

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

Н. И. Вяхирев, Ю. В. Крышнев, В. В. Гизенко

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»
дневной и заочной форм обучения
В трех частях
Часть 1**

Гомель 2009

УДК 621.317(075.8)
ББК 31.221я73
В99

*Рекомендовано научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 2 от 10.11.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. *В. В. Курганов*

Вяхирев, Н. И.
В99 Метрология, стандартизация и сертификация в электронике : лаборатор. практикум по одноим. курсу для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. и заоч. форм обучения. В 2 ч. Ч. 1 / Н. И. Вяхирев, Ю. В. Крышнев, В. В. Гизенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 108 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержатся необходимые сведения для освоения теоретического и практического закрепления знаний по метрологии (профиль – радиоэлектроника). Состоит из шести лабораторных работ на различные темы, касающиеся изучения электроизмерительных приборов, методов и средств измерения электрического сопротивления, мощности и энергии.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.317075.8)
ББК 31.221я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1. Цель работы

Целью работы является изучение характеристик электроизмерительных приборов, поверка электромеханического вольтметра, исследование частотных свойств и собственного потребления приборов.

2. Основные теоретические сведения

2.1. Характеристики электроизмерительных приборов

О качестве электроизмерительных приборов (ЭИП) судят по их характеристикам, к которым относятся:

1. Погрешности – Δ , δ , γ
2. Вариация показаний – V
3. Чувствительность – S
4. Собственное потребление – $P_{\text{ПОТР}}$
5. Время установления – $t_{\text{УСТ}}$
6. Полный динамический диапазон – D

Погрешность является основной характеристикой ЭИП и характеризует отклонение результата измерения X от действительного значения измеряемой величины (ИВ) X_d , под которым понимают значение ИВ, полученное более точным прибором. Различают:

абсолютную погрешность $\Delta X = X - X_d$, равную разности результата измерения и действительного значения;

относительную погрешность, выражаемую обычно в процентах:

$$\delta_{\text{ОТН}} = \frac{\Delta X}{X_d} \cdot 100\%;$$

приведенную погрешность:

$$\delta_{\text{ПР}} = \frac{\Delta X}{X_{\text{НОРМ}}} \cdot 100\%;$$

$X_{\text{НОРМ}}$ – нормирующее значение, которое может быть равно верхнему пределу измерений, диапазону измерений и длине шкалы.

Если принять, что абсолютная погрешность при измерениях не изменяется, то зависимость относительной погрешности от значения ИВ будет иметь вид, приведенный на рис. 1.

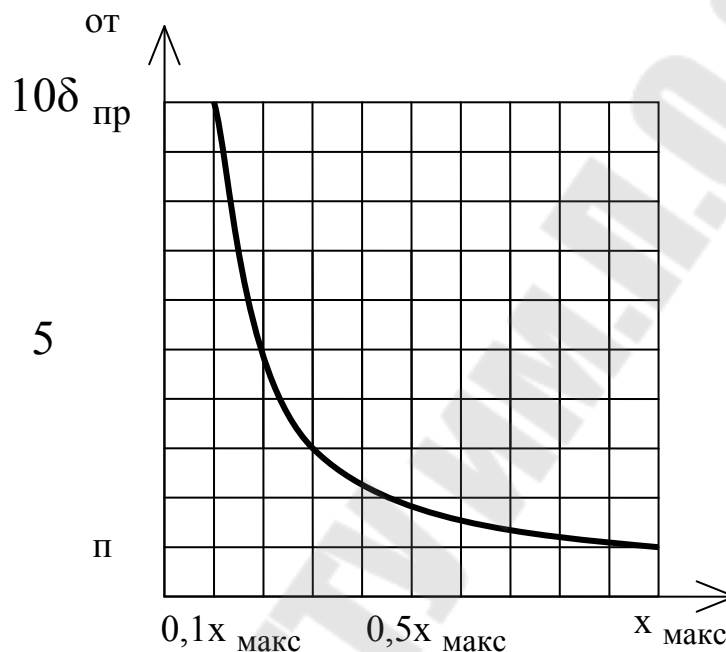


Рис.1. Зависимость относительной погрешности от значения измеряемой величины

На рисунке относительная погрешность выражена в величинах приведенной погрешности, а ИВ – в долях максимального значения. Как видно, в начале шкалы $\delta_{\text{отн}}$ во много раз больше $\delta_{\text{пр}}$, поэтому при измерениях следует выбирать такой предел измерения, при котором значение ИВ находится во второй половине шкалы.

По характеру изменения погрешностей выделяют:

1. Систематические.
2. Случайные.
3. Промахи.

Систематическими называют погрешности, которые остаются постоянными (например, внесенные при градуировке), или изменяются по определенному закону (например, при изменении температуры) при повторных измерениях одной и той же величины.

Систематические погрешности можно обнаружить и исключить из результата измерения, например, с помощью градуировки или поправочных таблиц.

Случайные погрешности изменяются случайным образом при измерении одной и той же величины при одинаковых условиях. Эти погрешности исключить нельзя, но учесть их влияние на результат измерения можно с помощью математического аппарата теории вероятностей.

Промахами называют погрешности, значительно превышающие ожидаемые значения. Они выявляются при повторных измерениях и отбрасываются, как не внушающие доверия. Промахи являются следствием неверных действий экспериментатора.

По условиям возникновения выделяют основную и дополнительную погрешности.

Основная – это погрешность, имеющая место при определенных условиях, называемых нормальными, при которых факторы, оказывающие влияние на результат измерения, находятся в определенных пределах, например, температура окружающей среды, уровень магнитных и электрических полей и др.

Дополнительная погрешность появляется при отклонении влияющих факторов от нормальных значений.

По природе возникновения выделяют:

1. Инструментальные погрешности.
2. Методические погрешности.
3. Погрешности отсчета.

Инструментальные погрешности обусловлены конструктивными и технологическими причинами, например, погрешности от неточности изготовления, градуировки, трения в опорах и т.д.

Методические погрешности обусловлены методом измерения. Наиболее характерным примером является методическая погрешность, вызванная собственным потреблением прибора. Например, при включении амперметра в цепь ток в исследуемой цепи изменяется из-за конечного значения сопротивления амперметра.

Погрешность отсчета зависит от типа отсчетного устройства. Так, при цифровом отсчете погрешность отсчета отсутствует. При стрелочном отсчете можно считать, что ее абсолютное значение составляет $0,3$ деления. Если потребовать, чтобы погрешность отсчета составляла $0,3 \cdot \delta_{\text{ДР}}$, то можно получить связь между максимальным

числом отсчетных делений прибора и приведенной погрешностью в следующем виде:

$$N_{\text{МАКС}} = \frac{1}{\delta_{\text{ПР}}},$$

где $\delta_{\text{ПР}}$ выражена в относительных единицах. Пользуясь этой формулой и приняв ширину деления равной 1мм, можно вычислить число делений и длину шкалы приборов с определенным значением приведенной погрешности (см. таблицу 1).

Таблица 1

Связь между приведенной погрешностью и длиной шкалы прибора

$\delta_{\text{ПР}}$	$N_{\text{МАКС}}$	L
1%	100 дел.	10 см
0,5%	200 дел.	20 см
0,1%	1000 дел	1 м

Как видно из таблицы 1, стрелочные приборы, обеспечивающие приведенную погрешность 0,1%, должны иметь длину шкалы 1 м. Для уменьшения габаритов таких приборов применяют двухстрочные шкалы со специальными делительными сетками.

Вариацией показаний называется разность между отдельными повторными показаниями прибора, соответствующими одному и тому же действительному значению ИВ при неизменных внешних условиях. Вариация показаний прибора $\delta_{\text{ВАР}}$ выражается в процентах от конечного значения рабочей части шкалы и определяется одновременно с определением основной погрешности на каждой отметке шкалы прибора сначала при увеличении, а затем при уменьшении ИВ. Поскольку точность отсчета по шкале контролируемого прибора невелика, практически вариации определяют по показаниям образцового прибора как разность действительных значений ИВ, соответствующих одному и тому же показанию испытуемого прибора

$$\delta_{\text{ВАР}} = \frac{X_{\text{двосх}} - X_{\text{днисх}}}{X_{\text{МАКС}}} \cdot 100\%.$$

Чувствительность определяется как производная от угла поворота α указателя по изменению ИВ

$$S = \frac{\partial \alpha}{\partial X}.$$

Если чувствительность постоянна, т.е. прибор имеет равномерную шкалу, то чувствительность равна отношению положения указателя к значению ИВ. Чувствительность показывает, сколько делений шкалы соответствует единице измерения физической величины.

Величина, обратная чувствительности, называется постоянной прибора:

$$C = \frac{1}{S} \left[\frac{\text{ед.изм}}{\text{дел}} \right].$$

Постоянная прибора показывает, какая часть единицы измерения физической величины соответствует одному делению.

Понятие чувствительности прибора позволяет представить погрешность прибора двухчленной формулой. Если построить зависимость абсолютной погрешности от изменения значения ИВ, то она будет в общем случае иметь вид, изображенный на рис.2. Значения погрешностей можно разделить на лежащие внутри прямых 1 и 1' и лежащие внутри прямых 1-1' и 1-2 и описать такой формулой:

$$\Delta X = \pm(\Delta X_0 + \gamma_S X) = \pm \Delta X_{\text{Ад}} \pm \Delta X_{\text{М}}$$

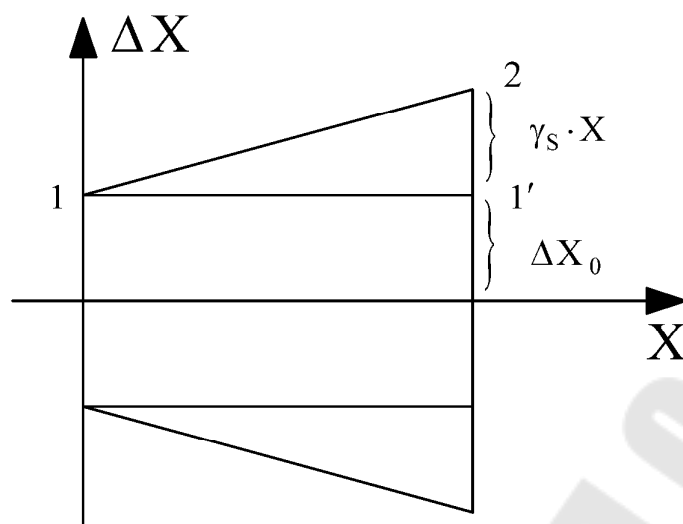


Рис.2. К пояснению понятий аддитивной и мультипликативной погрешностей.

В этой формуле составляющая $\Delta X_{\text{Ад}}$ определяет составляющую погрешности, которая не зависит от значения ИВ и называется аддитивной (от лат. additives-придаточный), а составляющая $\Delta X_{\text{М}} = \gamma_{\text{С}} X$ определяет составляющую погрешности, обусловленную изменением чувствительности и зависящую от значения ИВ и называется мультипликативной (от лат. multiplicato – умножение). Величина $\gamma_{\text{С}}$ определяет изменение чувствительности прибора.

Собственное потребление характеризует мощность, которую отбирает ЭИП от объекта измерения для формирования сигнала измерительной информации. Малое собственное потребление является достоинством прибора. Чем больше мощность, потребляемая прибором, тем больше изменяется режим цепи, в которой производится измерение при включении измерительного прибора. Кроме того, чем больше мощность, потребляемая прибором, тем на большую мощность должны быть рассчитаны вспомогательные элементы измерительной цепи – шунты, добавочные сопротивления, измерительные трансформаторы и т.п.

Временем установления называют время от момента изменения ИВ до момента, когда можно произвести отсчет. В соответствии с ГОСТ 23706-93 время установления электромеханических приборов определяется как время от момента подачи ИВ, равной половине максимального значения, до момента, когда отклонение указателя от точки равновесия не превышает 1% от длины шкалы. Для стрелочных приборов время установления должно быть меньше 4 с.

Полным динамическим диапазоном называют отношение максимального значения ИВ к порогу чувствительности $X_{\text{ПОР}}$.

$$D = \frac{X_{\text{МАКС}}}{X_{\text{ПОР}}}$$

Порогом чувствительности ЭИП называют минимальное значение ИВ, которое может быть измерено с гарантированной точностью.

2.2. Поверка, классы точности

Поверкой называют совокупность операций, в результате которых определяется класс точности прибора.

По точности приборы, в соответствии с ГОСТ 23706-93 делятся на восемь классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Прибору присваивается данный класс точности, если его основная приведенная погрешность на всех оцифрованных отметках шкалы и изменениях показаний прибора, вызываемых нормированными ГОСТом отклонениями влияющих факторов от их нормальных значений, не превышает значений, установленных ГОСТом для данного класса.

Все вновь изготовленные, а также находящиеся в эксплуатации и выпускаемые из ремонта ЭИП подлежат поверке, согласно правилам Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь (Госстандарт). Методы и содержание поверки установлены соответствующими стандартами и инструкциями Госстандарта, причем во всех случаях поверка включает определение основной приведенной погрешности прибора.

Поверку приборов классов точности 0,5÷4,0 обычно производят путем сравнения показаний испытуемых приборов с показаниями образцового прибора. Поверку приборов классов точности 0,05÷0,2 производят с помощью специальных установок обычно компенсационным методом.

2.3. Влияние частоты на показание ЭИП

Каждый электроизмерительный прибор переменного тока рассчитан на применение при определенной частоте, или в определенном диапазоне частот. Изменение частоты тока или напряжения относительно указанных частоты или диапазона частот, приводит к дополнительной погрешности.

В соответствии с ГОСТ 23706-93 на шкале каждого прибора должна быть указана его номинальная частота (если она отличается от 50 Гц) или номинальная область частот. Основная приведенная погрешность таких приборов не должна превышать значения, соответствующего их классу точности на номинальной частоте или в диапазоне номинальных частот. Причем, для приборов, у которых указана номинальная частота, класс точности должен обеспечиваться и при отклонении частоты от номинальной на $\pm 10\%$.

Довольно часто наряду с номинальным диапазоном, указывается также расширенная область частот или расширенный диапазон частот. Для частот, соответствующих расширенному диапазону частот, дополнительная приведенная погрешность не должна превышать значения, соответствующего классу точности прибора, а максимальная погрешность не будет, таким образом превышать удвоенного значения класса точности.

Для некоторых приборов иногда еще указывается дополнительная область частот. Допустимые значения погрешностей для этой области частот ГОСТ 23706-93 не нормируются и устанавливаются непосредственно заводом-изготовителем.

Области (диапазоны) частот с гарантированными погрешностями определяются по частотным характеристикам приборов, которые представляют собой зависимости отклонения указателя прибора (в единицах измеряемой величины, в делениях или процентах от максимального значения) от частоты при неизменном действительном значении измеряемой величины.

2.4. Влияние формы кривой на показания приборов

Электромагнитные, электродинамические и электростатические приборы измеряют действующее (эффективное) значение измеряемой величины. Под действующим (эффективным) значением переменного тока понимают такое значение постоянного тока, которое производит такой же тепловой или электродинамический эффект, как и переменный ток. Если приравнять количество выделившейся теплоты за время периода T на сопротивлении R постоянным током I и переменным i , то получится следующее равенство:

$$\int_0^T I^2 \cdot R \, dt = \int_0^T i^2 \cdot R \, dt,$$

из которого следует, что действующее значение I переменного тока, связано с мгновенным i следующим образом:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 \cdot R dt}$$

Если переменный ток – синусоидальной формы, то

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}$$

Магнитоэлектрические приборы могут применяться для измерения переменных напряжений и токов только с преобразователями переменного напряжения в постоянное, в качестве которых используются выпрямители и термопреобразователи. Выходное постоянное напряжение выпрямителей пропорционально среднему значению преобразуемого переменного напряжения:

$$U_{CP1} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T/2} U dt - \text{для однополупериодного преобразования,}$$

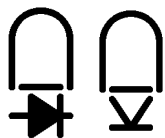
$$U_{CP2} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} U dt - \text{для двухполупериодного преобразования.}$$

Для формирования выпрямленного напряжения используется одна полуволна переменного напряжения, которая усредняется либо за период (U_{CP1}), либо за полпериода (U_{CP2}). Если переменные напряжения синусоидальны, то

$$U_{CP1} = \frac{U_M}{\pi}, \quad \text{а} \quad U_{CP2} = \frac{2U_M}{\pi}$$

В случае применения термопреобразователей, будут измеряться действующие значения.

Для приборов с выпрямительными и термоэлектрическими преобразователями приняты такие условные обозначения:



Для измерения переменных напряжений и токов широко применяются и электронные приборы. В них измеряемые сигналы сначала усиливаются, затем преобразуются в постоянное напряжение, которое измеряется либо стрелочными приборами магнитоэлектрической системы, либо преобразуется в цифры (приборы с цифровым отсчетом). В качестве преобразователей применяются выпрямители (детекторы) среднего и амплитудного значения, а также термоэлектрические преобразователи.

Форма измеряемых переменных сигналов может значительно отличаться от синусоидальной. Оценка отличия формы кривой от синусоидальной осуществляется с помощью коэффициентов формы (K_{Φ}) и амплитуды (K_A):

$$K_{\Phi} = \frac{U}{U_{\text{CP}}}; K_A = \frac{U_M}{U}$$

Для сигналов синусоидальной формы:

$$K_{\Phi} = \frac{U}{U_{\text{CP}}} = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2U_M} \approx 1,11$$

$$K_A = U_M \cdot \frac{\sqrt{2}}{U_M} \approx 1,41$$

Приборы с выпрямителем среднего значения покажут среднее значение, с выпрямителем амплитудного значения – амплитудное значение, а с термоэлектрическим преобразователем – действующее значение.

3. Схема и методика проведения эксперимента

3.1. Поверка

В данной работе поверка сводится к определению приведенной погрешности и вариации показаний вольтметра.

Схема эксперимента приведена на рис.1.

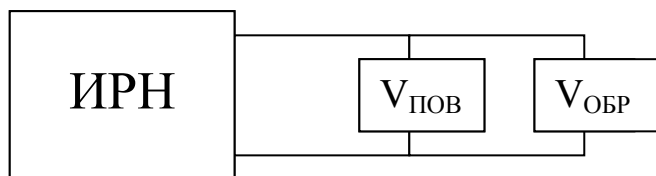


Рис.1. Схема определения приведенной погрешности и вариации показаний.

На рис. 1: ИРН – источник регулируемого стабильного напряжения постоянного тока, $V_{\text{ПОВ}}$ – поверяемый вольтметр, $V_{\text{ОБР}}$ – образцовый вольтметр.

В качестве ИРН используется стабилизированный источник напряжения постоянного тока.

В качестве образцового используется цифровой вольтметр В7-27.

Напряжение постоянного тока подается на его клеммы «U» и «0», знак напряжения относительно клеммы «0» индицируется автоматически. Предел измерения и род измеряемой величины устанавливается одним переключателем, находящимся в правом верхнем углу.

Проверку проводят в следующем порядке. В начале проверяют, находится ли указатель поверяемого прибора на нулевой отметке шкалы при отсутствии напряжения. В случае необходимости указатель устанавливают на нулевую отметку с помощью корректора.

Затем включают ИРН и последовательно устанавливают указатель испытываемого прибора на всех оцифрованных отметках шкалы сначала при возрастании измеряемой величины от нуля до максимального значения, а затем по тем же точкам при убывании от максимального значения до нуля. Для всех этих точек по образцовому прибору определяют действительное значение измеряемой величины. При определении погрешностей необходимо следить за тем, чтобы стрелка подходила к очередной отметке плавно и только с одной стороны.

Для всех точек вычисляют абсолютные приведенные погрешности. По тем же данным вычисляют для каждой точки вариацию показаний.

Результаты измерений и вычислений необходимо свести в таблицу 1.

Результаты поверки вольтметра

Показания \rightarrow	
$V_{\text{ПОВ}}$ [] \leftarrow	
Показания \rightarrow	
$V_{\text{ОБР}}$ [] \leftarrow	
Δ \rightarrow	
Δ \leftarrow	
$\delta_{\text{ПР}}$ [%] \rightarrow	
$\delta_{\text{ПР}}$ [%] \leftarrow	
Вариация показаний [%]	

3.2. Исследования частотных свойств приборов

Для снятия частотных характеристик вольтметров разных систем, они подключаются к генератору синусоидальных колебаний согласно рис.3.

В качестве образцового принимается универсальный электронный прибор В7-27. В обозначениях электронных приборов буква отражает назначение прибора (В - вольтметр), первая после буквы цифра отражает род измеряемого тока (2 - постоянный ток, 3 - переменный ток, 7 - постоянный и переменный ток, универсальный прибор). Вольтметр В3-38 - электронный вольтметр переменного тока со стрелочным отсчетом.

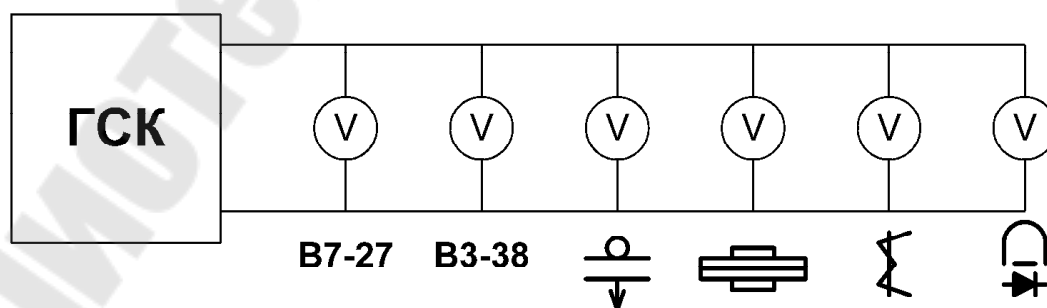






Рис.3. Схема снятия частотных характеристик вольтметров разных систем

Для снятия частотных характеристик собирают схему рис.3, устанавливают по образцовому вольтметру при частоте 20 Гц, какое-либо напряжение (например, 50В) и записывают показания всех приборов. Затем начинают увеличивать частоту выходного напряжения, поддерживая по образцовому вольтметру подаваемое напряжение на неизменном уровне. Показания приборов записывают в таблицу 3, определяя абсолютные и приведенные погрешности. Если при снятии характеристик погрешности отдельных приборов увеличиваются до величины, при которой указатель выходит за пределы шкалы, то такие приборы нужно отключить.

Таблица 2

Результаты снятия частотных характеристик приборов

	B7-27		B3-38 $\Delta U_{\text{кЛ}} =$		 $\Delta U_{\text{кЛ}} =$			 $\Delta U_{\text{кЛ}} =$			 $\Delta U_{\text{кЛ}} =$			 $\Delta U_{\text{кЛ}} =$		
	U []	U []	ΔU []	$\delta_{\text{пр}}$ [%]	U	Δ	$\delta_{\text{пр}}$	U	Δ	$\delta_{\text{пр}}$	U	Δ	$\delta_{\text{пр}}$	U	Δ	$\delta_{\text{пр}}$
20 Гц																
50 Гц																

Необходимо отметить, что даже на номинальной частоте показания всех вольтметров будут несколько отличаться друг от друга из-за различного класса точности. Для этого, чтобы убедиться, что эти расхождения не превышают допустимых для вольтметров значений, необходимо перед началом опыта вычислить для каждого вольтметра (по его классу точности) допустимые для них абсолютные погрешности $\Delta U_{\text{кЛ}}$ и проверить, совместимы ли наблюдаемые расхождения с требованиями к точности сравниваемых приборов.

3.3. Определение собственного потребления приборов

Собственное потребление амперметров и вольтметров обычно характеризуется потребляемой ими мощностью в вольт-амперах при номинальном значении тока $I_{\text{н}}$ для амперметров или напряжения $U_{\text{н}}$ для вольтметров.

Потребление вольтметров часто характеризует также величиной тока полного отклонения или сопротивлением цепи прибора в Омх на 1В номинального напряжения.

Измерение тока полного отклонения I_{Π} вольтметра производят по схеме рис.4. Потребляемая мощность равна $P_{\text{ПОТР}} = U_{\text{Н}} \cdot I_{\Pi}$ [В·А].

Входное сопротивление $R_{\Pi} = \frac{U_{\text{Н}}}{I_{\Pi}}$ [Ом]

Сопротивление на 1В рабочего напряжения будет: $\frac{R_{\Pi}}{U_{\text{Н}}}$

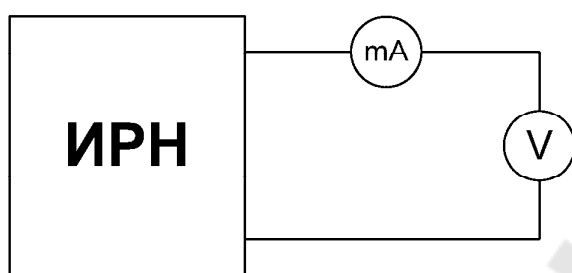


Рис.4. Схема определения тока полного отклонения вольтметра

Для определения собственного потребления амперметров измеряется милливольтметром падение напряжения на его зажимах при номинальном токе.

Если сопротивление вольтметра настолько велико, что непосредственное измерение тока полного отклонения затруднительно (например, электронные, выпрямительные вольтметры), то измерение входного сопротивления можно осуществить следующим методом: последовательно с вольтметром включают магазин сопротивлений R (рис.5). Установив сначала сопротивление магазина $R=0$, устанавливают напряжения на вольтметре, равным максимальному значению или какому-либо другому U_1 . Затем увеличивают сопротивление магазина до тех пор, пока вольтметр не покажет какое-либо меньшее напряжение U_2 . Легко показать, что, если сопротивление магазина при этом будет R_M , то сопротивление вольтметра равно:

$$R_{\text{ВХ}} = R_M \cdot \frac{U_2}{U_1 - U_2} \text{ [Ом]}$$

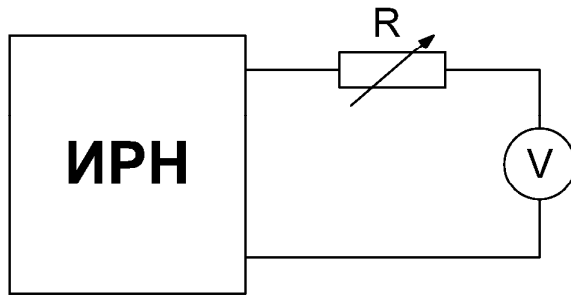


Рис.5. Схема определения входного сопротивления вольтметров с очень малым потреблением

В электростатических вольтметрах входное сопротивление определяется его входной емкостью и зависит от частоты измеряемого напряжения. В электронных вольтметрах входное сопротивление определяется сопротивлением входного делителя.

4. Задание

Для подготовки к работе необходимо ознакомиться по лекциям, учебникам, учебным пособиям с принципом действия, устройством и общими свойствами магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических, электростатических, выпрямительных и электронных приборов и с характеристиками электроизмерительных приборов. Перед работой следует внимательно рассмотреть макеты приборов указанных систем, имеющиеся на демонстрационных стендах лаборатории.

4.1. Ознакомится с приборами, имеющимися на лабораторном стенде и столе. Составить перечень приборов, записать подробно все паспортные данные этих приборов.

4.2. Произвести поверку магнитоэлектрического вольтметра в соответствии с п.3.1. Записать данные (обозначение, класс точности) поверяемого и образцового вольтметров. По результатам таблицы 1 сделать вывод о том, к какому классу точности может быть отнесен поверяемый вольтметр.

4.3. Снять частотные характеристики электромагнитного, электродинамического, электростатического, выпрямительного (тестер), электронного вольтметров в соответствии с п.3.2. для следующих частот 20Гц, 50Гц, 150Гц, 200Гц, 300Гц, 1кГц, 1,5кГц, 3кГц, 10кГц,

100кГц, 200кГц. Записать данные вольтметров, результаты эксперимента свести в таблицу 2.

По результатам таблицы 2 построить зависимости $U_{\text{изм}}$ от частоты для всех испытываемых приборов.

4.4. Для вольтметров магнитоэлектрической, электродинамической, электромагнитной систем и тестера определить или вычислить по данным, приведенным на шкалах, собственное потребление на отметке шкалы 30В, а также вычислить для данного предела измерения входное сопротивление в Ом и в Ом, приходящихся на 1В. Результаты свести в таблицу 3.

Таблица 3

Тип прибора	$P_{\text{СОБСТВ}}$ [ВА]	R [Ом]	$R/U_{\text{ПР}}$ [Ом/В]

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы экспериментов, результаты экспериментов и результаты их обработки по всем пунктам задания с таблицами и результатами вычислений.

6. Контрольные вопросы

1. Какова размерность абсолютной, относительной, приведенной погрешностей?
2. Назовите характеристики электроизмерительных приборов.
3. Как определить систематическую и случайную погрешности?
4. Каков характер зависимости относительной погрешности от значения измеряемой величины?
5. Что такое чувствительность и постоянная ЭИП, какова их размерность?
6. Что называют поверкой прибора?
7. Чем отличаются основная и дополнительная погрешности?
8. Что такое аддитивная и мультипликативная погрешности?
9. Что называют временем установления?
10. Что такое собственное потребление прибора?
11. Что называют полным динамическим диапазоном?
12. Назовите классы точности приборов.

13. Определите понятия нормальной, расширенной и дополнительной областей (диапазонов) частот.
14. Определите понятие действующего значения.
15. Определите понятие среднего значения.
16. Какие из электромеханических приборов измеряют действующее значение?
17. Какие приборы измеряют среднее значение?
18. Что такое коэффициенты формы и амплитуды?
19. Как устроены электронные измерительные приборы?
20. Как определяется частотная характеристика приборов?
21. Как определяется вариация показаний прибора?
22. Как проводится поверка приборов?
23. Как определить собственное потребление прибора?
24. Чему равно входное сопротивление электростатического вольтметра на постоянном токе?
25. Какие из электромеханических приборов являются измерителями тока и какие – напряжения?
26. Какой вольтметр используется в качестве образцового?
27. Почему в качестве ИРН нельзя использовать нестабилизированный источник питания?
28. Почему генератор синусоидальных колебаний, используемый при снятии частотных характеристик, должен иметь малое выходное сопротивление?
29. Что обозначает буква и первая цифра электронных приборов?
30. Каким образом регулируется величина частоты выходного напряжения генератора ГЗ-56?
31. Что такое ток полного отклонения и как его измерить?
32. Как можно определить входное сопротивление электронных вольтметров (с большим входным сопротивлением)?
33. Как определить коэффициент формы несинусоидального напряжения по показанию приборов действующего и среднего значения?
34. Чему равно входное сопротивление электростатического вольтметра на постоянном токе, чем определяется на переменном токе?
35. Что такое «влияющие факторы»?
36. Что такое «нормальные условия»?
37. Изобразите условные обозначения приборов всех систем.

Литература

1. Электрические измерения. – Под ред. А.В. Фремке. – Л.: Энергия, 1973. – С.14-22, С. 40-45, С. 59-84, С. 113-129.
2. Электрические измерения. – Под ред. Е.Г. Шрамкова, - М.: Высшая школа, 1972. – С. 37-50, С. 90-90.
3. ГОСТ 23706-93. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 6. Особые требования к омметрам (приборам для измерения полного сопротивления) и приборам для измерения активной проводимости.
4. Основные термины в области метрологии: Словарь справочник. – Юдин М.Ф., Селиванов М.Н., Тищенко О.Ф., Скороходов А.И.; Под ред. Торбеева Ю.В. – Издательство стандартов, 1989, – 113 с.
5. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. Пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.: ил.
6. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с устройством и особенностями современных осциллографов, с их применением для измерения электрических величин, приобретение навыков работы с ними.

2. Основные теоретические сведения

Назначение и устройство осциллографов

Осциллографы предназначены для наблюдения на экране быстротекущих процессов, представленных в виде колебаний электрического напряжения. Осциллографы позволяют измерять постоянное и переменное напряжение, сдвиг по фазе, длительность, амплитуду и период повторения импульсов, частоту колебаний, ток.

Блок-схема осциллографа приведена на рис.1, где условно обозначены: ЭЛТ – электроннолучевая трубка, УВ – усилитель вертикального отклонения, УГ – усилитель горизонтального отклонения, ГР – генератор развертки.

Основными элементами электроннолучевой трубки являются Э – светящийся экран, аноды А1, А2, сетка С, катод К, отклоняющие пластины P_x и P_y . На электроды трубки подаются необходимые питающие напряжения. Назначение элементов: катод в результате нагревания эмиттирует электроны, аноды А1 и А2 ускоряют электроны и фокусируют их в пучок, изменением напряжения на сетке С относительно катода регулируют яркость луча. Пластины P_x и P_y расположены взаимно перпендикулярно и предназначены для отклонения луча по горизонтали и вертикали.

На пластины P_y , отклоняющие луч по вертикали, подается исследуемый сигнал через усилитель вертикального отклонения УВ. Ввиду того, что пучок электронов обладает большим быстродействием, он полностью повторяет закон изменения во времени выходного напряжения U_y усилителя УВ. Частотный диапазон сигналов, которые можно наблюдать на ЭЛТ, определяется частотными характеристика-

ми усилителя вертикального отклонения. Если необходимо наблюдать высокочастотные сигналы, то усилитель должен обладать широкой полосой пропускания в сторону высоких частот, если же необходимо наблюдать медленно изменяющиеся процессы или постоянное напряжение, то в качестве усилителя вертикального отклонения может применяться низкочастотный усилитель.

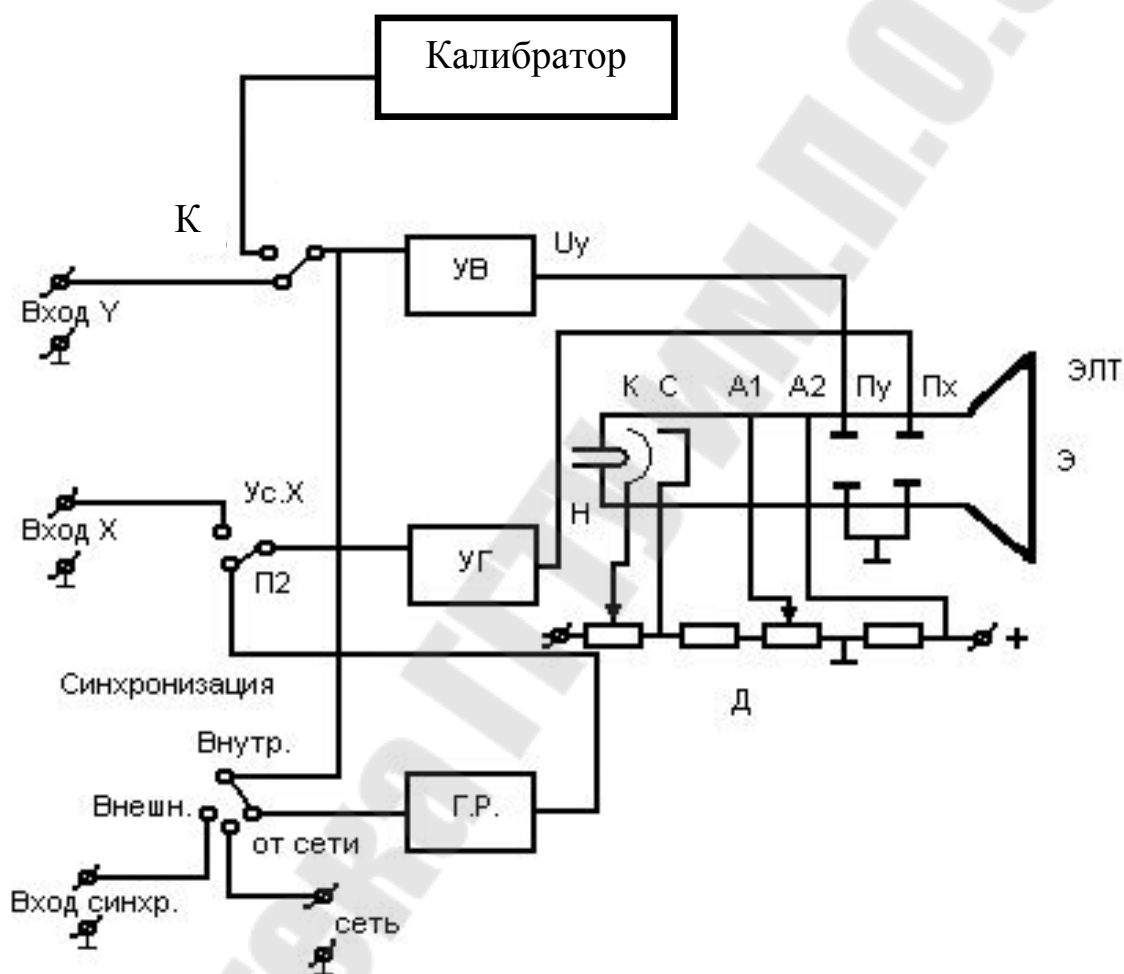


Рис. 1. Блок-схема осциллографа

2.1.1. Блок развертки и синхронизация

Блок развертки обеспечивает:

- перемещение луча по экрану ЭЛТ в горизонтальном направлении,

б) возможность наблюдения на экране процессов, протекающих с разной скоростью,

в) получение на экране неподвижного изображения.

Для возможности наблюдения на экране сигнала, изменяющегося во времени, необходимо, чтобы луч в горизонтальном направлении перемещался пропорционально времени с определенной скоростью. Перемещение луча во времени достигается подачей на горизонтально-отклоняющие пластины развертывающего напряжения, линейно-изменяющегося во времени (рис. 2), которое формируется генератором развертки ГР (рис. 1).

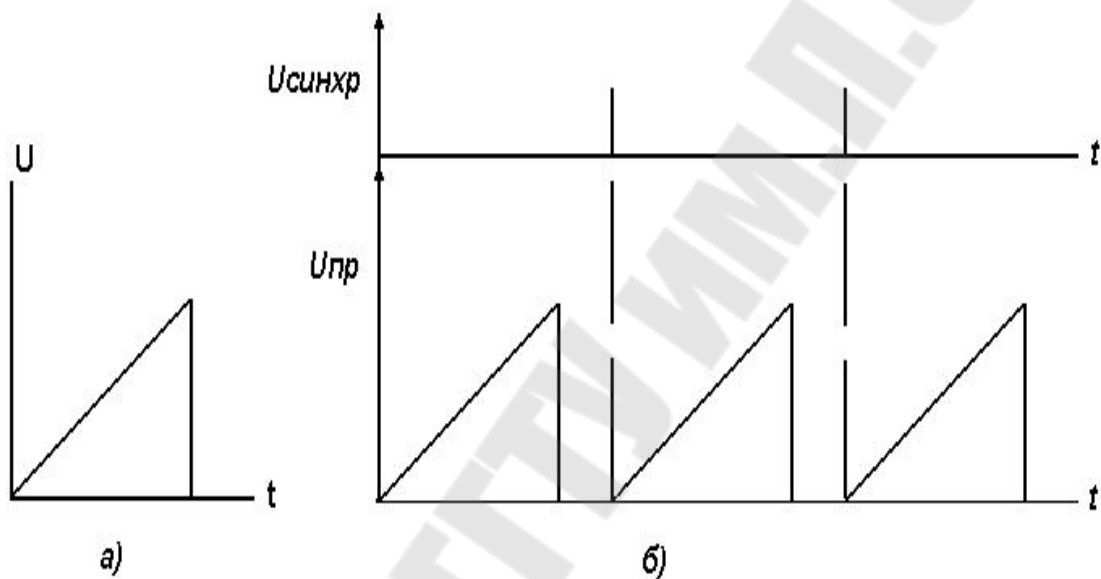


Рис.2. Форма напряжения развертки (а) и процесс развертки во времени (б)

Скорость перемещения луча по экрану и длительность развертки (т.е. время, за которое луч «проходит» экран), определяется крутизной линейно-нарастающего напряжения. Такое напряжение в осциллографах формируется за счет заряда емкости постоянным током, а крутизна его изменяется переключением величины емкости.

Ввиду того, что с помощью осциллографа обычно наблюдают периодические сигналы с периодом повторения, составляющим микросекунды и миллисекунды, для возможности их высвечивания и наблюдения необходимо повторять эти кривые на экране, причем таким образом, что бы они, накладываясь друг на друга, давали устойчивое неподвижное изображение. Для формирования неподвижного изображения служит синхронизация, которая заключается в том, что ли-

нейно-нарастающее напряжение развертки начинается всегда в момент, соответствующий одному и тому же значению наблюдаемого периодического сигнала.

В зависимости от того, каким сигналом определяется момент начала развертки, различают:

1. Внутреннюю синхронизацию
2. Внешнюю синхронизацию
3. Синхронизацию от сети.

При внутренней синхронизации момент запуска развертки определяется исследуемым сигналом; при внешней – внешним сигналом, подаваемым на специальный вход «вход синхронизации»; при синхронизации от сети – момент начала развертки определяется сетевым напряжением.

2.1.2. Калибратор

Калибровка заключается в регулировке коэффициентов усиления УВ и УГ с тем, чтобы чувствительность осциллографа по горизонтали и вертикали соответствовала обозначенным на лицевой панели значениям. Все современные осциллографы снабжены калибраторами, которые вырабатывают переменное напряжение прямоугольной формы стабильной амплитуды и частоты. При калибровке выходной сигнал калибратора подается на вход усилителя вертикального отклонения (вход Y).

Калибровка амплитуды служит для градуировки вертикальных делений шкалы на экране осциллографа. Специальной ручкой, выведенной под шлиц, усиление изменяется так, чтобы амплитуда импульсов соответствовала амплитуде сигнала калибратора. В современных осциллографах кроме плавного регулирования, коэффициент усиления изменяется переключателем дискретно. Чувствительность осциллографа по вертикали при этом изменяется также дискретно, и цена деления вертикальной шкалы на экране осциллографа считывается против положения указателя чувствительности.

Калибратор длительности служит для градуировки горизонтальных делений шкалы осциллографа. В современных осциллографах длительность развертки может изменяться плавно и дискретно через определенные интервалы, причем цена горизонтального деления считывается против положения указателя переключателя чувствительности по горизонтали. Калибровка длительности развертки осуществля-

ется в определенном положении переключателя чувствительности по горизонтали путем изменения специальным регулятором, выведенном под шлиц, коэффициента усиления УГ до получения на градуированной части горизонтальной шкалы осциллографа определенного, оговоренного в инструкции, числа колебаний. Отградуированная во времени горизонтальная шкала экрана осциллографа позволяет считывать по экрану длительность исследуемых импульсов, определять период и частоту наблюдаемых колебаний, а также фазовый сдвиг между двумя синусоидальными напряжениями.

Калибровка осуществляется при выведенных до щелчка плавных регулировках чувствительности по вертикали и горизонтали на лицевой панели осциллографа.

2.1.3. Усилители вертикального и горизонтального отклонения

Усилители вертикального отклонения современных осциллографов могут работать в двух режимах – в режиме усилителя постоянного тока и в режиме усилителя переменного тока. Как правило, во втором случае они имеют больший коэффициент усиления. С одного режима на другой усилитель переводится специальным переключателем, обычно расположенным рядом с входом У. Иногда в инструкциях режим усиления по постоянному току называют режимом «с открытым входом», понимая под этим, что постоянная составляющая исследуемого сигнала подается на вход усилителя; а режим усиления по переменному току – режимом «с закрытым входом», подразумевая, что постоянная составляющая сигнала на вход усилителя осциллографа не подается. Применение усилителя постоянного тока позволяет измерять осциллографом постоянное напряжение, наблюдать положительные и отрицательные импульсы, правильно измерять положительные и отрицательные амплитуды несимметричных импульсов, наблюдать без искажений низкочастотные сигналы.

Вход Х является входом усилителя горизонтального отклонения (рис.1). Он используется при наблюдении на осциллографе фигур Лиссажу, когда на вертикальные и горизонтальные пластины подаются сигналы синусоидальной формы определенной частоты. По получившимся на экране изображениям можно судить о частоте сигнала, подаваемого на вертикальные пластины, о фазовом сдвиге между этими сигналами.

2.2. Применение электроннолучевых осциллографов

2.2.1. Измерение напряжений

Измерение напряжений осциллографом осуществляется по калиброванной шкале с учетом положения переключателя чувствительности по вертикали. Постоянное напряжение должно измеряться при «открытом входе». Полярность постоянного напряжения определяется по перемещению луча относительно нулевой линии. При положительной полярности луч расположен выше нулевой линии, при отрицательной – ниже. Расположение нулевой линии определяется закорачиванием входа осциллографа (соединение концов шнура осциллографа). Полярность постоянного напряжения осциллографом определяется относительно «земляного» зажима шнура осциллографа. Для определения «земляного» (общего) конца нужно поочередно взять в руку концы шнура, не дотрагиваясь при этом до корпуса осциллографа. Если в руке находится «земляной» конец, на экране осциллографа будет высвечиваться ровная линия даже при высокой чувствительности усилителя вертикального усиления. Если в руке сигнальный конец, то на экране осциллографа будет большой (порядка вольт или больше) шумовой сигнал – наводка частотой приблизительно 50 Гц.

Переменное напряжение может измеряться при открытом входе, если в исследуемом сигнале нет постоянной составляющей, и при закрытом. По осциллографу измеряется амплитудное значение синусоидального напряжения, а действующее значение определяется по известной связи:
$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}.$$

2.2.2. Измерение периода и частоты периодических сигналов и параметров импульсов

Измерение периода осциллографом осуществляется по калиброванной горизонтальной шкале с учетом положения переключателя чувствительности осциллографа по горизонтали. Вначале определяется длительность периода в делениях шкалы, например 2,4 деления, а затем с учетом цены деления, определяемой по положению переключателя, например 5 мс/дел, определяют величину периода:

$$T = N[\text{дел}] \cdot C \left[\frac{\text{мс}}{\text{дел}} \right] = 2,4 \text{ дел} \cdot 5 \frac{\text{мс}}{\text{дел}} = 12 \text{ мс}.$$

Длительность периода на экране следует определять по расстоянию между одинаковыми переходами через нуль исследуемого сигнала. Частота исследуемого сигнала определяется по формуле, связывающей частоту и период: $f=1/T$.

Основными параметрами импульсов являются длительность, амплитуда и период повторения. Период повторения и длительность измеряются так же, как описано выше. Амплитуда импульсов должна измеряться при «открытом» входе. В противном случае однополярные импульсы (рис. 3а) амплитудой U_m будут выглядеть как двуполярные с амплитудами ΔU_+ и ΔU_- – относительно среднего значения напряжения $U_{\text{ср}}$ (рис. 3а), а двуполярные импульсы с положительной и отрицательной амплитудами U_+ и U_- – будут представляться импульсами с амплитудами ΔU_+ и ΔU_- – относительно среднего значения напряжения $U_{\text{ср}}$ (рис. 3б).

2.2.3. Измерение фазового сдвига

Фазовый сдвиг может быть измерен либо при помощи калиброванной горизонтальной шкалы разверток, либо по фигуре Лиссажу.

Измерение по калиброванной развертке

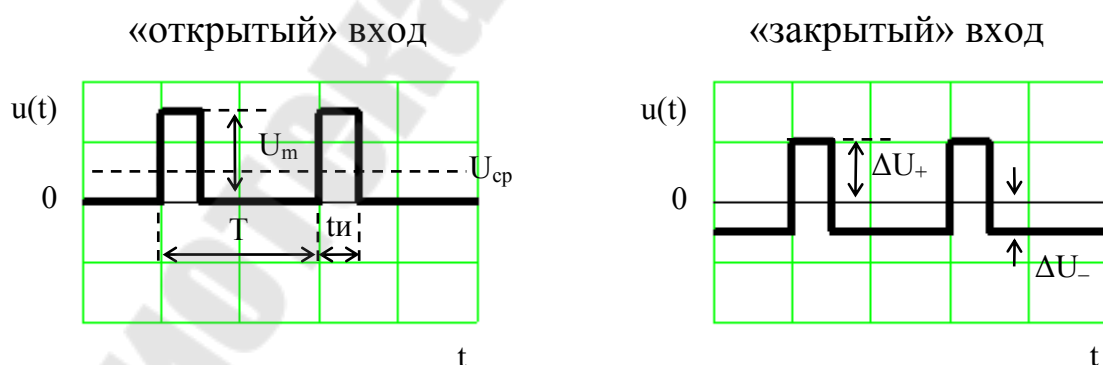
При измерении с помощью калиброванной развертки определяют длительность $t_{\text{И}}$ между одинаковыми переходами через нуль синусоидальных напряжений (например, от отрицательной к положительной полуволне) (рис.4а), а сдвиг определяют как $\phi = \omega \cdot t_{\text{И}}$. На рис. 4а сигнал U_2 отстает по фазе от U_1 , а U_3 – опережает U_1 . Для измерения используется режим внешней синхронизации, при переключатель «синхронизация» устанавливается в положение «внешняя». На вход «внешняя синхронизация» подается сигнал такой же частоты, как и исследуемые (возможно использовать один из исследуемых сигналов).

На вход Y подается сигнал U_1 , ручкой «уровень» получается неподвижное изображение на экране осциллографа. Регулятором го-

горизонтального смещения, обозначенным знаком « \leftrightarrow », устанавливается положительный переход синусоиды через нуль на начало шкалы, как показано на рис. 4а. Затем, не изменяя положения регулятора «уровень», подается на вход Y сигнал U_2 и измеряют длительность $t_{и}$ между положительными переходами. Как видно из рис. 4а, переход от положительной полуволны к отрицательной для отстающего по фазе напряжения находится правее аналогичного перехода опережающего напряжения.

В настоящее время широко распространены двухканальные осциллографы (С1-83, С1-137 и др.), имеющие два канала вертикального отклонения и два входа $Y1$ и $Y2$. Сигнал U_1 подается на вход первого канала, U_2 – второго. Переключатель режима работы осциллографа устанавливается в положение «...» или « \rightarrow »». В этом случае можно использовать также режим внутренней синхронизации. Ручкой «уровень» получается неподвижное изображение двух сигналов на экране осциллографа. Измеряется сдвиг $t_{и}$ одного сигнала относительно другого.

По осциллографу описанным методом можно определить чередование фаз трехфазного напряжения. На вход Y через шнур с ослаблением в 10 раз поочередно подается напряжение отдельных фаз. Положительный переход через нуль напряжения U_B должен отставать от положительного перехода через нуль напряжения U_A на треть периода ($T/3$), что соответствует 120° ; напряжение U_C должно отставать от U_B на $T/3$, как изображено на рис. 4б.



а)

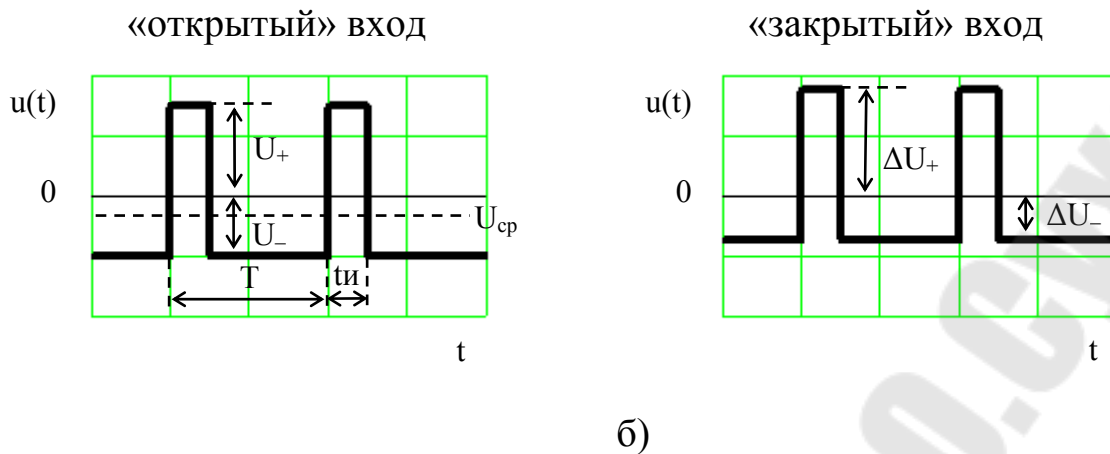


Рис.3. Временные диаграммы – вид импульсов при «открытом» (а) и при «закрытом» (б) входе

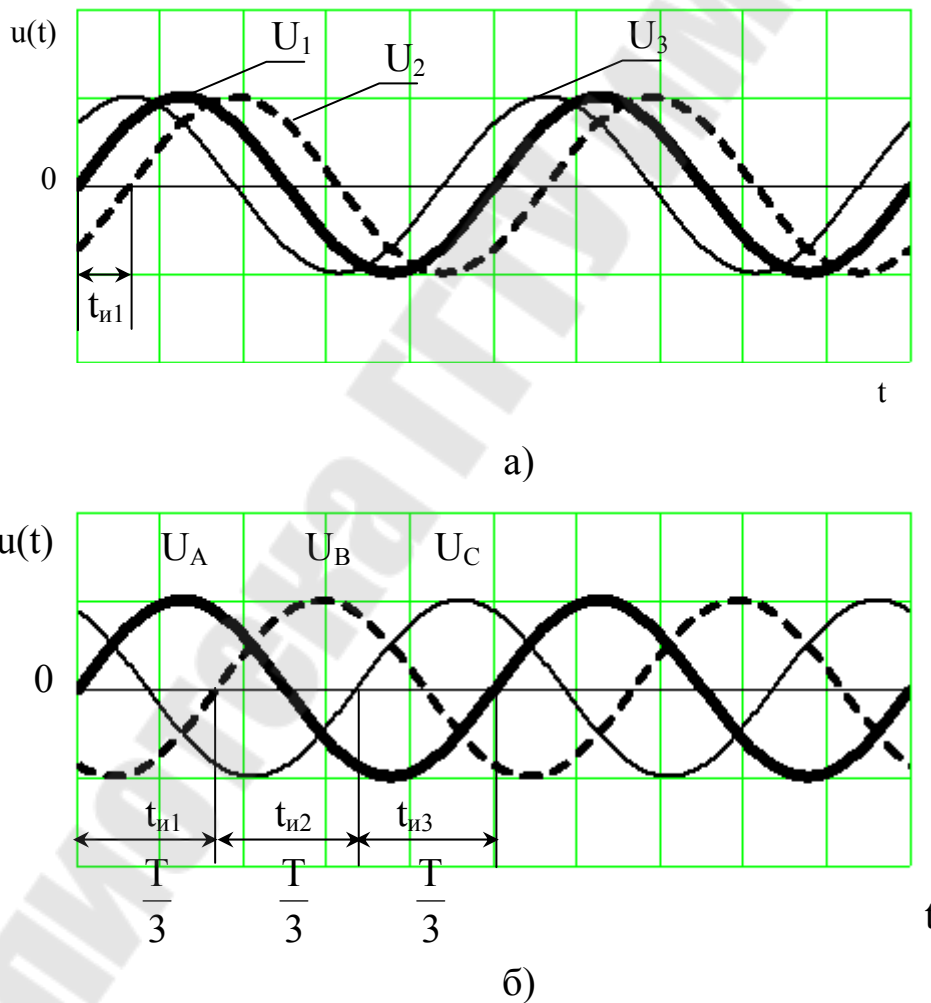


Рис.4. Временные диаграммы – вид импульсов при «открытом» (а) и при «закрытом» (б) входе

Фигуры Лиссажу

Фигурами Лиссажу называют фигуры, появляющиеся на экране осциллографа при подаче переменных напряжений на вход Y и на вход X. На рис. 5 б приведено построение фигуры Лиссажу при подаче на вертикальный вход напряжения U_B , а на горизонтальный – U_G (рис. 5 а).

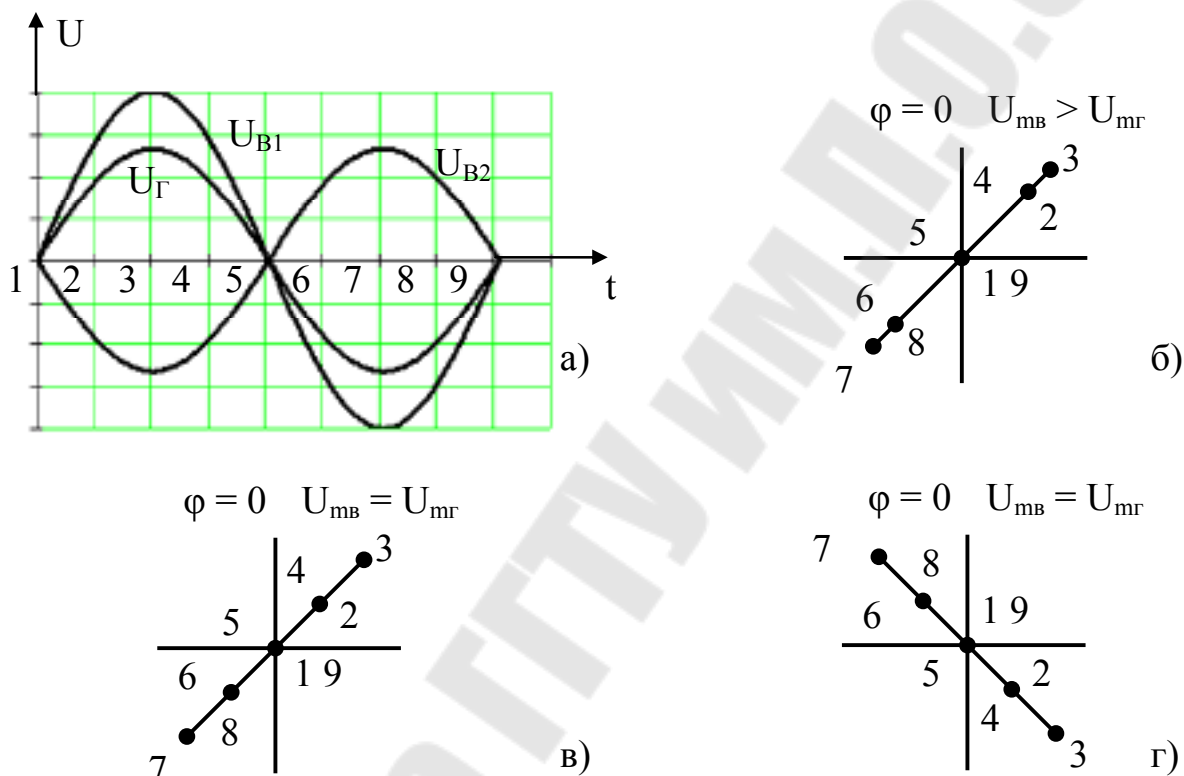


Рис. 5. Временные диаграммы напряжений (а) и фигуры Лиссажу для совпадающих по фазе напряжений (б, в) и сдвинутых на 180° .

Как видно, фигура представляется прямой линией, проходящей 1 и 3 квадрантах. Если напряжения U_B и U_G равны по величине, то прямая располагается под углом 45° . При подаче на входы Y и X напряжений, сдвинутых по фазе на 180° , фигуры Лиссажу представляются прямой, расположенной во 2 и 4 квадрантах. Если напряжения U_B и U_G сдвинуты на 90° , то фигура Лиссажу – окружность (рис 6 а, б).

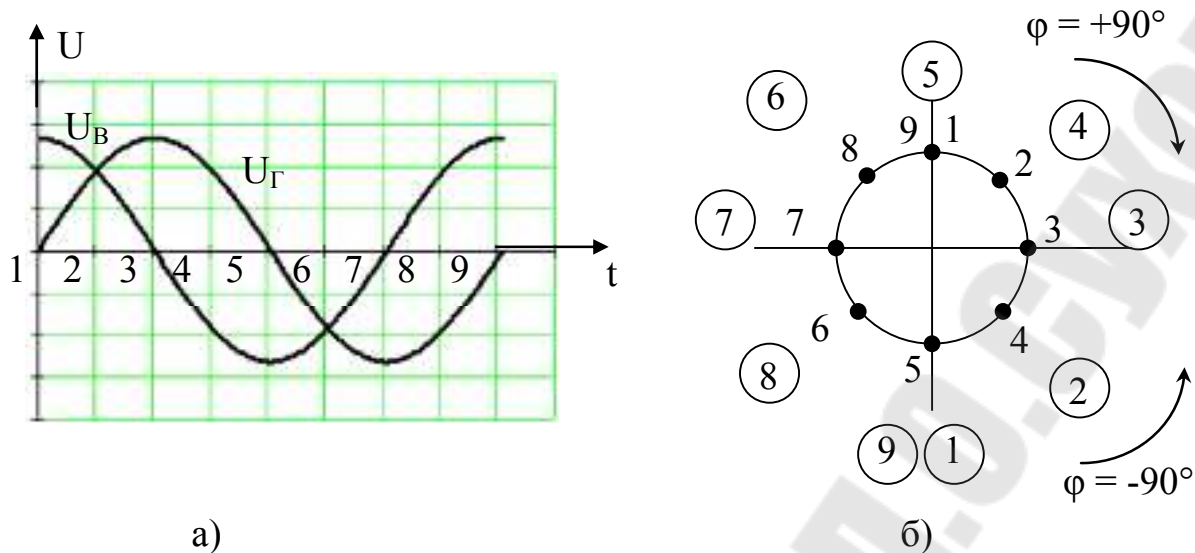


Рис. 6. Временные диаграммы (а) и фигуры Лиссажу (б) для напряжений, сдвинутых по фазе на 90° .

Если фазовые сдвиги между U_B и U_G не равны нулю и 90° , то фигуры Лиссажу будут эллипсами, как показано на рис. 7б и 7г.

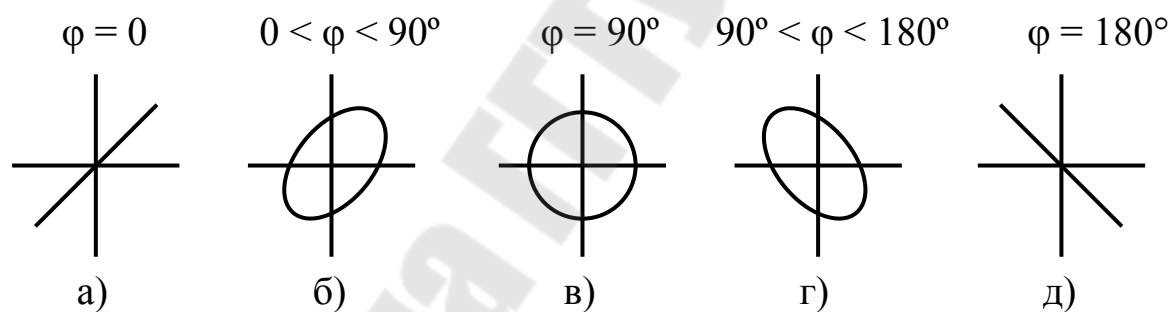


Рис. 7. Фигуры Лиссажу для напряжений, сдвинутых по фазе на угол φ .

По фигурам Лиссажу можно судить о том, в каких пределах лежит фазовый сдвиг и измерять его. На рис. 8а представлены два сдвинутых по фазе синусоидальных сигнала U_G и U_B , а на рис. 8б приведено построение фигуры Лиссажу. При этом а – величина ординаты синусоиды U_B в момент перехода мгновенного значения U_G через нуль. Из рис. 8 видно:

$$a = U_{MB} \cdot \sin \omega t_1 = U_{MB} \cdot \sin \varphi, \quad b = U_{MB}$$

где t_1 – отрезок времени между положительными переходами через нуль мгновенных значений U_B и U_Γ .

$$\frac{A}{B} = \frac{2a}{2b} = \frac{a}{b} = \frac{U_{MB} \cdot \sin \varphi}{U_{MB}} = \sin \varphi.$$

Как видно, $\sin \varphi$ равен отношению $\frac{A}{B}$ и не зависит от амплитуд U_B и U_Γ .

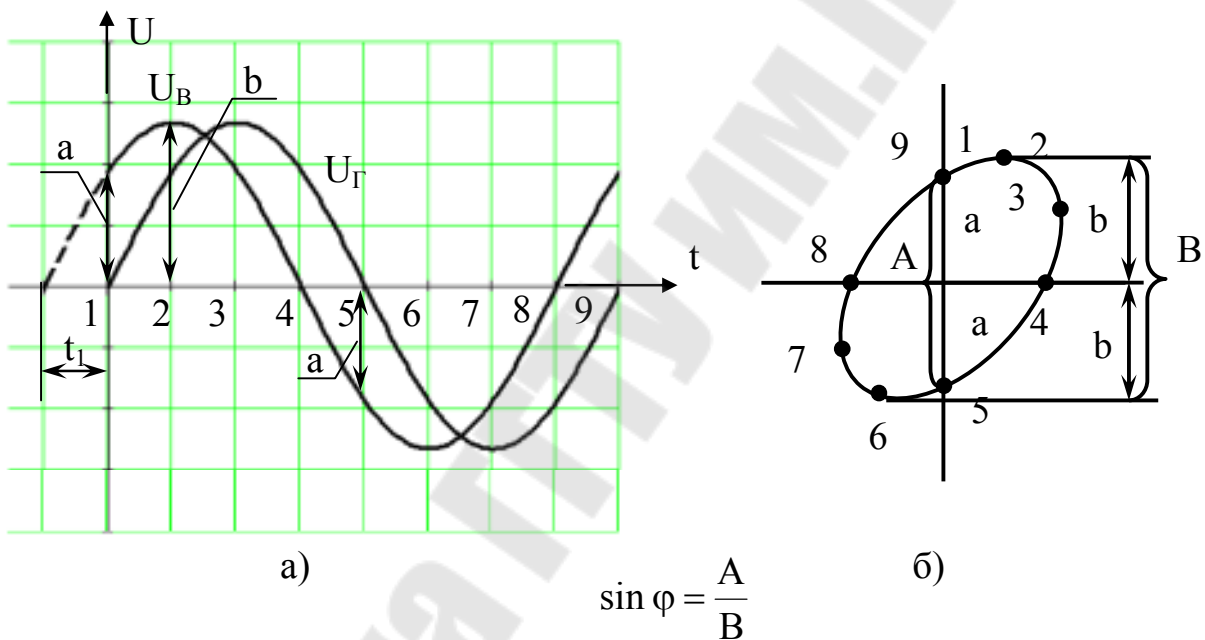


Рис. 8. Временные диаграммы (а) и фигура Лиссажу (б), поясняющая принцип определения фазового сдвига по фигуре Лиссажу.

В двухканальном осциллографе переключатели режима работы осциллографа и синхронизации устанавливаются в положения «Х – Y» и сигналы подаются на входы каналов.

Схемы, позволяющие изменять фазу выходного напряжения относительно входного, называются фазовращателями. На рис. 9а приведена схема фазовращателя, используемого в работе. Работу фазовращателя поясняет векторная диаграмма, приведенная на рис. 9б. Напряжения U_1 и U_2 образуют гипотенузу треугольника напряжения, катетами которого являются падения напряжений на активном

сопротивлению R и емкости C . При изменении R сумма $U_1 + U_2$ не изменяется, т.к. величина U_1 и U_2 определяется сетевым напряжением, а соотношения между U_R и U_C меняются без изменения 90° -го сдвига между ними. Как известно, геометрическое место вершины прямого угла при неизменной гипотенузе и изменяющихся катетах будет скользить по полуокружности, а фазовый сдвиг U_Φ будет изменяться от 0° при $R = 0$ до 180° при $R = \infty$.

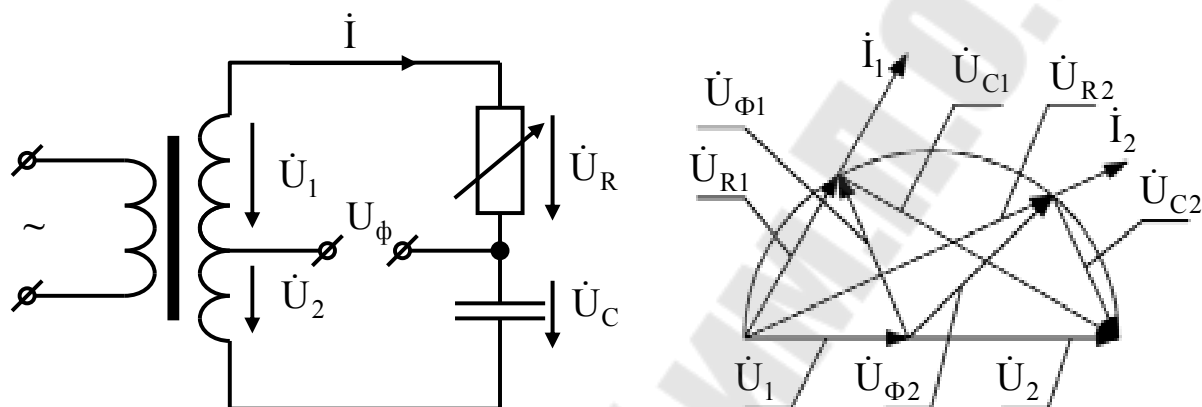


Рис. 9. Схема (а) и векторная (круговая) диаграмма фазовращателя.

3. Схема и методика эксперимента

3.1. Схема установки

Принципиальная схема, изображенная на лабораторном стенде и приведенная на рис. 10 методических указаний, формирует необходимые измеряемые напряжения.

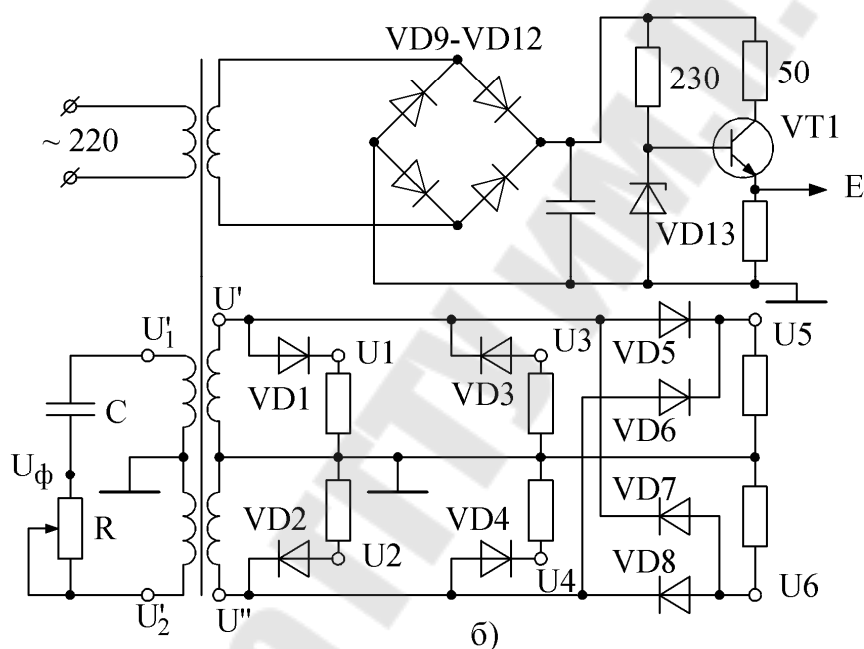
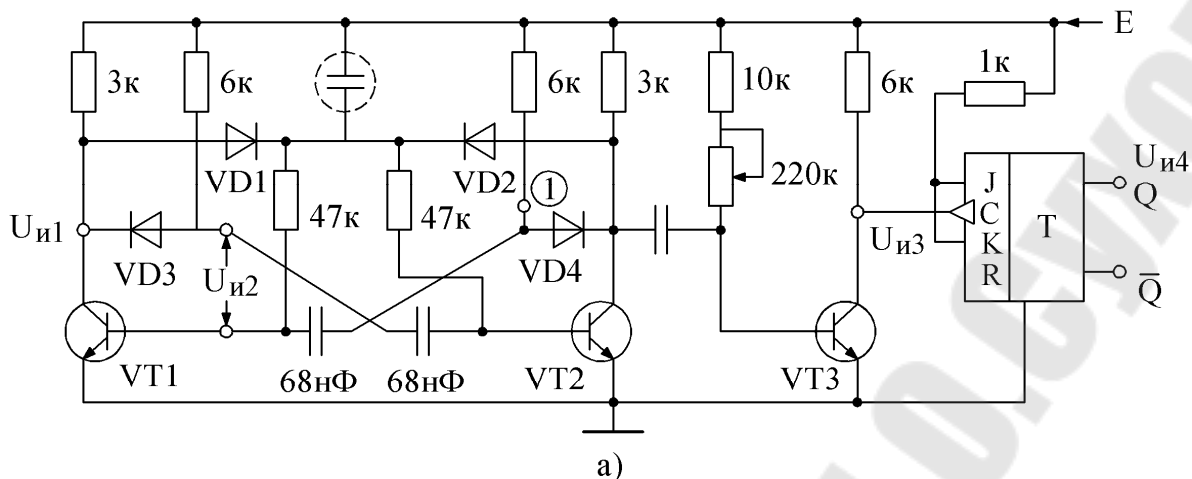


Рис. 10. Схема лабораторного стенда

На транзисторах VT_1 и VT_2 (см. рис.10 а) собран мультивибратор с «мягким» возбуждением. Диоды VD_1 , VD_2 служат для «мягкого» запуска, диоды VD_3 , VD_4 – для получения крутых фронтов импульсов $U_{и1}$. На транзисторе VT_3 собран формирователь импульсов $U_{и3}$ переменной длительности. Микросхема T – триггер, осуществляющий деление частоты входных импульсов. На стабилитроне VD_{13} и транзисторе VT_1 (см. рис.10 б) собран стабилизатор напряжения – стабилитрон работает в режиме параметрического стабилизатора, а VT_1 – в режиме усилителя мощности.

На конденсаторе C и потенциометре R собран фазовращатель.

На диодах $VD_1 \div VD_4$ (рис.10 б) собраны однополупериодные выпрямители, на диодах $VD_5 \div VD_8$ (рис.10 б) – двухполупериодные выпрямители. Временные диаграммы напряжений U' , U'' , $U_1 \div U_6$ приведены на рис. 11.

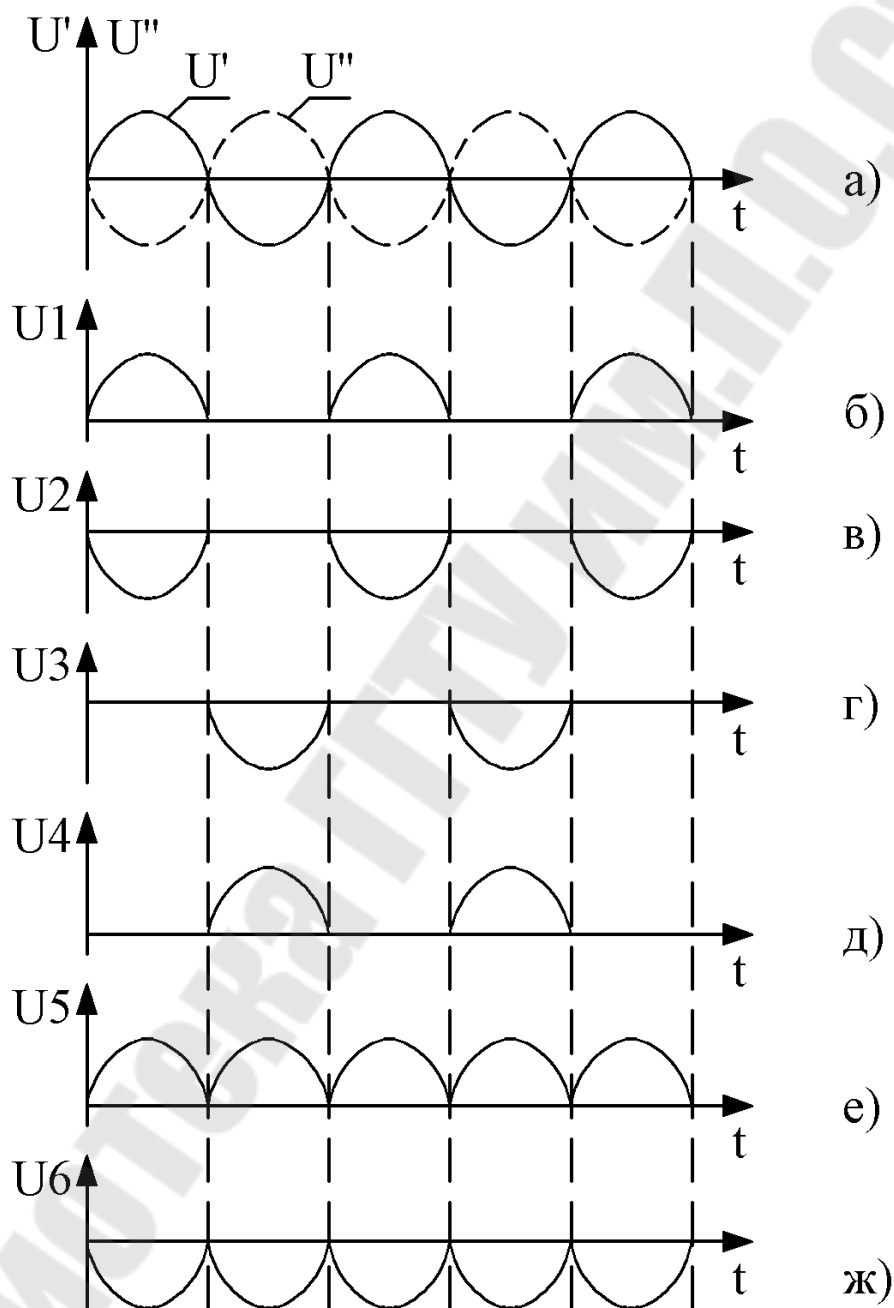


Рис. 11. Временные диаграммы переменных напряжений (а), напряжений на выходе однополупериодных (б, в, г, д) и двухполупериодных (е, ж) выпрямителей

3.2. Получение неподвижного изображения на экране осциллографа

В лабораторной работе используется двухканальный осциллограф С1–83. Для получения на экране неподвижного изображения служит синхронизация, которая определяет момент начала развертки по определенному уровню либо исследуемого сигнала (внутренняя синхронизация), либо внешнего сигнала (внешняя синхронизация). Необходимо помнить, что неподвижное изображение можно получить только в том случае, если исследуемый сигнал и сигнал синхронизации строго синхронизированы, т.е. получены от одного источника. Например, нельзя получить неподвижное изображение, если исследуемый сигнал и сигнал синхронизации берутся от разных генераторов, т.к. момент прохождения сигнала синхронизации через определенный уровень не будет оставаться неизменным относительно момента прохождения исследуемого сигнала через какой-то неизменный уровень, и изображения будет «плыть».

Неподвижное изображение получается следующим образом:

3.2.1. В режиме внутренней синхронизации с помощью регулятора «уровень».

3.2.2. В режиме внешней синхронизации вначале регулятор «уровень» выводится влево до исчезновения сигнала на экране осциллографа. Затем регулятор «уровень» вращается вправо до появления неподвижного изображения на экране осциллографа.

3.3. Порядок измерения фазового сдвига

Для измерения фазового сдвига между двумя синусоидальными напряжениями одно из них подаётся на вход первого, а другое на вход второго канала. Для перевода осциллографа в режим высвечивания фигур Лиссажу необходимо переключатели режима работы и синхронизации перевести в положения «X-Y». Далее нужно действовать как описано в п. 2.2.3.

4. Задание

4.1. Ознакомиться с назначением регуляторов и переключателей, расположенных на лицевой панели осциллографа.

4.2. Измерить постоянное напряжение E и определить его полярность. Указание: использовать внутреннюю синхронизацию.

4.3. Измерить амплитудное и определить действующие значения напряжений U'_1 и U'_2 , определить фазовый сдвиг между ними (внутренняя синхронизация).

4.4. Измерить частоту напряжения U'_1 .

4.5. Измерить амплитуду импульсов $U_{и3}$ и $U_{и4}$ при «закрытом» и «открытом» входе. Измерить их длительность и период повторения. Указание: синхронизация внутренняя.

4.6. Измерить длительность и период повторения импульсов $U_{и2}$. Измерить их амплитуду при «открытом» и «закрытом» входе. Указание: синхронизация внешняя от точки 1.

4.7. Измерить длительность, период повторения и амплитуду импульсов $U_{и1}$. Определить время нарастания положительного фронта.

4.8. Измерить фазовый сдвиг выходного напряжения U_Φ фазовращателя относительно напряжения U'_1 с помощью калиброванной развертки и по фигурам Лиссажу для шести положений регулятора сопротивления R . Заполнить таблицу 4.1.

Таблица 4.1

	$t_{и}$	$\varphi_1 = \omega \cdot t_{и}$	A	B	$\sin \varphi_2$	φ_2
Единица измерения	мс	град	дел	дел		град
1						
2						
3						
4						
5						
6						

4.9. Наблюдать и зарисовать напряжения U' , U'' и входные напряжения $U_1 \div U_6$ выпрямителей. Указание: синхронизация внутренняя.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, блок-схему осциллографа, схему и векторную диаграмму фазовращателя, фигуры Лиссажу для 45° , 90° , 135° , 180° , результаты измерений по п.п. 4.2.÷4.9.

6. Контрольные вопросы

1. Назначение катода, анодов и сетки ЭЛТ.
2. Назначение генератора развертки.
3. Для чего предназначена синхронизация?
4. Что такое внутренняя, внешняя синхронизация и синхронизация от сети?
5. Как «остановить» изображение на экране?
6. Как определить «земляной» конец шнура осциллографа?
7. Как измерить амплитуду и длительность импульса?
8. Как измерить частоту периодического сигнала?
9. Что такое фигуры Лиссажу?
10. Как измерить фазовый сдвиг по фигуре Лиссажу?
11. Как измерить фазовый сдвиг при помощи калиброванной по длительности развертки?
12. Что такое «открытый» и «закрытый» вход?
13. Можно ли при наблюдении импульсов генератора использовать синхронизацию: от сети, внешнюю, внутреннюю? Почему?
14. Будут ли соответствовать изображения напряжений U' и U'' рисунку 11а, если использовать внутреннюю синхронизацию? Почему?
15. Какую синхронизацию необходимо применять, чтобы наблюдать изображения выходных сигналов однополупериодных выпрямителей, приведённых на рис. 11б, в, г, д?
16. Объясните причину отличия выходных сигналов однополупериодных выпрямителей, приведённых на рис. 11б и 11г.
17. Как измерить с помощью осциллографа действующее значение синусоидального напряжения?
18. Как получить на экране осциллографа фигуру Лиссажу?
19. Изобразите фигуры Лиссажу при сдвиге двух синусоидальных напряжений на (0° , 45° , 90° , 135° , 180°).
20. Поясните последовательность формирования фигуры Лиссажу с помощью временных диаграмм при $\varphi = 0^\circ$ и 45° .

21. Постройте с помощью временных диаграмм фигуру Лиссажу при $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 135^\circ$ при $U_\Gamma = U_B$.

22. Постройте с помощью временных диаграмм фигуру Лиссажу при $\varphi = 90^\circ$, когда $U_\Gamma = U_B$ и когда $U_\Gamma \neq U_B$

23. Постройте с помощью временных диаграмм фигуру Лиссажу при $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 180^\circ$, когда $U_\Gamma = U_B$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические измерения. – Под ред. А.В. Фремке. – Л.: Энергия, 1973. – С.200-224.

2. Электрические измерения. – Под ред. Е.Г. Шрамкова, - М.: Высшая школа, 1972. – С.318-323.

3. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. Пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.: ил.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с некоторыми наиболее распространенными методами, схемами и приборами для измерения сопротивлений на постоянном токе, а также приобретение навыков при измерении сопротивлений с помощью омметров, мегомметров на основе логометров, цифровых приборов типа В7-35, тераомметров и методом амперметра-вольтметра.

2. Основные теоретические сведения

2.1. Общие сведения

Особенностью измерений на постоянном токе является отсутствие влияния на результат измерения реактивных элементов - индуктивностей и емкостей. Это, с одной стороны, упрощает процесс измерения, но с другой – не позволяет определять различные потери, имеющие место на переменном токе.

В современной измерительной практике приходится измерять сопротивления от 10^{-8} Ом до 10^{17} Ом, и условно этот диапазон принято разбивать на три группы сопротивлений:

1. Малые сопротивления – до 1 Ома; для характеристики малых сопротивлений используются приставки мили – (мОм = 10^{-3} Ом), микро – (мкОм = 10^{-6} Ом), нано – (нОм = 10^{-9} Ом);

2. Средние сопротивления – от 1 до 10^6 Ом; для характеристики средних сопротивлений применяются приставки кило - (кОм = 10^3 Ом), мега – (МОм = 10^6 Ом);

3. Большие сопротивления – от 10^6 Ом и выше; для характеристики больших сопротивлений применяются приставки мега -, гига- (ГОм = 10^9 Ом), тера – (ТОм = 10^{12} Ом).

По назначению в зависимости от диапазона измеряемых сопротивлений выделяют:

1. Омметры (до 1 МОм)
2. Мегомметры (до 100 МОм)
3. Тераомметры (до 100 ТОм).

В зависимости от устройства выделяют:

1. Омметры и мегомметры на основе магнитоэлектрического микроамперметра.
2. Омметры и мегомметры на основе магнитоэлектрического логометра.
3. Электронные приборы со стрелочным или цифровым отсчетом. Для измерения нелинейных сопротивлений применяется метод амперметра – вольтметра.

2.2. Омметры на основе магнитоэлектрического микроамперметра

В этих омметрах сопротивление преобразуется в ток, который измеряется магнитоэлектрическим механизмом. Шкала прибора градуируется в единицах измерения сопротивления. Такой способ измерения сопротивления нашел применение в стрелочных универсальных приборах, так называемых, тестерах.

Применяются две основные схемы преобразования сопротивления в ток – с последовательным (рис. 1а) и параллельным (рис. 1б) включением магнитоэлектрического амперметра

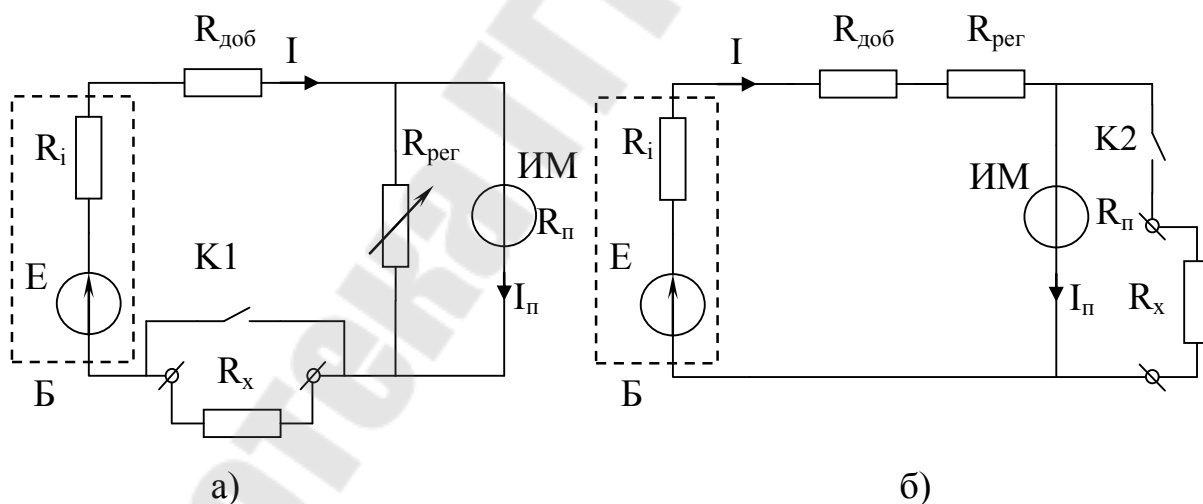


Рис. 1. Схема преобразования сопротивления в ток

На рис. 1 $I_{\text{п}}$ – ток прибора, протекающий по измерительному механизму ИМ; R_x – измеряемое сопротивление; $R_{\text{доб}}$, $R_{\text{рег}}$ – добавочное и регулировочное сопротивление; E , R_i – эдс и внутреннее сопротивление батареи (Б), по мере разряда батареи R_i сильно возрастает

и становится значительно больше $R_{\text{доб}}$, $R_{\text{рег}}$, R_x . После этого калибровка и измерения становятся невозможными и батарею необходимо заменить.

Для последовательной схемы рис. 1а:

$$I_{\Pi} = \frac{I(R_{\text{рег}} \parallel R_{\Pi})}{R} = I \frac{R_{\text{рег}}}{R_{\text{рег}} + R_{\Pi}},$$

где: R_{Π} – сопротивление обмотки подвижной рамки ИМ (прибора), $R_{\text{рег}} \parallel R_{\Pi}$ – эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных резисторов $R_{\text{доб}}$, $R_{\text{рег}}$.

$$I_{\Pi} = \frac{E \cdot R_{\text{рег}}}{(R_i + R_{\text{доб}} + R_x)(R_{\text{рег}} + R_{\Pi}) + R_{\text{рег}} \cdot R_{\Pi}}. (1)$$

При $R_x = \infty$ $I_{\Pi} = 0$; при $R_x = 0$ $I_{\Pi} = I_{\text{пмакс}}$. Поэтому нуль шкалы такого омметра будет находиться справа (при максимальном токе через ИМ). Такую шкалу называют «обратной».

Как видно из (1), I_{Π} зависит не только от R_x но и от ЭДС E и от такого нестабильного параметра, как R_i . Поэтому в схему вводится регулировочное сопротивление $R_{\text{рег}}$, с помощью которого перед каждым измерением производится калибровка омметра («установка нуля») при замкнутом ключе $K1$.

Последовательная схема применяется при измерении сопротивления от 1 кОм и выше.

Для параллельной схемы рис. 1б:

$$I_{\Pi} = \frac{E \cdot R_x}{(R_i + R_{\text{доб}} + R_{\text{рег}})(R_x + R_{\Pi}) + R_x \cdot R_{\Pi}}. (2)$$

Ток I_{Π} прямо пропорционален R_x (при условии, что $R_x \ll R_{\Pi}$); $I_{\Pi} = 0$ при $R_x = 0$, а при $R_x = \infty$ $I_{\Pi} = I_{\text{пмакс}}$. Поэтому нуль шкалы при такой схеме будет слева, как у обычных приборов («прямая» шкала). Калибруется такой омметр (установка максимального тока) при разомкнутом ключе $K2$ (или при отсоединении R_x).

Параллельная схема измерения применяется для измерения сопротивлений, меньших 1 кОм.

Недостатком омметров с магнитоэлектрическим микроамперметром является зависимость показаний от параметров источника питания. Исключить влияние напряжения питания схем на результат измерения сопротивлений позволяет использование магнитоэлектрического логометра.

Следует отметить, что в настоящее время имеют применение тестеры, не требующие предварительной регулировки с помощью $R_{доб}$ и $R_{рег}$. При этом измеряемое сопротивление R_x включается в отрицательную обратную связь операционного усилителя.

2.3. Омметры на основе магнитоэлектрического логометра

Подвижная часть магнитоэлектрических логометров состоит из двух жестко скрепленных под определенным углом рамок (1, 2) (рис.2), и не имеет противодействующих пружин. Токи к рамкам подводятся с помощью безмоментных (не создающих противодействующих моментов) токоподводов.

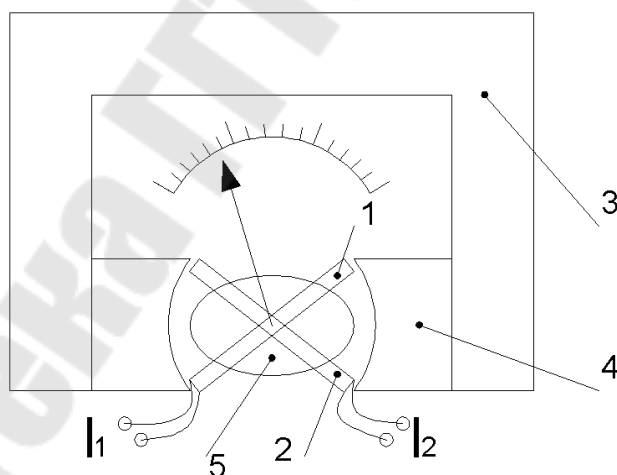


Рис. 2. Упрощенная конструкция магнитоэлектрического логометра

Магнитное поле в воздушном зазоре между полюсами 4 и сердечником 5 создается постоянным магнитом 3. В результате взаимодействия магнитного поля с токами I_1 и I_2 , протекающими по рамкам 1 и 2, создаются вращающие моменты $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$, противоположное

действие которых на подвижную часть обеспечивается соответствующим направлением токов I_1 и I_2 . Если вращающие моменты не равны, подвижная часть будет поворачиваться. Она сможет остановиться только в случае, если хотя бы один из вращающих моментов будет зависеть от угла поворота подвижной части α . Зависимость вращающего момента от угла поворота осуществляется формированием в воздушном зазоре неравномерного магнитного поля, что достигается специальной формой полюсов 4 и сердечника 5. Обычно сердечник 5 выполняется эллиптическим. В результате:

$$M_{вр1} = K_1 F_1(\alpha) \cdot I_1; \quad M_{вр2} = K_2 F_2(\alpha) \cdot I_2$$

При установившемся равновесии вращающие моменты равны

$$K_1 F_1(\alpha) \cdot I_1 = K_2 F_2(\alpha) \cdot I_2, \text{ откуда:}$$

$$\frac{F_1(\alpha)}{F_2(\alpha)} = \frac{K_2}{K_1} \frac{I_2}{I_1}$$

Обозначив $\frac{F_1(\alpha)}{F_2(\alpha)} = F(\alpha)$, $\frac{K_2}{K_1} = K$ можно написать:

$$F(\alpha) = K \frac{I_2}{I_1}$$

Выражение для обратной функции можно представить в следующем виде:

$$\alpha = F\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (3)$$

Как видно из (3), угол поворота подвижной части приборов, у которых отсутствует противодействующая пружина, противодействующий момент создается электрически, также как и вращающий, зависит от отношения токов, протекающих по рамкам. Поэтому они называются логометрами от греческого "logos" – отношение.

Принципиальная схема омметра на основе магнитоэлектрического логометра приведена на рис.3. Для схемы рис.3а:

$$\alpha = F\left(\frac{E}{R_{p1} + R_0} \cdot \frac{R_{p2} + R_x}{E}\right) = F\left(\frac{R_x + R_{p2}}{R_0 + R_{p1}}\right), \quad (4)$$

где R_{p1}, R_{p2} – сопротивления обмоток, размещенных на рамках.

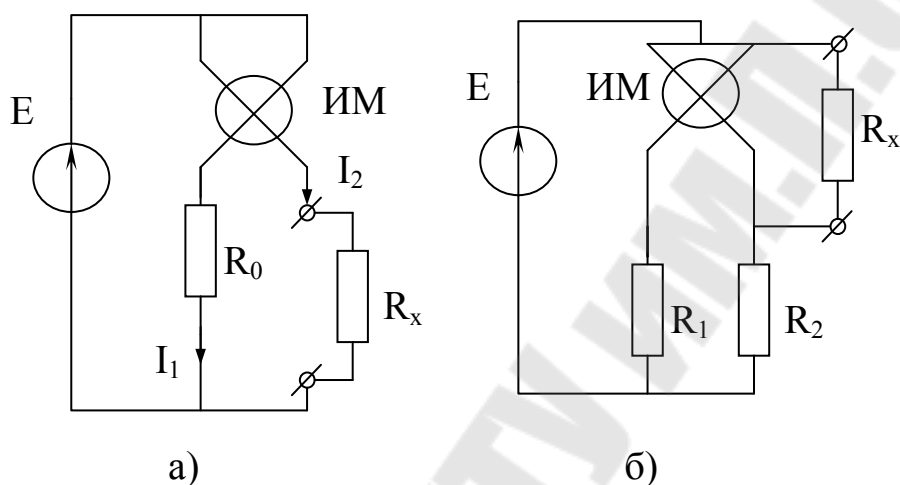


Рис.3. Принципиальная схема омметра на основе магнитоэлектрического логометра

Как видно из (4), показания такого омметра определяются только измеряемым сопротивлением и не зависят от напряжения источника питания.

Схема (рис. 3а) применяется для измерения сопротивлений, больших 100 кОм. Схема (рис. 3б) применяется для измерения сопротивлений, меньших 1 МОм, и будет иметь «обратную» шкалу (максимум – слева, нуль – справа), если схеме (рис. 3а) соответствует «прямая» шкала. Наличие «прямой» и «обратной» шкал объясняется тем, что в схемах (рис. 3а) и (рис. 3б) в качестве измерительной используется одна и та же рамка (2).

Схемы, аналогичные приведенным на рис.3, используются в специальных мегомметрах, которые предназначены для измерения сопротивления изоляции различных электрических аппаратов и машин. В таких мегомметрах в качестве источников питания применяются встроенные генераторы постоянного тока с ручным приводом на

напряжения: 100, 500, 1000 и 2500 В. Номинальное напряжение мегомметров не должно превышать испытательного напряжения объекта измерения. Для устранения, влияния токов утечки мегомметры имеют дополнительный зажим "Э"(экран). ГОСТ 23706-93 предусматривает следующие классы точности омметров 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 4. Под классом точности омметров понимают максимально-допустимую приведенную погрешность не в процентах от верхнего предела измерения, а в процентах от длины рабочей части шкалы.

2.4. Электронные приборы для измерения сопротивлений

В электронных приборах сопротивление вначале преобразуется в ток или напряжение низкого уровня, которое усиливается электронным или полупроводниковым усилителем, а затем измеряется стрелочным прибором или преобразуется в цифру. В лабораторной работе используется два электронных прибора: тераомметр Е6-13А и универсальный цифровой вольтметр В7-35. В обоих приборах преобразование сопротивления в напряжение осуществляется с помощью усилителя с параллельной отрицательной обратной связью (ООС) (рис. 4)

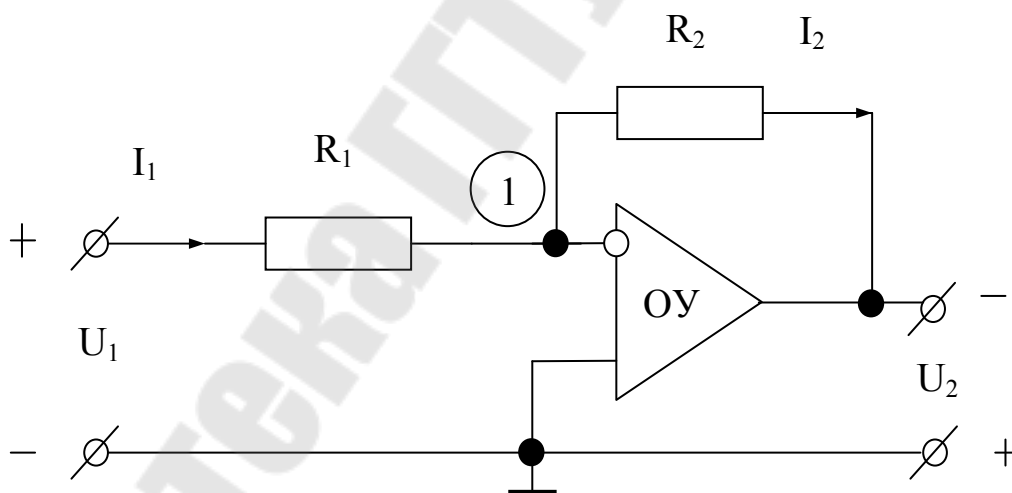


Рис.4. Схема усилителя с параллельной отрицательной обратной связью

На рис. 4: U_1 и U_2 – входное и выходное напряжения; ОУ – операционный усилитель с большим коэффициентом усиления.

Особенностью операционного усилителя является автоматическое поддержание из-за большого коэффициента усиления и глубокой отрицательной обратной связи нулевого потенциала точки 1. В связи

с этим автоматически поддерживается равенство токов I_1 и I_2 , протекающих соответственно по сопротивлениям R_1 и R_2 . Из этого условия $I_1 = I_2$ можно найти зависимость выходного напряжения от входного:

$$U_2 = -I_2 R_2 = -\frac{U_1}{R_1} R_2, \text{ т.к. потенциал точки 1 равен нулю. Таким образом } U_2 = -\frac{R_2}{R_1} U_1.$$

Особенностью усилителя тераомметра Е6-13А является выполнение его первого усилительного каскада на специальной электрометрической лампе, типа ЭМ-6, обладающей очень малыми (порядка 10^{-14} А) входными токами. В тераомметре используются две схемы преобразования сопротивления, приведенные на рис. 5.

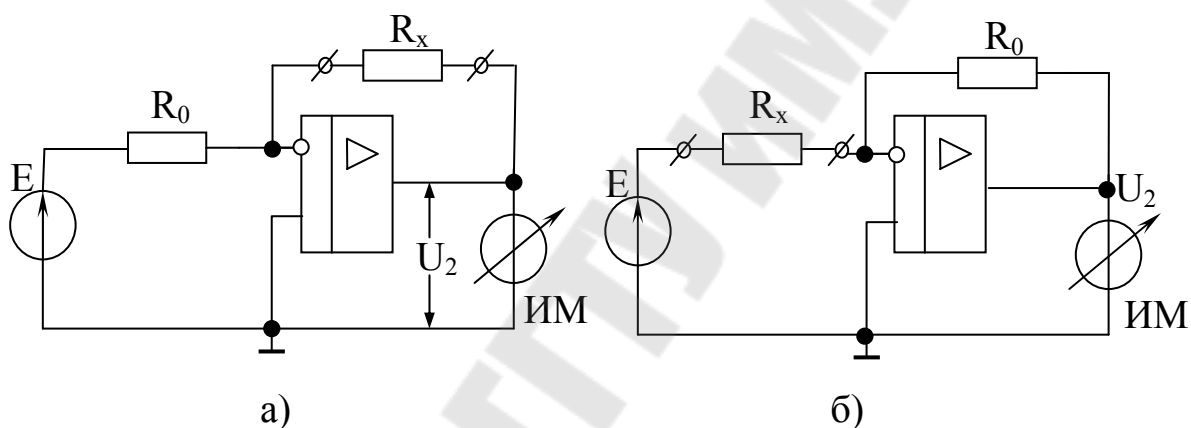


Рис.5. Схемы преобразования сопротивления в тераомметре Е6-13А

Схема (рис. 5а) применяется для преобразования сопротивлений до 1 МОм. Напряжение U_2 , измеряемое магнитоэлектрическим измерительным механизмом ИМ, прямо пропорционально измеряемому сопротивлению R_x : $U_2 = \frac{R_x}{R_0} E$

Шкала ИМ – «прямая». В тераомметре Е6-13А пределы измерения, которым соответствует «прямая» шкала, названы линейными.

Схема (рис. 5б) применяется для измерения сопротивлений, больших 10^6 Ом. Напряжение U_2 в этом случае обратно пропорционально R_x : $U_2 = \frac{R_0}{R_x} E$, а шкала – «обратная», при которой крайняя

правая точка соответствует наименьшему значению выбранного предела измерения, а левая крайняя – бесконечности. В обеих схемах R_0 – образцовое сопротивление, дискретным изменением которого производится изменение пределов измерения; напряжение источника питания E в обеих схемах может быть либо 10 В, либо 100 В.

Входные токи электрометрических ламп, хотя и малы, но нестабильны. В связи с этим усилителям с электрометрическими лампами свойственно смещение нуля или, как говорят, «дрейф» нуля. Поэтому перед каждым измерением прибором Е6-13А необходимо «установить ноль».

В универсальном вольтметре В7-27 преобразование сопротивлений в напряжение осуществляется по схемам, приведенным на рис. 6.

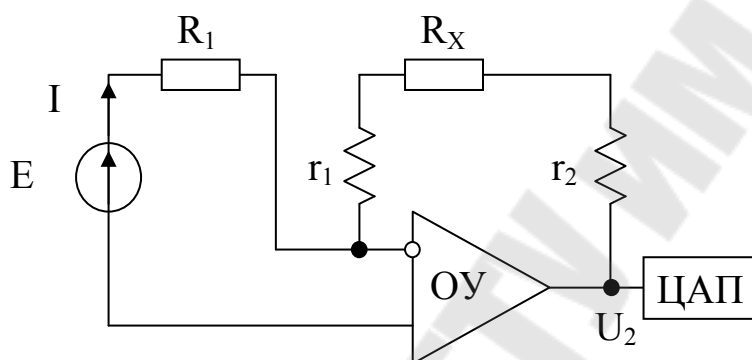


Рис. 6. Схемы преобразования сопротивления универсального вольтметра В7-35

На рис. 6: ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, осуществляющий преобразование напряжения U_2 в цифры, высвечивающиеся на цифровом табло; r_1 , r_2 – сопротивления соединительных проводов; E – источник постоянного напряжения.

Схема (рис. 6) используется при измерении сопротивлений от 1 Ом до 10 МОм. При этой схеме сопротивления соединительных проводов r_1 и r_2 входят в результат измерения:

$$U_2 = I \cdot (R_X + r_1 + r_2).$$

Но поскольку r_1 и r_2 значительно меньше измеряемых сопротивлений, они не искажают результат измерений сверх допустимых значений. Опорный ток I задается резисторами R_1 , которые переключаются автоматически в зависимости от величины R_X .

2.5. Измерение сопротивлений методом амперметра и вольтметра

Метод амперметра и вольтметра относится к косвенным видам измерения и применяется для ориентировочных измерений относительно малых сопротивлений (например, сопротивления замкнутых контактов) и нелинейных резисторов, сопротивление которых зависит от величины протекающего по ним тока. Нелинейные резисторы обладают нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ) (рис. 7б).

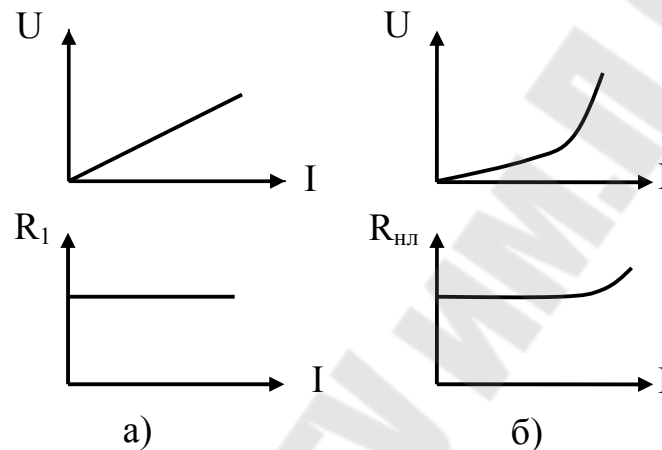


Рис.7. Вольт-амперные характеристики и зависимости сопротивления от протекающего тока линейного (а) и нелинейного (б) резистора

Значения измеряемого сопротивления R_x независимо от схемы включения приборов (рис. 8), вычисляется по показанию вольтметра U_v и амперметра I_a :

$$R_x = \frac{U_v}{I_a}$$

Точность измерения R_x зависит от точности применяемых приборов и методической погрешности, обусловленной собственным потреблением амперметра или вольтметра, для обеих схем (рис. 8 а и б) методическая погрешность δ определяется по одинаковой формуле:

$$\delta = \frac{R_x - R_{хд}}{R_x}$$

$R_{\text{зд}}$ – действительное значение измеряемого сопротивления.

Для первой схемы (рис. 8 а) $R_{\text{зд1}} = \frac{U_v}{I_x}$ а для второй (рис.8 б)

$$R_{\text{зд2}} = \frac{U_{R_x}}{I_A}$$

На рис. 8: U_v – показания вольтметра, I_a – показания амперметра; I_v – ток, протекающий через вольтметр; U_A – падение напряжения на амперметре; $R_v = \frac{U_v}{I_v}$ – входное сопротивление вольтметра;

$R_A = \frac{U_A}{I_A}$ – сопротивление амперметра.

С учетом обозначений (рис. 8) определим R_x по показаниям приборов для первой (R_{x1}) и второй (R_{x2}) схем:

$$R_{x1} = \frac{U_v}{I_A} = \frac{U_v}{I_x + I_v} = \frac{R_{\text{зд1}}}{1 + \frac{R_{\text{зд1}}}{R_v}} \quad (7)$$

$$R_{x2} = \frac{U_v}{I_A} = \frac{U_{R_x} + U_A}{I_A} = R_{\text{зд2}} + R_A \quad (8)$$

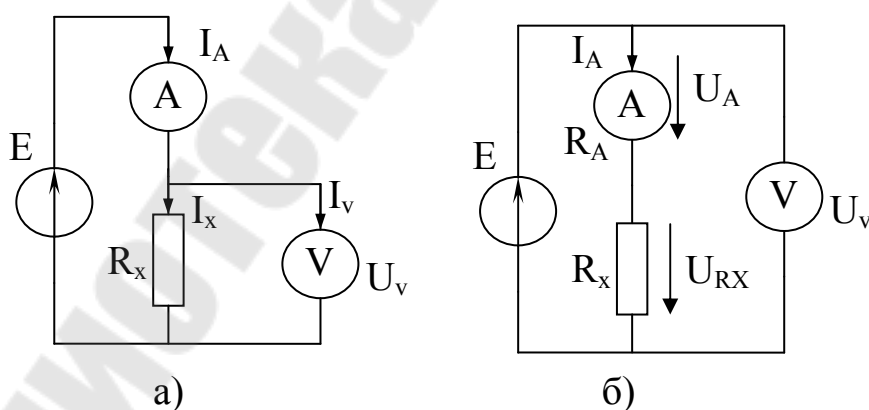


Рис.8. Схемы измерений методом амперметра и вольтметра

Подставляя (7) и (8) в (6), получим выражения для методических погрешностей первой и второй схем:

$$\delta_1 = \frac{R_{x1} - R_{xd1}}{R_{x1}} = -\frac{R_{xd1}}{R_v} \approx -\frac{R_{x1}}{R_v}; \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{R_{x2} - R_{xd2}}{R_{x2}} = \frac{R_A}{R_{x2}}. \quad (10)$$

По выражениям (9) и (10) можно сделать следующие выводы:

1. Первая схема дает заниженные результаты ($\delta_1 < 0$), а вторая завышенные ($\delta_2 > 0$).

2. Первую схему целесообразно применять при измерении малых сопротивлений, когда $R_x \ll R_v$, а вторую – для измерения больших сопротивлений, когда $R_x \gg R_v$.

3. Если сопротивления амперметра и вольтметра известны, то можно ввести поправки в результат измерения.

3. Методика и схемы эксперимента

Нелинейный резистор (лампа накаливания) и другие резисторы собраны на лабораторном стенде.

Схема расположения элементов и схем приведена на рис.9.

При работе с тестером внимательно устанавливать пределы и род измеряемой величины. Если значение измеряемой величины неизвестно, то всегда нужно устанавливать наибольший предел измерения.

При работе с мегомметром внимательно отнеситесь к схеме подключения измеряемых сопротивлений, которая изображена на корпусе прибора.

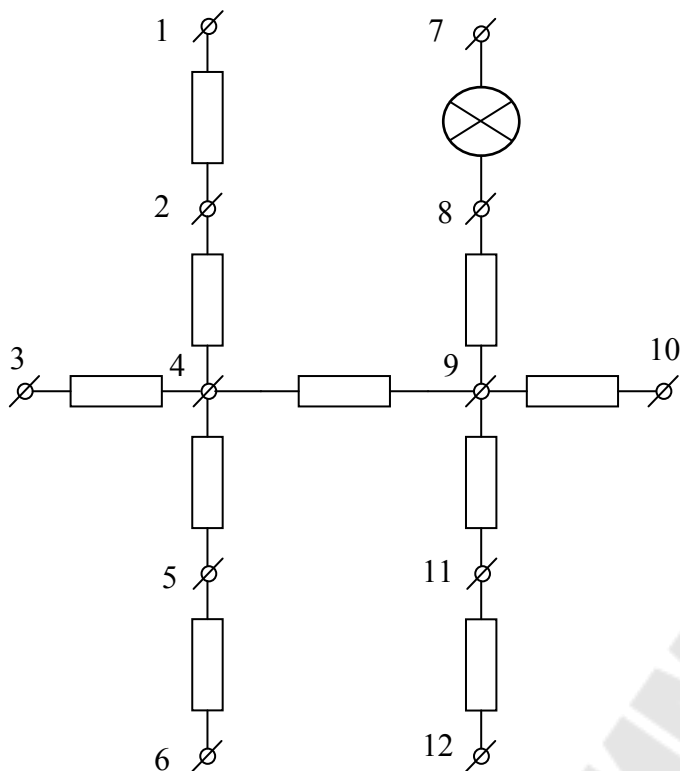


Рис. 9. Схема набора элементов для измерения сопротивлений

4. Задание

4.1. Ознакомиться с выписками из технических описаний и инструкций по эксплуатации приборов В7-35 и Е6-13А.

4.2. Измерить сопротивление пяти резисторов (по указанию преподавателя) следующими приборами: тестером, универсальном измерителем В7-35, логометрическим мегомметром типа М4100/4, тераомметром Е6-13А. Результаты свести в таблицу 1.

Указание: при выполнении этого пункта все сопротивления измерить сначала одним прибором, затем другим и т.д.

Таблица 1

	R_1 [Ом]	R_2 [Ом]	R_3 [кОм]	R_4 [МОм]	R_5 [ГОм]
Тестер					
В7-27					
Мегаомметр					
Тераомметр					

4.3 Методом амперметра-вольтметра измерить сопротивление лампы.

Указания:

а. В качестве вольтметра использовать - В7-35, в качестве амперметра - тестер.

б. Измерение проводить по двум схемам.

в. В качестве источника использовать источник постоянного напряжения.

4.4 Измерить прибором В7-35 сопротивление амперметра на пределе, который использовался в п.3.

4.5. По результатам п.п. 4.3 и 4.4 вычислить методические погрешности измерения сопротивления лампы и свести результаты в таблицу 2.

Примечание : входное сопротивление вольтметра В7-357 равно 10 МОм.

Таблица №2

	$U_v[]$	$I[]$	$R_{л}[]$	$R_A[]$	$\delta_{мет}$
1 схема					
2 схема					

В таблице

U_v, I – показания вольтметра и амперметра;

$R_{л}, R_A$ – сопротивления лампы и амперметра;

$\delta_{мет}$ – методическая погрешность.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы омметров, мегаомметров на основе логометров, схему преобразования сопротивлений тераомметра, универсального вольтметра В7-35 и результаты выполнения работы по пунктам 4.2 – 4.5.

6. Контрольные вопросы

1. Какие приставки используются для характеристики сопротивлений?

2. Каковы недостатки омметров на основе магнитоэлектрического микроамперметра?

3. Что такое логометр?
4. Как устроен магнитоэлектрический логометр?
5. Каковы достоинства мегаомметров на основе магнитоэлектрического логометра?
6. Нарисуйте схему омметра.
7. Нарисуйте схему мегаомметра на основе логометра.
8. Что такое «прямая» и «обратная» шкалы?
9. Изобразите схемы преобразования сопротивления тераомметра Е6-13А. Какая из них имеет прямую и обратную шкалу? Почему?
10. Почему тераомметр Е6-13А необходимо перед измерением устанавливать на нуль?
11. Что такое операционный усилитель и чем определяется его коэффициент передачи (выходное напряжение)?
12. Изобразите схему преобразования больших сопротивлений прибора В7-35.
13. Изобразите схему преобразования малых (меньше 10 Ом) сопротивлений прибора В7-35.
14. Для чего применяется четырехпроводная схема включения измеряемых сопротивлений?
15. Почему в приборе В7-35 применяется источник тока?
16. Что такое нелинейный резистор и какова его ВАХ?
17. Для чего применяется метод амперметра и вольтметра?
18. Нарисуйте две схемы измерения методом А и V и выведите их погрешности.

7. Литература

1. Электрические измерения. – Под ред. А.В. Фремке. – Л: Энергия, 1973г. с. 68-70, 138-143.
2. Электрические измерения. – Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М; Высшая школа, 1972г. с. 102-103, 269-271, 278-279.
3. Электрические измерения. – Под ред. А.В. Фремке и Н.С. Душина. – Л: Энергия, 1980г. с. 63-65, 142-147.
4. ГОСТ 23706-93. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Часть 6. Особые требования к омметрам (приборам для измерения полного сопротивления) и приборам для измерения активной проводимости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ФАЗОМЕТРИЧЕСКИМ И ВАТТМЕТРОВЫМ МЕТОДАМИ

1. Цель работы

Целью работы является освоение практики измерения комплексных сопротивлений фазометрическим и ваттметровым методами, экспериментального определения характера реактивности, вычисления параметров последовательной и параллельной схем замещения для одного и того же комплексного сопротивления и сравнения их; исследование зависимости формы тока холостого хода трансформатора (катушка с ферромагнитным сердечником) от приложенного напряжения.

2. Основные теоретические сведения

2.1. Комплексное сопротивление и его эквивалентные схемы замещения.

Комплексное сопротивление участка цепи (элемента) равно отношению комплексной величины падения напряжения \dot{U} этом участке к комплексной величине тока \dot{I} , протекающего по этому участку (элементу):

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}. (1)$$

Комплексное сопротивление может быть выражено в показательной и алгебраической формах:

$$\dot{Z} = Z \cdot e^{j\varphi_Z} = R_{\text{посл}} + jX_{\text{посл}}, (2)$$

где $Z = \sqrt{R_{\text{посл}}^2 + X_{\text{посл}}^2}$ – модуль комплексного сопротивления;

$\varphi_Z = \arctg \frac{X_{\text{посл}}}{R_{\text{посл}}}$ – аргумент комплексного сопротивления;

$R_{\text{посл}}, X_{\text{посл}}$ – активная и реактивная составляющие последовательной схемы замещения комплексного сопротивления.

Формула Эйлера позволяет определить связь между параметрами алгебраической (соответствует последовательной схеме замещения) и показательной формы записи комплексного сопротивления:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z} &= Z \cos(\varphi_z) + jZ \sin(\varphi_z) \\ R_{\text{посл}} &= Z \cos(\varphi_z) \\ X_{\text{посл}} &= Z \sin(\varphi_z) \end{aligned} \right\} (3)$$

Как известно, одно и то же комплексное сопротивление может быть представлено как последовательной, так и параллельной схемой замещения. Так, на рисунках 1 и 2 представлены схемы замещения участка цепи с емкостью (например, реальный конденсатор) и с индуктивностью (например, реальная катушка индуктивности).

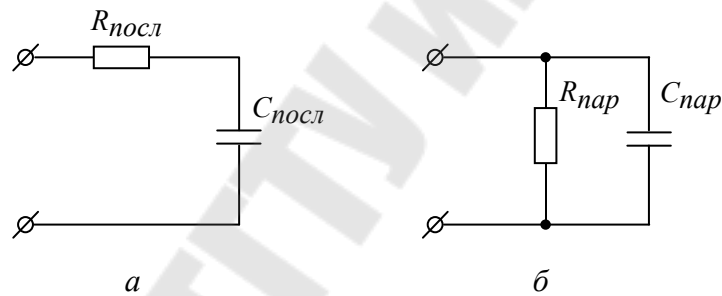


Рис.1. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения участка цепи, содержащей активное сопротивление и емкость

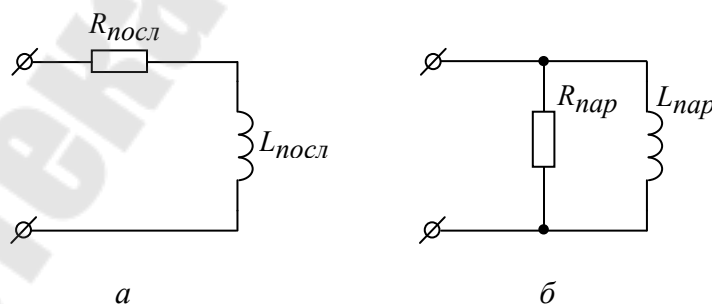


Рис.2. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения участка цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность

При анализе цепей с параллельным соединением элементов обычно пользуются понятием проводимости. Комплексная проводимость \dot{Y} участка цепи равна отношению комплексного тока \dot{I} , проте-

кающего по этому участку цепи, к комплексной величине падения напряжения \dot{U} на этом участке:

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = Y e^{j\varphi_Y} = G - jB, (4)$$

где $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ – модуль комплексной проводимости;
 $\varphi_Y = \arctg \frac{B}{G}$ – аргумент комплексной проводимости;

G, B – активная и реактивная составляющие комплексной проводимости, соответствующие параллельной схеме замещения.

Как ясно из сравнения (1), (2) и (4),

$$Y = \frac{1}{Z}; \varphi_Y = -\varphi_Z. (5)$$

Связь между параметрами алгебраической и показательной форм комплексной проводимости, согласно формуле Эйлера:

$$G = Y \cos(\varphi_Y); B = Y \sin(\varphi_Y). (6)$$

При характеристике параметров параллельной схемы замещения удобнее пользоваться более привычными понятиями активного сопротивления $R_{\text{пар}}$ и реактивного сопротивления $X_{\text{пар}}$, причем $R_{\text{пар}}$ и G , $X_{\text{пар}}$ и B связаны очевидным соотношением:

$$R_{\text{пар}} = \frac{1}{G}; X_{\text{пар}} = \frac{1}{B}. (7)$$

Соотношение (7) и выражения (5) и (6) позволяют установить связь между параметрами параллельной схемы замещения ($R_{\text{пар}}$ и $X_{\text{пар}}$) и параметрами показательной формы комплексного сопротивления (Z, φ_Z), которые обычно определяются с помощью наиболее простого фазометрического метода измерения комплексных сопротивлений:

$$R_{\text{пар}} = \frac{1}{Y \cos(\varphi_Y)} = \frac{Z}{\cos(\varphi_Y)}; (8)$$

$$X_{\text{пар}} = \frac{-1}{Y \sin(\varphi_Y)} = \frac{-Z}{\sin(\varphi_Y)}. (9)$$

Знак «минус» в выражении (9) указывает на то, что реактивные составляющие проводимости и сопротивления одного и того же элемента имеют противоположные знаки. Например, для индуктивности:

$$\dot{Z}_L = j\omega L = jX_L; \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{jX_L} = j\left(-\frac{1}{X_L}\right) = jB_L; B_L = -\frac{1}{X_L};$$

для емкости:

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = j(-X_C); \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{j(-X_C)} = j\left(\frac{1}{X_C}\right) = jB_C; B_C = \frac{1}{X_C}.$$

2.2. Фазометрический метод измерения параметров комплексного сопротивления

Фазометрический метод позволяет измерить параметры показательной формы комплексного сопротивления – модуль Z и его аргумент φ_Z .

Модуль комплексного сопротивления определяется с помощью амперметра и вольтметра:

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

где: U – напряжение на измеряемом комплексном сопротивлении,

I – ток, протекающий по нему.

Аргумент комплексного сопротивления и его знак определяются по фазовому сдвигу φ между \dot{U} и \dot{I} . Связь между фазовым сдвигом φ и аргументом комплексного сопротивления φ_Z можно установить из выражений (1) и (2):

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{i\psi_u}}{Ie^{i\psi_i}} = Ze^{j(\psi_u - \psi_i)}, (10)$$

где ψ_u и ψ_i – начальные фазы напряжения \dot{U} и \dot{I} .

Сравнивая (10) с (1), можно записать

$$\varphi_Z = \psi_u - \psi_i. (11)$$

Так, например, для цепи с активным сопротивлением и емкостью $\psi_i > \psi_u$ (т.е. ток в такой цепи опережает по фазе напряжение на ней). Поэтому аргумент φ_{ZC} комплексного сопротивления, содержащего активное сопротивление и емкость – отрицательный: $\varphi_{ZC} < 0$.

В цепи, содержащей индуктивность и активное сопротивление $\psi_i < \psi_u$ (т.е. ток в такой цепи отстает по фазе от напряжения на ней). Поэтому аргумент φ_{ZL} комплексного сопротивления, составленного из индуктивности и активного сопротивления, положителен: $\varphi_{ZL} > 0$.

Фазовый сдвиг между \dot{U} и \dot{I} измеряют либо фазометром, либо с помощью осциллографа.

2.3. Ваттметровый метод измерения параметров комплексного сопротивления

При измерениях ваттметровым методом определяют модуль Z комплексного сопротивления с помощью амперметра и вольтметра и активное сопротивление последовательной ($R_{\text{посл}}$) или параллельной ($R_{\text{пар}}$) схемы замещения с помощью ваттметра, измеряющего мощность, потребляемую исследуемым комплексным сопротивлением.

Недостатком метода является невозможность определения характера реактивности исследуемого комплексного сопротивления, т.к. показания ваттметра пропорциональны $\cos(\varphi)$, который не зависит от знака φ . Поэтому ваттметровый метод применяется только для измерения параметров цепей, характер реактивности которых заранее известен, например, при определении потерь конденсаторов, катушек индуктивности.

Схема измерения ваттметровым методом приведена на рис.3.

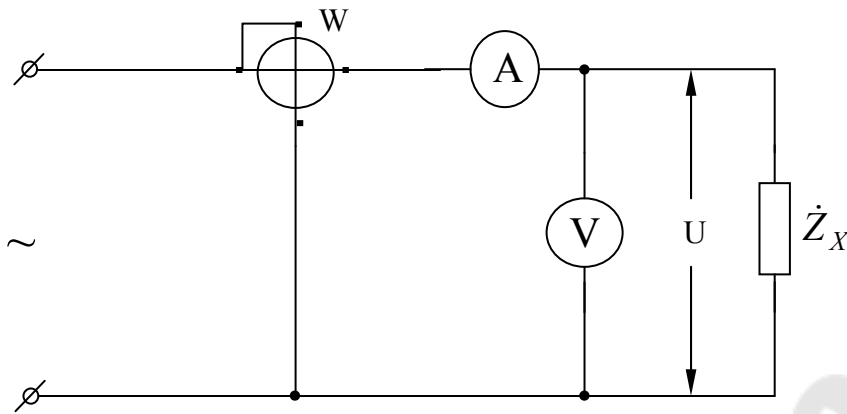


Рис.3. Схема измерения параметров комплексного сопротивления ваттметровым методом

Места включения амперметра A , вольтметра V , обмоток ваттметра W выбираются из условия получения наименьших методических погрешностей, исходя из конкретных условий, т.е. с учетом типа применяемых измерительных приборов и величины исследуемого комплексного сопротивления \dot{Z}_x . Приведенная на рис.3 схема выбрана с учетом:

- Z_x не превышает 10-20 кОм;
- в качестве вольтметра V применяется электронный вольтметр с высоким (порядка 10 МОм) входным сопротивлением;
- в качестве ваттметра W применяется электродинамический ваттметр, имеющий значительный (30 мА или выше) номинальный ток обмотки напряжения.

При такой схеме ток параллельной обмотки ваттметра не будет протекать по амперметру, а входной ток вольтметра не сможет повлиять на величину тока.

Модуль комплексного сопротивления определяется как

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

где U , I – показания соответственно вольтметра и амперметра.

Активные сопротивления последовательной ($R_{\text{посл}}$) и параллельной ($R_{\text{пар}}$) схем замещения определяются по формулам:

$$R_{\text{посл}} = \frac{P_w}{I^2}; (12)$$

$$R_{\text{пар}} = \frac{U^2}{P_w}, (13)$$

где P_w – показания ваттметра W .

Реактивная составляющая $X_{\text{посл}}$ последовательной схемы замещения может вычисляться с помощью аргумента $\varphi_{\text{посл}}$:

$$\cos(\varphi_{\text{посл}}) = \frac{R_{\text{посл}}}{Z}; (14)$$

$$X_{\text{посл}} = Z \sin(\varphi_{\text{посл}}); (15)$$

либо по формуле:

$$X_{\text{посл}} = \sqrt{Z^2 - R_{\text{посл}}^2}. (16)$$

Реактивная составляющая $X_{\text{пар}}$ параллельной схемы замещения также может вычисляться двояко – с помощью аргумента $\varphi_{\text{пар}}$:

$$\cos(\varphi_{\text{пар}}) = \frac{Z}{R_{\text{пар}}}; (17)$$

$$X_{\text{пар}} = \frac{Z}{\sin(\varphi_{\text{пар}})}, (18)$$

либо по формулам:

$$X_{\text{пар}} = \frac{1}{B}; B = \sqrt{Y^2 - G^2}, (19)$$

$$\text{где } Y = \frac{1}{Z}; G = \frac{1}{R_{\text{пар}}}.$$

Необходимо заметить, что формулы (14) и (17) должны давать одинаковые результаты, но из-за погрешностей (в том числе и методической) результаты могут несколько отличаться.

2.4. Влияние величины напряжения на обмотке на форму тока холостого хода трансформатора

Сопротивление медных проводов обмотки трансформатора обычно значительно меньше ее индуктивного сопротивления. Поэтому магнитный поток Φ и индукция B в сердечнике трансформатора изменяются по синусоидальному закону, если синусоидально напряжение, приложенное к обмотке. Ток холостого хода трансформатора складывается из тока намагничивания и тока потерь на гистерезис и вихревые токи. Причем ток намагничивания обычно значительно больше тока потерь. Поэтому форма тока холостого хода будет в основном определяться формой намагничивающего тока, который будет повторять форму кривой напряженности магнитного поля H . Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля в замкнутом ферромагнитном сердечнике определяется основной кривой намагничивания $B = f(H)$, очень сильно отличающейся от линейной (рис.4).

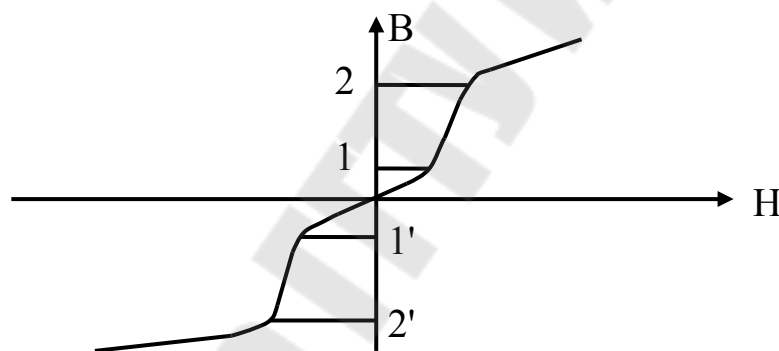


Рис.4. Приближенный вид кривой намагничивания ферромагнетиков

Как ясно из рис.4, при индукции B , изменяющейся по синусоидальному закону во времени, форма напряженности H будет зависеть от величины индукции B . Если амплитудные значения индукции не превышают значений участка 1–1' (рис. 4), то форма напряженности и намагничивающего тока будет близка к синусоидальной (рис. 5а). Если амплитудные значения индукции выходят за пределы участка 1–1', но не выходят за пределы участка 2–2', вершины синусоиды тока будут сглажены (рис. 5б). Если же амплитудные значения индукции будут выходить за пределы участка 2–2', то будут появляться большие выбросы тока (рис. 5в), соответствующие значительному

увеличению H при незначительном увеличении B на пологом участке кривой $B = f(H)$.

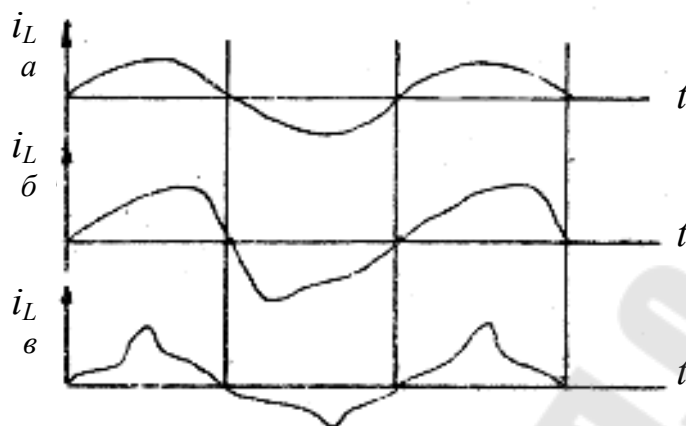


Рис.5. Приблизженный вид формы намагничивающего тока при разных напряжениях на обмотке трансформатора

3. Методика и схемы эксперимента

В лабораторной работе для измерений используются три комплексных сопротивления $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3$, которые помещены внутри стенда, а их концы выводятся на лицевую панель и соединены так, как показано на рис. 6.

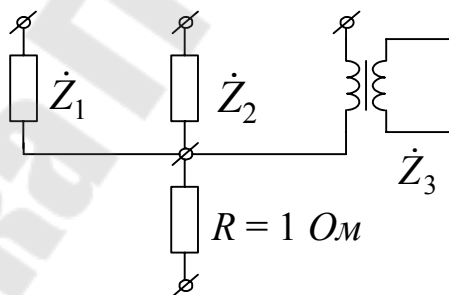


Рис.6. Схема соединений элементов, приведенная на лицевой панели стенда

Характер реактивности комплексных сопротивлений \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 неизвестен, поэтому их параметры измеряются фазометрическим методом.

Параметры обмотки трансформатора \dot{Z}_3 измеряются ваттметровым методом.

Активное сопротивление $R=1$ Ом, значительно меньшее $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3$, служит для получения падения напряжения \dot{U}_1 , совпадаю-

щего по фазе с током \dot{I} через исследуемый элемент, пропорционального этому току и повторяющего форму этого тока.

При измерении комплексного сопротивления фазометрическим методом фазовый сдвиг между \dot{U} и \dot{U}_1 определяется с помощью осциллографа (см. методические указания к лабораторной работе № 2 «Электроннолучевые осциллографы и их применение в измерительной технике»). Схема эксперимента приведена на рис.7.

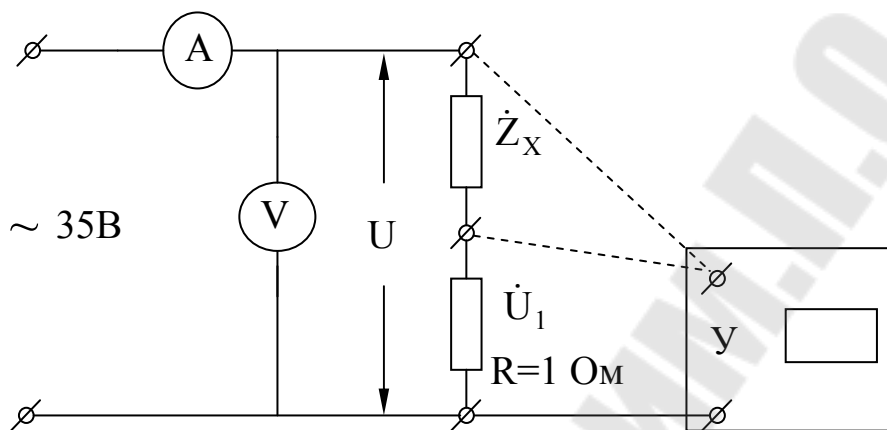


Рис.7. Схема эксперимента №1 измерения параметров комплексного сопротивления фазометрическим методом

Измерение параметров \dot{Z}_3 ваттметровым методом и исследование влияния величины напряжения на обмотке на форму тока холостого хода трансформатора производится по схеме эксперимента №2, приведенной на рис.8.

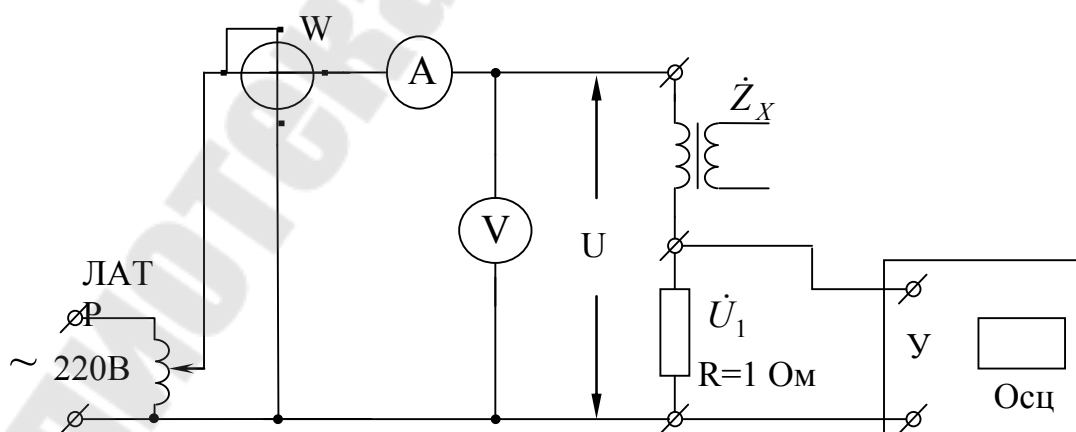


Рис.8. Схема эксперимента №2 измерения параметров комплексного сопротивления ваттметровым методом и исследования влияния напряжения на форму тока холостого хода трансформатора

4. Задание

4.1. Измерить модули и аргументы двух комплексных сопротивлений \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 фазометрическим методом и определить их характер реактивности (индуктивный, емкостной). Результаты свести в таблицу 1.

Указания:

1. Для выполнения п.1 собрать схему эксперимента №1.
2. В качестве вольтметра применить В7-37 (или В7-27), амперметра – 359 с пределами 50, 100, 200 мА, осциллографа – С1-83 (или С1-137).
3. Падение напряжения на малом сопротивлении $R=1$ Ом совпадает по фазе с током через \dot{Z}_x .
4. Фазовый сдвиг между напряжением и током определять с помощью калиброванной развертки.
5. t_u – временной сдвиг между синусоидами напряжения и тока.

Таблица 1

U [В]	I [мА]	Z [Ом]	Ток опережает или отстает от напряжения	t_u [мс]	φ [град]	Характер реактивности

4.2. По результатам п.1 определить параметры последовательной и параллельной схем замещения комплексных сопротивлений \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 . Результаты свести в таблицу 2.

Таблица 2

	Z [Ом]	φ [град]	$\frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)}$	Последовательная схема			Параллельная схема		
				R [Ом]	X [Ом]	$L(C)$	R [Ом]	X [Ом]	$L(C)$
Z_1									
Z_2									

4.3. Измерить модуль комплексного сопротивления к активную мощность обмотки трансформатора при напряжениях 70 В, 95 В, 120 В и зарисовать форму тока. Результаты занести в таблицу 3.

Указания:

1. Для выполнения п. 3 собрать схему эксперимента №2.
2. Форма тока повторяет падение напряжения на малом сопротивлении $R=1$ Ом.
3. В качестве вольтметра использовать В7-37 (или В7-27), амперметра – 359 с пределами 50, 100, 200 мА, ваттметра – малокосинусный ваттметр Д 522.

Таблица 3

	I [мА]	NC_w [дел] $\left[\frac{Bm}{дел} \right]$	P_w [Вт]	Z [Ом]	Форма тока
$U_1=70$ В					
$U_2=95$ В					
$U_3=120$ В					

4.4. Объяснить причину зависимости формы тока холостого хода трансформатора от напряжения.

4.5. По результатам п.4.3 вычислить параметры последовательной и параллельной схем замещения комплексного сопротивления обмотки трансформатора при различных напряжениях. Результаты свести в таблицу 4.

Таблица 4

	Z [Ом]	Последовательная схема					Параллельная схема				
		R [Ом]	cos(φ)	φ [град]	X _L [Ом]	L [Гн]	R [Ом]	cos(φ)	φ [град]	X _L [Ом]	L [Гн]
U ₁											
U ₂											
U ₃											

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Последовательные и параллельные схемы замещения цепей с емкостью и индуктивностью и формулы, позволяющие определять их параметры по модулю и аргументу комплексного сопротивления.

2. Схему измерения комплексного сопротивления ваттметровым методом и формулы, позволяющие определить параметры последовательной и параллельной и схем замещения.

3. Схемы эксперимента и результаты выполнения всех пунктов задания.

6. Контрольные вопросы

1. Напишите формулы, определяющие связь параметров параллельной и последовательной схем замещения с модулем и аргументом комплексного сопротивления.

2. Как соотносятся между собой активные (реактивные) параметры последовательной и параллельной схем замещения одного и того же комплексного сопротивления?

3. Какой знак имеет аргумент комплексного сопротивления емкостного и индуктивного характера?

4. Как связан аргумент комплексного сопротивления и аргумент комплексной проводимости с начальными фазами напряжения и тока этого элемента.

5. В чем заключается фазометрический метод измерения комплексного сопротивления? Какие параметры комплексного сопротивления измеряются?

6. Как определить по фазовому сдвигу между напряжением и током через комплексные сопротивления характер реактивности?

7. Как измеряется фазовый сдвиг с помощью осциллографа?

8. Как в эксперименте формируется сигнал, несущий информацию о токе?

9. В чем заключается ваттметровый метод измерения параметров комплексного сопротивления?

10. Позволяет ли ваттметровый метод определить характер реактивности (емкостной, индуктивный) комплексного сопротивления? Почему?

11. По каким формулам определяются активные сопротивления для последовательной и параллельной схем замещения при измерениях ваттметровым методом?

12. По каким формулам определяется φ для последовательной и параллельных схем замещения при измерениях ваттметровым методом?

13. По каким формулам можно определить реактивное сопротивление последовательной схемы замещения при измерении ваттметровым методом?

14. По каким формулам можно определить реактивное сопротивление параллельной схемы замещения при измерении ваттметровым методом?

15. Нарисуйте схему измерения комплексного сопротивления фазометрическим методом с помощью осциллографа.

16. Нарисуйте схемы измерения параметров комплексного сопротивления ваттметровым методом с различными вариантами включения измерительных приборов (A , V , W). Укажите возможные методические погрешности.

17. Из каких токов складывается ток холостого хода трансформатора?

18. Чем определяется форма тока намагничивания трансформатора?

19. Что такое основная кривая намагничивания и каков ее вид?

20. Как зависит форма тока намагничивания трансформатора от напряжения на его обмотке?

21. Почему магнитная индукция в сердечнике трансформатора изменяется по синусоидальному закону при подключении обмотки трансформатора к источнику с синусоидальной формой кривой?

7. Литература

1. Электрические измерения. – Под ред. А.В. Фремке. – Л: Энергия, 1973. – С. 144-147, 233-234.

2. Электрические измерения. – Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М; Высшая школа, 1972. – С. 288-289, 332-335.

3. Электрические измерения. – Под ред. А.В. Фремке и Н.С. Душина. – Л: Энергия, 1980. – С. 118-120, 198-200.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

1. Цель работы.

Ознакомление с принципом работы и конструкции ваттметров активной и реактивной мощности, электродинамических фазометров, с погрешностями активных ваттметров, с поверкой ваттметров.

2. Основные теоретические сведения

2.1. Ваттметры активной мощности

2.1.1. Принцип работы

Ваттметры выполняются на основе электродинамических механизмов, содержащих неподвижную катушку 1, состоящую из 2-х секций, и подвижную 2, расположенную внутри неподвижной (рис.1.). При протекании по катушкам переменных токов $i_1 = I_{m1} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ и $i_2 = I_{m2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$, где φ - фазовый сдвиг между токами, возникает вращающий момент, среднее значение которого равно:

$$M_{\text{вр.ср.}} = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot \cos \varphi,$$

где I_1, I_2 – действующие значения токов i_1 и i_2 , а $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ - закон изменения взаимной индукции между катушками 1 и 2 от угла поворота подвижной части α .

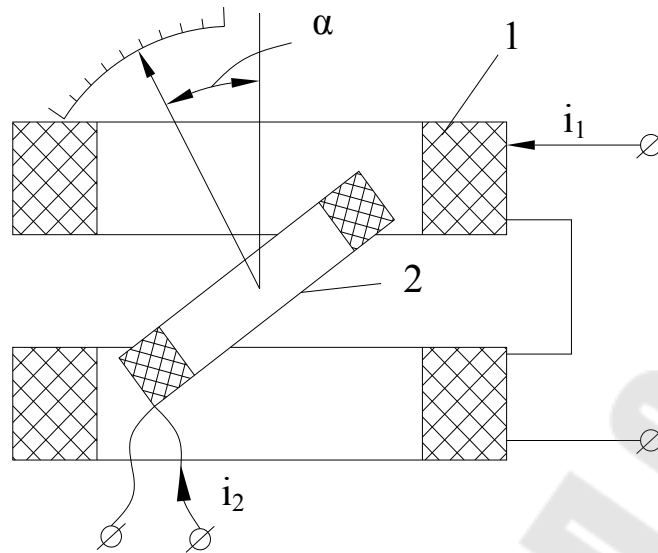


Рис. 1. Устройство электродинамического прибора

Если противодействующий момент создать пружиной, то угол подвижной части 2 равен:

$$\alpha = \frac{1}{K_{\alpha}} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot \cos \varphi,$$

K_{α} – удельный противодействующий момент .

На рис. 2а приведена схема включения электродинамического в режиме измерения активной мощности.

По неподвижной катушке 1 проходит ток нагрузки \dot{I} , а по неподвижной 2 - ток I_U , совпадающий по фазе с напряжением \dot{U} (рис. 2 б), и равный по величине $I_U = \frac{U}{r + r_d}$, где r - сопротивление подвижной катушки; r_d - добавочное сопротивление; φ - фазовый сдвиг напряжением \dot{U} и током нагрузки \dot{I} .

Угол поворота подвижной части при этом зависит от активной мощности ($P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$):

$$\alpha = \frac{1}{K_{\alpha}} \cdot I_1 \cdot \frac{U}{r + r_d} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot \cos \varphi.$$

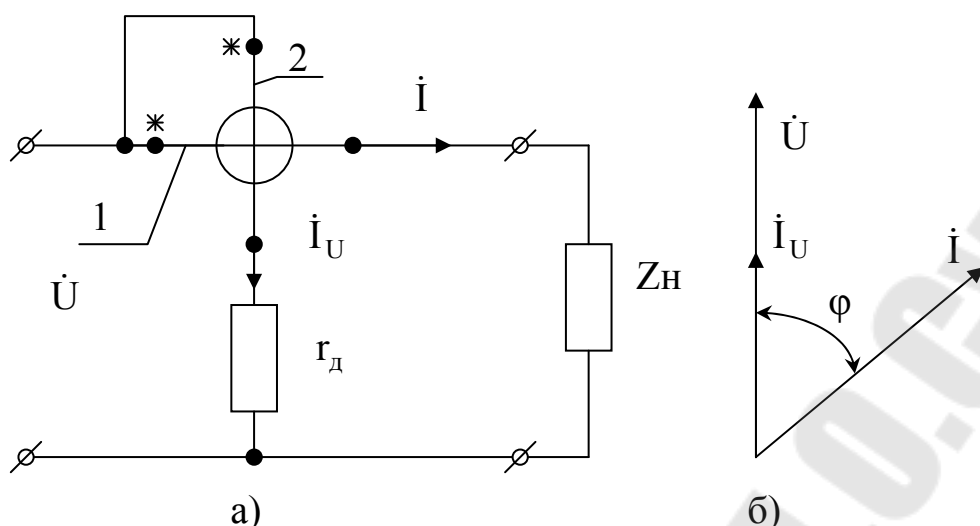


Рис.2. Схема включения электродинамического прибора в режиме измерения активной мощности (а) и векторная диаграмма (б)

Закон изменения взаимной индуктивности делается независимым от угла поворота соответствующим выбором размеров и формы катушек, их взаимного и начального расположения, т.е. $\frac{dM_{12}}{d\alpha} = \text{const}$. Тогда угол поворота пропорционален активной мощности:

$$\alpha = K \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi, \text{ где } K = \frac{1}{K_{\alpha}} \cdot \frac{U}{r + r_d} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

Как видно направление отклонения подвижной части α зависят от знака U и I , поэтому определенные концы токовой (неподвижной) катушки и катушки напряжения (подвижной) маркируются звездочками (*). Подвижная часть будет отклоняться в сторону увеличения показаний, если токи I и I_U относительно маркированных зажимов будут направлены одинаково.

Электродинамические ваттметры обычно выполняются многопредельными по напряжению и по току, а шкалы их градуируются в условных единицах. Результат измерения определяется умножением числа отсчитанных делений на постоянную ваттметра S , которая определяется по формуле:

$$C = \frac{U_{\text{пр}} \cdot I_{\text{пр}}}{\alpha_{\text{макс}}},$$

где $U_{\text{пр}}$, $I_{\text{пр}}$ – выбранные измерения ваттметра по напряжению в [В] и току [А].

$\alpha_{\text{макс}}$ – максимальное число делений, обозначенное на шкале ваттметра.

2.1.2. Методические погрешности ваттметров

Электродинамические ваттметры могут применяться для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока. Методическая погрешность имеет место при измерении мощности и на постоянном и на переменном токе, а причиной ее возникновения является потребление мощности, самим измерительным прибором. Методическая погрешность зависит от способа включения катушки напряжения - начало ее может быть включено до токовой катушки и после неё, как показано на рисунках 3а и 3б.

При включение ваттметра по схеме рис. 3а он измерит мощность равную: $P_1 = UI_{\text{н}} = (U_{\text{А}} + U_{\text{н}})I_{\text{н}} = P_{\text{А}} + P_{\text{н}}$

где $U_{\text{А}}$ – падение напряжения на токовой катушке;

$P_{\text{А}}$ – мощность потребляемая токовой катушкой;

$P_{\text{н}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}$ – мощность, потребляемая нагрузкой.

Погрешность измерения определяется разностью между измеренной мощностью P_1 и действительной $P_{\text{д}} = P_{\text{н}}$:

$$\delta_1 = \frac{P_1 - P_{\text{д}}}{P_{\text{д}}} = \frac{P_{\text{А}} + P_{\text{н}} - P_{\text{н}}}{P_{\text{н}}} = \frac{P_{\text{А}}}{P_{\text{н}}}.$$

При включенном ваттметре по схеме рис.3 б он измеряет мощность P_2 , равную: $P_2 = U_{\text{н}} \cdot I = (I_{\text{У}} + I_{\text{н}}) \cdot U_{\text{н}} = P_{\text{У}} + P_{\text{н}}$,

где $P_{\text{У}}$ - мощность, потребляемая цепью напряжения.

Погрешность в этом случае равна δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{P_2 - P_{\text{д}}}{P_{\text{д}}} = \frac{P_{\text{У}} + P_{\text{н}} - P_{\text{н}}}{P_{\text{н}}} = \frac{P_{\text{У}}}{P_{\text{н}}}.$$

Как видно из выражений для δ_1 и δ_2 , в обоих случаях ваттметр даёт завышенное значение мощности, т.к. $\delta_1 > 0$ и $\delta_2 > 0$.

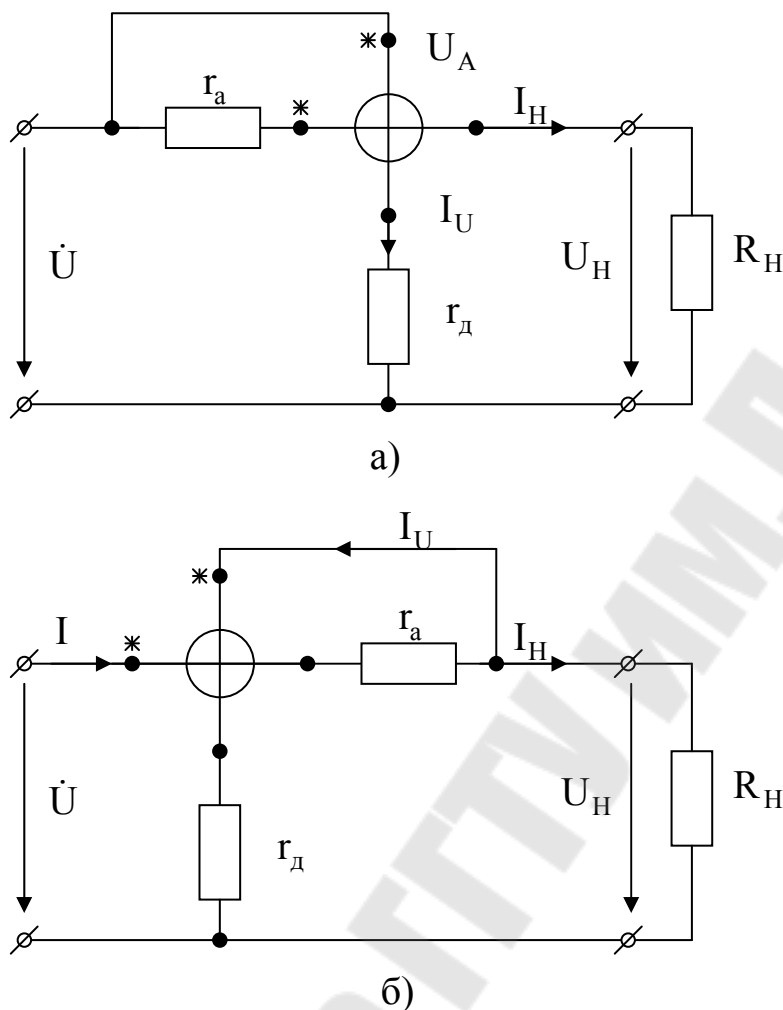


Рис.3. Схема включения электродинамических ваттметров, дающие разные методические погрешности

Обычно на шкалах ваттметров приводятся значения сопротивления токовой катушки R_A и катушки напряжения R_U на разных пределах измерения. Учитывая, что $P_A = I_H^2 \cdot R_A$, $P_U = \frac{U_H^2}{R_H}$, можно δ_1 и δ_2 представить в таком виде:

$$\delta_1 = \frac{P_A}{P_H} = \frac{I_H^2 \cdot R_A}{U_H \cdot I_H} = \frac{I_H \cdot R_A}{P_H} = \frac{R_A}{R_H} \quad (1)$$

$$\delta_2 = \frac{P_U}{P_H} = \frac{U_H^2}{R_U \cdot U_H \cdot I_H} = \frac{U_H}{P_H} \cdot \frac{1}{R_U} = \frac{R_H}{R_U} \quad (2)$$

где $R_H = \frac{U_H}{I_H}$ – сопротивление нагрузки.

Как видно из выражений (1) и (2), схему включения ваттметра, приведённую на рис. 3 а, целесообразно применить при сравнительно больших сопротивлениях нагрузки, когда $R_H \gg R_A$, а схему включения, приведённую на рис. 3 б – при малых сопротивлениях нагрузки, когда $R_H \ll R_U$. Для уменьшения методической погрешности перед измерением нужно оценить обе погрешности δ_1 и δ_2 по выражениям (1) и (2) и выбрать схему, при которой методическая погрешность имеет наименьшее значение.

Методические погрешности δ_1 и δ_2 можно определять и для конечных значений шкалы на каждом пределе измерения:

$$\delta_1 = \frac{I_{\text{пр}}}{U_{\text{пр}}} \cdot R_A \quad (3)$$

$$\delta_2 = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} \cdot \frac{1}{R_A} \quad (4)$$

где $U_{\text{пр}}$, $I_{\text{пр}}$ – конечные значения на выбранных пределах по напряжению и току.

2.1.3. Угловая погрешность измерения ваттметров

Угловая погрешность возникает при измерениях мощности в цепях переменного тока. Причиной возникновения её является сдвиг тока \dot{I}_U , протекающего по катушке напряжения, относительно напряжения \dot{U} , из-за индуктивности этой катушки. Ток \dot{I}_U потому будет отставать от \dot{U} на некоторый угол γ , как это показано на векторной диаграмме, приведенной на рис.4., где φ – фазовый сдвиг между измеряемым током \dot{I} и напряжением \dot{U} .

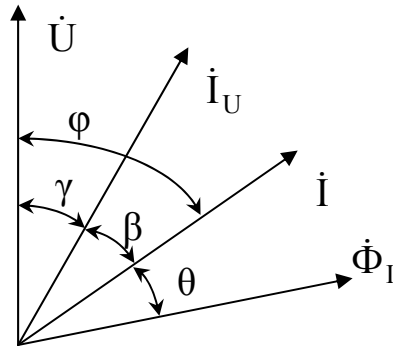


Рис. 4. Векторная диаграмма, отражающая причины возникновения угловых погрешностей

Угол поворота α подвижной части ваттметра пропорционален произведению токов I и I_U , протекающих по катушкам, на косинус угла между ними: $\alpha = K \cdot I_U \cdot \cos\beta = K \cdot I_U \cdot \cos(\varphi - \beta)$. Как видно из рис. 4. $\beta = \varphi - \gamma$. Ток, протекающий по катушкам напряжения, можно выразить через напряжение U , приложенное к катушке, сопротивление r и индуктивность L катушки и дополнительное сопротивление r_d , которое обычно выполняется безреактивным:

$$I_U = \frac{U}{\sqrt{(r + r_d)^2 + (\omega \cdot L)^2}} = \frac{U}{r + r_d} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} = \frac{U}{r + r_d} \cdot \cos \gamma,$$

где ω – угловая частота измеряемых напряжения и тока.

$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega \cdot L}{r + r_d}$ – аргумент комплексного сопротивления цепи на-

пряжения ваттметра.

С учётом выражения для I_U :

$$\alpha = K \cdot \frac{I \cdot U}{r + r_d} \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\varphi - \gamma).$$

Обычно ваттметры активной мощности градуируются на постоянном токе, т.к. во-первых постоянные напряжения и ток можно измерить с высокой точностью либо электромеханическими приборами, либо компенсационным методом, а во-вторых, на постоянном токе отсутствует угловая погрешность, т.к. $\omega = 0$ и $\gamma = 0$.

Таким образом, шкала ваттметров градуируется в единицах действительной активной мощности $P_d = U I \cos\varphi$. При измерениях на переменном токе $\gamma \neq 0$, и ваттметр измеряет мощность $P_w = U I \cos\gamma \cos(\varphi - \gamma)$. Погрешность δ_γ , вносимую аргументом комплексного сопротивления цепи напряжения γ , называют угловой, а определить ее можно как:

$$\delta_\gamma = \frac{P_w - P_d}{P_d} = \frac{U \cdot I \cdot \cos(\varphi - \gamma) - U \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{U \cdot I \cdot \cos(\varphi)} = \cos(\gamma) \cdot \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\cos(\varphi)} - 1 =$$

$$= \cos^2(\gamma) - \cos(\gamma) \cdot \sin(\gamma) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) - 1$$

$$\delta_\gamma = -\sin^2(\gamma) - \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \gamma) \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$$

Учитывая, что γ не превышает $30^\circ - 50^\circ$, $\sin\gamma$ можно заменить углом γ , выраженном в радианах :

$$\delta_\gamma = -\gamma^2 - \gamma \operatorname{tg}\varphi$$

Пренебрегая малой величиной второго порядка (γ^2), получим:

$$\delta_\gamma = -\gamma \operatorname{tg}\varphi$$

Как видно, при углах φ близких к 90° , угловая погрешность может достигать значительных величин. Для оценки второй погрешности, в таблице 2.1. приведены расчёты δ_γ для $\gamma = 30' = 10^{-2}$ радиан для разных значений φ :

Таблица 2.1.

Φ	6°	17°	27°	45°	$84,3^\circ$	$87,10^\circ$	88°	89°
$\operatorname{Tg}\varphi$	0,1	0,2	0,5	1,0	10,0	20,0	28,6	57,3
δ_γ [%]	0,1	0,2	0,5	1,0	10,0	20,0	28,6	57,3

Для измерения активной мощности с небольшими погрешностями при больших углах φ выпускаются специальные, так называемые малокосинусные ваттметры, которые специально градуируются при больших углах φ и на определенной частоте. На их шкалах указывается номинальный косинус φ (обычно $\cos\varphi_n = 0,1$), а погрешность, указанная на шкале, гарантируется в узком диапазоне частот, например, 44-56 Гц.

2.1.4. Ферродинамические ваттметры

В ферродинамических ваттметрах, по двум неподвижным катушкам А1 и А2 (рис. 4), расположенным на полюсах магнитопроводов 1 и 2, протекает ток нагрузки \dot{I} , который создает в магнитопроводах поток $\dot{\Phi}_I$, отстающий по фазе от тока \dot{I} из-за потерь на гистерезис и вихревые токи на угол Θ . По подвижным катушкам Б1 и Б2, перемещающимся в воздушном зазоре между магнитопроводами и полюсами, протекает ток \dot{I}_U , отстающий от напряжения U на угол γ .

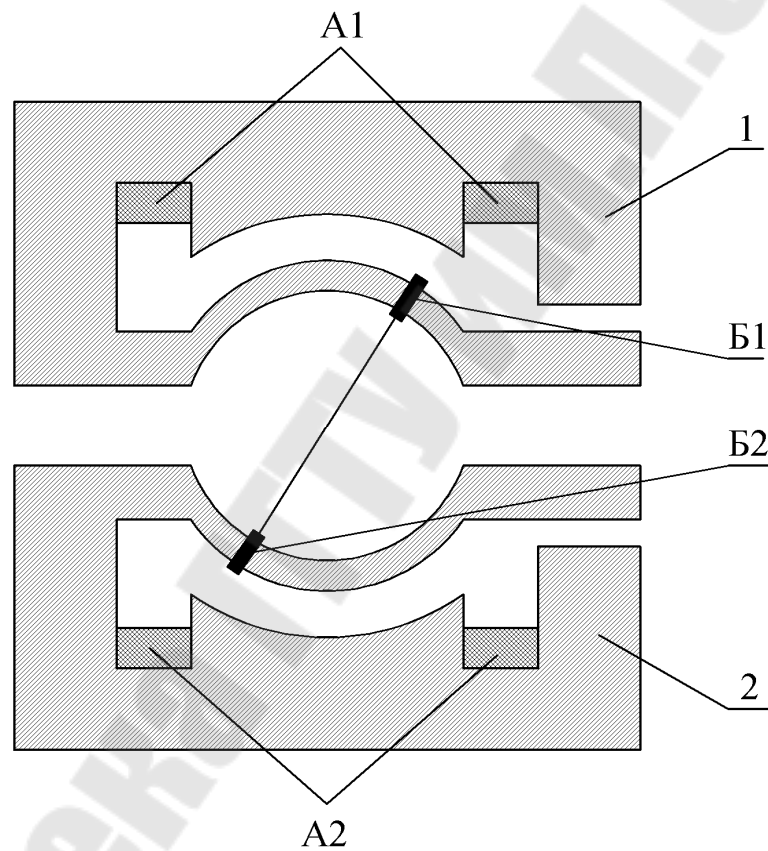


Рис.4. Устройство ферродинамических ваттметров

Вращающий момент ферродинамического ваттметра равен:

$$M_{\text{ВР}} = k_I \cdot I_U \cdot \Phi_I \cdot \cos(I_U, \Phi_I) \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

где $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ - закон изменения взаимной индуктивности между

подвижной и неподвижной катушками от угла поворота.

При равномерном воздушном зазоре

$$\frac{dM_{12}}{d\alpha} = \text{const}$$

и $M_{вр}$ пропорционален мощности. Если учесть, что $I_U = \frac{U}{r + r_D}$ и

$\Phi_I = k_2 \cdot I$ и предположить, что γ и θ равны нулю:

$$M_{вр} = k \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = k \cdot P$$

Поэтому шкала ферродинамических ваттметров – равномерная.

В реальных приборах $\gamma \neq 0$ и $\theta \neq 0$, из-за чего возникает угловая погрешность. В ферродинамических ваттметрах угловая погрешность, в отличие от ферромагнитных определяет разность углов γ и θ (рис.4.).

2.2. Измерение реактивной мощности

Реактивная мощность измеряется варметрами – ваттметрами реактивной мощности (реактивными ваттметрами). Варметры применяются также и для проверки реактивных счётчиков индукционной системы. Упрощенная схема ваттметра приведена на рис.5а. Дополнительная индуктивность L_d , включённая последовательно с катушкой напряжения, сдвигает ток \dot{I}_U на 90° относительно вектора \dot{U} , как показано на рис. 5а.

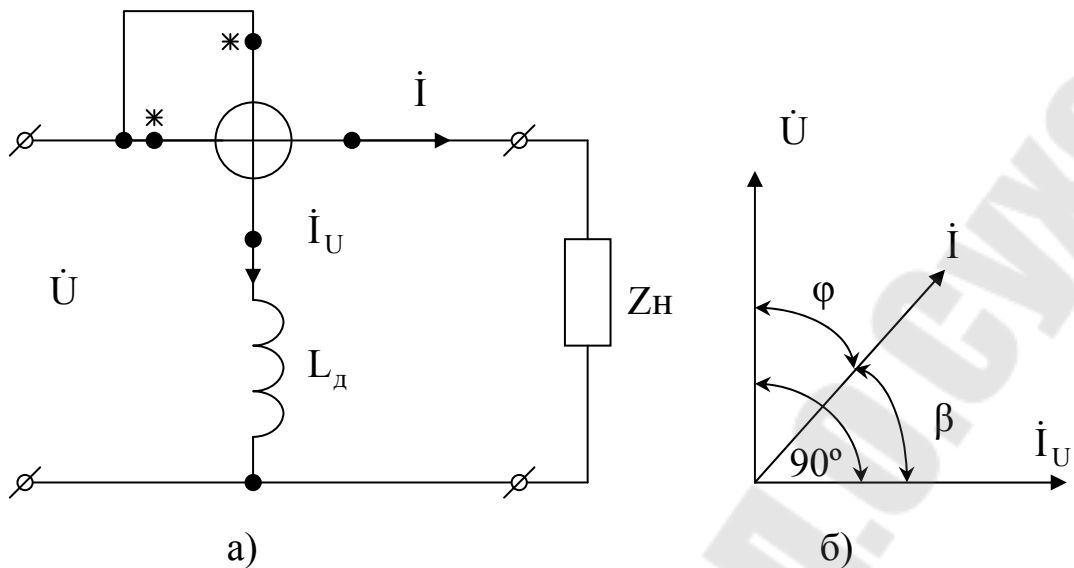


Рис.5. Схема включения электродинамического прибора для измерения реактивной мощности (а) и векторная диаграмма (б)

Угол поворота подвижной части α будет пропорционален в этом случае реактивной мощности:

$$\alpha = k \cdot I_U \cdot I \cdot \cos\beta = k \cdot \frac{U}{\omega \cdot L} \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = \frac{k}{\omega \cdot L} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi = \frac{K}{\omega} \cdot Q$$

Как видно, показания реактивного ваттметра зависят от частоты, поэтому они выпускаются только на одну частоту.

Однако, включением одной, индуктивности невозможно добиться 90° -го сдвига между \dot{U} и \dot{I}_U , т.к. подвижная катушка обладает определенным активным сопротивлением. Для получения 90° -го сдвига между \dot{U} и \dot{I}_U применяют более сложную схему, приведенную на рис. 6а, где r, L - сопротивление и индуктивность подвижной катушки; r_1 - активное сопротивление, включенное параллельно подвижной катушке; r_2, L_2 - активное сопротивление и индуктивность дополнительной катушки индуктивности.

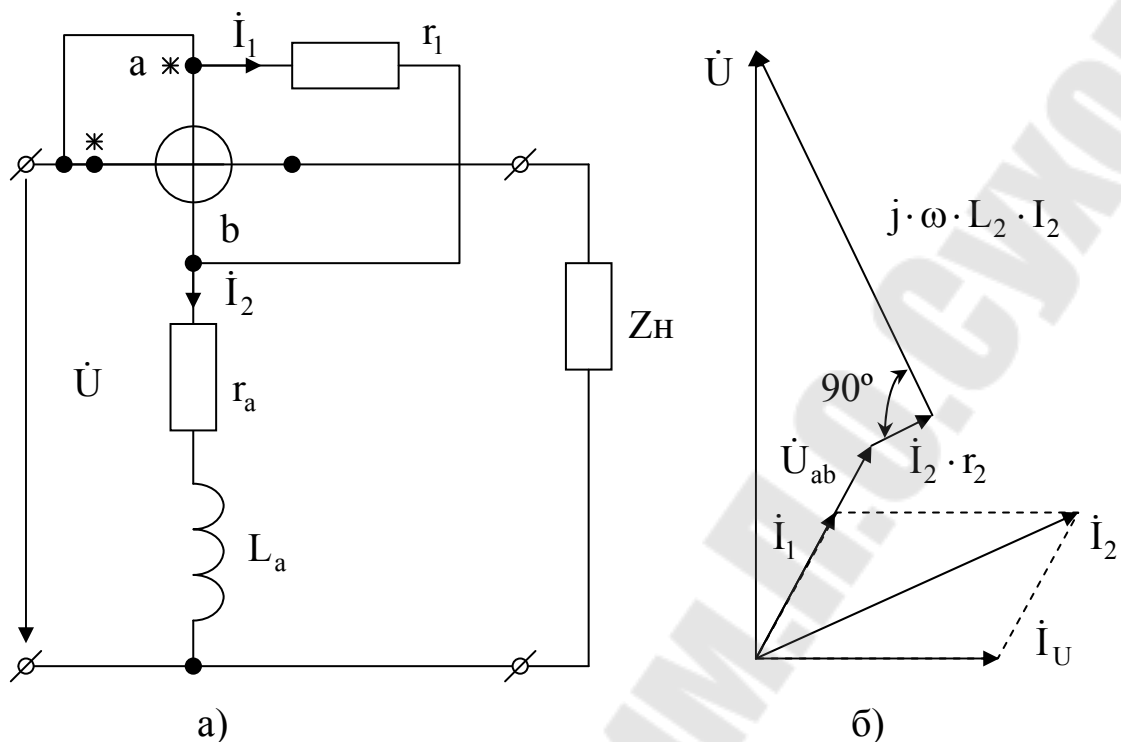


Рис. 6. Схема, позволяющая получить точный 90° -ный сдвиг между током \dot{I}_U и напряжением \dot{U} в электродинамических варметрах (а), и векторная диаграмма (б).

Вектор напряжения \dot{U}_{ab} (рис. 6 б) будет отставать от вектора напряжения \dot{U} . Вектор \dot{I}_U будет отставать от \dot{U}_{ab} , т.к. катушка на напряжение обладает индуктивностью L . Вектор тока \dot{I}_1 совпадает с \dot{U}_{ab} . Подбором параметров схемы получает угол сдвига между векторами \dot{I}_U и \dot{U} равный 90° .

2.3. Фазометры на основе электродинамических логометров

2.3.1. Электродинамический логометр

В логометрах противодействующий момент создается электрическим способом так же, как и вращающий момент. Электродинамический логометр состоит из неподвижной катушки А, составленной из двух секций, и двух подвижных катушек Б1 и Б2, жестко укрепленных на одной оси под углом γ друг к другу (рис.7). Токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 через безмоментные подводы подключаются к катушкам Б1 и Б2 так,

чтобы вращающие моменты $M_{вр1}$ и $M_{вр2}$, возникающие в результате взаимодействия токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 с током \dot{I} , были бы направлены навстречу друг другу.

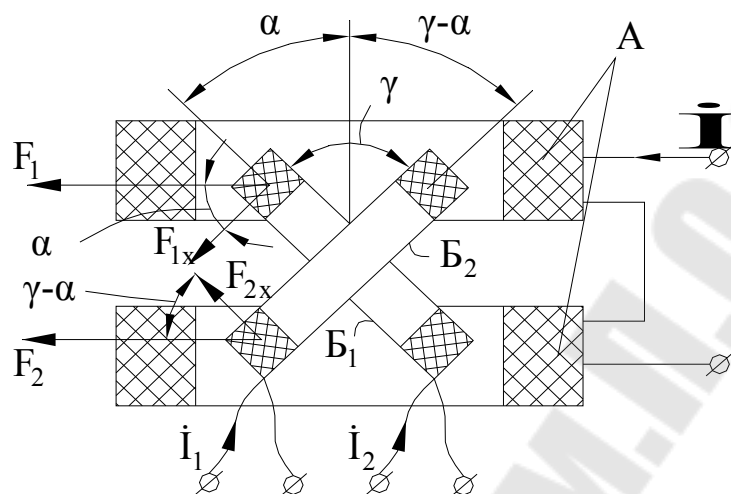


Рис. 7. Устройство электродинамического логометра

В результате взаимодействия токов подвижных и неподвижных катушек возникают силы F_1 и F_2 . Вращающие моменты будут создаваться составляющими сил F_{1x} и F_{2x} , направлены перпендикулярно плоскостям катушек B_1 и B_2 , т.е.

$$F_{1x} = F_1 \cdot \cos \alpha; F_{2x} = F_2 \cdot \cos(\gamma - \alpha)$$

Поэтому:

$$M_{вр1} = I \cdot I_1 \cdot \cos \alpha \cdot \cos(I, I_1) \cdot \frac{dM_{AB1}}{d\alpha}$$

$$M_{вр2} = I \cdot I_2 \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot \cos(I, I_2) \cdot \frac{dM_{AB2}}{d\alpha}$$

Под действием этих моментов подвижная часть придет в движение и остановится при таком угле α , когда $M_{вр1} = M_{вр2}$. Катушки выполняются таким образом, чтобы законы изменения взаимных индуктивностей $\frac{dM_{AB1}}{d\alpha}$ и $\frac{dM_{AB2}}{d\alpha}$ были равны. Тогда

$$\frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos \alpha} = \frac{I_1 \cdot \cos(I, I_1)}{I_1 \cdot \cos(I, I_2)}$$

Как видно, угол поворота подвижной части логометра зависит от отношения токов и фазовых сдвигов между током I и токами I_1 и I_2 :

$$\alpha = F \cdot \frac{I_1 \cdot \cos(I, I_1)}{I_1 \cdot \cos(I, I_2)}$$

Поэтому такие приборы называются логометрами от латинского слова “logos” - отношение.

2.3.2. Электродинамические фазометры

Электродинамические фазометры выполняются на основе логометров и предназначены для измерения сдвига фаз между напряжением и током в какой-либо цепи. Для исключения влияния напряжения на показания фазометра обе подвижные катушки подключаются к одному напряжению, а комплексные сопротивления их цепей выбираются так, чтобы угол поворота подвижной части определялся фазовым сдвигом между напряжением и током. Схема такого фазометра приведена на рис. 8а.

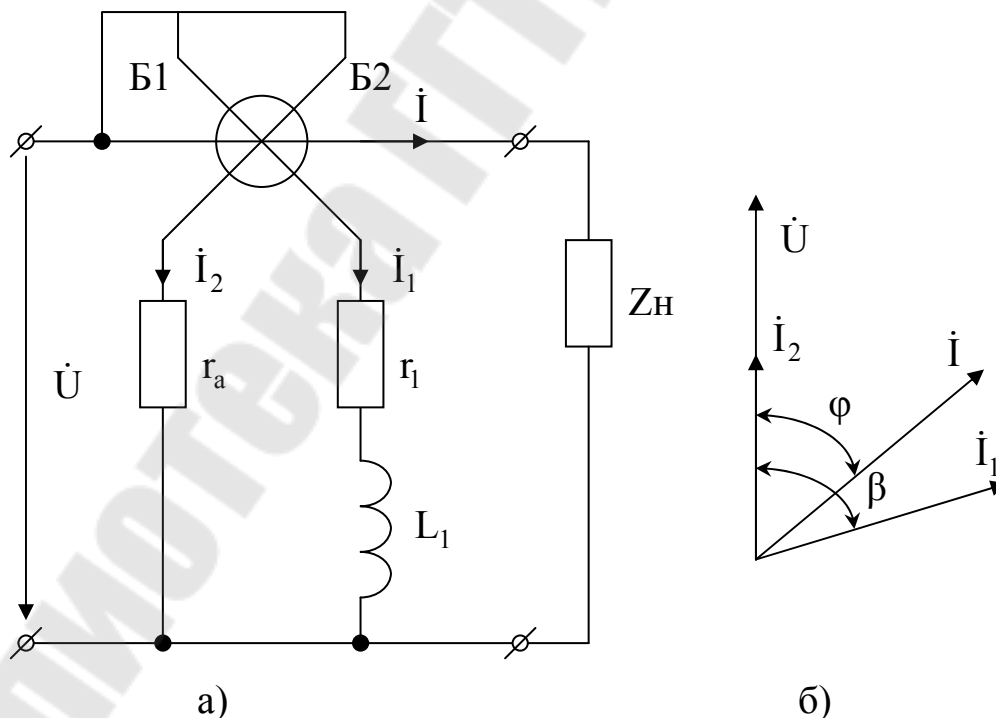


Рис. 8. Схема электродинамического фазометра (а) и векторная диаграмма (б)

Ток \dot{I}_2 в катушке Б2 совпадает с напряжением \dot{U} , а \dot{I}_1 - сдвинут относительно \dot{U} на угол β . Тогда в соответствии с (5) можно записать:

$$\frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos \alpha} = \frac{I_1 \cdot \cos(\beta - \varphi)}{I_2 \cdot \cos(\varphi)}$$

Если r_1 и ωL_1 выбрать так, чтобы $\beta = \gamma$, а r_2 выбрать таким, чтобы $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$, то $\alpha = \varphi$, т.е. угол поворота подвижной части определяется только фазовым сдвигом φ и не зависит от величины U и I .

Шкала фазометра будет равномерной по φ . Фазометры, построенные на таком принципе, выпускаются для измерения коэффициента мощности $\cos \varphi$ в цепях переменного тока. Пределы измерений 0,5 – 1 - 0,5 или 1 - 0 - 1 для емкостного и индуктивного сдвига.

$\cos \varphi$ – функция четная. Но знак угла поворота подвижной части α зависит от характера реактивной нагрузки, т.к. α пропорционален φ . В связи с этим и появляется возможность не только измерить $\cos \varphi$, но и определить характер реактивной нагрузки.

Недостатком схемы, приведенной на рис. 8а, является большая зависимость от частоты. Кроме того параллельная цепь рассчитывается только на одно значение напряжения, т.к. при изменении величины добавочного сопротивления изменится угол β и вместе с ним характеристика шкалы. На рис. 9а приведена схема фазометра Д578, свободная в некоторой степени от указанных недостатков

В последовательной цепи фазометра включен конденсатор C_1 , настраивающий цепь катушки А при номинальной частоте в последовательный резонанс, что позволяет уменьшить падение напряжения в токовой цепи прибора. Для компенсации погрешности от частоты одна катушка параллельной цепи выполнена из двух секций Б1' и Б1'', одна из которых включена через дроссель L , а другая - через конденсатор C . Токи \dot{I}_1' и \dot{I}_1'' будут поэтому сдвинуты относительно напряжения \dot{U} на 90° , а между собой на 180° (рис. 9б). Секции Б1' и Б1'' включаются встречно, поэтому моменты, возникающие в них, будут складываться. Значения L и C подбираются так, чтобы при номинальной частоте токи в секциях Б1' и Б1'' были равны между собой. С изменением частоты ток в одной секции будет уменьшаться, а в другом - увеличиваться, и их суммарное действие останется неизменным, т.е. показания прибора не будут зависеть от частоты. Для того, чтобы прибор можно было использовать в цепях с различным напряжением, предусмотрен трансформатор, встроенный внутри прибора.

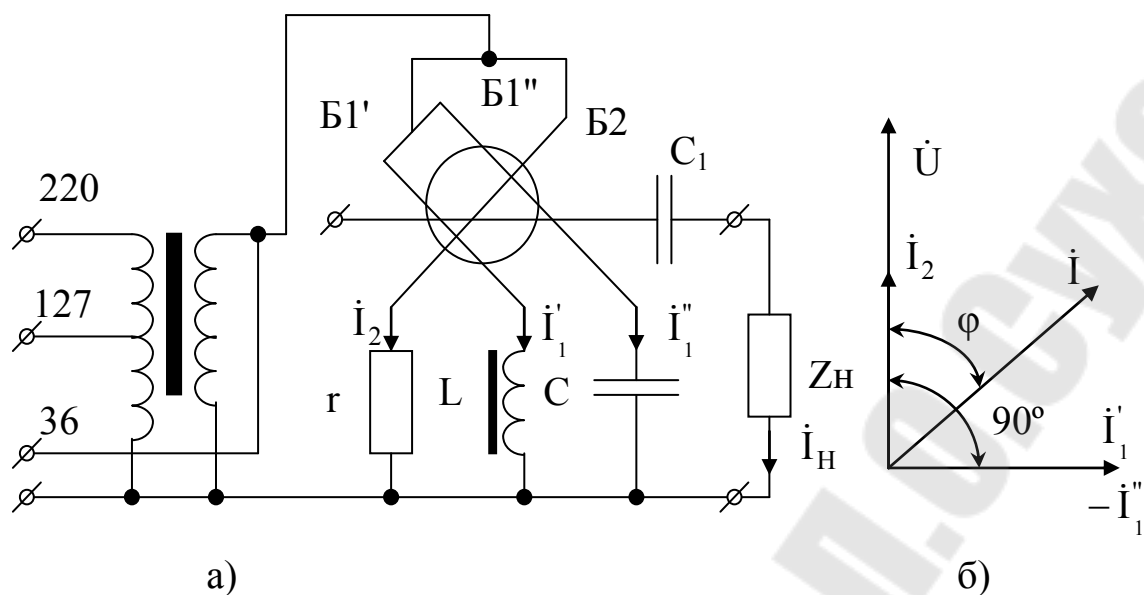


Рис. 9. Схема электродинамического фазометра Д578 и векторная диаграмма

3. Схема и методика проведения эксперимента

Схемы проведения эксперимента, изображенные с учётом обозначения, приборов и клемм, расположенных на лабораторном стенде, приведены на рис.10, 11. Сплошными линиями обведены приборы, укрепленные на стенде (KW - поверяемый ваттметр, ТТ - трансформатор тока), а пунктирными - лабораторные приборы, располагающиеся на столе (V_0 , A_0 , W_0 - образцовые вольтметр, амперметр, ваттметр; $W_{мк}$ - малокосинусный ваттметр; φ - фазометр). R_1 и R_2 - сопротивления, используемые в качестве нагрузки, значения которых приведены на стенде. С - магазин ёмкостей, с помощью которого устанавливается необходимое значение емкости.

Как видно из схемы эксперимента, приведенной на рис. 10, поверяемый киловаттметр kW включается через трансформатор тока ТТ. Причем номинальный ток первичной цепи равен 1 А, а вторичной – 5 А. Такое включение позволяет с одной стороны осуществлять поверку киловаттметра при малых потребляемых мощностях, так как первичный ток можно задавать от низких напряжений, а с другой стороны – задавать в токовую обмотку киловаттметра номинальный ток 5А.

3.1. Определение методических погрешностей

Методические погрешности образцового ваттметра определяется по формулам (см. 2.1.2.):

$$\delta_1 = \frac{I_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} \cdot R_A \cdot 100\%; \quad \delta_2 = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}} \cdot R_V} \cdot 100\%$$

где $U_{\text{ПР}}$, $I_{\text{ПР}}$ – конечные значения на разных пределах измерения ваттметра;

R_A и R_V – сопротивления токовой обмотки и обмотки напряжения (параллельной) ваттметра;

Сопротивление токовой обмотки приводится по шкале ваттметра, а сопротивление R_V можно найти по указанному на шкале номинальному току $I_{\text{ном}}$ параллельной цепи ваттметра:

$$R_V = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ном}}}$$

3.2. Поверка киловаттметра

Поверяемый киловаттметр kW предназначен для работы с понижающим трансформатором тока $ТТ_0$ с коэффициентом трансформации

$$k_{\text{ТО}} = \frac{I_1}{I_{\text{ПР}}}; \quad I_1 = k_{\text{ТО}} \cdot I_{\text{ПР}}$$

где I_1 – ток в нагрузке,

$I_{\text{ПР}}$ – ток, протекающий по токовой обмотке киловаттметра (прибора).

В схеме эксперимента понижающий трансформатор тока $ТТ_0$ отсутствует также, как и ток I_1 . Однако шкала киловаттметра kW отградуирована с учетом $ТТ_0$ ($K_{\text{ТО}}$), и это надо учитывать при определении мощности $P_{\text{ц}}$ цепи, связанной с токовой обмоткой киловаттметра трансформатором тока с коэффициентом трансформации, отличным от $K_{\text{ТО}}$.

Связь между мощностью $P_{\text{кВ}}$, показываемой киловаттметром, и током $I_{\text{ПР}}$, следующая:

$$P_{KW} = U \cdot I_1 = U \cdot k_{TO} \cdot I_{IP}$$

Так как киловаттметр в схеме эксперимента включается через повышающий трансформатор тока ТТ с коэффициентом трансформации $K_{TT} = I_1 / I_2 = I_{Ц} / I_{IP}$, то мощность P_{KW} и мощность $P_{Ц}$, потребляемая цепь нагрузки (R_1, R_2, C на рис.10), связана следующим образом:

$$P_{KW} = U \cdot k_{TO} \cdot I_{IP} = U_{KTO} \cdot \frac{I_{Ц}}{k_{TT}} = \frac{k_{TO}}{k_{TT}} \cdot U \cdot I_{Ц} = \frac{k_{TO}}{k_{TT}} \cdot P_{Ц}$$

где $P_{Ц} = U \cdot I_{Ц}$.

таким образом по показаниям ваттметра можно определить мощность цепи $P_{Ц}$:

$$P_{Ц} = \frac{k_{TO}}{k_{TT}} \cdot P_{KW}$$

Проверку осуществляют, определяя приведённую погрешность

$$\delta_{KW} = \frac{P_{ЦKW} - P_{WD}}{I_{IP} \cdot R_V}$$

где $P_{цкв}$ - мощность, потребляемая цепью нагрузки, вычисленная по показаниям киловаттметра;

$P_{WD} = N_{WD} C_0$ – показания образцового ваттметра в ваттах;

$C_0 = U_{IP} I_{IP} / N_{макс}$ – постоянная образцового ваттметра;

U_{IP}, I_{IP} – максимальные значения напряжения и тока ваттметра на данном пределе измерения;

$N_{макс}$ – максимальное число делений ваттметра;

$P_{WOK} = P_{квк} K_{TT} / K_{TO}$ – мощность, соответствующая конечной точке шкалы киловаттметра $P_{квк}$, приведённая к показаниям образцового ваттметра.

Проверку произвести для всех оцифрованных точек шкалы киловаттметра.

Необходимое значение мощности устанавливать изменением тока в цепи $I_{ц}$ путём регулирования ЛАТРОм напряжения на нагрузке U_H (рис.10).

Для установки заданных значений фазового сдвига φ необходимо вначале определить ёмкостное сопротивление X_C и ёмкость C , соответствующему значению заданного φ . При последовательном соединении R и C : $X_C = \operatorname{tg}\varphi R$. Ёмкость находится по формуле $C = 1 / \omega X_C$, где $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с для $f = 50$ Гц.

Затем с помощью магазина ёмкостей значение ёмкости C , ближайшее к полученному расчётом, и вычислить расчётное значение фазового сдвига и коэффициента мощности $\cos\varphi$ для этого значения ёмкости: $\varphi = \arctg X_C/R$

3.3. Определение угловых погрешностей

Угловые погрешности образцового ваттметра $\delta_{\gamma 0}$, киловаттметра $\delta_{\gamma KW}$, малокосинусного ваттметра $\delta_{\gamma MW}$ определяется по формулам:

$$\delta_{\gamma 0} = \frac{P_0 - P_d}{P_d}; \delta_{\gamma KW} = \frac{P_{цKW} - P_d}{P_d}; \delta_{\gamma МК} = \frac{P_{МК} - P_d}{P_d}$$

где P_0 , $P_{цKW}$, $P_{МК}$ - значения мощности, определённые по показаниям образцового ваттметра, киловаттметра, малокосинусного ваттметра.

$P_d = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ – действительное значение мощности, вычисленное по показаниям образцового амперметра A_0 , вольтметра V_0 , фазометра.

3.4. Приборы, необходимые для выполнения работы:

1. Амперметр Д 533; кл. 0,2; 0,5А; 1А.
2. Вольтметр Д 533; кл. 0,2; 150В; 300В;
3. Ваттметр Д566; кл. 0,2; 300В; 0,5А; 1А.
4. Малокосинусный ваттметр Д522; кл. 1,0; 300В/0,5А, 1А)
5. Фазометр Д578 кл. 0,5; 5А; 220В.
6. Киловаттметр Д307 (установлен на стенде).
7. Трансформатор тока И-54 (установлен на стенде).

4. Задание

4.1. Ознакомьтесь с конструкцией электродинамического амперметра, фазометра, ферродинамического ваттметра, расположенного на стендах в лаборатории.

4.2. Записать тип и характеристики измерительных приборов, используемых в лабораторной работе.

4.3. Вычислить методические погрешности образцового ваттметра на всех пределах измерения для конечной точки шкалы в соответствии с п. 3.1., формулы (3) и (4).

Указания.

1. Результаты вычисления свести в таблицу 4.1.
2. $U_{прі}$, $I_{прі}$ – пределы измерения ваттметра по U и I ;
3. $R_{рні}$ – расчётное значение нагрузки, соответствующее конечной точке ваттметра на данном пределе измерения: $R_{рні} = U_{прі}/I_{прі}$.

Таблица 4.1

	$U_{прі}$	$I_{прі}$	$R_{рні}$	R_V	R_A	δ_1	δ_2
Ед. изм.	В	А	Ом	Ом	Ом	%	%
1							
2							
3							
4							
5							
6							

4.4. Собрать схему эксперимента, приведенную на рис. 10, и вычислить необходимое значение ёмкости в соответствии с п.п. 3.2. (значение φ даёт преподаватель).

4.5. Произвести поверку киловаттметра kW для двух значений φ в соответствии с п. 3.2. Заполнить таблицу 4.2.

$$K_{то} = \quad ; K_{тт} = \quad ; K_{тт}/K_{то} = \quad ,$$

Таблица 4.2

Показания фазометра		$\varphi_1 =$; $\cos\varphi_1 =$			$\varphi_2 =$; $\cos\varphi_2 =$		
	Ед. изм.	R=			R= ; C=		
C_0	Вт/дел						
N_{W_0}	дел						
P_{W_0}	Вт						
P_{KW}	кВт						
$P_{цKW}$	Вт						
$\Delta P = P_{цKW} - P_{KW}$	Вт						
δ_{KW}	%						

4.6. Определить угловые погрешности киловаттметра kW, образцового ваттметра W_0 и малокосинусного ваттметра W_{MK} для двух значений φ . Заполнить таблицу 4.3.

Указание.

1. Для выполнения п. 4.6. собрать схему, приведённую на рис. 11.
2. Значение емкостей, необходимых для получения фазовых сдвигов, близких к 90° , приведены в таблице 4.3.
3. I_0, U_0 – показания образцовых амперметра и вольтметра.
4. Для выполнения п. 4.6. и обработки результатов см. п. 3.3.

Таблица 4.3

Показания фазометра		$C = 3,2\text{мкФ}; R=0$	$C=16\text{мкФ}; R=0$
		$\cos\varphi_2=$; $\varphi_2=$	$\cos\varphi_2=$; $\varphi_2=$
A_0 и V_0		$I_0 = 1\text{А}; U_0 =$	$I_0 =$; $U_0 =$
N_0	Ед. изм.		
	дел		
P_0	Вт		
$P_0 - P_d$	Вт		
P_{KW}	кВт		
$P_{цKW}$	Вт		
$P_{цKW} - P_d$	Вт		
$P_{МК}$	Вт		
$P_{МК} - P_d$	Вт		
$\delta_{\gamma 0}$	%		
$\delta_{\gamma 0 KW}$	%		
$\delta_{\gamma МК}$	%		

Сравнить угловые погрешности ваттметров между собой.

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, формулы методических погрешностей и схемы включения ваттметров; векторную диаграмму и формулу угловой погрешности; упрощенные схемы экспериментов; результаты по п.п. 4.2 - 4.7.

6. Контрольные вопросы

1. Каким образом выполняется безреактивные катушки сопротивления?
2. Каким образом уменьшается паразитная емкость образцовых катушек сопротивления?
3. Что такое методическая погрешность?
4. Чему равна методическая погрешность измерения мощности электродинамическими ваттметрами?
5. Почему маркируют зажимы ваттметров?
6. Зависит ли показание ваттметра от направления тока (напряжения)?
7. Зависят ли показания ваттметра от вида реактивной нагрузки (ёмкостной или индуктивной)?
8. Чем вызывается методическая погрешность ваттметра?

9. Чем вызывается угловая погрешность ваттметров?
10. Имеет ли место угловая погрешность на постоянном токе? Почему?
11. Напишите формулу угловой погрешности ваттметра?
12. Зависит ли величина угловой погрешности ваттметра от характера нагрузки (индуктивной, емкостной, величина аргумента)? Почему?
13. Может ли угловая погрешность стать равной 50? Когда?
14. Каким образом достигается равномерная шкала электродинамических ваттметров?
15. За счет чего достигается равномерная шкала ферродинамических ваттметров?
16. Можно ли применять электродинамические ваттметры в цепях постоянного и переменного тока? Почему?
17. Применяются ли ферродинамические ваттметры для измерений в цепях переменного тока, в цепях постоянного тока? Почему?
18. Как определить цену деления многопредельного ваттметра?
19. Как определяет результат измерения мощности многопредельными ваттметрами?
20. Изменяются ли показания ваттметра, если изменить полярность включения обмотки напряжения (тока)? Почему?
21. Изменяется ли показания ваттметра, если одновременно изменить полярность включения катушек напряжения и тока? Почему?
22. Как уменьшить методическую погрешность ваттметра?
23. Можно ли с целью уменьшения угловой погрешности ваттметров выполнить катушку напряжения безреактивной? Почему?
24. Достоинства градуировки ваттметров активной мощности на постоянном токе?
25. Для чего в работе служит трансформатор тока?
26. Вывести формулу, позволяющую находить мощность цепи нагрузки по показаниям киловаттметра $P_{кв}$.

7. Литература

1. Электрические измерения. Под ред. А. В.Фремке. – Л.: Энергия. 1973.
2. Основы электроизмерительной техники. Под ред. М.И.Левина, – М.: Энергия, 1972.
3. Электродинамические измерения. Под ред. Е.Г. Шрамкова, – М.: Высшая школа, 1972.
4. Электродинамические измерения под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина, 5е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1980.

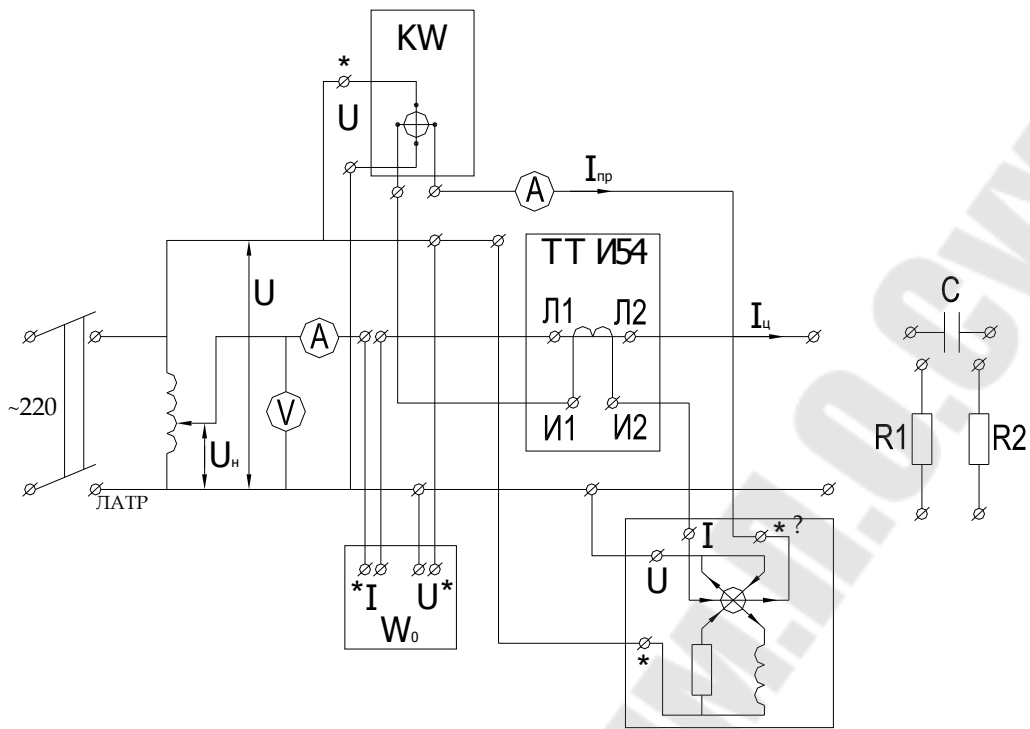


Рис.10. Схема поверки киловаттметра

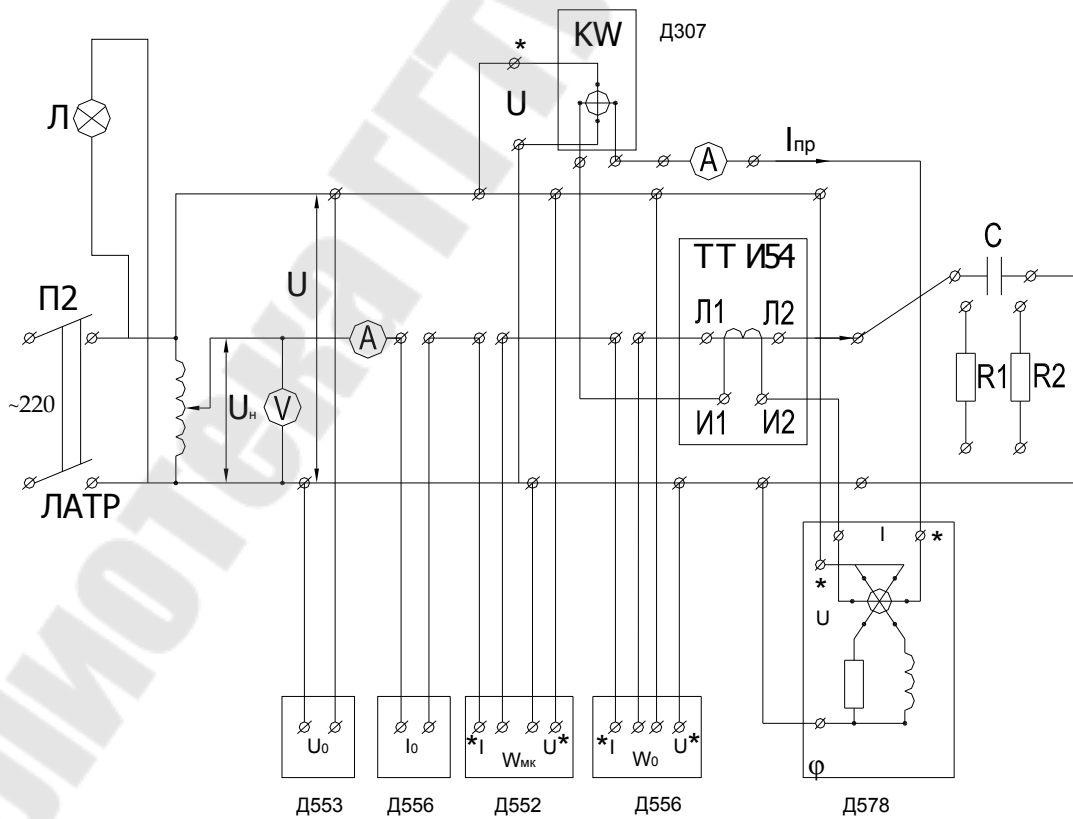


Рис.11. Схема определения угловых погрешностей

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОДНОФАЗНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ СЧЁТЧИК АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

1. Цель работы

Целью работы является ознакомление с конструкцией и теорией однофазных счетчиков, испытанием однофазных счетчиков.

2. Основные теоретические сведения

2.1. Конструкция и принцип работы счётчика

Для измерения энергии в однофазных цепях получили применение радиальные и тангенциальные индукционные счетчики, В последнее время большое распространение получили тангенциальные счётчики, в которых электромагнит напряжения расположен по касательной к диску. На рис. 1 схематично показано устройство однофазного индукционного тангенциального счетчика.

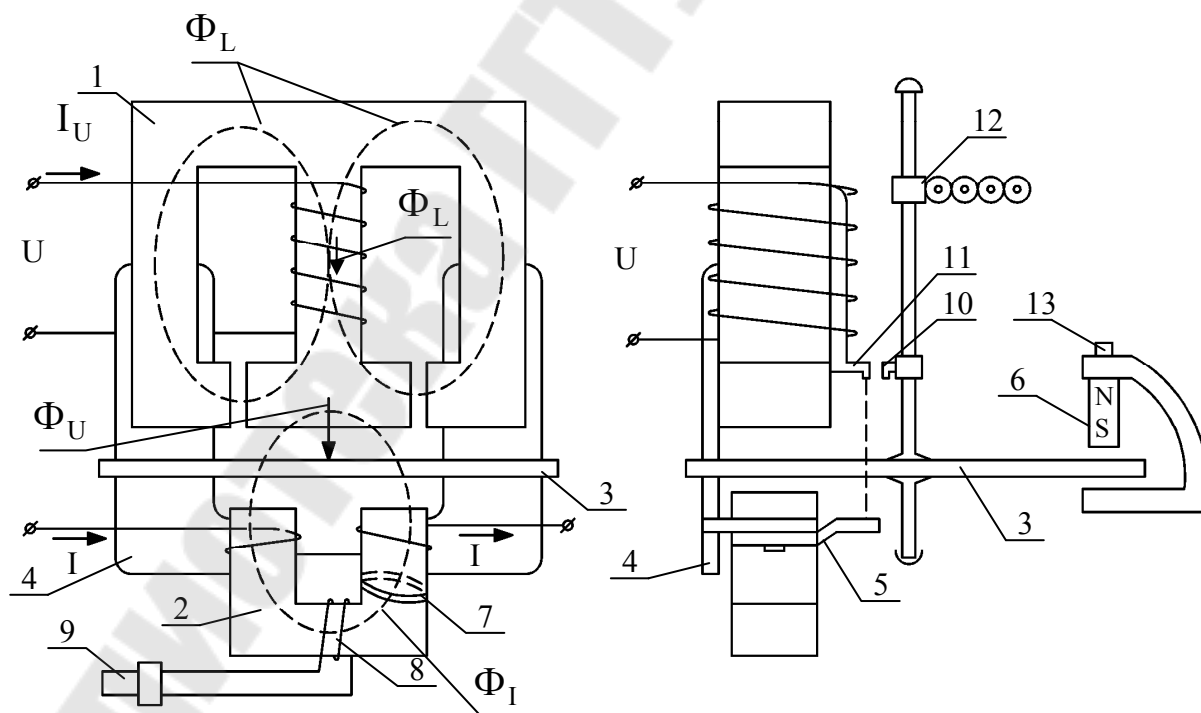


Рис.1. Устройство однофазного индукционного счётчика активной энергии

На рисунке 1: 1 - трехстержневой магнитопровод с обмоткой напряжения; 2 - магнитопровод с двумя последовательно соединенными токовыми обмотками; 3 - алюминиевый диск; 4 – противоположно; 5 - поводок для создания и регулировки компенсационного момента; 6 - постоянный магнит для создания тормозного момента; 7 - короткозамкнутые витки; 8 - обмотка с регулируемым сопротивлением; 9; 10 - крючок; 11 - пластинка с флажком из магнитомягкой стали; 12 - счетный механизм; 13 - винты основной регулировки.

На рис. 2 приведена часть векторной диаграммы счетчика, поясняющей принцип его работы.

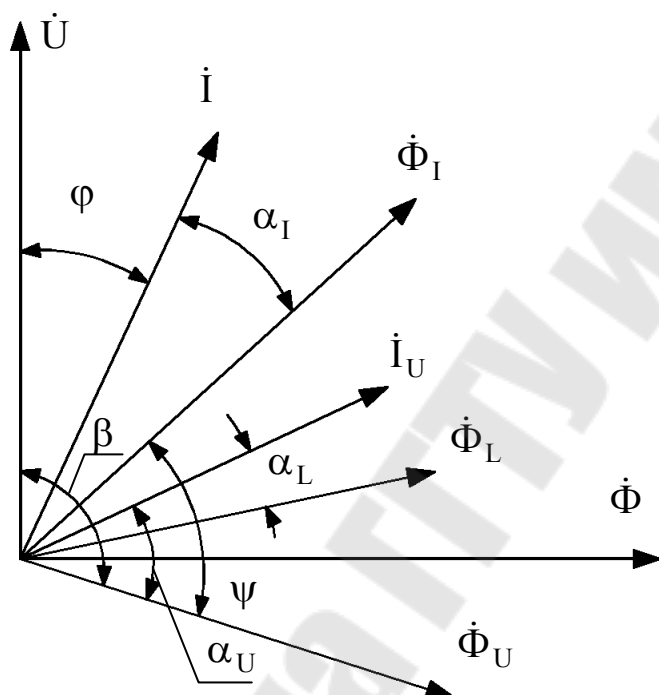


Рис. 2. Векторная диаграмма, поясняющая работу индукционного счетчика

Напряжение \dot{U} , приложенное к обмотке напряжения, находящейся на среднем стержне магнитопровода 1, создает в обмотке ток \dot{I}_U , отстающий от напряжения \dot{U} на угол близкий к 90° . Ток \dot{I}_U создает магнитный поток $\dot{\Phi}$, который делится на два потока $\dot{\Phi}_U$ и $\dot{\Phi}_L$. Рабочий поток $\dot{\Phi}_U$ пересекает диск и замыкается через противоположно. Нерабочий поток $\dot{\Phi}_L$, замыкается через боковые стержни магнитопровода 1. Потoki $\dot{\Phi}_U$ и $\dot{\Phi}_L$ отстают от тока \dot{I}_U на углы потерь α_U

и α_L , причем $\alpha_U > \alpha_L$, т.к. $\dot{\Phi}_U$ пересекает диск и проходит через противоположные полюсы, в которых возникают дополнительные потери.

Ток \dot{I} создаёт в магнитопроводе 2 магнитный поток $\dot{\Phi}_I$, замыкающийся через нижнюю часть магнитопровода 1. При этом поток $\dot{\Phi}_I$ пересекает диск два раза. Поток отстаёт от тока \dot{I} на угол α_I , обусловленный потерями на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе и диске.

Таким образом, диск пересекают три несовпадающих в пространстве и сдвинутых по фазе потоков. Взаимодействие этих потоков с токами, индуцированными ими в диске приводят к возникновению вращающего момента:

$$M_{\text{вр}} = k \cdot f \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \psi,$$

где f - частота напряжения сети;

ψ - угол сдвига между потоками $\dot{\Phi}_U$ и $\dot{\Phi}_I$.

$$\Phi_I = k_1 \cdot I; \quad \Phi_U = k_2 \cdot I_U = k_2 \cdot \frac{U}{Z_U},$$

где Z_U - полное сопротивление обмотки цепи напряжения.

Ввиду малости r_U по сравнению с X_U можно считать, что

$$Z_U \cong X_U = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_U,$$

где L_U - индуктивность обмотки напряжения.

Тогда

$$\Phi_U = \frac{k_2 \cdot U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_U} = k_3 \cdot \frac{U}{f}.$$

Подставляя значения $\dot{\Phi}_U$ и $\dot{\Phi}_I$ в выражение для момента $M_{\text{вр}}$, получим:

$$M_{\text{вр}} = k_4 \cdot U \cdot I \cdot \sin \psi,$$

где $k_4 = k \cdot k_1 \cdot k_3$.

Для того, чтобы вращающий момент счетчика был пропорционален активной мощности, необходимо, чтобы

$$\sin \psi = \cos \varphi,$$

где φ - угол сдвига между напряжением U и током I . Из векторной диаграммы (рис. 2) видно, что угол ψ между потоками Φ_U и Φ_I равен: $\psi = \beta - \alpha_I - \varphi$.

Для выполнения условия $\sin \psi = \cos \varphi$ необходимо, чтобы $\beta - \alpha_I = 90^\circ$ или $\beta = 90^\circ + \alpha_I$.

$$\text{Тогда } M_{\text{вр}} = k_4 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = k_4 \cdot P.$$

Выполнение условия $\beta > 90^\circ$ обеспечивается наличием большого нерабочего потока Φ_L ($\Phi_U > \Phi_L$). Выполнение равенства $\beta - \alpha_1 = 90^\circ$ осуществляется изменением угла потерь α_1 с помощью короткозамкнутых витков 7 (грубая регулировка) и обмотки 8 с регулируемым сопротивлением 9 (плавная регулировка).

Изменение сопротивления 9 производится с помощью передвижного контакта.

Для создания тормозного момента и обеспечения равномерной скорости вращения диска при каждой данной нагрузке служит постоянный магнит 6. При пересечении диском потока постоянного магнита Φ_M в нём возникают токи (I_M), пропорциональные потоку Φ_M и угловой скорости вращения диска:

$$I_M = c_1 \cdot \Phi_M \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

От взаимодействия токов I_M с потоком Φ_M возникает тормозной момент M_T :

$$M_T = c_2 \cdot \Phi_M \cdot I_M = c_1 \cdot c_2 \cdot \Phi_M^2 \cdot \frac{d\alpha}{dt} = c_3 \cdot \frac{d\alpha}{dt},$$

где $c_3 = c_1 \cdot c_2 \cdot \Phi_M^2$.

Если пренебречь трением и другими дополнительными моментами, то равномерная скорость вращения диска будет при $M_{BP} = M_T$. Тогда:

$$k_4 \cdot P = c_3 \cdot \frac{d\alpha}{dt} \text{ или } c_3 \cdot d\alpha = k_4 \cdot P \cdot dt$$

Интегрируя за промежуток времени от t_1 до t_2 , имеем:

$$\int_{t_1}^{t_2} d\alpha = \frac{k_4}{c_3} \cdot \int_{t_1}^{t_2} P dt,$$

$$\int_{t_1}^{t_2} P dt = W - \text{энергия, прошедшая через счётчик за время от } t_1 \text{ до } t_2;$$

$$\int_{t_1}^{t_2} d\alpha = 2 \cdot \pi \cdot N,$$

N – число оборотов диска за время от t_1 до t_2 .

$$\text{Тогда } 2 \cdot \pi \cdot N = \frac{k_4}{c_3} \cdot W, \text{ откуда } W = \frac{2 \cdot \pi \cdot c_3}{k_4} = c \cdot N,$$

т.е. энергия, прошедшая через счетчик, пропорциональна числу оборотов диска. Для учёта числа оборотов диска. Для учёта числа оборотов диска служит счётный механизм 12.

Передаточное число счётчика N_0 определяет соотношение между единицей энергии, регистрируемой счётчиком, и числом оборотов диска. Передаточное число счётчика N_0 указывается на его щитке: «1кВт·час = N_0 оборотов диска».

Величина, обратная передаточному числу счетчика, т.е., энергия, регистрируемая счетчиком за 1 оборот, называется номинальной постоянной счетчика C_H :

$$C_H = \frac{3600 \cdot 1000}{N_0} \text{ [Вт·с/оборот]},$$

тогда $W = C_H \cdot N$

2.2. Компенсационный момент

Существенное влияние, особенно при малых нагрузках, на правильность показаний счетчика оказывает момент трения в счетном механизме и подпятниках. Для уменьшения этого влияния в счетчиках создают при помощи специальных приспособлений, имеющих, в зависимости от типа счетчика, различное устройство, дополнительный, так называемый компенсационный вращающий момент, компенсирующий момент трения.

Наибольшее распространение получили три способа создания компенсационного момента:

а) с помощью винта из магнитомягкого материала, ввернутого в противоположный под диском счетчика;

б) с помощью короткозамкнутого витка, помещенного на пути потока $\dot{\Phi}_U$ над диском счетчика;

в) с помощью поводка.

Независимо от способа, компенсационный момент создается в результате взаимодействия двух или нескольких потоков, создаваемых обмоткой напряжения и сдвинутых друг относительно друга в пространстве и по фазе, с токами, наводимыми ими в диске счетчика.

При наличии поводка 5 компенсационный момент создается с помощью потока $\dot{\Phi}_U$ и потока $\dot{\Phi}_S$ (рис. 1а), замыкающегося через пластинку с флажком 11 и противопололюс 4. Если поводок расположен по радиусу диска 3, то сила, возникающая в результате взаимодействия потоков $\dot{\Phi}_U$ и $\dot{\Phi}_S$ с токами, наведенными ими в диске, действует также в направлении радиуса, и дополнительный вращающий момент отсутствует. При смещении поводка возникающая сила создаст дополнительный вращающий момент, компенсирующий момент трения.

Так как момент трения является величиной переменной, а компенсационный момент при $U = \text{const}$ - величиной постоянной, то при регулировке счетчика величину компенсационного момента стараются делать равной моменту трения при токе I , примерно равном 10% от тока $I_{\text{ном}}$. По ГОСТ 6570-60 погрешность при нагрузке 10% не должна превышать: $\pm 1\%$ - для счетчиков класса точности 1 и $\pm 2\%$ для счётчиков класса 2 (см. таблицу 2.1.).

Таблица 2.1.

	Нагрузка в процентах от номинальной	Допустимая погрешность в % для прибора класса точности		
		1	2	3
1	5	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	-
	10	$\pm 1,0$	± 2	$\pm 3,5$
	10-150	$\pm 1,0$	-	-
	10-200	-	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$
0,5	10	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	-
	20-150	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$

2.3. Самоход

Если в силу ряда причин компенсационный момент окажется больше момента трения покоя, то диск счетчика при $I=0$ может безостановочно вращаться под действием одного лишь компенсационного момента. Это явление называется «самоходом». Для устранения самохода на оси счетчика укрепляют крючок 10 из ферромагнитного

материала. Флажок 11 намагничивается потоком $\dot{\Phi}_S$ и, притягивая крючок 10, устраняет самоход. Сила взаимодействия между крючком и флажком должна быть отрегулирована так, чтобы счетчик обладал определенной чувствительностью.

2.4. Порог чувствительности

Под порогом чувствительности счётчика понимают минимальный ток, выраженный в процентах от номинального, при котором диск при номинальном напряжении начинает безостановочно вращаться:

$$S_{\text{сч}} = \frac{I_{\text{мин}}}{I_{\text{макс}}} \cdot 100\%.$$

При этом частота должна быть равна номинальной, а $\cos\varphi = 1$. Порог чувствительности не должен превышать 0,5% для счётчиков класса 1 и 2 и 1% для других классов.

2.5. Погрешность счетчиков

На работу счетчика влияют многочисленные факторы, зависящие от устройства счетчика, конструкции и качества изготовления деталей, от материалов, из которых изготовлены его детали. Эти факторы определяют погрешности счетчиков.

В отличие от показывающих приборов со шкалой, класс точности счетчиков определяют не по приведенной, а по относительной погрешности

$$\delta = \frac{W_{\text{сч}} - W_{\text{д}}}{W_{\text{д}}} \cdot 100\%,$$

где $W_{\text{сч}}$ – значение энергии, определённое за данный промежуток времени по показаниям счётчика;

$W_{\text{д}}$ – действительное значение электрической энергии, определённое за этот же промежуток времени по показаниям образцовых приборов.

2.6. Регулировки счетчика

Основной регулировкой счетчика является установка такого тормозного момента, при которой передаточное число счетчика равно значению, указанному на его шкале. Основная регулировка осуществляется с помощью винтов 13 (рис. 1) путем перемещения тормозного постоянного магнита.

Дополнительной регулировкой счетчика является установка компенсационного момента. В данном счетчике компенсационный момент регулируется перемещением поводка 5 (рис.1) согласно методике, описанной в п.п. 2.2.

К регулировкам счетчика относится также установка такого угла α_1 , при котором счетчик реагирует только на активную мощность. Эта регулировка производится нулевым методом: по токовой обмотке пропускается только реактивный ток, сдвинутый относительно U на 90° . Угол потерь α_1 регулируется дискретно с помощью короткозамкнутых витков 7 (они разрезаются) и плавно с помощью сопротивления 9 (рис. 1) до прекращения вращения диска.

2.7. Поверка счетчиков

Правильность показаний счетчика определяется в соответствии с инструкцией 195-60. Согласно инструкции правильность показаний счетчика должна производиться не менее чем при двух нагрузках в пределах от 10% до 100% номинальной нагрузки счетчика, отличающихся между собой значением $\cos\varphi$ не менее чем на 0,2. Образцовые ваттметры должны быть класса не менее 0,5, а измерительные трансформаторы, применяемые для расширения их пределов измерения, - класса 0,2.

Установив заданную нагрузку, отсчитывают по секундомеру время t , в течение которого диск счетчика сделает целое число оборотов N , и записывают показания ваттметра. Число оборотов N выбирают таким, чтобы им соответствовало время 50-60 с. Измерение времени при одной и той же нагрузке и одном и том же числе оборотов N производят 3 раза. За действительное значение времени берут t_{cp} - среднее арифметическое из всех полученных значений. Погрешность вычисляют по формуле:

$$\delta = \frac{W_{\text{сч}} - W_{\text{д}}}{W_{\text{д}}} \cdot 100\%,$$

где $W_{\text{сч}} = C_{\text{н}} N$,

$$W_{\text{д}} = P t_{\text{ср}},$$

P - значение активной мощности, определенное по показанию образцового ваттметра;

$C_{\text{н}}$ - номинальная постоянная счетчика, определяемая по передаточному числу счетчика (см. п.2.1.).

Счетчики или комплекты из счетчиков и измерительных трансформаторов, проверяемые в порядке экспертизы или ревизии в соответствии с инструкцией 195-50, могут быть оставлены в эксплуатации до очередной государственной проверки, если погрешность в учете энергии не превышает 4%. При большей погрешности пользоваться счетчиками не разрешается и клеймо государственной проверки на счетчиках погашается.

3. Схема и методика проведения эксперимента

Схема проведения эксперимента, изображенная с учетом обозначений, приборов и клемм, расположенных на лабораторном стенде, приведена на рис. 3.

Сплошными линиями обведены приборы, укрепленные на стенде (СО-2 - проверяемый счетчик активной энергии, ТТ - трансформатор тока), а пунктирными - лабораторные приборы, располагающиеся на столе: амперметр A_0 , образцовый ваттметр W_0 и фазометр φ , R_1 , R_2 - сопротивления, используемые в качестве активной нагрузки; C - магазин емкостей, с помощью которого устанавливается необходимое значение емкости. Как видно из рис. 3, токовая обмотка счетчика включается в цепь нагрузки через трансформатор тока ТТ типа И-54, номинальный вторичный ток которого равен 5А, а первичный может дискретно изменяться от 0,5А до 50А. Такое включение позволяет - с одной стороны - осуществлять поверку счетчика при малой потребляемой от сети мощности, а с другой - задавать в токовую обмотку счетчика номинальный ток $I_{\text{ном}}$, равный 5А,

3.1. Определение порога чувствительности

Порог чувствительности определяется при чисто активной нагрузке путем постепенного увеличения тока через счетчик от нуля до значения $I_{\text{МИН}}$, при котором диск начинает безостановочно вращаться:

$$S_{\text{СЧ}} = \frac{I_{\text{МИН}}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%.$$

3.2. Поверка счетчика

Поверку счетчика следует производить согласно п. 2.7. данного описания. Погрешность счетчика $\delta_{\text{СЧ}}$ определяется по формуле:

$$\delta_{\text{СЧ}} = \frac{W_{\text{СЧ}} - W_{\text{Д}}}{W_{\text{Д}}},$$

где $W_{\text{СЧ}} = C_{\text{Н}} N$,

$W_{\text{Д}}$ – действительное значение активной энергии, определяемое по показаниям P_{W_0} образцового ваттметра W_0 .

Как видно из рис. 3, токовая обмотка счетчика запитывается через трансформатор тока с коэффициентом трансформации

$$K_{\text{ТТ}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}},$$

где $I_{1\text{НОМ}}$, $I_{2\text{НОМ}}$ – номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора тока.

Поэтому действительное значение мощности $P_{\text{Д}}$, проходящей через счетчик будет:

$$P_{\text{Д}} = U \cdot I_2 = U \cdot \frac{I_1}{k_{\text{ТТ}}} = P_{W_0} \cdot \frac{1}{k_{\text{ТТ}}},$$

где $P_{W_0} = U I_1$ – показания образцового ваттметра W_0 (см. рис. 3.).

Действительное значение энергии будет

$$W_{\text{Д}} = P_{\text{Д}} t_{\text{СР}},$$

где $t_{\text{СР}}$ – время N оборотов диска (см. п. 2.7.).

Необходимое значение тока I_1 (I_2) устанавливается путём регулировки ЛАТРома напряжения $U_{\text{Н}}$ (рис.3).

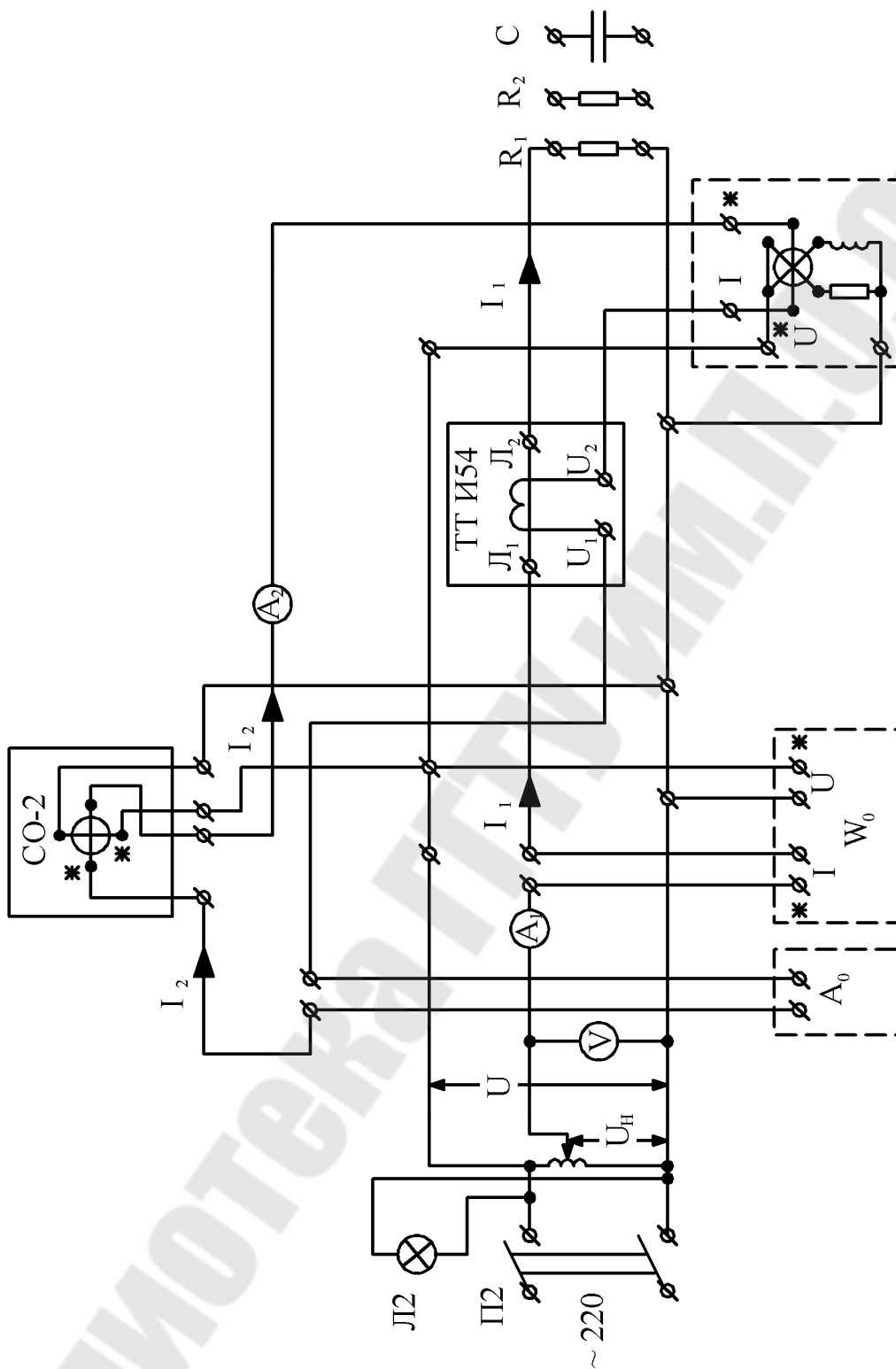


Рис.3. Схема определения порога чувствительности счётчика

3.3. Определение необходимой емкости для выставления заданного значения $\cos \varphi$

Для установки заданного (преподавателем) значения коэффициента мощности нагрузки необходимо вначале определить соответствующий ему аргумент комплексного сопротивления φ_2 , а по нему найти емкостное сопротивление X_{C3} и емкость C_3 . Для последовательного соединения R и C: $X_{C3} = R \operatorname{tg} \varphi_2$.

После определения C_3 ($f = 50$ Гц), с помощью магазина емкостей выставляется значение емкости C_3 , ближайшее к заданному C_3 .

3.4. Приборы, необходимые для выполнения работы:

1. Амперметр Д 553; 0,1 А.
2. Ваттметр Д 566; кл. 0,2; 300 В, 1 А.
3. Фазометр Д 578; кл. 0,5; 220 В, 5А

4. Задание

4.1. Ознакомиться с конструкцией счётчика, установленного на стенде. Записать его характеристики: I_n , U_n , N_0 , S_n , тип.

4.2. Собрать схему для определения порога чувствительности, приведенную на рис. 3.

4.3. Убедиться в отсутствии самохода.

Указания: Для этого в собранной схеме при нулевом напряжении на выходе ЛАТРа разорвать вторичную цепь трансформатора тока (на амперметре A_0) и убедиться, что диск медленно поворачивается, если крючок 10 не находится напротив флажка пластины 11 (см. рис. 1). Когда крючок 10 окажется против пластины 11, диск остановится.

4.4. Определить порог чувствительности счетчика $S_{Cч}$. Указания:

1. См. п. 3.1.
2. $I_{мин}$ определяется по амперметру A_0 на пределе 100 мА.
3. Ток регулируется с помощью изменения напряжения на выходе ЛАТРа.

4. Ток начинать увеличивать после полной остановки диска - см. указания п. 4.3.

4.5. Собрать электрическую цепь для поверки счетчика.

Указание: Для этого в собранной схеме переключить A_0 на предел 5 А.

4.6. Произвести поверку счетчика.

Указания:

1. Погрешности определять для двух значений тока (порядка $0,8I_{ном}$ - $I_{ном}$), отличающихся $\cos\varphi$.
2. Значения $\cos\varphi$ задает преподаватель.
3. Емкость для обеспечения заданного $\cos\varphi$ определить в соответствии с п. 3.3.
4. Результаты выполнения п. 4.6 свести в таблицу 4.1.
5. $t_{cp} = (t_1 + t_2 + t_3)/3$ - среднее время по результатам трех измерений, проведенных при неизменной нагрузке.
6. При выполнении п. 4.6. руководствоваться п.п. 3.2. и 2.7. данных указаний.
- 4.7. Сделать вывод о классе точности счетчика (см. таблицу 2.1).

Таблица 4.1.

$C_{W0} =$ $K_{TT} =$ $N_0 =$ $C_H =$

I =		$\cos\varphi =$		$\varphi =$		C =	
P_{W0}	P_D	t	W_D	N	$W_{Сч}$	$W_{Сч} - W_D$	$\delta_{Сч}$
Вт	Вт	с		оборот			
			t1 =				
			t2 =				
			t3 =				
			tcp =				
			t1 =				
			t2 =				
			t3 =				
			tcp =				

C_{W0} – постоянная ваттметра W_0 .

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, векторную диаграмму счетчика, упрощенную схему поверки счетчика, результаты эксперимента по пунктам 4.1, 4.3 – 4.7 и вычислений емкости C.

6. Контрольные вопросы

1. Как создаётся тормозной и компенсационный моменты?
2. В чем заключается самоход счетчика и что предпринимают для его устранения?

3. Что такое порог чувствительности счетчика?
4. Какой порог чувствительности соответствует счетчикам I и 2 классов точности?
5. Как влияет изменение частоты сети на показания счетчика?
6. Как осуществляется поверка счетчика?
7. Как определить передаточное число счетчика?
8. Как определить номинальную постоянную счетчика и какова ее размерность?
9. Для чего служат короткозамкнутые витки на магнитопроводе токового электромагнита?
10. Для какой цели вводится обмотка с шунтирующим сопротивлением на магнитопроводе токового электромагнита?
11. Для чего служит противопололюс?
12. Назначение потоков Φ_U и Φ_L ?
13. Причины возникновения углов α_I , α_U , α_L ?
14. В чем заключается основная и дополнительные регулировки?
15. Как определить в лабораторной работе емкость, необходимую для обеспечения заданного значения коэффициента мощности?
16. С какой целью в схеме эксперимента применяется трансформатор тока?
17. Как регулируется в лабораторной работе энергия, проходящая через счетчик?
18. Для чего служит в лабораторной работе ЛАТР?
19. При каких нагрузках должна производиться поверка счетчиков?
20. Как устанавливается угол α , при котором счетчик реагирует только на активную мощность и не реагирует на реактивную?

7. Литература

1. Электрические измерения. Под ред. А. В. Френке. – Л.: Энергия. 1973, с. 84 – 86, 148 – 154.
2. Основы электроизмерительной техники. Под ред. М. И. Левина, – М.: Энергия, 1972, с. 84 – 86, 148 – 154.
3. Электрические измерения. Под ред. Е. Г. Шрамкова, – М.: Высшая школа, 1972, с. 297 – 301.
4. Электрические измерения. Под ред. А. В. Френке и Е. М. Душина, 5е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия: 1980, с. 75 – 77, 121 – 127.

Содержание

	<u>стр.</u>
Лабораторная работа № 1. Исследование общих свойств электроизмерительных приборов.....	3
Лабораторная работа № 2. Электроннолучевые осциллографы и их применение в измерительной технике	21
Лабораторная работа № 3. Измерение сопротивлений на постоянном токе.....	41
Лабораторная работа № 4. Измерение комплексных сопротивлений фазометрическим и ваттметровым методами...	57
Лабораторная работа № 5. Измерение мощности и коэффициента мощности в однофазных цепях.....	72
Лабораторная работа № 6. Однофазный индукционный счетчик активной энергии.....	97

**Вяхирев Николай Иванович
Крышнев Юрий Викторович
Гизенко Вячеслав Валентинович**

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

**Лабораторный практикум
по одноименному курсу
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»
дневной и заочной форм обучения
В трех частях
Часть 1**

Подписано в печать **30.06.09**.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 6,28. Уч.-изд. л. 5,41.

Изд. № 7.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано на цифровом дуплекаторе
с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.