$. При подключении к сети переменного тока показания стали $I=2\text{ А}$, $U=24\text{ В}$. Частота сети 50 Гц . Определить индуктивность катушки.

6.7. По показаниям амперметра $I=10\text{ А}$, вольтметра $U=220\text{ В}$ и ваттметра $P=1,1\text{ кВт}$ определить активное сопротивление и индуктивность катушки. Частота сети 50 Гц .

6.8. Определить емкость конденсатора с большими потерями, если при измерении методом ваттметра были получены следующие показания приборов: напряжение 100 В , ток 5 А , мощность 30 Вт . Частота сети 50 Гц .

6.9. Определить значения эквивалентного сопротивления $Z_э=R_э+jX_э$ цепи (рис.6.4.) и сопротивления Z каждой ветки, если показания амперметра $I=5\text{ А}$, вольтметра $U=200\text{ В}$, ваттметра $P=350\text{ Вт}$.

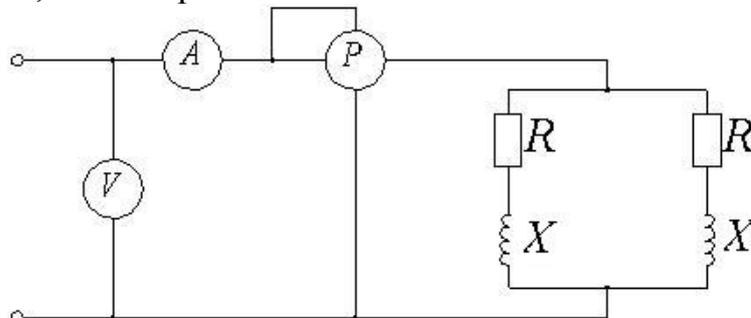


Рис.6.4. Схема измерения сопротивления

6.10. В цепи с конденсатором без потерь при напряжении 240 В установился ток 20 А. Определить емкость конденсатора, если частота сети 50 Гц.

6.11. Составьте схемы измерений и приведите точные формулы определения сопротивления методов амперметра и вольтметра.

6.12. Измерение тангенса угла потерь и добротности катушки проводится при следующих данных плеча сравнения мостовой схемы (рис.6.2.): $C_3=0,1$ мкФ и $R_3=(1,6...52,2)$ Ом. Определите значения измеряемых параметров при частоте 1000 Гц.

7. Измерение электрической мощности и энергии

В цепях постоянного тока мощность потребления P нагрузки R определяется произведением тока I в нагрузке на падение напряжения U на ней:

$$P = UI = I^2 R \quad (7.1)$$

В цепях однофазного синусоидального тока измеряют активную P , реактивную Q , и полную S мощности:

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R \quad (7.2)$$

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X \quad (7.3)$$

$$S = UI = I^2 Z \quad (7.4)$$

где U, I - среднеквадратичные значения напряжения и тока в цепи; φ - сдвиг по фазе между напряжением и током в нагрузке; R, X, Z - соответственно активное, реактивное, полное сопротивления нагрузки.

Мощность потребления нагрузки $P_H = UI$. Мощность P_x , вычисленная по показаниям приборов (рис.7.1,а)

$$P_x = U_V I_A = U(I_V + I) = UI_V + UI = P_V + P_H$$

больше действительного значения мощности потребления нагрузки на значение мощности P_V потребления вольтметра (I_V - ток в цепи вольтметра). Погрешность определения мощности в нагрузке тем меньше, чем больше входное сопротивление вольтметра.

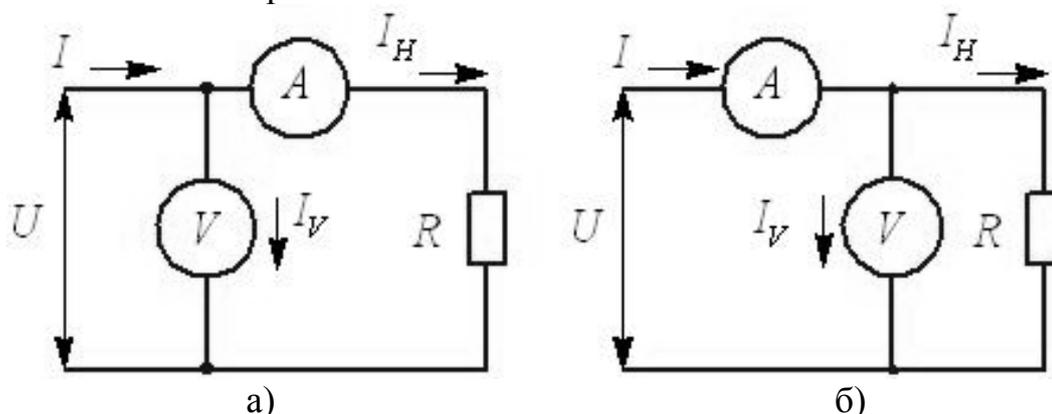


Рис.7.1. Схема измерения мощности: I_a – ток, измеряемый амперметром; I_H – ток, протекающий через сопротивление нагрузки; I_V – ток, протекающий через вольтметр; P_H - действительное значение измеряемой мощности.

Мощность P_x , вычисленная по показаниям приборов (рис.7.1,б)

$$P_x = U_V I_A = (U_A + U)I = U_A I + UI = P_A + P_H$$

больше действительного значения мощности потребления нагрузки на значение мощности P_A потребления амперметра (U_A - падение напряжения на амперметре). Погрешность определения мощности в нагрузке тем меньше, чем меньше входное сопротивление амперметра. Поэтому схему, изображенную на рисунке 7.1,а, применяют для измерения мощности при больших сопротивлениях нагрузки, а схему, изображенную на рисунке 7.1,б - при малых.

Для прямых измерений мощности в цепях постоянного и переменного токов применяют электродинамические ваттметры. Неподвижную катушку ваттметра включают последовательно с нагрузкой, мощность которой необходимо измерить, а подвижную катушку параллельно к нагрузке.

Включение неподвижной катушки ваттметра последовательно с нагрузкой возможно только при токах нагрузки 10-20 А (при больших токах нагрузки неподвижную катушку ваттметра включают через трансформатор тока). При измерении мощности в цепях высокого напряжения (свыше 600 В) подвижную катушку ваттметра включают не непосредственно в измеряемую цепь, а через трансформатор напряжения, а неподвижную катушку ваттметра - через измерительный трансформатор тока (независимо от значения тока нагрузки).

Включение ваттметра через измерительные трансформаторы тока и напряжения показано на рис.7.2.

Значение измеряемой мощности определяют по показанию ваттметра, умноженному на произведение трансформации трансформаторов тока и напряжения:

$$P_x = P_w K_U K_I \quad (7.5)$$

где P_x - измеренное значение активной мощности в цепи нагрузки; P_w - показание ваттметра; K_U , K_I - номинальные коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов напряжения и тока.

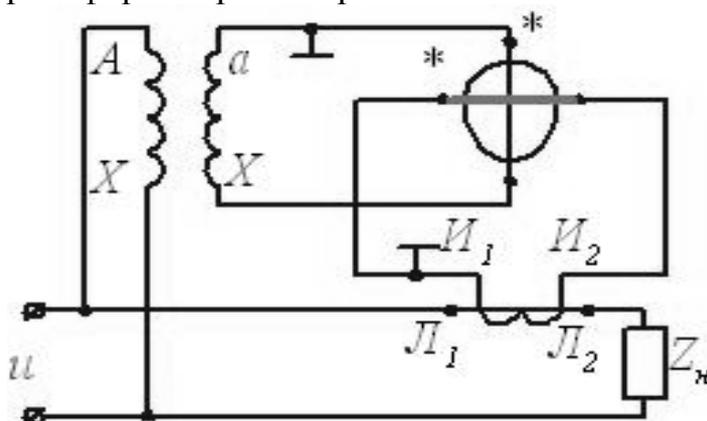


Рис.7.2. Включение электродинамического ваттметра через измерительные трансформаторы тока и напряжения

Задачи

7.1. Амперметр на ток 5 А, вольтметр на 110 В, ваттметр на 5 А и 120 В со шкалой на 120 делений включены через трансформаторы тока 100/5 и

напряжения 6000/100 для измерения тока, напряжения и мощности потребителя. Амперметр показывает 4 А, вольтметр 110 В. Определить мощность цепи и показания ваттметра в делениях шкалы при $\cos \varphi = 0.5$.

7.2. При измерении мощности приемника постоянного тока напряжением 120 В использован электродинамический ваттметр: $U_N = 120$ В, $I_N = 2,5$ А; сопротивление R_a последовательной обмотки 0,12 Ом, номинальный ток параллельной обмотки $I_a = 30$ мА. По какой схеме следует включить ваттметр, чтобы при протекании максимального тока получить наименьшую погрешность?

7.3. Амперметр на ток 5 А, вольтметр на 150 В, ваттметр на 5 А и 150 В включены в цепь с трансформаторами тока 1000/5 и напряжения 6000/100. Показания приборов: $I = 4,5$ А, $U = 105$ В, $P = 400$ Вт. Определить ток, напряжение, мощность и $\cos \varphi$.

7.4. Для измерения мощности ваттметр включен через измерительные трансформаторы тока и напряжения с коэффициентами трансформации K_I и K_U (табл.7.1). Определите мощность, потребляемую нагрузкой, если ваттметр показал P Вт, и зарисуйте схему включения. Погрешностями трансформаторов пренебречь.

Таблица 7.1

Номинальные характеристики трансформаторов

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
K_I	200/5	150/5	400/5	200/5	1000/5
K_U	600/100	3000/100	5000/100	1000/100	6000/100
P , Вт	400	500	400	250	300

8. Измерение частоты и фазовых сдвигов

Для измерения временных интервалов используется метод калиброванной шкалы. Метод основан на использовании предварительно откалиброванной развертки. Значение измеряемого временного интервала определяется по формуле

$$t = D_p l_x M_p \quad (8.1)$$

где D_p – длительность калиброванной развертки, мс/дел или мкс/дел (иначе называют коэффициент развертки K_p , т.е. масштаб изображения по горизонтали); l_x – отклонение луча по горизонтали в делениях шкалы; M_p – множитель развертки.

Для измерения частоты необходимо определить число делений, приходящихся на один период рассматриваемой кривой, например, измерить промежуток между двумя соседними вершинами синусоиды. Значение частоты определится по формуле:

$$f_{изм} = \frac{1}{n_T \cdot K_p} \quad (8.2)$$

где n_T - число делений, приходящихся на период; K_p - коэффициент развертки.

Более точное измерение, если имеется измерительный генератор, возможно с помощью так называемых «фигур Лиссажу». Для этого на вход «Y» подается напряжение с неизвестной частотой $f_{изм}$, а на вход «X» напряжение с известной частотой $f_{эт}$, от измерительного генератора. При равных частотах на экране будет наблюдаться фигура в виде эллипса; если частоты кратны, но не равны, то будет наблюдаться более сложная замкнутая кривая (рис.8.1).



Рис.8.1 Фигуры Лиссажу

В общем случае отношение частот равно

$$f_{изм} / f_{эт} = N_x / N_y \quad (8.3)$$

где N_x - число пересечений фигуры горизонтальной секущей; N_y - число пересечений фигуры вертикальной секущей.

Измерение угла сдвига фаз измеряемого напряжения от опорного напряжения одинаковой частоты возможно тремя способами:

- с использованием фигуры Лиссажу;
- с использованием внешней развертки от опорного напряжения;
- с использованием двухканального осциллографа.

В первом случае наклон наблюдаемого на экране эллипса определяется фазовым сдвигом двух напряжений. Его можно определить по геометрическим размерам эллипса, используя следующие соотношения (рис. 8.2):

$$\sin \varphi = \frac{A}{B} \text{ и } \varphi = \arcsin \frac{A}{B} \quad (8.4)$$

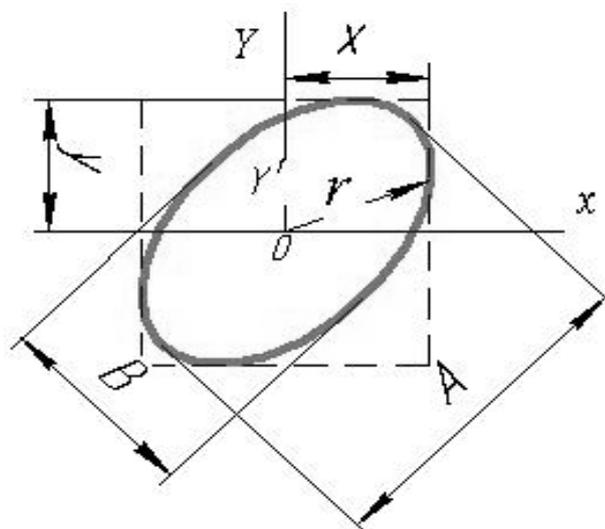


Рис.8.2. Использование фигуры Лиссажу для измерения фазового сдвига

При использовании внешней синхронизации от опорного сигнала надо одновременно подать опорное напряжение на вход «Y» и настроить канал синхронизации так, чтобы изображение кривой начиналось с одной из характерных точек, например, с точки перехода синусоиды от отрицательных значений к положительным (рис.8.3). Затем, на этот вход вместо опорного следует подать измеряемое напряжение, измерить по экрану расстояние от прежней характерной точки до новой и посчитать фазовый сдвиг по соотношению

$$\varphi = \frac{l_u}{l_T} \cdot 360^\circ = 2\pi \frac{l_u}{l_T} \quad (8.5)$$

где l_u - расстояние по экрану между характерными точками двух кривых; l_T - расстояние по экрану, соответствующее периоду колебания.

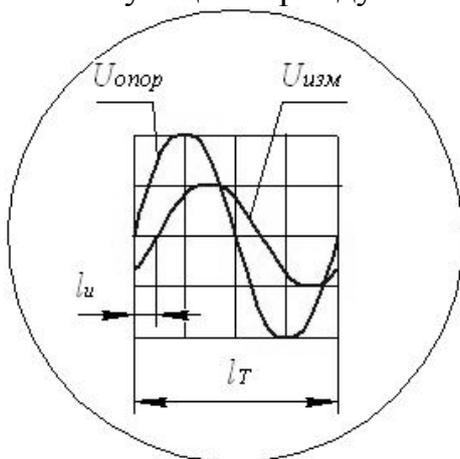


Рис.8.3. Измерение фазового сдвига с использованием внешней развертки от опорного напряжения

В третьем случае фазовый сдвиг определяется аналогично второму, но задача облегчается тем, что на экране наблюдаются обе кривые, т.е. можно использовать внутреннюю синхронизацию (рис.8.4).

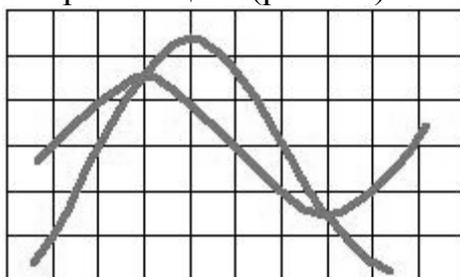


Рис.8.4. Измерение фазового сдвига с использованием двухканального осциллографа

Задачи

8.1. Определить значение угла сдвига фаз между напряжениями, изменяющимися по закону $u_1(t) = U_{m1} \cdot \sin(\omega t + \psi)$ и $u_2(t) = U_{m2} \cdot \sin \omega t$ и образующими на экране эллипс, если измерены значения $Y=4$ и $y^1=3$ в делениях шкалы (рис.8.2).

8.2. Определить частоту синусоидального сигнала, изображенного на экране осциллографа (рис.8.5) при

1) длительности развертки $D_p = 0,1$ мс/дел, множителя развертки $M_p = 1$ (масштаб 1:1, 1 дел. = 6 мм);

2) длительности развертки $D_p = 0,5$ мс/дел, множителя развертки $M_p = 0,2$.

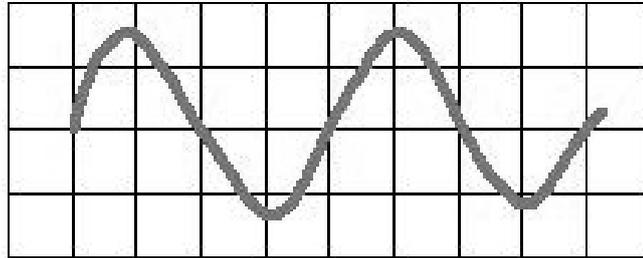


Рис.8.5.Осциллограмма исследуемого сигнала

8.3. Определить частоту f_x исследуемого сигнала по полученным на экране осциллографа фигурам Лиссажу (рис.8.6). Напряжение частот f_x и образцовой f_o подведены соответственно к горизонтальным и вертикальным пластинам ЭЛТ ($f_o = 1500$ Гц).

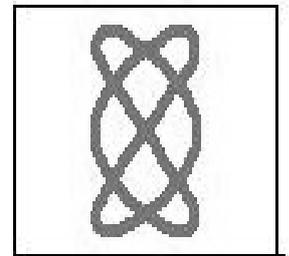
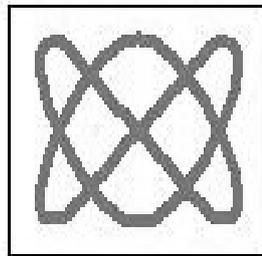
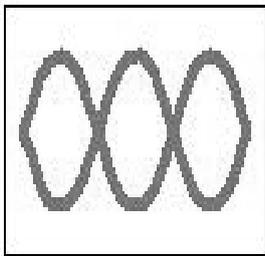


Рис.8.6.Фигуры Лиссажу

8.4. Определить масштаб времени линии развертки осциллографа, если при подведении на Y – вход импульсного сигнала от генератора типа Г5-15 с частотой $f=1$ кГц на экране осциллографа получилась осциллограмма, приведенная на рисунке 8.7. Масштаб изображения 1:1 (1 дел. = 6 мм).

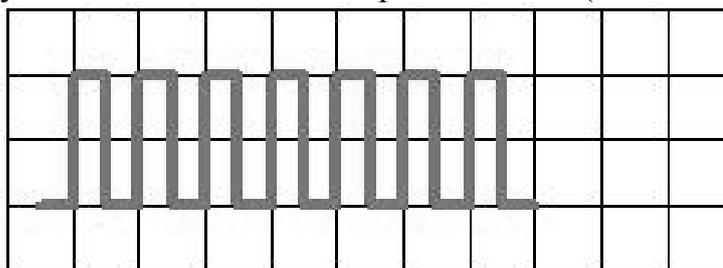


Рис.8.7.Осциллограмма исследуемого сигнала

8.5. Определить частоту f исследуемого сигнала генератора, напряжением которого осуществлена круговая развертка. Напряжение генератора с образцовой частотой $f_o = 1$ кГц подано на модулятор ЭЛТ. Осциллограмма, полученная на экране ЭЛТ, представлена на рисунке 8.8.

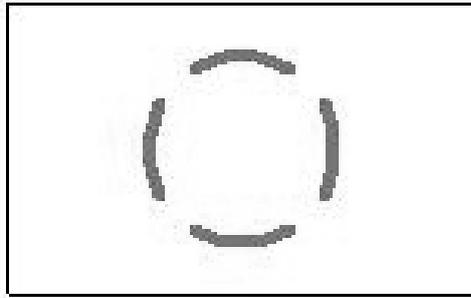


Рис.8.8.Осциллограмма исследуемого сигнала

8.6. Какова скорость развертки, если диапазон длительностей развертки в осциллографе простирается от 50 мс/дел до 0,2 мкс/дел. (1 дел. = 6 мм)?

8.7. Определить период и частоту синусоидального сигнала, изображенного на экране осциллографа, если отклонение луча l_x по горизонтали, соответствующее периоду, равно пяти делениям шкалы, значение длительности развертки $D_p = 0,5$ мс/дел, значение множителя развертки $M_p = 0,1$.

8.8. Определить значение угла сдвига фаз ψ между синусоидальными сигналами $u_1(t) = U_{m1} \cdot \sin \omega t$ и $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t - \psi)$ по осциллограммам на экране осциллографа (рис.8.9).



Рис.8.9.Осциллограмма исследуемых сигналов

Список использованной литературы

1. Метрология и радиоизмерения: Учебник для вузов. / Под ред. В.И. Нефедова – М.:Высшая школа, 2003. – 526с.
2. Пустовая О.А. Электрические измерения: Учебное пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 247с.
3. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. Уч.пособие для вузов.- М.: Высшая школа,1989-223с.
4. Демидова-Панферова Р.М. Задачи и примеры решения по электроизмерительной технике: Учебное пособие для вузов/ Р.М. Демидова-Панферова и др. – М.:Энергоатомиздат,1990.-192 с.

Дмитриева Ольга Венедиктовна

Методы и средства измерения электрических величин

Методические указания к практическим занятиям по курсу
«Метрология, стандартизация и сертификация»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления 220700. 62
«Автоматизация технологических процессов и производств»

Авторская редакция

Подписано к печати 06.03.2014	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,75	Уч.-изд. л. 1,75
Заказ 76	Тираж 50	Не для продажи

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.