

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждения  
высшего образования  
«Северо-Кавказский федеральный университет»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по дисциплине  
«Метрология, стандартизация и сертификация»

Методические указания к выполнению лабораторных  
работ для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
Всех форм обучения

Невинномысск 2021 г.

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки выпускников направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника предназначены для студентов очной и заочной формы обучения и содержат основы теории, порядок выполнения лабораторных работ и обработки опытных данных, перечень контрольных вопросов для самостоятельной проверки.

Составители:

Д.В. Болдырев  
Ю. В. Карабак  
Г. В. Мирошников  
Б. А. Добнер

Рецензент:

Д.В. Болдырев

## Содержание

<b>Лабораторная работа №1</b> .....	4
<b>Лабораторная работа №2</b> .....	11
<b>Лабораторная работа №3</b> .....	15
<b>Лабораторная работа №4</b> .....	21
<b>Лабораторная работа №5</b> .....	28
<b>Лабораторная работа №6</b> .....	34
<b>Лабораторная работа №7</b> .....	38

## Лабораторная работа № 1

Определение метрологических характеристик амперметра и вольтметра на постоянном токе

**Цель работы:** Освоить методику поверки средств измерений амперметра и вольтметра на постоянном токе. Приобрести навыки расчета допустимой относительной погрешности для поверяемых приборов и образцовых средств измерений. Определить входные сопротивления поверяемых приборов и оценить их влияние при измерениях.

### 1. Теоретические основы

Поверкой средств измерений называют совокупность действий, выполняемых для определения его метрологических характеристик.

Поверку средств измерений производят при нормальных условиях, оговоренных в технических условиях на поверяемый прибор класс точности образцовых средств измерений используемых при поверке должен быть в 3 – 5 раз выше точности поверяемых приборов.

Вычисления погрешности средств измерений производят пользуясь следующими формулами:

— —

где

$A$  – измерительное значение физической величины;

$A_0$  – действительное значение физической величины;

$A_N$  – предельное значение измерительной величины;

$\Delta$  – абсолютная погрешность;

$\delta$  – относительная погрешность;

$\gamma$  – приведенная относительная погрешность №.

В качестве действительного значения физической величины принимают показания образцового прибора.

Вариация показаний средств измерений (обычно определяется для стрелочных приборов). Рассчитывается по формуле:

—————

где

$A_H$  и  $A_B$  - показания прибора при подходе «снизу вверх» и «сверху вниз».

Для исключения погрешности от вариации показания складываются и делятся на 2.

В случае, когда погрешность измерений прибора не зависит от действительного значения измеряемой величины, такую погрешность называют аддитивной.

Если погрешность прибора зависит только от действительного значения измеряемой величины, то такую погрешность называют мультипликативной.

Обычно для стрелочных приборов указывают класс точности. Под классом точности подразумевается относительная погрешность прибора в конечной точке шкалы прибора.

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_N}$$

Так как никаких других указаний от зависимости погрешности прибора при измерении в других точках шкалы нет, то для определения относительной погрешности в других точках шкалы определяют по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0}$$

Так при классе прибора 1,5% на середине шкалы  $\delta = 3\%$ , а при измерении на точке 0,1 шкалы  $\delta = 15\%$ .

Следует учитывать, что погрешность измерений может существенно возрастать от внутренних сопротивлений приборов. Если внутреннее сопротивление вольтметра соизмеримо с выходным сопротивлением измеряемой схемы, то погрешность измерений может существенно превышать погрешности нормируемую для прибора. Для того, чтобы этого влияния не было, входное сопротивление вольтметра должно быть на 3,4 порядка выше выходного сопротивления схемы. Аналогично большое сопротивление амперметра, соизмеримо с выходным сопротивлением

измеряемой схемы приведет к изменению тока в измеряемой схеме и вызовет большую погрешность измерения.

## 2. Порядок выполнения работы

### 2.1. Собирают схему приведенную ниже на рис. 1

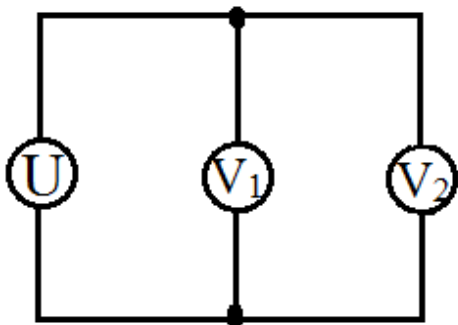


Рис. 1 Схема поверки вольтметра

U – регулируемый источник 0 – 15 В;

V<sub>1</sub> – поверяемый вольтметр;

V<sub>2</sub> – образцовый вольтметр Щ68003.

Поверку прибора проводят в точках 3, 6, 9, 12, 15 В.

В начале проводят измерения в точках при увеличении напряжения, затем в тех же точках при уменьшении напряжения. Показания в точке при подъеме напряжения и при уменьшении складывают и делят на 2. Затем определяют допустимую относительную погрешность в точках для поверяемого прибора, для образцового прибора.

Рассчитывают фактическую погрешность поверяемого прибора в точках и делают заключение о пригодности поверяемого прибора и о достаточном запасе точности образцового прибора, необходимом при поверке.

### 2.2 Прямая поверка амперметра

Собирают схему приведенную ниже на рис. 2

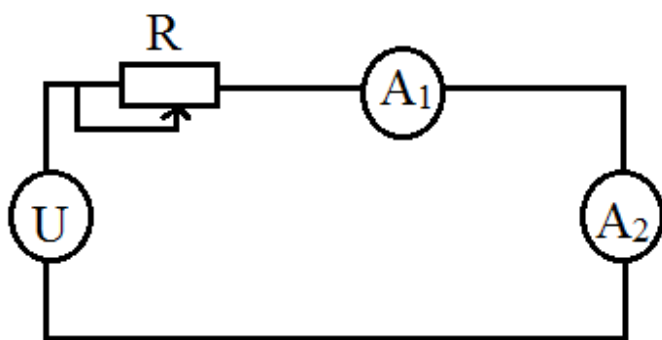


Рис. 2 Схема поверки амперметра

U – регулируемый источник 0 – 15 В;

R – реостат 0 – 50;

A<sub>1</sub> – поверяемый амперметр;

A<sub>2</sub> – образцовый прибор Щ68003.

Поверку прибора проводят в точках 30, 60, 90, 120, 150 мкА.

Перед поверкой устанавливают на источнике напряжение максимальное и минимальное сопротивление реостата. Затем включают источник и регулируют реостат так, чтобы обеспечивался ток намного больше крайней точки показания поверяемого прибора. Далее повторяют операции, которые выполнялись при поверке вольтметра.

### 2.3 Поверка амперметра косвенным методом

Собирают схему приведенную ниже на рис. 3

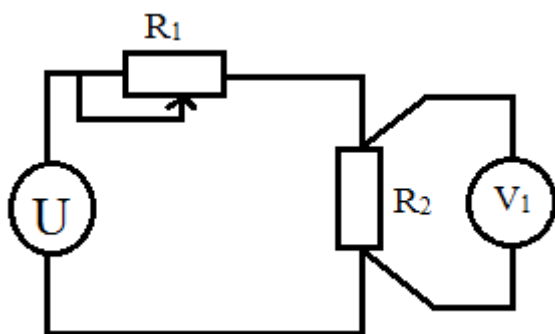


Рис. 3 Схема поверки амперметра косвенным методом

U – регулируемый источник напряжения;

R<sub>1</sub> – реостат 0 – 50;

$R_2$  – образцовая катушка 1

$A_1$  – поверяемый амперметр;

$V_1$  – образцовый вольтметр Щ68003.

Далее повторяют все операции аналогично предыдущим. Прибор Щ68003 устанавливают на предел 100мВ.

#### 2.4 Определение входного сопротивления вольтметра

Собирают схему приведенную ниже на рис. 4

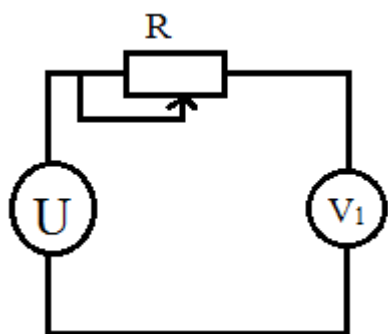


Рис. 4 Схема определения входного сопротивления вольтметра

U – регулируемый источник;

R – магазин сопротивлений;

$V_1$  – поверяемый прибор;

Р33.

При включении сопротивление магазина установить "0". Источником напряжения устанавливают показание прибора 15 В. Измеряя сопротивление магазина добавить показания вольтметра 7,5 В. Сопротивление входное вольтметра равно сопротивлению установленному на магазине.

#### 2.5 Определение входного сопротивления амперметра

Собирают схему приведенную ниже на рис. 5

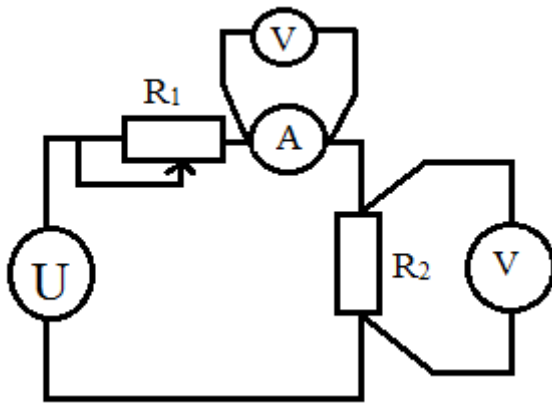


Рис. 5 Схема поверки амперметра косвенным методом

U – регулируемый источник;

R<sub>1</sub> – реостат;

R<sub>2</sub> – образцовая катушка 1

A – поверяемый амперметр;

V – вольтметр Щ68003.

С помощью реостата и регулируемого источника установите ток равный 150 мА (напряжение на катушке должно быть 150 мВ). Измерьте напряжение на зажимах амперметра. Определите входное сопротивление по формуле:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_A}{0,15 \text{ A}}$$

Результат измерений записать в табл. 1 и табл. 2.

Таблица поверки вольтметра

Поверяемая точка	Допустим. относит. погрешн. поверяем. прибора	Показ. прибора при подх. снизу	Показ. прибора при подх. сверху	Фактич. относит. погрешн. поверяем. прибора	Отношение допустим. относит. погрешн. повер. прибора к относит. погрешн. образцовог. прибора	Заклчение о пригодности прибора	Допустим. погрешн. образцового прибора
3 В							
6 В							
9 В							

12 В							
15 В							

Таблица поверки амперметра

Поверяемая точка	Допустим. относит. погрешн. поверяем. прибора	Показ. прибора при подх. снизу	Показ. прибора при подх. сверху	Фактич. относит. погрешн. поверяем. прибора	Отношение допустим. относит. погрешн. повер. прибора к относит. погрешн. образцовог. прибора	Заключение о пригодности прибора	Допустим. погрешн. образцового прибора
30 мА							
60 мА							
90 мА							
120 мА							
150 мА							

### 3. Определение результатов работы

По результатам работы составляют краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицы с результатами эксперимента.
3. Рассчитанные значения метрологических характеристик и оценку класса точности приборов, входные сопротивления поверяемых приборов.
4. Выводы, вытекающие из результатов работы.

### 4. Контрольные вопросы

1. Что такое "класс точности" средства измерения?
2. Что такое «поправка» к показаниям средств измерения", как она определяется?
3. Каким требованиям должны отвечать образцовые средства измерений?

## Лабораторная работа №2

Проверка цифрового вольтметра Щ68003 и моста постоянного тока МО – 62, Р333 с помощью образцовых мер сопротивления.

**Цель работы:** провести поверку мостов постоянного тока МО – 62, Р333, омметра Щ68003 с помощью образцовых катушек в диапазоне от 0,1 Ом до 1 МОм.

### 1. Теоретические основы.

Измерение сопротивлений может производиться мостовым методом, аналоговыми омметрами, методом замещения, цифровыми омметрами.

При измерении сопротивлений мостовым методом используется схема на рис. 1.

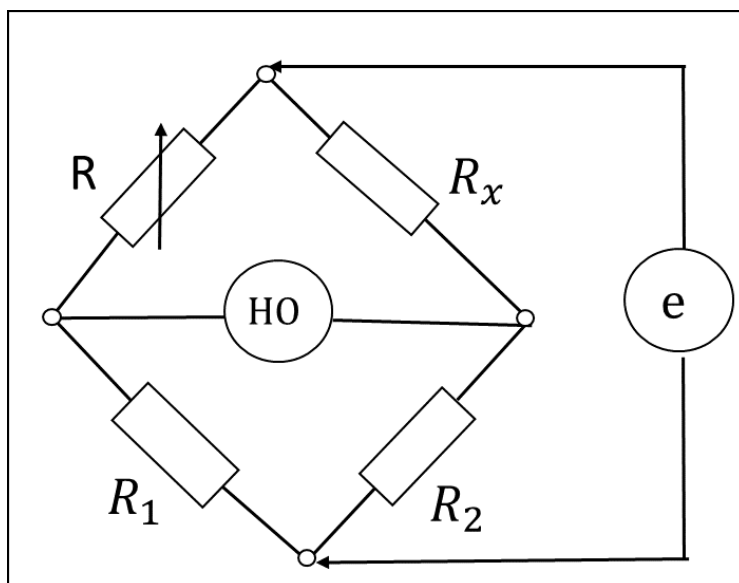


Рис. 1. Схема измерения сопротивлений мостовым методом  
 $R_1, R_2$  – резисторы равного сопротивления точно подогнанные;  
 $R$  – магазин сопротивлений;  
НО – нулевой орган (гальванометр);  
е – источник, питающий схему.

Измерение производится путем балансирования схемы, когда гальванометр имеет нулевое показание, тогда измеряемое сопротивление будет равно сопротивлению магазина. Благодаря тому, что обе цепи моста запитаны от одного источника, изменение его напряжения не влияет на баланс моста и не вносит погрешности в процесс измерения. Погрешность

такого метода измерения определяется погрешностью магазина сопротивлений и чувствительностью гальванометра.

При измерении сопротивлений цифровыми приборами используется преобразователь сопротивлений в напряжение, которое будет пропорционально измеряемому сопротивлению.

Схема преобразователя приведена на рис. 2.

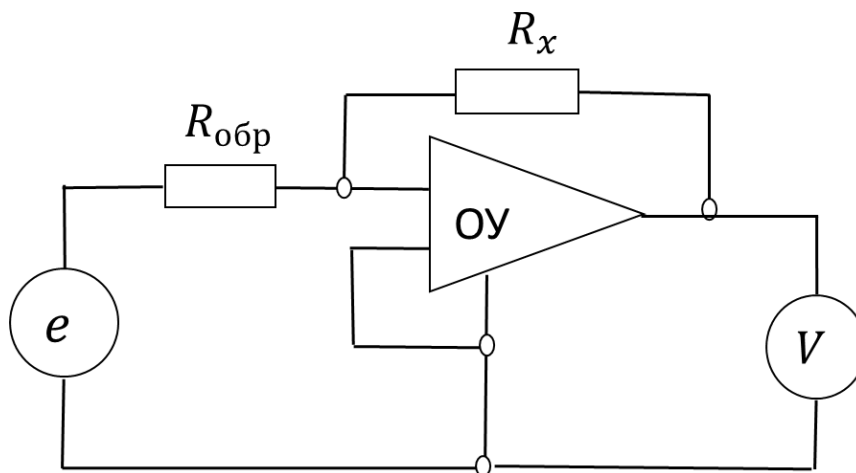


Рис. 2. Схема преобразователя сопротивления в напряжение

$e$  – образцовый источник напряжения;

$R_{обр}$  – образцовое сопротивление;

$R_x$  – измеряемое сопротивление;

$У$  – операционный усилитель;

$V$  – цифровой вольтметр.

Образцовый источник и образцовое сопротивление, а также цифровой вольтметр вносят погрешность при измерении сопротивлений. В настоящее время существуют стабилитроны, обеспечивающие временную стабильность температурный коэффициент на уровне 0,0005%, образцовые сопротивления так же мало зависят от времени и температуры, аналого – цифровые преобразователи имеют погрешность на уровне 0,001%. Этот метод позволяет существенно увеличить точность измерения сопротивлений.

Имеющиеся мосты позволяют производить измерение сопротивлений с точностью 0,1 – 0,5%. Прибор Щ68003 позволяет измерять сопротивления с точностью до 0,06%. Образцовые меры сопротивления имеют погрешность 0,01 – 0,005%. С их помощью можно поверять как мостовые схемы, так и прибор Щ68003.

## 2. Порядок выполнения работы.

Поверка мостов М062 и Р333 осуществляется в точках 0,0152; 0,152; 1,052; 1052; 10052; 100052; 1000052; 10000052; 100000052.

При измерении малых сопротивлений существенную погрешность могут вносить соединительные провода. Для устранения влияния соединительных проводников используется 4 – х проводная схема измерения. При измерении больших сопротивлений значительную погрешность можно получить за счет влияния электронных помех. Для устранения влияния электрических помех измеряемое сопротивление надо экранировать.

Поверка мостов постоянного тока МО – 62, Р333, омметра Щ68003 с помощью образцовых катушек (в диапазоне от 0,1 Ом до 1 МОм) проводится по поверяемым точкам указанным в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Поверяемая точка, Ом	Плечо отношения	Напряжение источника	Допустимая относительная погрешность моста	Фактическая относительная погрешность моста	Заключение поверки
0,1 1,0 10,0 100,0 1000,0 10000,0 100000,0 1000000,0					

Таблица 2

Предел измерения	Поверяемая точка	Напряжение источника	Допустимая относительная погрешность моста	Фактическая относительная погрешность моста	Заключение поверки
1КОм	10 Ом 100 Ом 1000 Ом				
10КОм	100 Ом 1000 Ом 10000 Ом				
100КОм	1000 Ом 10000 Ом 100000				

	Ом				
1МОм	10000 Ом 100000 Ом 1000000 Ом				
10МОм	100000 Ом 1000000 Ом 10000000 Ом				

### 3. Оформление результатов работы.

По результатам работы составляют краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицы с результатами экспериментальных данных.
3. Рассчитанные значения метрологических характеристик и оценку погрешностей.
4. Выводы, вытекающие из результатов работы.

### 4. Контрольные вопросы.

1. Какие факторы влияют на погрешность измерения мостовым методом?
2. Объясните принцип измерения сопротивления мостовым методом?
3. Объясните принцип измерения сопротивления путем преобразования сопротивления в напряжение?
4. Объясните полученные в табл. 1 значения относительной погрешности от величины сопротивления в поверяемой точке?
5. Объясните полученные в табл. 2 значения относительной погрешности от величины сопротивления в поверяемой точке?

## Лабораторная работа №3

### Измерение напряжения, тока и мощности на переменном токе

**Цель работы:** ознакомление с методами измерения, тока и мощности на переменном токе.

#### 1. Теоретические основы

Переменный ток характеризуется амплитудой, частотой, сдвигом фаз между напряжением и током (см. рис. 1)

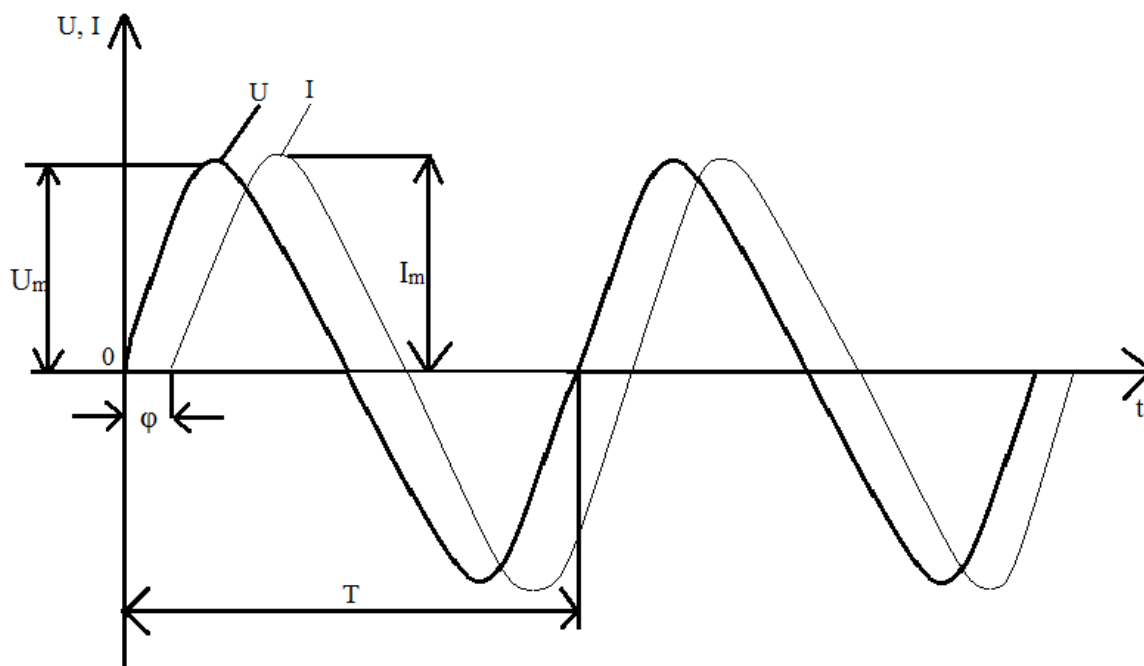


Рис. 1 Параметры, характеризующие переменное напряжение и ток

$U_m$  — амплитуда напряжения;

$I_m$  — амплитуда тока;

$T$  — период;

$\varphi$  — фазовый угол сдвига между напряжением и током.

Если нагрузка на источник сигнала активная, то напряжение и ток совпадают по фазе. Если нагрузка индуктивная, то ток отстает по фазе от напряжения.

Чисто индуктивная нагрузка увеличивает фазу запаздывания тока от напряжения на  $90^\circ$ . При емкостной нагрузке ток опережает напряжение и при чисто емкостной нагрузке сдвиг по фазе будет равен  $90^\circ$ .

Для переменного напряжения и тока различают амплитудное значение, средне выпрямленное значение и действующие значение.

Под амплитудным значением понимают максимальное отклонение параметра от нуля.

Средневыпрямленное значение параметра является постоянной составляющей, которая определяется по формуле:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt$$

Среднеквадратическое значение параметра за период определяется по формуле:

$$U_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

Это напряжение называют действующим значением. Действующее значение равно такому значению постоянного тока, который обеспечивает эквивалент нагрев нагрузки.

Амплитудное значение больше действующего в  $\sqrt{2}$  раз (1,41).

Средневыпрямленное значение больше действующего в 1,11 раза.

Наиболее часто для измерения переменного напряжения и тока используют стрелочные приборы магнито – электрической и электромагнитной систем.

Магнито – электрическая система измеряет только постоянный ток, поэтому при ее использовании необходимо преобразовать переменный ток в постоянный. Это выполняется с помощью полупроводниковых диодов. При этом прибор будет показывать средневыпрямленное значение и для того, чтобы измерить действующее значение, необходимо вводить поправочный коэффициент, или градуировать шкалу в действующих значениях. Электромагнитная система позволяет измерять как постоянный, так и переменный ток. На магнитной системе прибора размещают катушку. На оси стрелки располагается пермалловый лепесток, который втягивается магнитным полем, создаваемым протекающим по катушке током.

При измерении мощности переменного тока значение мощности определяется по формуле:

$$P = U_{\text{д}} I_{\text{д}} \cos\varphi$$

При активной нагрузке  $\cos\varphi = 1$ .

При полной реактивной нагрузке  $\cos\varphi = 0$  и мощность равна нулю, однако реактивные токи создают нагрузку на сеть. Для уменьшения реактивных токов используют компенсирующие конденсаторы.

## 2. Порядок выполнения работы

### 2.1 проверка вольтметра переменного тока

Собирают схему приведенную на рис. 2.

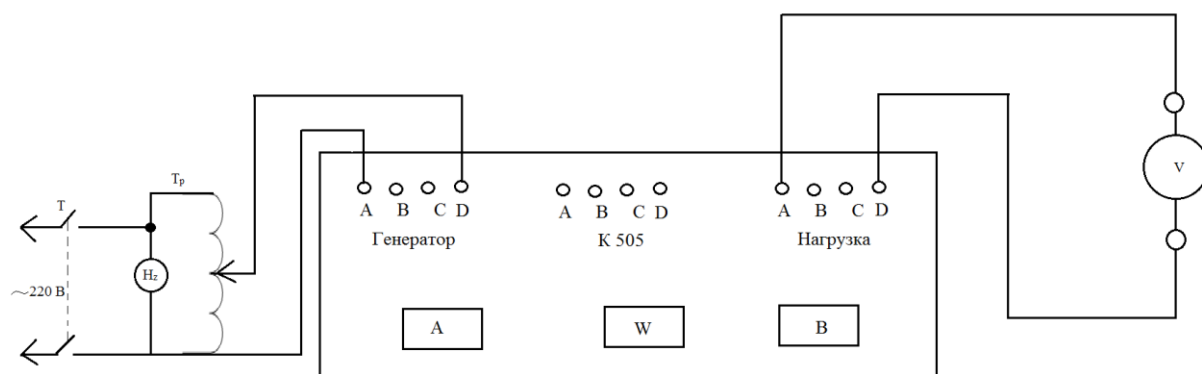


Рис. 2 схема поверки вольтметра переменного тока

T – тумблер;

$T_p$  – лабораторный автотрансформатор;

$H_z$  – частотомер;

V –веряемый вольтметр;

K 505 – поверочная установка.

Для поверки вольтметра используется поверочный комплекс K 505, который включает в себя образцовый вольтметр, амперметр и ваттметр, которые коммутируются в зависимости отверяемых приборов. Комплекс предусматривает работу как в однофазном режиме, так и в трехфазном.

Установка K 505 в данной работе используется в однофазном режиме. Переключатель «V» на вольтметре установить в положение той фазы, на которую подключенверяемый вольтметр.

Включить образцовый прибор на предел измерения, близкий к максимальному значениюверяемого прибора. Установить ручку трансформатора  $T_p$  в крайнее левое положение. Включить тумблер T. произвести поверкуверяемого вольтметра в оцифрованных точках. Напряжение устанавливать поворотом ручки трансформатора  $T_p$  по часовой стрелке.

Внести показанияверяемого вольтметра в табл. 1 и определить допустимую и фактическую погрешность в оцифрованных точках. Сделать заключение о пригодностиверяемого вольтметра к эксплуатации.

Таблица 1

Поверяемая точка	Показания образцового прибора	Показанияверяемого прибора	Допустимая относительная погрешность	Фактическая относительная погрешность	Заключение

## 2.2 Поверка амперметра переменного тока

Собрать схему, приведенную на рис. 3

Реостат установить на величину максимального значения сопротивления. Ручку автотрансформатора установить в крайнее левое положение. Переключатель диапазонов амперметра А установить на предел, соответствующий максимальному значению поверяемого прибора.

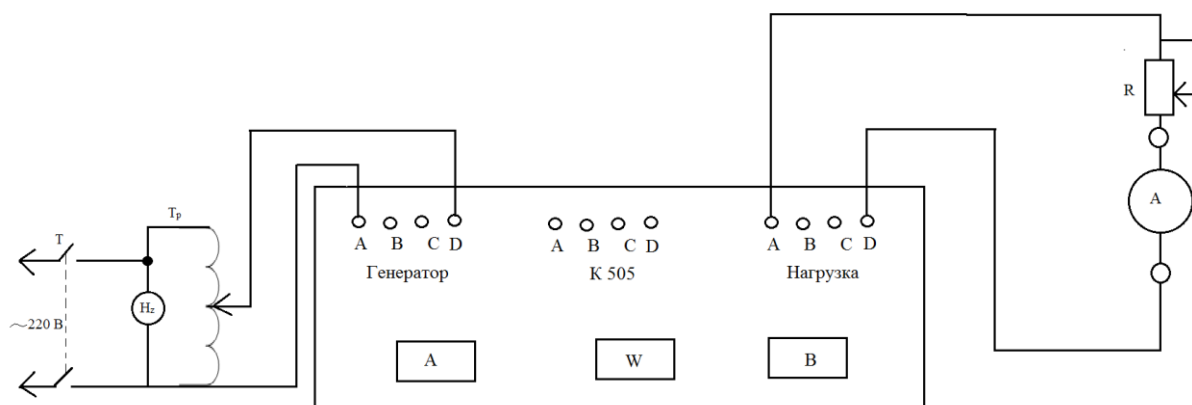


Рис. 3 схема поверки амперметра переменного тока

T – тумблер;

T<sub>p</sub> – лабораторный автотрансформатор;

H<sub>z</sub> – частотомер;

R – реостат;

A – поверяемый амперметр;

K 505 – поверочная установка.

Включить тумблер. Регулируя ручку трансформатора провести поверку амперметра в оцифрованных точках. В процессе выполнения работы следить за тем, чтобы не перегружались образцовые вольтметр и ваттметр.

Результаты измерений и показания поверяемого амперметра по точкам внести в табл. 2. Определить допустимую и фактическую относительные погрешности в поверяемых точках и дать заключение о пригодности поверяемого прибора к эксплуатации.

Таблица 2

Поверяемая точка	Показания образцового прибора	Показания поверяемого прибора	Допустимая относительная погрешность	Фактическая относительная погрешность	Заключение

## 2.3 Поверка ваттметра на переменном токе

Собрать схему, приведенную на рис. 4

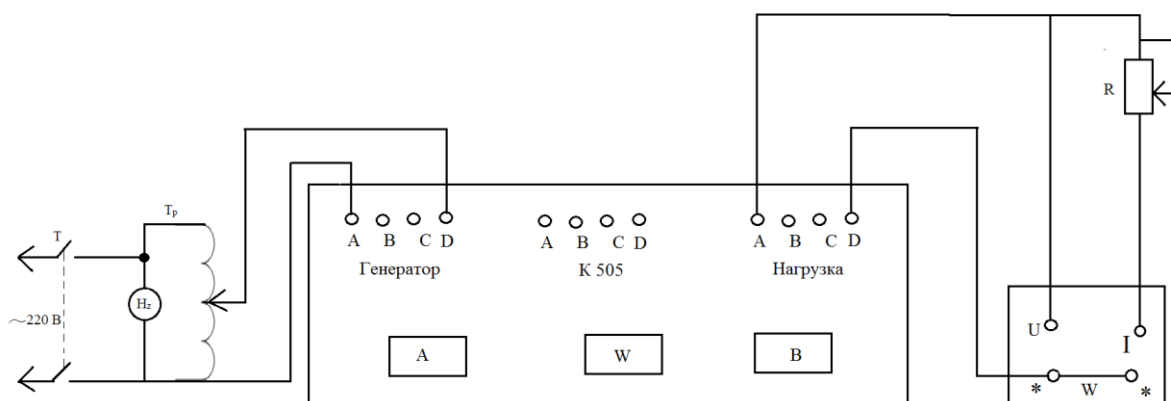


Рис. 4 схема поверки ваттметра

T – тумблер;

T<sub>p</sub> – лабораторный автотрансформатор;

H<sub>z</sub> – частотомер;

R – реостат;

W – поверяемый амперметр;

К 505 – поверочная установка.

Установить трансформатор в крайнее левое положение, а реостат установить на величину максимального значения сопротивления. Включить тумблер и плавно регулируя трансформатор произвести поверку ваттметра в оцифрованных точках. Результаты измерений и показания поверяемого ваттметра внести в табл. 3.

Таблица 3

Поверяемая точка	Показания образцового ваттметра	Показания поверяемого ваттметра	Допустимая относительная погрешность	Фактическая относительная погрешность	Заключение

### 3. Оформление результатов работы

По результатам работы составляют краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицы с результатами экспериментальных данных.

3. Рассчитанные значения метрологических характеристик и оценку погрешностей.

4. Выводы, вытекающие из результатов работы.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Перечислите и дайте пояснения параметра, характеризующим переменный ток?

2. Как измеряется мощность переменного тока в зависимости от характеристики нагрузки?

3. Какие факторы влияют на погрешность вольтметра переменного тока?

4. Какие факторы влияют на погрешность амперметра переменного тока?

5. Какие факторы влияют на погрешность измерения мощности на переменном токе?

## Лабораторная работа №4

Расширение пределов измерения измерительных приборов с помощью шунтов и добавочных сопротивлений.

**Цель работы:** Ознакомиться с конструктивными требованиями к шунтам и добавочным сопротивлениям.

Освоить методику подбора шунтов и добавочных сопротивлений, применяемых для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов.

### 1. Теоретические основы.

В электроизмерительных приборах могут использоваться элементы, расширяющие возможности пределов измерения входных измеряемых величин.

К таким элементам относятся шунты, добавочные сопротивления, переключатели. Шунт представляет собой сопротивление, параллельно которому подключается измерительный механизм прибора. Шунты используются для расширения пределов измерения по току. Измерительный механизм имеет номинальный ток отклонения и внутреннее сопротивление. При измерении тока большой величины необходимо подобрать шунт так, чтобы при измерении входного тока, ток через измерительный механизм прибора не превышал значение номинального тока.

Отношение измеряемого тока к току измерительного механизма называется коэффициентом шунтирования  $P_L$

$$P_L = \frac{I}{I_a},$$

где  $I$  – измеряемый ток;

$I_a$  – ток измерительного механизма.

Сопротивление шунта будет равно

$$R_{ш} = \frac{R_a}{P_L - 1}, \text{ Ом} \quad (1)$$

Шунты изготавливают внутренними или наружными. Внутренние шунты размещают внутри измерительного прибора и могут их делать на токи до десятков ампер. Наружные шунты размещаются вне прибора и их выполняют для измерения токов до 10 КА.

С увеличением величины измеряемого тока сопротивление шунтов уменьшается и становится соизмеримым с сопротивлением контактов. Поэтому на большие токи шунты выполняются 4 –х зажимными (токовые и потенциальные зажимы). Токовые зажимы включаются в измерительную цепь, а к потенциальным концам подсоединяется измерительный механизм.

Для того, чтобы шунт не вносил большой погрешности в процессе измерения, его сопротивление не должно зависеть от температуры и от времени. Поэтому шунты выполняются из сплавов, у которых температурная зависимость мала. Обычно, для изготовления шунтов используют манганин. При изготовлении шунт должен пройти «старение», что позволит уменьшить временную зависимость его сопротивления.

Шунты изготавливаются на следующие величины падений напряжения: 15, 75, 100, 150 мВ.

Шунты изготавливаются с точностью (Кл): 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0.

Шунты бывают однопредельными и многопредельными. По конструкторскому решению шунты бывают стержневые, проволочные, пластинчатые и печатные. Подгонку сопротивлений шунтов осуществляют подпиливанием. На печатных шунтах существуют закороченные секции, которые вводят перерезанием закорачивающих перемычек.

Главным условием правильности показаний амперметров с шунтами является постоянство отношений сопротивления рамки  $R_a$  и сопротивление шунта  $R_{ш}$ . Поскольку материалы шунта (манганин) и рамки (медь) обладают разными температурными коэффициентами электропроводности, изменение температуры может вызвать заметные погрешности при измерении тока. Для исключения влияния окружающей температуры на показания амперметра, включенного с шунтом, применяются специальные схемы температурной компенсации.

### **Добавочные сопротивления.**

Для расширения пределов измерения вольтметров применяют специальные сопротивления, называемые добавочными. Добавочные сопротивления  $r_d$  включают последовательно с измерительным механизмом и, как правило, помещают внутрь корпуса прибора. При измерении высоких напряжений или при использовании измерительных механизмов с большими номинальными токами, добавочные сопротивления делаются наружными так как

рассеиваемая мощность на добавочном сопротивлении будет нагревать измерительный механизм.

Калиброванные добавочные сопротивления выпускаются для токов 0,5; 1,0; 3; 5; 7,5; 15; 30; 60 мА и могут использоваться с любым измерительным механизмом у которого ток соответствует или меньше тока, выпускаемого добавочного сопротивления.

Добавочные сопротивления изготавливаются из материалов, сопротивление которых мало зависит от температуры.

Для приборов переменного тока намотка добавочных сопротивлений делается бифилярной для улучшения частотных свойств. Намотка может выполняться как на цилиндрических каркасах, так и на пластинчатых. Пластинчатые каркасы обладают большей теплоотдачей.

В качестве материалов, для каркасов, используются текстолит, гетинакс, фарфор и другие пластмассы.

Для того, чтобы рассчитать величину добавочного сопротивления для прибора на номинальное натяжение, необходимо знать:

- 1) Номинальный ток измерительного механизма;
  - 2) Сопротивление измерительного механизма;
  - 3) Напряжение, до которого расширяется предел измерения прибора.
- Исходя из того, что ток измерительного механизма должен быть такой же, как при расширенном пределе

$$I_v = \frac{U_v}{r_v} = \frac{U}{r_v + r_d} = \frac{mU_v}{r_v + r_d}, \text{ отсюда}$$

$$r_d = \frac{U}{I_v} - r_v = \frac{mU_v}{I_v} - r_v = mr_v - r_v = r_v(m - 1), \quad (2)$$

Где  $I_v$  – номинальный ток измерительного механизма;

$U_v$  – номинальное напряжение на измерительном механизме;

$r_v$  – сопротивление измерительного механизма;

$U$  – номинальное напряжение расширенного диапазона;

$m = \frac{U}{U_v}$  – множитель, показывающий во сколько раз номинальное напряжение расширенного диапазона больше номинального напряжения измерительного прибора.

## 2. Порядок выполнения работы.

Перед проведением работ ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, определить номинальные величины измеряемых сигналов и классы точности приборов.

### 2.1. Создание амперметра с пределом измерения 1А и классом точности 1,0.

Собрать схему приведенную на рис. 1.

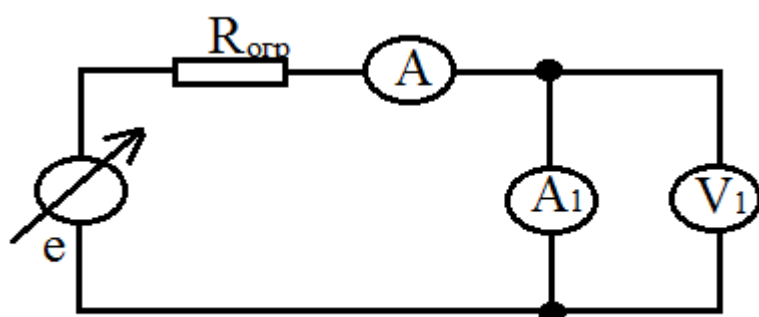


Рис. 1. Схема для измерения тока до 1А

$e$  – регулируемый источник напряжения 0 – 25В.

$A$  – образцовый амперметр;

$A_1$  – измерительный прибор (механизм);

$V_1$  – образцовый вольтметр с высоким входным сопротивлением;

$R_{орг}$  – ограничительный резистор (магазин R33).

Регулируя источник питания  $e$  и величину ограничительного резистора  $R_{орг}$  устанавливают стрелку измерительного механизма на крайнюю точку шкалы и фиксируют ток, протекающий через измерительный механизм  $I_v$  и напряжения на нем  $U_v$ . Определяют сопротивление измерительного механизма

$$r_v = \frac{U_v}{I_v}$$

По формуле (1) определяют сопротивление шунта.

Удельное сопротивление манганина

$$\rho = (0,42 \div 0,48) \times 10^{-4}, \text{ Ом*см}$$

Сопротивление проводника определяется по формуле

$$r = \frac{\rho \times l}{S}; \text{ допустимая плотность тока } 5\text{А на } 1\text{мм}^2.$$

После чего определяют конструкцию шунта.

С помощью моста постоянного тока МО – 61 подгоняют шунт. После подгонки шунта его устанавливают на выводы измерительного механизма. Затем амперметр А1 включают по схеме на рис. 1. и по показаниям образцового прибора А проводят окончательную подгонку прибора А1.

После окончательной подгонки амперметра А1 проводят его поверку в указанных поверяемых точках. По результатам поверки определяют фактическую погрешность в поверяемых точках. Сравнивают погрешность с допустимой, считая что изготовленный амперметр должен иметь класс точности 1,5.

Результаты полученные в результате измерений заносятся в табл.1.

Таблица 1

Поверяемая точка	Показания образцового прибора	Показания поверяемого прибора	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность	Допустимая относительная погрешность

## 2.2. Создание вольтметра на напряжение 20В с помощью добавочного сопротивления.

Собрать схему приведенную на рис. 2.

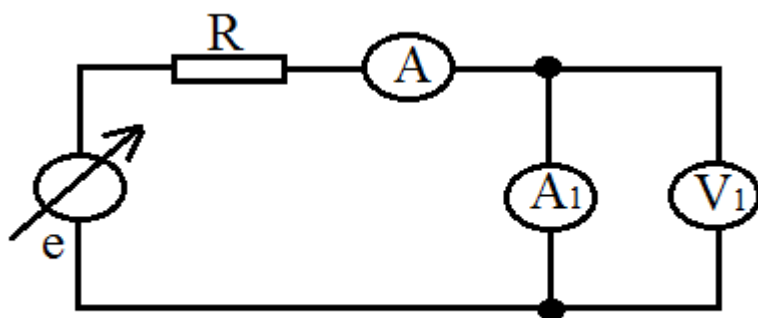


Рис. 2. Схема для поверки вольтметра

$e$  - регулируемый источник напряжения 0 – 25В.

$A$  – образцовый амперметр;

$A_1$  – измерительный механизм;

$V$  – вольтметр с высоким входным сопротивлением;

$R_{орг}$  – ограничительный резистор (магазин R33).

В собранной схеме определяют напряжение, ток полного отклонения и сопротивление измерительного механизма. По формуле (2) определяют сопротивление добавочного резистора. С помощью моста МОБ1 подбирают резистор близкий к расчетному значению резистора и устанавливают его последовательно с катушкой измерительного механизма. При окончательной подгонке в схеме 2 меняют номинал добавочного резистора либо шунтированием, либо включением последовательно дополнительных резисторов.

После точной подгонки резисторов проводят поверку вольтметра и определение его погрешности в точках шкалы, аналогично амперметру. Данные заносят в таблицу 2.

Таблица 2

Поверяемая точка	Показания образцового прибора	Показания поверяемого прибора	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность	Допустимая относительная погрешность

Допустимую относительную погрешность определяют из условия, что поверяемый прибор должен иметь класс точности 1,5. По результатам поверки сформулировать заключение о пригодности прибора к использованию.

### **3. Оформление результатов работы.**

По результатам работы составляют краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицы с результатами экспериментальных данных.
3. Рассчитанные значения метрологических характеристик и оценку погрешностей.
4. Выводы.

### **4. Контрольные вопросы.**

1. Какие элементы используются для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов?
2. Объясните принцип действия шунта и расчет величины его сопротивления?
3. С каким классом точности изготавливаются шунты?
4. Какую функцию выполняют добавочные сопротивления?
5. Для каких номинальных значений тока выбираются добавочные сопротивления?
6. Объясните методику подгонки шунта?
7. Объясните методику подгонки добавочного сопротивления?

## Лабораторная работа №5

### Поверка трехфазного индукционного счетчика

**Цель работы:** ознакомление со схемой и методами поверки трехфазного счетчика электрической энергии. Определение действительной постоянной и относительной погрешности счетчика при различных режимах нагрузки; определение «самохода» счетчика; определение чувствительности счетчика.

#### 1. Теоретические основы

Поверка счетчика имеет целью выяснить, удовлетворяет ли счетчик техническим требованиям, предъявленным к приборам учета электроэнергии по ГОСТ 6570 – 60.

Вращающий момент счетчика пропорционален мощности, определяемой током последовательных обмоток прибора, напряжением, приложенным к его параллельным цепям, и косинусом угла сдвига фаз между указанными величинами. Поэтому схема поверки должна обеспечивать возможность регулировки каждой из указанных величин.

В работе используется схема поверки приведенная на рис. 1.

В этой схеме регулировка тока осуществляется реостатом  $R_1$ , напряжения – реостатами  $R_2$ , угла сдвига фаз  $\varphi$  – фазорегулятором  $\Phi_p$ . Образцовыми приборами служат ваттметры  $W_1$  и  $W_2$ .

Как известно, полная мощность в сети:

$$P = P_1 + P_2$$

где

$$P_1 = U_L I_L \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P_2 = U_L I_L \cos(30^\circ - \varphi)$$

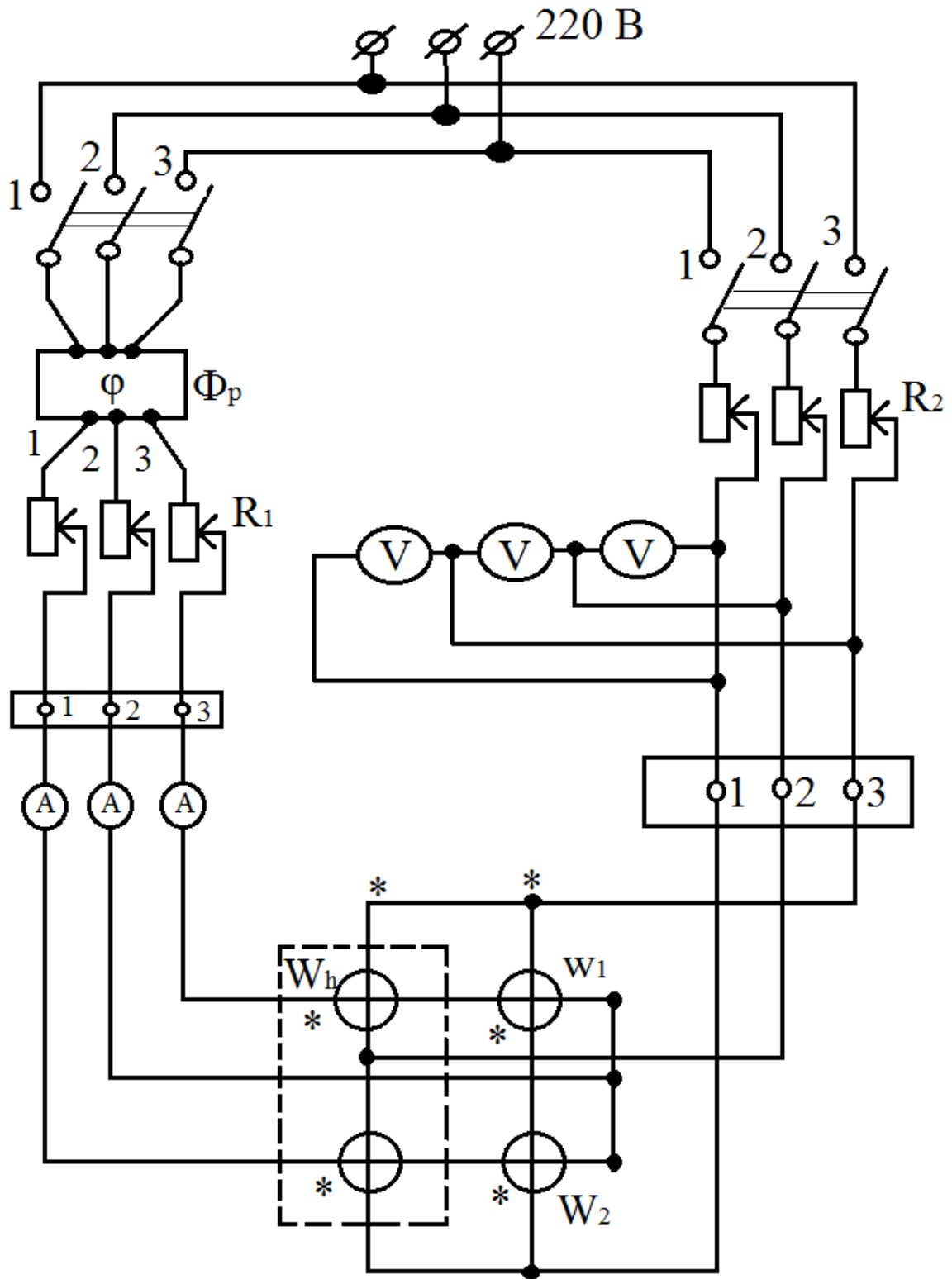


Рис. 1 схема поверки трехфазного индуктивного счетчика

$P_1$  и  $P_2$  – показания ваттметров  $W_1$  и  $W_2$ .

Поверяемый счетчик ( $W_n$ ) – двухэлементный, т. е. он имеет два диска, на каждый из которых действует свой вращающий момент. Поскольку оба

диска насажены на общую ось, то действие сил суммируют расходу энергии в трехфазной сети.

При создании схемы (рис. 1), необходимо соблюдать правила включения генераторных зажимов счетчика и ваттметров. Номинальные значения тока и напряжения для счетчика – 5 А и 220 В, для ваттметров – 5 А и 150 В. Пределы ваттметров по напряжению необходимо расширить, используя добавочные сопротивления (до 300 В).

После проверки схемы руководителем, прогреть счетчик в течении 10 – 15 мин при  $I_d = 5$  А,  $U_d = 220$  В и  $\cos\varphi = 1$ .

Подсчитать:

а) номинальную постоянную счетчика

$$C_n = \frac{W}{N} \left[ \frac{\text{Вт} * \text{с}}{\text{об}} \right]$$

Для расчета используются данные передаточного числа, обычно указываемые на щитке.

б) постоянную ваттметров

$$C_w = \frac{U_n I_n}{\alpha_m}$$

где

$U_n$  и  $I_n$  – номинальные значения напряжения и тока, на которые включен ваттметр;

$\alpha_m$  – число делений на шкале ваттметра.

Определение действительной постоянной и погрешности счетчика.

Действительная постоянная  $C_d$  определяется при различных режимах работы счетчика

$$C_d = \frac{(P_1 + P_2)t}{n} \left[ \frac{\text{Вт} * \text{с}}{\text{об}} \right]$$

где

$P_1$  и  $P_2$  – показания ваттметров  $W_1$  и  $W_2$ , Вт;

$t$  – время, за которое счетчик совершил поворотов, с.

Зная  $C_H$  и  $C_D$ , можно определить относительную погрешность счетчика  $\beta$ :

$$\beta = \frac{C_H - C_D}{C_D} * 100\%$$

Значения относительных погрешностей не должны превышать величин, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Нагрузка в % от номинальной	Допустимые погрешности, %			COS $\varphi$
	Класс 1	Класс 2	Класс 2,5	
5	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	-	1,0
10	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	
50	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
100	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
150	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
10	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	-	0,5
20	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$	
50	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	
100	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	

## 2. Порядок выполнения работы

При выполнении работы следует в начале рассчитать значения мощности, проходящей через ваттметры при различных режимах нагрузки. Расчетная величина мощности устанавливается на ваттметрах путем использования регулирующих приборов схемы –  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\Phi_p$ . После этого подсчитывается число оборотов счетчика за некоторое время  $t(50 - 70 \text{ с})$ .

Следует определить действительную постоянную и погрешности при следующих значениях нагрузки:

а) нагрузка 5, 10, 50 и 100 % от номинальной ( $I_H=5 \text{ А}$ ) при  $\cos\varphi = 1,0$  и  $U_L = 220 \text{ В}$ .

Расчетные значения мощности определяются по формулам для определения  $P_1$  и  $P_2$ .

б) нагрузка 10, 20, 50 и 100 % от номинальной при  $\cos\varphi = 0,5$  ( $\varphi = 60^\circ$ ). При этом, как видно из формул для  $P_1$  и  $P_2$  показания одного из ваттметров должны равняться нулю. Этого добиваются, используя фазорегулятор.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 2

I, А	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	n, об	t, с	P <sub>1</sub> + P <sub>2</sub> , Вт	$C_d = \left[ \frac{\text{Вт} * \text{с}}{\text{об}} \right]$	В, %
------	---------------------	---------------------	-------	------	--------------------------------------	---	------

а) нагрузка равномерная при  $\cos\varphi = 1,0$

б) нагрузка равномерная при  $\cos\varphi = 0,5$

построить кривые зависимости погрешности от нагрузки  $\beta = f(I)$ : а) при  $\cos\varphi = 1,0$ ; б) при  $\cos\varphi = 0,5$ .

Проверка «самохода» счетчика

Для этого надо отклонить ток нагрузки и реостатами R<sub>2</sub> повысить напряжение до равного 110 % от номинального. Если диск счетчика не вращается, или, сделав часть оборота, остановится и дальше вращаться не будет, «самоход» отсутствует.

Проверка чувствительности счетчика

Для этого при номинальном напряжении и  $\cos\varphi = 1,0$  (P<sub>1</sub> = P<sub>2</sub>) полностью ввести реостаты R<sub>1</sub> в токовых цепях, а затем плавно уменьшить их сопротивление, пока диск счетчика не начнет вращаться. Заметив при этом показания ваттметров, определить чувствительность в счетчиках по формуле:

$$s = \frac{P_{min}}{P_{ном}} * 100\%$$

Дать заключение о поверяемом счетчике.

### 3. Оформление результатов работы

По результатам работы составляют краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицы с результатами измерений.
3. Схему поверки счетчика.
4. Расчетные формулы.

5. Графики  $\beta = f(I)$ .

6. Заключение о поверяемом счетчике.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Как измерить мощность в трехфазной сети методом двух ваттметров? Каковы правила включения?

2. Как включаются генераторные зажимы счетчика и ваттметров?

3. Что такое номинальная и действительная постоянные счетчика, какая из них неизменна?

4. В каких случаях показания обоих ваттметров равны?

5. Что такое погрешность счетчика и ее связь с классом точности?

6. Что такое «самоход» счетчика, как он проверяется?

7. Как определяется чувствительность счетчика?

## Лабораторная работа №6

Поверка однофазного ваттметра на установке МК6801.

**Цель работы:** определение зависимости погрешности ваттметра от изменения тока.

### 1. Элементы теории.

Используемая установка МК6801 включает в себя блок напряжения, блок тока, образцовый счетчик и стенд для подключения поверяемых приборов.

Блок напряжения предназначен для питания измерительных цепей 3-х и однофазных преобразователей мощности и энергии ваттметров, счетчиков электрической энергии. Блок напряжения выдает фазные напряжения от 13 до 420 В на 10 поддиапазонах. Кроме того, имеется плавная регулировка напряжения в пределах установленного поддиапазона. Блок напряжения может выдавать напряжение с частотой от 50 до 1000 Гц на 6 поддиапазонах с плавной регулировкой частоты в пределах поддиапазона.

Блок напряжения имеет возможность синхронизировать выравниваемую частоту напряжения с частотой питающей сети.

При работе с блоком тока, блок напряжения обеспечивает сдвиг фаз между напряжением и током в диапазоне от 0 до 180°.

Блок тока.

Блок тока предназначен для питания измерительных цепей 3-х и однофазных преобразователей мощности и энергии, ваттметров, счетчиков электрической энергии по методу фиктивной мощности.

Номинальное значение выходных фазных токов перекрывается пятью поддиапазонами с плавной регулировкой внутри поддиапазона. Диапазон выдаваемых токов от 5мА до 10 А.

Блок тока обеспечивает регулировку частоты фазных токов от 50 Гц до 1000 Гц при этом если частота питающей сети блока тока соответствует частоте выдаваемой блоком тока, то возможна синхронизация частоты, выдаваемой блоком тока с частотой сети.

Нестабильность выдаваемых токов для частоты 50 Гц не превышает 0,1% за 5 мин и 0,5% на более высоких частотах.

Ваттметр – счетчик образцовый ЦЭ6802.

Счетчик ЦЭ6802 предназначен для измерения активной мощности и энергии в 3-х и 4-х проводной трехфазной и двухпроводной сети переменного тока и для измерения реактивной мощности в трехфазной сети. Счетчик может применяться для поверки и регулировки ваттметров, трехфазных варметров, преобразователей мощности и счетчиков электрической энергии класса точности 0,2 и менее точных.

Номинальные значения напряжения входных параллельных цепей счетчика:

фазные	$100/\sqrt{3}$	$220/\sqrt{3}$	$380/\sqrt{3}$
линейные	100	220	380

Номинальные значения силы тока входных последовательных цепей счетчика равны:

$3 \times 1 \text{ А}$  и  $3 \times 5 \text{ А}$ , при этом перегрузочное значение силы тока должно составлять 200% от номинальных значений.

Счетчик имеет восемь входов для подключения телеметрических выходов поверяемых счетчиков.

В зависимости от установленного режима счетчик отображает на индикаторном табло измеренное значение активной и реактивной мощности, количество делений шкалы поверяемого прибора, соответствующее измеренной мощности.

Измеренное значение активной и реактивной энергии в ваттчасах или варчасах.

Вычисленное значение погрешностей поверяемых счетчиков в процентах (%).

Измеренное значение силы тока через последовательные цепи в амперах, измеренное значение напряжений параллельных цепей в вольтах.

Для контроля измерительной цепи счетчика на табло индуцируется значение угла сдвига фаз между током и напряжением, значение коэффициента мощности и частота измерительных сигналов с ненормируемой точностью.

Счетчик проводит автокалибровку не реже, чем один раз в 20 мин. автоматически или по требованию оператора.

Блоки тока, напряжения и образцовый счетчик ЦЭ6802 устанавливаются на передвижной стойке. На стойке расположен общий выключатель питания

стойки и три розетки для подключения блоков. Кроме того, в состав установки входит стенд для подключения 8 поверяемых счетчиков.

Все восемь мест для поверки предусматривают установку контактирующих устройств, позволяющих быстро установить счетчики.

Нижние контактные места позволяют подключать счетчики с помощью проводов. Для этого установлено 6 клеммных зажимов для подключения токовых входов счетчика. Ниже установлено еще 4 клеммных зажима для подключения входов напряжения и нулевого провода.

Информация с поверяемых счетчиков поступает в образцовый счетчик через разъем, установленный справа от клеммных зажимов. В случае, если рабочее поверочное место не используется, токовые клеммы попарно должны быть закорочены перемычками.

## **2. Порядок выполнения работы.**

Поверка однофазного ваттметра на установке МК6801.

Для снятия графической зависимости погрешности ваттметра от изменения величины тока необходимо на одном из рабочих мест 5-8 разомкнуть перемычку на клеммах тока и к этим клеммам подсоединить токовые выходы ваттметра. Провод от клеммы \* подсоединить к правой клемме. Выходы вольтметра подсоединить к клемме той фазы, на которой подключены токовые выходы. Провод от клеммы напряжения со звездочкой ( \*) подсоединить к клемме  $U_0$ .

Предел по напряжению ваттметра установить 150 В, предел по току 5 А.

Включить блок тока, блок напряжения и образцовый счетчик.

Запрограммировать образцовый счетчик на измерение мощности.

Программирование необходимо выполнить в соответствии с требованиями, указанными в паспорте на ваттметр – счетчик образцовый ЦЭ6802.

Произвести измерение мощности при токах 1А, 2А, 3А, 4А, 5А и напряжении 150В.

Занести показания счетчика в табл. 1.

Рассчитать допустимую погрешность ваттметра в точках измерения и внести показания в табл. 1.

### 3. Оформление результатов работы.

По результатам работы составить краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицу с результатами эксперимента.
3. Рассчитанные значения метрологических характеристик и оценку класса точности вольтметра.
4. Выводы, вытекающие из результатов работы.

### 4. Контрольные вопросы.

1. Перечислить состав аппаратуры и назначение блоков, входящих в состав установки МК6801?
2. Объясните принцип измерения активной мощности и энергии на установке МК6801?
3. Объясните принцип измерения реактивной мощности на установке МК6801?

Таблица 1

То к, А	Показани я образцов ого счетчика	Показан ия ваттмет ра	Абсолют ная погрешно сть	Относител ьная погрешнос ть	Допустима я относитель ная погрешнос ть	Выво ды

## Лабораторная работа №7

### Исследование свойств реостатных измерительных преобразователей

**Цель работы:** исследовать отдельные виды реостатных измерительных преобразователей с точки зрения их чувствительности, линейности характеристик и точности. Провести обработку результатов исследований и их анализ.

#### 1. Теоретические основы

Реостатными называются преобразователи, выполненные в виде реостата, движок которого перемещается под действием входной неэлектрической величины. Перемещение движка приводит к изменению сопротивления.

Таким образом, естественной входной величиной таких преобразователей является механическое перемещение (линейное, угловое), а естественной входной величиной – сопротивление преобразователя.

В зависимости от конструктивного исполнения реостатные измерительные преобразователи делятся на преобразователи линейного перемещения и преобразователи углового перемещения. С помощью таких измерительных преобразователей можно измерять неэлектрические величины, которые могут быть преобразованы (при помощи других измерительных преобразователей) в линейное и угловое перемещение (давление, уровень и т. д.).

Реостатные измерительные преобразователи изготавливаются из изолированной манганиновой, константановой и вольфрамовой проволоки, намотанной на каркас из изолированного материала. При повышенных требованиях в отношении износостойчивости в качестве материала обмотки используют сплав платины с иридием (Pt– 90 %, Ir – 10 %). Контактная щетка выполняется из серебра, бронзы или платиноиридиевого сплава (при малых контактных изделиях).

Наиболее часто реостатные измерительные преобразователи изготавливают с линейной функцией преобразования. Для преобразователей линейного перемещения. Для преобразователей линейного перемещения она имеет вид:

$$R_x = \frac{R_p}{l} X \quad (1)$$

а для преобразователей углового перемещения

$$R_x = \frac{R_p}{2l} D \alpha_x \quad (2)$$

где

$R_p$  – полное сопротивление реостатного измерительного преобразователя;

$l$  – его длина;

$X, \alpha_x$  – линейное и угловое (в радианах) перемещение.

В ряде случаев применяются реостатные измерительные преобразователи с функциональным (не линейным) распределением сопротивления вдоль каркаса. Заданная функция преобразования  $R_x = f(x)$  обеспечивается, например, измерением профиля с переменным шагом намотки, намотки отдельных участков каркаса проводами разного диаметра или разного удельного сопротивления, шунтированием участков линейного реостата соответствующими сопротивлениями.

Выходное сопротивление реостатных проволочных преобразователей в зависимости от перемещения изменяется ступенчато. Это обстоятельство вызывает погрешность квантования, приведенное значение которой равно:

$$\gamma_{кв} = \frac{0,5 * \Delta R_x}{R_p} * 100\% = \frac{0,5}{w} * 100\% \quad (3)$$

где

$w$  – число витков измерительного преобразователя.

Суммарная погрешность, вызванная непостоянством параметров преобразователей, составляет  $0,05 \div 0,1$  %. Температурная погрешность, определяемая температурным коэффициентом сопротивления материала провода, не превышает  $0,1$  % на  $10$  °С.

## **2. Порядок выполнения работы**

### **2.1 Исследование реостатного измерительного преобразователя линейного перемещения**

#### **2.1.1 Определение функции преобразования**

а) Используя конструктивные материалы измерительного преобразователя, рассчитать его полное сопротивление по формуле:

$$R_p = \frac{\rho l_0 w}{\pi a^2} \quad (4)$$

б) Используя выражение (1) и задавая различные значения входного перемещения  $X$  в диапазоне  $0,11 \div 1$ , рассчитать теоретическую функцию преобразования реостатного измерительного преобразователя линейного перемещения в режиме холостого хода ( $R_H = \infty$ ). Данные расчетов свести в таблицу 1.

Таблица 1

$X/l$	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00
$R_x, \text{ Ом}$					

в) Снять экспериментальную зависимость  $R_x = f(x)$  в режиме холостого хода ( $R_H = \infty$ ), для чего нужно подключить цифровой прибор к клеммам «б» и «16». Включить прибор в режиме омметра, но не включать макет в сеть, и, перемещая движок измерительного преобразователя при помощи тяги по шкале, измерить сопротивления измерительного преобразователя при разных положениях движка. Данные опыта занести в таблицу 2.

Таблица 2

$X, \text{ мм}$	0	10	20	30	40	50
$R_x, \text{ Ом}$						

г) Построить расчетную и экспериментальную функции преобразования на общем графике, сравнить их и, используя экспериментальную зависимость, рассчитать чувствительность измерительного преобразователя

$$S = \frac{\Delta R_x}{\Delta X} \quad (5)$$

### 2.1.2 Исследование реостатного измерительного преобразователя в схеме делителя напряжения в различных режимах

а) Включить измерительный преобразователь в схему делителя напряжения согласно рисунку 1. Для этого к клеммам «5» и «6» подсоединить вольтметр Щ68003, предварительно переключив его в режиме измерения постоянного напряжения.

б) Включить макет в сеть ( $\sim 220 \text{ В}$ ) и снять зависимость  $U_{\text{вых}} = f(x)$  для режима холостого хода ( $R_H = \infty$ ). Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3

X, мм	0	10	20	30	40	50
U <sub>ВЫХ</sub> , В						

в) Подключить магазин сопротивлений к клеммам «5» и «6» (см. рисунок 2). Задать магазином значения  $R_H=R$ ;  $0,2R$ ;  $0,5R$ . И для каждого случая снять зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}=f(x)$ . данные занести в таблицу 4.

Таблица 4

X, мм	0	10	20	30	40	50
U <sub>ВЫХ</sub> , В						
R <sub>H</sub> =R						
U <sub>ВЫХ</sub> , В						
R <sub>H</sub> =0,2R						
U <sub>ВЫХ</sub> , В						
R <sub>H</sub> =0,5R						

г) По полученным данным построить зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}=f(x)$  на общем графике для режима холостого хода и трех нагрузочных режимов. Сделать выводы. Определить коэффициент нелинейности для всех последующих режимов работы измерительного преобразователя

$$k_H = \frac{tg_{max}\alpha - tg_{min}\alpha}{tg_{cp}\alpha}$$

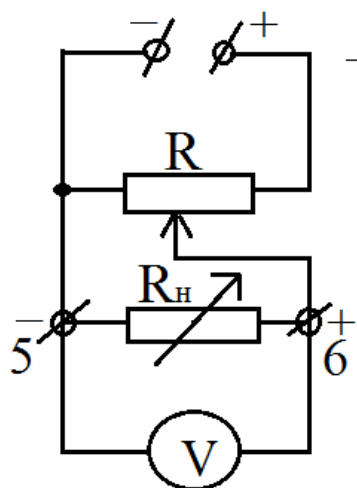


Рисунок 1

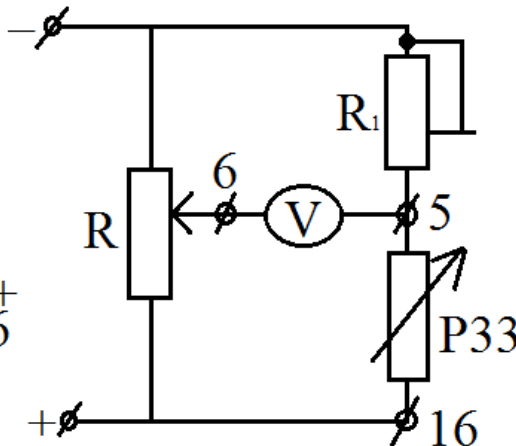


Рисунок 2

### 2.1.3 Исследование реостатного измерительного преобразователя с преобразователем «сопротивление - ток».

а) Подключить к клеммам «5», «6» и «16» реостатного измерительного преобразователя линейного перемещения соответствующие выводы индикатора положения унифицированного и включить его в сеть ( $\sim 220$  В), но исследуемый макет в сеть не включать.

б) Снять зависимости  $I(\%) = f(x)$ . данные занести в таблицу 5.

Таблица 5

X, мм	0	10	20	30	40	50
I, %						

в) По полученным данным построить зависимость  $I(\%) = f(x)$ . сделать выводы.

#### 2.1.4 Исследование реостатного измерительного преобразователя дифференциального типа в схеме моста

а) Собрать схему моста для измерительного преобразователя (рисунок 3). Для чего к клеммам «5» и «6» подсоединить вольтметр Щ68003. Магазин сопротивления Р33 подключить к клеммам «5» и «16». Стрелка подвижного контакта реостатного измерительного преобразователя должна находиться на делении 25 мм (середина рабочей части шкалы линейки).

б) Включить макет в сеть ( $\sim 220$  В) и уравновесить мост с помощью магазина сопротивлений ( $U_M = 0$ ).

в) Снять зависимости  $\Delta U_M = f(\pm x)$ , перемещая движок измерительного преобразователя вправо и влево от исходного положения. Данные положительно и отрицательного перемещения занести соответственно в таблицы 6 и 7.

Таблица 6

+X, мм	5	10	15	20	25
$\Delta U_M$ , В					

Таблица 7

-X, мм	5	10	15	20	25
$\Delta U_M$ , В					

г) Построить графики зависимости  $\Delta U_M = f(\pm x)$  и определить чувствительность

$$S = \frac{\Delta U_M}{\Delta X}$$

д) По полученному графику сделать выводы о чувствительности и линейности мостовой схемы.

## 2.2 Исследование реостатного измерительного преобразователя углового перемещения

### 2.2.1 Снятие экспериментальной зависимости $R_x = f(\alpha)$ однооборотного реостатного измерительного преобразователя углового перемещения

а) Подключить к клеммам «1» и «2» однооборотного измерительного преобразователя вольтметр Щ68003, включенный в режиме омметра. Вращая ручку преобразователя, снять показания прибора и занести в таблицу 8.

Таблица 8

Деления	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha^\circ$	0	29	58	87	116	145	174	203	232	261	290
$R_x, \text{ Ом}$											

б) По данным таблицы 8 построить зависимость  $R_x = f(\alpha)$ . Рассчитать чувствительность по формуле:

$$S = \frac{\Delta R_x}{\Delta \alpha}$$

в) Сделать выводы по графику. Сравнить полученную чувствительность с результатами для измерительного преобразователя линейного перемещения по п. 2.1.1 (в).

### 2.2.2 Исследование однооборотного измерительного преобразователя в схеме моста

а) Установить ручку преобразователя на делении «50». Два магазина сопротивления Р33 соединить последовательно между собой и подключить к клеммам «8» и «16» и макета реостатного измерительного преобразователя линейного перемещения, который в данном случае используется в качестве источника постоянного напряжения. Измерительный прибор Щ68003

подключить к выводу «2» и к соединению между магазинами (см. рисунок 7). Когда схема будет собрана, включить в сеть ( $\sim 220$  В) измерительный преобразователь линейного перемещения.

б) Уравновесить мост магазинами сопротивления. Снять зависимости  $\Delta U_M = f(\pm\alpha)$ , перемещая ручку по часовой стрелке и против. Данные занести в таблицу 9.

Деления	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha^\circ$	-145	-116	-87	-58	-29	0	+29	+58	+87	+116	+145
$\Delta U_M, \text{В}$											

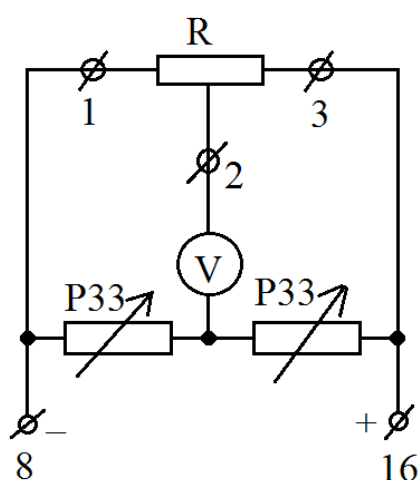


Рисунок 3

в) Построить график зависимости  $\Delta U_M = f(\pm\alpha)$  и определить чувствительность

$$S = \frac{\Delta U_M}{\Delta \alpha}$$

### 2.2.3 Исследование многооборотного измерительного преобразователя углового перемещения

а) Подключить к клеммам «1» и «2» многооборотного реостатного измерительного преобразователя измерительный прибор Щ68003, включенный в режиме омметра. Угол поворота отложен на ручке – шкале измерительного преобразователя.

б) Снять зависимости  $R_x = f(\alpha)$ . Данные эксперимента занести в таблицу 10.

$\alpha^\circ$	Номер оборота								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60									
120									
180									
240									
300									
360									

в) Построить зависимость  $R_x = f(\alpha)$  и рассчитать чувствительность

$$S = \frac{\Delta R_x}{\Delta \alpha}$$

г) Сделать выводы.

### 3. Оформление результатов работы

По результатам работы составляют краткий отчет, который должен содержать:

1. Цель и теоретические основы работы.
2. Таблицы с результатами измерений.
3. Примеры расчетов.
4. Схемы лабораторных установок.
5. Графики зависимостей в соответствии с программой.
6. Выводы по отдельным пунктам работы и общие выводы.

### 4. Контрольные вопросы

1. Принцип действия реостатных измерительных преобразователей линейного и углового перемещений?

2. Преимущества и недостатки реостатных измерительных преобразователей линейного и углового перемещений?

3. Особенности однооборотного и многооборотного реостатных измерительных преобразователей углового перемещения? Области применения?

4. Измерительные схемы включения реостатных измерительных преобразователей?

5. Что значит уравновесить мост?

6. Характер изменения  $R_x = f(X)$  и  $R_x = f(\alpha)$  у реостатных измерительных преобразователей?

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждения  
высшего образования  
«Северо-Кавказский федеральный университет»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Для проведения практических занятий по дисциплине  
«Метрология, стандартизация и сертификация»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Невинномысск 2019 г.

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Составители:

к.т.н., доцент Д.В. Болдырев

Рецензент:

к.т.н., доцент А.А. Евдокимов

## ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$A$ – истинное значение измеряемой величины;	$S$ – полная мощность;
$A_1$ – показание прибора;	$s$ – площадь поперечного сечения;
$C$ – ёмкость;	$t$ – время;
$C_{A, U}$ – цена деления шкалы (постоянная прибора);	температура;
$E$ – действующее значение электродвижущей силы (ЭДС);	$U$ – действующее значение напряжения;
$f$ – частота переменного тока;	$\omega$ – число витков;
$G$ – вес стали;	$W$ – энергия;
$h$ – высота;	$X_L$ – индуктивное сопротивление;
$I$ – действующее значение тока;	$Z$ – полное сопротивление цепи переменного тока;
$k$ – коэффициент;	– угол отклонения прибора в градусах или делениях шкалы;
$L$ – индуктивность;	температурный коэффициент сопротивления;
$l$ – длина;	относительная погрешность;
$M$ – взаимная индуктивность;	абсолютная погрешность;
$N$ – число оборотов диска;	поправка;
$n$ – число делений шкалы;	$\Phi$ – магнитный поток;
$P$ – активная мощность;	угловая частота.
$p$ – коэффициент, показывающий во сколько раз расширяются пределы измерения приборов;	
$Q$ – реактивная мощность;	
$r$ – активное сопротивление;	
$S_A$ – чувствительность прибора;	

# 1. Методы и погрешности измерений

## Основные определения и формулы

1. Абсолютной погрешностью прибора называется разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$A - A_{\text{д}}$$

2. Поправкой прибора называется разность между действительным значением измеряемой величины и показанием прибора. Численно поправка равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком:

$$-A$$

3. Поправочным коэффициентом называется число  $k$ , на которое нужно умножить значение, полученное в результате измерения, чтобы найти действительное значение измеряемой величины:

$$—$$

4. Относительной погрешностью измерительного прибора называется выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\frac{A}{A_{\text{д}}}$$

5. Приведенной погрешностью измерительного прибора называется выраженное в процентах отношение фактической абсолютной погрешности к верхнему пределу измерения прибора  $A_n$ :

$$n = \frac{A}{A_n} 100\%$$

6. Допустимой погрешностью  $\gamma_{\text{д}}$  (классом точности) прибора называется наибольшая приведенная относительная погрешность, которую может иметь прибор согласно ГОСТ, инструкциям или правилам.

7. Наибольшая возможная относительная погрешность измерения при прямом методе непосредственной оценки вычисляется по формуле:

$$\text{из } \frac{A_{\text{наиб}}}{A} \quad \partial \frac{A_n}{A} \quad \partial \frac{A_n}{A}$$

где  $A_{\text{наиб}}$  — наибольшая абсолютная погрешность прибора.

8. Относительная погрешность при косвенном методе измерения в простейших случаях определяется следующими формулами.

Если искомая величина

где  $B, P, V$  – величины, полученные в результате прямых измерений, то

$x$

причем в выражении для  $\gamma_x$  берется арифметическая сумма членов независимо от знаков у показателей степени  $n, m, f$ .

Если искомая величина определяется выражением

и

то соответствующими формулами для вычисления относительной погрешности будут

$$\gamma_x = \frac{B}{x} \text{ и } \gamma_x = \frac{P}{x} \text{ и } \gamma_x = \frac{V}{x}.$$

9. Погрешность ряда измерений:

а) наиболее вероятное значение измеряемой величины

$$A = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{n}$$

где  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  – значение величины при отдельных измерениях;

$n$  – число измерений;

б) абсолютная вероятная погрешность

$$A_B = \sqrt{\frac{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + \dots + (\Delta_n)^2}{n(n-1)}}$$

где  $A$  – остаточная погрешность отдельных измерений;

в) относительная вероятная погрешность

$$\gamma_B = \frac{A_B}{A}$$

г) предельная погрешность результата измерения

$$A_{np} = A_B \text{ или } \gamma_{np} = \gamma_B$$

д) результат измерения

$$A = A_0 \pm \Delta A_{0 \text{ пр}} \text{ или } A = A_0 \pm \gamma_{0 \text{ пр}}.$$

**10.** Чувствительностью прибора называется количество делений шкалы (или угловое отклонение указателя), соответствующее единице измеряемой величины:

$$S_A = \frac{\alpha}{A} \text{ дел/а; дел/ма.}$$

**11.** Постоянной прибора (ценой деления) называется количество единиц измеряемой величины, соответствующее перемещению указателя на одно деление или на 1 мм шкалы прибора:

$$c_A = \frac{A}{\alpha} \text{ а/дел; ма/дел.}$$

**12.** Измеряемая величина равна

$$A = \alpha c_A.$$

**13.** Угол поворота рамки магнитоэлектрического прибора, град,

$$\alpha = \frac{0,01 B b h \omega I}{D},$$

где  $I$  – ток рамки, а;

$B$  – индукция в воздушном зазоре, тл;

$b$  – ширина рамки, м;

$h$  – высота рамки, м;

$\omega$  – число витков;

$D$  – удельный противодействующий момент спиралей или растяжек, н×м/град.

## 2. Задачи

**1.** Миллиамперметр рассчитан на ток  $I=500$  ма и имеет чувствительность по току 0,2 дел/ма. Определить число делений шкалы, цену деления и ток, если стрелка миллиамперметра отклонилась на 60 делений.

*Решение*

1. Зная, что  $S_1 = \frac{\alpha}{I_n}$ , определим число делений шкалы;

$$\alpha = S_1 I_n = 0,2 \times 500 = 100 \text{ дел.}$$

2. Цена деления

$$c_I = \frac{1}{S_I} = \frac{500}{100} = 5 \text{ ма/дел.}$$

3. Ток, протекающий в цепи,

$$I = \alpha c_I = 5 \cdot 60 = 300 \text{ ма.}$$

2. Определить цену деления астатического ваттметра (рис. 1), шкала которого разбита на 150 делений, а параллельная обмотка рассчитана на 30ма, если напряжение подведено: а) к зажиму 150 В; б) к зажиму 1 ком.

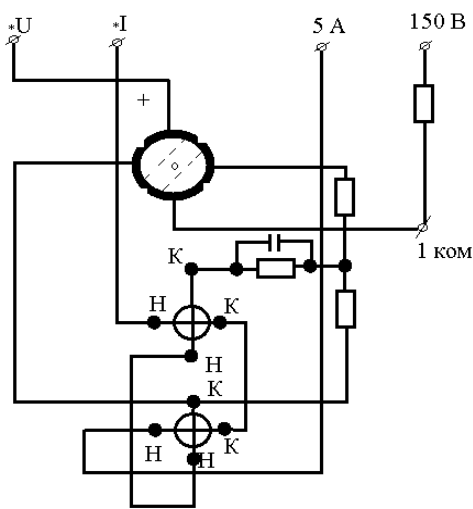


Рис. 1

*Решение*

а) напряжение подведено к зажиму 150 В.

1. Мощность, на которую рассчитан прибор,  $P=UI=150 \cdot 5=750 \text{ Вт}$ .

2. Цена деления прибора

$$C_p=750:150=5 \text{ Вт/дел.}$$

б) напряжение подведено к зажиму 1 ком.

1. Напряжение, на которое должен быть подключен прибор,

$$U=Ir=0,03 \cdot 1000=30 \text{ В.}$$

2. Мощность, на которую рассчитан прибор,  $P=UI=30 \cdot 5=150 \text{ Вт}$ .

3. Цена деления

$$C_p=150:150=1 \text{ Вт/дел.}$$

3. Элемент, у которого  $E=1,5$  в, а внутреннее сопротивление  $r_0=0,2$  ом, замкнут на внешнее сопротивление  $r = 14,8$  ом. Определить, чему будет равна относительная погрешность при расчете тока в цепи, если внутренним сопротивлением элемента пренебречь. Как изменится относительная погрешность, если при прочих равных условиях внешнее сопротивление вместо 14,8 станет равным 0,3 ом?

*Решение*

1. Действительное значение тока в цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{1,5}{0,2 + 14,8} = 0,1 \text{ а.}$$

2. Значение тока без учета внутреннего сопротивления

$$\dot{I} = \frac{E}{r} = \frac{1,5}{14,8} = 0,1013 \text{ а.}$$

3. Относительная погрешность

$$\gamma_I = \frac{\dot{I} - I}{I} 100\% = \frac{0,1013 - 0,1}{0,1} \cdot 100 = 1,3\%.$$

4. Действительное значение тока в цепи при  $r = 0,3$  ом

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{1,5}{0,2 + 0,3} = 3 \text{ а.}$$

5. Значение тока без учета внутреннего сопротивления

$$\dot{I} = \frac{E}{r} = \frac{1,5}{0,3} = 5 \text{ а.}$$

6. Относительная погрешность

$$\gamma_I = \frac{\dot{I} - I}{I} 100\% = \frac{5 - 3}{3} \cdot 100 = 66,7\%.$$

4. Десять одинаковых осветительных ламп соединены параллельно. Ток каждой лампы  $I_{л} = 0,3$  а. Определить абсолютную и относительную погрешности амперметра, включенного в неразветвленную часть цепи, если его показания  $I_1 = 3,3$  а.

*Решение.*

1. Ток в неразветвленной части цепи

$$I = nI_{л} = 10 \cdot 0,3 = 3 \text{ а.}$$

2. Абсолютная погрешность

$$\Delta I = I_1 - I = 3,3 - 3 = 0,3 \text{ а.}$$

3. Относительная погрешность

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{I} 100\% = \frac{0,3}{3} 100 = 10\%.$$

### 3. Задачи

5. Какова относительная погрешность измерения ЭДС генератора (рис.2) при измерении ее вольтметром с сопротивлением 10 ком? Внутреннее сопротивление генератора  $r_g = 0,2 \text{ ом}$ .

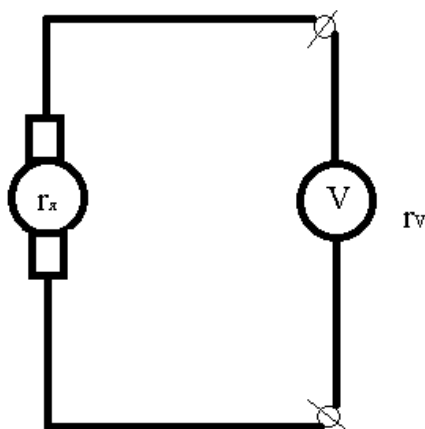


Рис. 2

*Решение.*

1. Относительная погрешность

$$\gamma_E = \frac{U - E}{E} 100\%.$$

2. Напряжение генератора определяется формулой

$$U = E - I r_g,$$

Где  $I = \frac{E}{r_V + r_g}$ .

3. Подставив эти выражения в формулу для погрешности, получим

$$\gamma_E = \frac{-r_g}{r_V + r_g} 100\% = \frac{-0,2}{10000 + 0,2} 100 = -0,002\%.$$

6. Определить чувствительность по напряжению магнитоэлектрического прибора на  $3\text{мА}$  внутренним сопротивлением  $10\ \text{ом}$  и шкалой на 150 делений. Каким сопротивлением должен обладать прибор, чтобы при той же чувствительности по току чувствительность по напряжению составила  $2\ \text{дел/мВ}$ ?

*Решение*

1. Верхний предел измерения прибора по напряжению

$$U = I_r = 3 \cdot 10 = 30\ \text{мВ}.$$

2. Чувствительность по напряжению

$$S_U = \frac{a}{U} = \frac{150}{30} = 5\ \text{дел/мВ}.$$

3. Верхний предел измерения прибора при чувствительности  $2\ \text{дел/мВ}$

$$U = \frac{a}{S_U} = \frac{150}{2} = 75\ \text{мВ}.$$

4. Сопротивление прибора

$$r = \frac{U}{I} = \frac{75}{3} = 25\ \text{ом}.$$

Значение сопротивления можно определить другим способом.

1. Постоянная прибора (цена деления) по току

$$c_1 = \frac{I}{a} = \frac{3}{150} = 0,02\ \text{мА/дел}.$$

2. Зная, что чувствительность по напряжению равна

$$S_U = \frac{1}{c_1 r},$$

сопротивление прибора определим следующим образом:

$$r = \frac{1}{S_U c_1} = \frac{1}{2 \cdot 0,02} = \frac{1}{0,04} = 25\ \text{ом}.$$

7. Для определения электрической мощности, выделяемой в активном сопротивлении, были измерены: напряжение  $125\ \text{В}$  вольтметром с номинальным напряжением  $150\ \text{В}$  класса точности 1,5 и сопротивление нагрузки  $20\ \text{ом}$  одинарным мостом с погрешностью  $0,2\ \%$ . Найти мощность в нагрузке и наибольшую возможную относительную погрешность при ее измерении.

*Решение*

1. Мощность определяется по формуле

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{125^2}{20} 781 \text{ вт.}$$

2. Относительная погрешность измерения напряжения

$$\gamma_U = \gamma_{\partial} \frac{U_H}{U} = 1,5 \frac{150}{125} = \frac{9}{5} = 1,8\%.$$

3. Относительная погрешность измерения мощности косвенным методом

$$\gamma_P = 2\gamma_U + \gamma_r = 2 \cdot 1,8 + 0,2 = 3,8\%.$$

8. Для измерения затраты энергии в течение суток были замерены: напряжение сети 215 в вольтметром на номинальное напряжение 250 в класса точности 1,5 и ток 120 а амперметром на 150 а класса точности 0,1. Определить количество энергии, расходуемой в печи за сутки, и наибольшую возможную абсолютную и относительную погрешности при ее измерении, если время измеряется с точностью до 1 мин.

*Решение*

1. Энергия, расходуемая за сутки,

$$W = UIt = 215 \cdot 120 \cdot 24 = 619200 \text{ втч} = 619200 \cdot 3600 = 2229,12 \cdot 10^6 \text{ дж} = 2229,12 \text{ Мдж.}$$

2. Относительная погрешность измерения напряжения

$$\gamma_U = \gamma_{\partial} \frac{U_H}{U} = 1,5 \frac{250}{215} = 1,75\%.$$

3. Относительная погрешность измерения тока

$$\gamma_I = \gamma_{\partial} \frac{I_H}{I} = 1 \frac{150}{120} = 1,25\%.$$

4. Относительная погрешность измерения времени

$$\gamma_t = \frac{1}{1440} 100 = 0,07\%.$$

5. Относительная погрешность измерения энергии

$$\gamma_W = \gamma_U + \gamma_I + \gamma_t = 1,75 + 1,25 + 0,07 = 3,07\%.$$

6. Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta W = W \frac{\gamma_W}{100} = 2229,12 \cdot \frac{3,07}{100} = 68,4 \text{ Мдж.}$$

#### 4. Измерения тока и напряжения

## Основные определения и формулы

1. Сопротивление шунта определяется по формуле:

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_{\text{п}}}{P_{\text{А}} - 1},$$

где  $r_{\text{п}}$  – сопротивление измерительного прибора;

$P_{\text{А}} = \frac{I}{I_{\text{н}}}$  – шунтирующий множитель, показывающий, во сколько раз измеряемый ток больше тока измерительного прибора  $I_{\text{н}}$  или во сколько раз расширяется предел измерения.

2. Добавочное сопротивление для расширения пределов измерения по напряжению определяется по формуле

$$r_{\text{д}} = r_{\text{V}}(P_{\text{V}} - 1),$$

где  $r_{\text{V}}$  – сопротивление вольтметра;

$$P_{\text{V}} = \frac{U}{U_{\text{н}}} - \text{коэффициент расширения пределов измерения;}$$

$U$  – измеряемое напряжение;

$U_{\text{н}}$  – напряжение, на которое рассчитан вольтметр.

3. Действительный коэффициент трансформации определяется по формулам:

для трансформатора напряжения

$$k_U = \frac{U_1}{U_2};$$

для трансформатора тока

$$k_I = \frac{I_1}{I_2};$$

где  $U_1, U_2, I_1, I_2$  – действительные значения первичных и вторичных напряжений и токов.

Номинальный коэффициент трансформации, указываемый на щитке трансформатора, называется отношение номинального первичного напряжения (тока) к номинальному вторичному напряжению (току).

Номинальный коэффициент трансформации:

по напряжению

$$k_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н1}}}{U_{\text{н2}}};$$

по току

$$k_H = \frac{I_{H1}}{I_{H2}};$$

4. Относительные погрешности при измерении тока и напряжения, обусловленные применением трансформаторов тока и напряжения, определяются по формулам

$$\gamma_U = \frac{U_2 k_H - U_2 k}{U_2 k} 100\% = \frac{k_H - k}{k} 100\% = \gamma_k; \quad \gamma_I = \frac{k_H - k}{k} 100\% = \gamma_k$$

где  $\gamma_k$  - погрешность коэффициента трансформации.

5. Номинальной мощностью трансформатора называется мощность (полная), которую можно получить от трансформатора без увеличения погрешностей, предусмотренных стандартом.

для трансформатора напряжения

$$S_H = I_{H2} U_{H2} = \frac{U_{H2}}{Z_{H2}},$$

где  $U_{H2}$  - номинальное вторичное напряжение;

$Z_{H2}$  - номинальное полное сопротивление вторичной цепи.

К трансформатору может быть подключено определенное количество приборов при условии, что их мощность при номинальном напряжении не превышает номинальной мощности трансформатора, т. е.

$$S_H = \sum S_{\Pi},$$

где  $S_{\Pi}$  - мощность, потребляемая каждым из приборов.

для трансформатора тока

$$S_H = I_{H2}^2 Z_{H2},$$

где  $I_{H2}$  - номинальное значение вторичного тока трансформатора.

6. Значение емкости конденсатора для расширения пределов измерения электростатических вольтметров

$$C_1 = \frac{C_V}{P_V - 1},$$

где  $C_V$  - емкость вольтметра;

$P_V$  - коэффициент расширения пределов измерения.

7. Для уменьшения влияния температуры на показания приборов прибегают к температурной компенсации. В простейшем случае (амперметр с шунтом) температурная компенсация может быть осуществлена включением последовательно с рамкой прибора добавочного сопротивления из манганина. При этом температурный коэффициент ветви измерительного механизма

$$a = a_m \frac{r_n}{r_n - r_d},$$

где  $a_m$  - температурный коэффициент провода рамки;

$r_n$  - сопротивление измерительного механизма;

$r_d$  - сопротивление, включаемое последовательно в цепь рамки.

8. Значение неизвестной ЭДС, измеренной компенсационным методом, определяется из отношения

$$E_x = \frac{E_n}{r_n} r_k = I_n r_k,$$

где  $E_n$  - ЭДС нормального элемента, определяется для температуры окружающей среды по формуле

$$E_n = [E_{20} - 0,0000406(t - 20)] \text{ В},$$

$r_n$  - значение сопротивления в цепи нормального элемента;

$r_k$  - значение сопротивления в цепи измеряемой ЭДС;

$E_{20}$  - значение ЭДС нормального элемента при температуре  $20^\circ \text{ C}$ .

9. Напряжение, измеряемое потенциометром с применением делителя напряжения, определяется по формуле

$$U_x = \frac{r_d}{r} U_n = U_n k,$$

где  $U_n$  - напряжение, отсчитываемое по потенциометру;

$r_d$  - общее сопротивление делителя напряжения;

$r$  - сопротивление делителя, к которому подключен потенциометр;

$k = \frac{r_d}{r}$  - коэффициент делителя.

## 5. Задачи

9. Определить напряжение на сопротивлении  $r_2$  и наибольшую возможную относительную погрешность при его определении (рис. 3), если напряжении сети равно 220 в, а напряжение на сопротивлении  $r_1$  равно  $U_1 = 180$  в. Для измерений используется вольтметры класса точности 1,0 на 250 в.

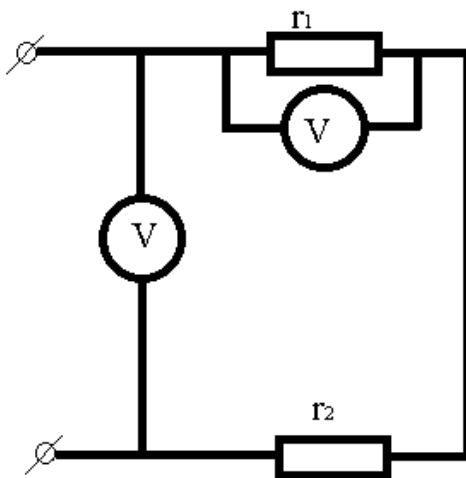


Рис. 3

*Решение*

1. Напряжение на сопротивлении  $r_2$

$$U_2 = U - U_1 = 220 - 180 = 40 \text{ в}$$

2. Наибольшие возможные относительные погрешности при измерении напряжений  $U$  и  $U_1$

$$\gamma_U = \gamma_{\text{д}} \frac{U_{\text{н}}}{U} = 1 * \frac{250}{220} = 1,14\%, \quad \gamma_{U_1} = \gamma_{\text{д}} \frac{U_{\text{н}}}{U_1} = 1 * \frac{250}{180} = 1,39\%.$$

3. Абсолютная погрешность при измерении напряжений  $U$  и  $U_1$

$$\Delta U_1 = 180 * 0,0139 = 2,5 \text{ в}; \Delta U = 220 * 0,0114 = 2,5 \text{ в}$$

4. Наибольшая возможная относительная погрешность при измерении напряжения на сопротивлении  $r_2$

$$\gamma_{U_2} = \frac{\Delta U + \Delta U_1}{U - U_1} = \frac{2,5 + 2,5}{220 - 180} = 0,125 = 12,5 \%$$

Эту величину можно определить другим способом. По известным абсолютным погрешностям измерения напряжений  $U$  и  $U_1$  находят абсолютную погрешность измерения напряжения на сопротивлении  $r_2$ :

$$\Delta U_2 = \Delta U + \Delta U_1 = 2,5 + 2,5 = 5 \text{ в}$$

Наибольшая возможная относительная погрешность

$$\gamma_{U2} = \frac{\Delta U_2}{U_2} 100\% = \frac{5}{40} * 100 = 12,5\%.$$

**10.** Определить сопротивление шунта к миллиамперметру, рассчитанному на  $0,5 \text{ а}$ , со шкалой на 100 делений, если требуется измерить ток  $25 \text{ а}$ . Каков ток цепи, если стрелка амперметра с этим шунтом отклонилась на 60 делений? Сопротивление миллиамперметра  $r_A = 0,2 \text{ ом}$ .

*Решение*

1. Шунтирующий множитель

$$P_A = \frac{I}{I_A} = \frac{25}{0,5} = 50$$

2. Сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{P_A - 1} = \frac{0,2}{49} = 0,004 \text{ ом}$$

3. Цена деления прибора с шунтом

$$c_I = \frac{25}{100} = 0,25 \text{ а/дел}$$

4. Ток в цепи

$$I = a c_I = 0,25 * 60 = 15 \text{ а}.$$

**11.** Шкала миллиамперметра магнитоэлектрической системы с сопротивлением  $r_A = 2 \text{ Ом}$  разбита на 150 делений, цена деления  $c_I = 0,2 \text{ ма/дел}$ . Определить: а) сопротивление шунта миллиамперметра, если этим прибором необходимо измерить ток  $15 \text{ а}$ ; б) величину добавочного сопротивления, если необходимо измерить напряжение  $150 \text{ в}$ .

*Решение*

1. Ток прибора

$$I = a c_I = 150 * 0,2 = 30 \text{ ма}$$

2. Шунтирующий множитель

$$p_A = \frac{I}{I_H} = \frac{15}{30 * 10^{-3}} = 500$$

3. Сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{p_A - 1} = \frac{2}{499} = 0,004 \text{ ом}$$

4. Напряжение на которое рассчитан прибор

$$U_H = I_H r_A = 30 * 2 = 60 мВ$$

5. Коэффициент расширения предела измерения

$$p_V = \frac{U}{U_H} = \frac{150}{60 * 10^{-3}} = 2,5 * 10^{-3} = 2500$$

6. Добавочное сопротивление

$$r_D = r_V(p_V - 1) = 2 * 2499 = 4998 \text{ ом.}$$

## 6. Задачи

**12.** Амперметр со шкалой на 5 а и сопротивлением 0,6 ом зашунтирован для измерения тока большой величины. При измерении тока  $I=90a$  стрелка прибора остановилась против деления 3,6 а. Определить сопротивление шунта и предел измерений зашунтированного амперметра.

*Решение*

1. Предел измерений определяется из пропорции  $3,6 : 90 = 5 : I_x$ , откуда

$$I_x = \frac{5 * 90}{3,6} = 125 \text{ а}$$

2. Шунтирующий множитель

$$p_A = \frac{I_x}{I_H} = \frac{125}{5} = 25 \text{ или } p_A = \frac{90}{3,6} = 25$$

3. Сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{p_A - 1} = \frac{0,6}{25 - 1} = \frac{0,6}{24} = 0,025 \text{ ом}$$

**13.** Каким образом из магнитоэлектрического вольтметра на 1,5 в с добавочным сопротивлением  $r_D = 145 \text{ ом}$  и сопротивлением рамки 5 ом можно сделать амперметр на 1а? Составить схему прибора.

*Решение*

1. К вольтметру следует подключить шунт, величина которого определяется из следующих соображений. Номинальный ток, на который рассчитан прибор и при котором стрелка отклоняется на всю шкалу, определяется из формулы

$$I = \frac{U}{r_d + r} = \frac{1,5}{145 + 5} = \frac{1,5}{150} = 0,01a = 10ma$$

2. Шунтирующий множитель

$$p_A = \frac{I}{I_H} = \frac{1}{30 * 10^{-3}}$$

3. Сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{p_A - 1} = \frac{150}{99} = 1,52om$$

4. Схема прибора рис. 4.

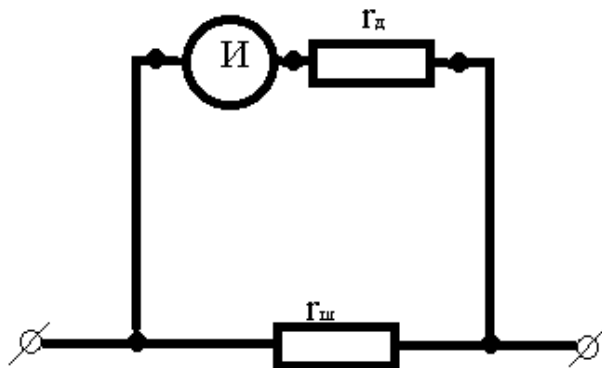


Рис. 4

**14.** Измерительный прибор без шунта сопротивлением  $r_A = 0,28 om$  имеет шкалу на 50 делений, цена деления  $0,01a/дел$ . Определить цену деления этого прибора и предельную величину измеряемого тока при подключении шунта сопротивлением  $r_{ш} = 0,02 om$ .

*Решение*

1. Предельный ток без шунта

$$I = ac_I = 50 * 0,01 = 0,5a$$

2. Шунтирующий множитель определяется из выражения

$$r_{ш} = \frac{r_A}{p_A - 1}; p_A = \frac{r_A}{r_{ш}} + 1 = \frac{0,28}{0,02} + 1 = 15$$

3. Предельный ток, который может быть измерен прибором с шунтом

$$I = I_H p_A = 0,5 * 15 = 7,5 a$$

4. Цена деления прибора с шунтом

$$c_I = \frac{I}{a} = \frac{7,5}{50} = 0,15a/дел$$

15. Амперметр рассчитан на ток  $50 \text{ ма}$ , сопротивление прибора  $r_A = 0,8 \text{ ом}$ . Определить сопротивление шунта для измерения тока до  $10 \text{ а}$ . Как изменится ток, протекающий по амперметру, при не правильном подключении сопротивления шунта (рис. 5) и сопротивлении контактов  $r_k = 0,002 \text{ ом}$ .

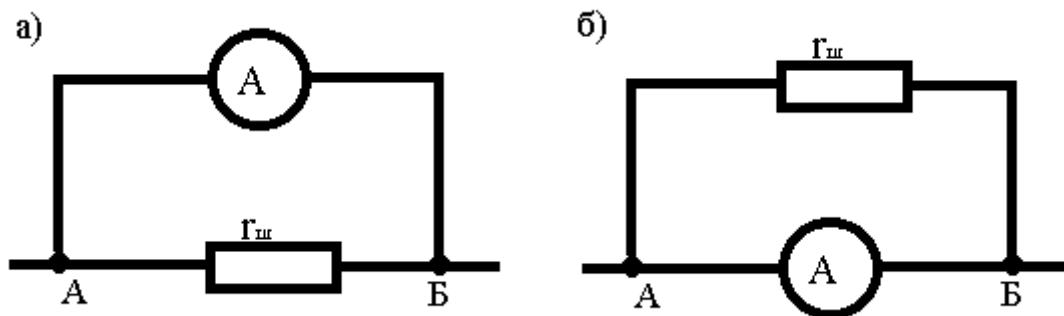


Рис. 5

*Решение*

1. Правильным включением является такое, когда в разрыв цепи измеряемого тока включен шунт, а параллельно ему прибор (рис. 5,а). При этом:

шунтирующий множитель

$$p_A = \frac{10}{0,05} = 200$$

сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{r_A}{p_A - 1} = \frac{0,8}{200 - 1} = 0,004 \text{ ом}$$

ток, протекающий через прибор при небрежно малом сопротивлении контактов,

$$I_A = I \frac{r_{ш}}{r_A + r_{ш}} = 10 \frac{0,004}{0,004 + 0,8} = 0,04974 \text{ а} \approx 50 \text{ ма}$$

т. е. не превышает номинального тока прибора;

при сопротивлении контактов  $r_k = 0,002 \text{ ом}$  протекающий через прибор ток будет

$$I_A' = I \frac{r_{ш}}{r_A + r_{ш} + r_k} = 10 \frac{0,004}{0,004 + 0,8 + 0,002} = 0,0495 \text{ а} = 49,5 \text{ ма}$$

Ток почти не изменился и опасности для прибора не представляет, а вносимая погрешность невелика.

## 7. Измерение сопротивлений, индуктивности и взаимной индуктивности

## Основные определения и формулы

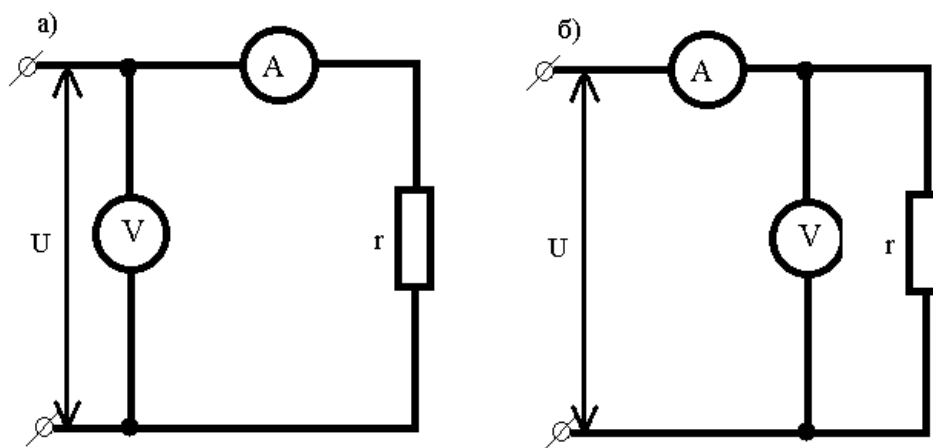


Рис. 6

1. Приближенное значение сопротивления при измерении по методу амперметра и вольтметра

$$r'_x = \frac{U}{I}$$

2. Точное значение сопротивления при измерении методом амперметра и вольтметра по схеме (рис. 6,а)

$$r_x = \frac{U}{I} - r_A$$

Точное значение сопротивления при измерении методом амперметра и вольтметра по схеме (рис. 6,б)

$$r_x = \frac{U r_V}{I r_V - U}$$

Здесь

$U$  – показания вольтметра;

$I$  – показания амперметра;

$r_A$  – сопротивление амперметра;

$r_V$  – сопротивление вольтметра.

3. Сопротивление, измеренное одинарным или двойным мостом,

$$r_x = r \frac{r_1}{r_2}$$

где  $r$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  – сопротивление плеч моста.

#### 4. Сопротивление, измеренное поочередным включением:

а) вольтметра – вначале непосредственно в сеть, а затем последовательно с измеряемым сопротивлением

$$r_x = r_V \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right)$$

Где  $U_1$  – показания вольтметра при подключении вольтметра непосредственно к сети;

$U_2$  – то же при подключении вольтметра к сети последовательно с измеряемым сопротивлением;

$r_V$  – сопротивление вольтметра.

б) амперметра – вначале в сеть последовательно с известным сопротивлением, а затем последовательно с измеряемым сопротивлением

$$r_x = \frac{I_0}{I_1} (r_0 + r_A) - r_A$$

Где  $I_1$  – показания амперметра при включении измеряемого сопротивления;

$I_0$  – то же при включении известного сопротивления;

$r_0$  – известное сопротивление;

$r_A$  – сопротивление амперметра.

#### 5. Сопротивление, измеренное по методу вольтметра и гальванометра,

$$r_x = \frac{U_2}{c_I p_2 a_2} - r$$

Здесь  $r$  - образцовое сопротивление;

$U_2$  – показания вольтметра при включении измеряемого сопротивления;

$p_2$  – шунтирующий множитель многопредельного шунта;

$a_2$  – число делений шкалы, на которое отклоняется гальванометр при измерении искомого сопротивления;

$c_I$  – постоянная гальванометра, равная

$$c_I = \frac{U_1}{r p_1 a_1}$$

Где  $U_1$  – показания вольтметра при определении постоянной гальванометра;

$r_1$  – шунтирующий множитель;

$a_1$  – число делений гальванометра при определении  $c_1$ .

6. Сопротивление изоляции проводов двухпроводной линии, находящейся под напряжением, на землю:

первого провода

$$r_1 = r_V \frac{U - U_1 - U_2}{U_2}$$

второго провода

$$r_2 = r_V \frac{U - U_1 - U_2}{U_1}$$

где  $r_V$  – сопротивление вольтметра;

$U$  – напряжение сети;

$U_1, U_2$  – напряжение между соответствующими фазами и землей.

7. Сопротивление заземления, измеренное методом трех электродов

$$r_x = \frac{r_{12} + r_{13} + r_{23}}{2}$$

где  $r_{12}$  – сопротивление между первым (основным) и вторым (вспомогательным) заземлениями;  $r_{13}$  – то же между первым и третьим заземлениями;  $r_{23}$  – то же между вторым и третьим заземлениями.

8. Сопротивление, измеренное методом сравнения с образцовым сопротивлением, при последовательном соединении сопротивлений

$$r_x = r_0 \frac{U_x}{U_0}$$

где  $r_0$  – значение образцового сопротивления;

$U_0$  – напряжение, измеренное потенциометром на потенциальных зажимах образцового сопротивления

$U_x$  – напряжение на потенциальных зажимах измеряемого сопротивления.

9. Сопротивление, измеренное методом сравнения с образцовым сопротивлением, при параллельном соединении сопротивлений

$$r_x = r_0 \frac{I_x}{I_0}$$

где  $r_0$  – значение образцового сопротивления;

$I_0, I_x$  – токи в образцовом и измеряемом сопротивлениях, измеренные амперметром или потенциометром.

10. Расстояние до места повреждения кабеля определяется методом петли по формуле

$$L_x = 2L \frac{k}{1+k}$$

где  $L$  – длина жилы кабеля;

$k$  – отношение сопротивлений поврежденной и исправной жилы:

$$k = \frac{r_1}{r_2}$$

$r_1$  – сопротивление в цепи поврежденной жилы;

$r_2$  – сопротивление в цепи исправной жилы.

11. Индуктивность при измерении методом амперметра и вольтметра

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - r^2}$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи;

$r$  – активное сопротивление катушки, известное или определяемое одним из методов измерения сопротивлений;

$\omega$  – угловая частота.

12. Взаимная индуктивность при измерении методом амперметра и вольтметра

$$M = \frac{E_2}{I_1 \omega}$$

где  $E_2$  – вторичная ЭДС;

$I_1$  – ток в первичной цепи.

13. Индуктивность при измерении методом ваттметра

$$L = \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{U^2 I^2 - P^2}$$

где  $U, I, P$  – показания приборов.

14. Взаимная индуктивность, измеряемая методом согласного и встречного включения катушек,

$$M = \frac{L_a - L_6}{4}$$

где  $L_a$  – индуктивность катушек, включенных последовательно согласно;

$L_6$  – индуктивность катушек, включенных последовательно встречно.

Значения  $L_a$  и  $L_6$  могут быть определены одним из методов измерения индуктивности, в частности методом амперметра и вольтметра:

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_a^2 - (r_1 + r_2)^2}; \quad L_6 = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_6^2 - (r_1 + r_2)^2}$$

15. Значение емкости определяется при измерении: методом амперметра и вольтметра

$$C_x = \frac{1}{\omega U}$$

метод ваттметра

$$C_x = \frac{I^2}{\omega \sqrt{U^2 I^2 - P^2}}$$

методом баллистического гальванометра

$$C_x = \frac{U_1}{U_2} C_0 \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

где  $U_1$  – показания вольтметра при зарядке образцовой емкости  $C_0$ ;

$U_2$  – то же, но измеряемой емкости  $C_x$ ;

$\alpha_1$  – угол отклонения (число делений шкалы) при разрядке образцовой емкости  $C_0$ ;

$\alpha_2$  – то же, но измеряемой емкости  $C_x$ .

## 8. Задачи

**16.** Амперметр сопротивлением  $r_A = 0,01$  ом и вольтметр сопротивлением  $r_V = 25$  ом применяются в схеме для измерения сопротивления якоря электродвигателя. Составить схему измерения методом амперметра и вольтметра, а также определить приближенное и точное значение сопротивления и относительную погрешность, допускаемую при определении сопротивления по приближенной формуле, если наиболее

вероятные значения тока и напряжения, получены в результате повторных измерений, следующие:  $I = 8,5 \text{ а}$ ,  $U = 1,25 \text{ в}$ .

*Решение*

1. Вследствие того, что измеряемое сопротивление может быть небольшим, до целых значений *ома*, схема измерения должна быть такой, как показано на рис. 6,б.

2. Приближенное значение сопротивления равно

$$r'_x = \frac{U}{I} = \frac{1,25}{8,5} = 0,147 \text{ ом}$$

3. Точное значение сопротивления для данной схемы

$$r_x = \frac{Ur_V}{Ir_V - U} = \frac{1,25 \cdot 25}{8,5 \cdot 25 - 1,25} = 0,148 \text{ ом}$$

4. Относительная погрешность измерения

$$\gamma_r = \frac{r'_x - r_x}{r_x} 100\% = \frac{0,147 - 0,148}{0,148} 100 = -0,61\%$$

**17.** Для измерения сопротивления  $r = 200 \text{ ом}$  используется амперметр  $r_A = 0,05 \text{ ом}$ , вольтметр сопротивлением  $r_V = 10 \text{ ком}$ . Какая из двух схем (рис. 6, а и б) измерения сопротивления методом амперметра и вольтметра дает меньшую погрешность измерения?

*Решение*

Схема рис. 6, а

1. Значение эквивалентного сопротивления

$$r_3 = \frac{U}{I} = \frac{U_r + U_A}{I} = \frac{Ir + Ir_A}{I} = r + r_A$$

2. Относительная погрешность

$$\gamma_r = \frac{r_3 - r}{r} 100\% = \frac{r + r_A - r}{r} 100\% = \frac{r_A}{r} 100\%$$

Подставим значения сопротивлений, получим

$$\gamma_r = \frac{r_A}{r} 100\% = \frac{0,05}{200} 100 = 0,025\%$$

Схема рис. 6, б

1. Значение эквивалентного сопротивления

$$r_3 = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{\frac{U}{r} + \frac{U}{r_V}} = \frac{U}{\frac{Ur_V + Ur}{r_V r}} = \frac{r_V r}{r_V + r}$$

2. Относительная погрешность

$$\gamma_r = \frac{r_3 - r}{r} 100\% = \frac{r}{r_V + r} 100\% = \frac{-2 * 10^2}{2 * 10^2 + 100 * 10^2} 100 = -1,96\%$$

Первая схема дает меньшую погрешность.

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

*Решение*

Первый способ решения

1. Сопротивление вольтметра

$$r_V = \frac{U_V}{I_V} = \frac{150}{30 * 10^{-3}} = 5 * 10^3 \text{ ом} = 5 \text{ ком}$$

2. Ток в цепи с сопротивлением

$$I = \frac{U_2}{r_V} = \frac{100}{5000} 0,02 \text{ а} = 20 \text{ ма}$$

3. Падение напряжения на сопротивлении

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 120 - 100 = 20 \text{ в}$$

4. Значение неизвестного сопротивления

$$r_x = \frac{\Delta U}{I} = \frac{20}{0,02} = 1000 \text{ ом} = 1 \text{ ком}$$

Второй способ решения

1. При включении вольтметра последовательно с искомым сопротивлением последнее будет играть роль добавочного сопротивления, а показания вольтметра можно рассматривать как номинальное напряжение. Тогда

$$r_x = r_d = r_V(p - 1) = r_V \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) = 5 \left( \frac{120}{100} - 1 \right) = 5 * 0,2 = 1 \text{ ком}$$

**19.** При подключении катушки индуктивности к источнику постоянного тока амперметр показал  $I = 12 \text{ а}$ , вольтметр  $U = 24 \text{ в}$ . При подключении к сети переменного

тока показания стали:  $I = 2a$ ,  $U = 24$  в. Частота  $50$  гц. Определить индуктивность катушки.

*Решение*

1. По показаниям приборов на постоянном токе определим активное сопротивление катушки:

$$r_k = \frac{U}{I} = \frac{24}{12} = 2 \text{ ом}$$

2. По показаниям приборов на переменном токе определим полное сопротивление катушки:

$$Z_k = \frac{U}{I} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ом}$$

3. Индуктивность катушки

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - r^2} = \frac{1}{314} \sqrt{144 - 4} = \frac{1}{314} \sqrt{140} \text{ гн} = 31,6 \text{ мгн}$$

**20.** При включении двух последовательно соединенных катушек в цепь постоянного тока показания приборов были  $I = 2a$ ,  $U = 12$  в. При согласном включении их в цепь переменного тока частотой  $50$  гц напряжением  $120$  вольтметр показал  $5a$ , при встречном –  $6a$ . Определить взаимную индуктивность катушек.

*Решение*

1. Активное сопротивление обеих катушек по показаниям приборов на постоянном токе

$$r = \frac{U}{I} = \frac{12}{2} = 6 \text{ ом}$$

2. При согласном включении катушек:

$$Z_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{120}{5} = 24 \text{ ом}$$

индуктивность двух последовательных катушек

$$L_a = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z_1^2 - r^2} = \frac{1}{314} \sqrt{24^2 - 6^2} = 0,074 \text{ гн}$$

3. При встречном включении катушек:

полное сопротивление катушек

$$Z_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{120}{5} = 20 \text{ ом}$$

индуктивность обеих катушек

$$L_6 = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_2^2 - r^2} = \frac{1}{314} \sqrt{20^2 - 6^2} = 0,064 \text{ гн}$$

4. Взаимная индуктивность катушек

$$M = \frac{L_a - L_6}{4} = \frac{0,074 - 0,064}{4} = 0,064 \text{ гн}$$

**21.** Сопротивление изоляции двухпроводной линии, работающей под напряжением 120 в, измерялось вольтметром с внутренним сопротивлением 36 ком. Напряжение между проводами и землей оказались  $U_1 = 25$  в,  $U_2 = 60$  в. Определить значение сопротивления изоляции на землю и оценить качество изоляции.

*Решение*

1. Сопротивление первого провода на землю

$$r_1 = r_V \frac{U - U_1 - U_2}{U_2} = 36 * \frac{120 - 25 - 60}{60} = 36 * \frac{35}{60} = 21 \text{ ком}$$

2. Сопротивление второго провода на землю

$$r_2 = r_V \frac{U - U_1 - U_2}{U_1} = 36 * \frac{120 - 25 - 60}{25} = 36 * \frac{35}{25} = 50,4 \text{ ком}$$

Изоляция ослаблена, так как нужно не менее 120 ком.

## 9. Измерение мощности, энергии и коэффициента мощности

Основные определения и формулы

1. Измерение мощности в цепях постоянного тока (кроме измерения методом амперметра и вольтметра) осуществляется включением электродинамического вольтметра по двум схемам (рис. 7, а, б).

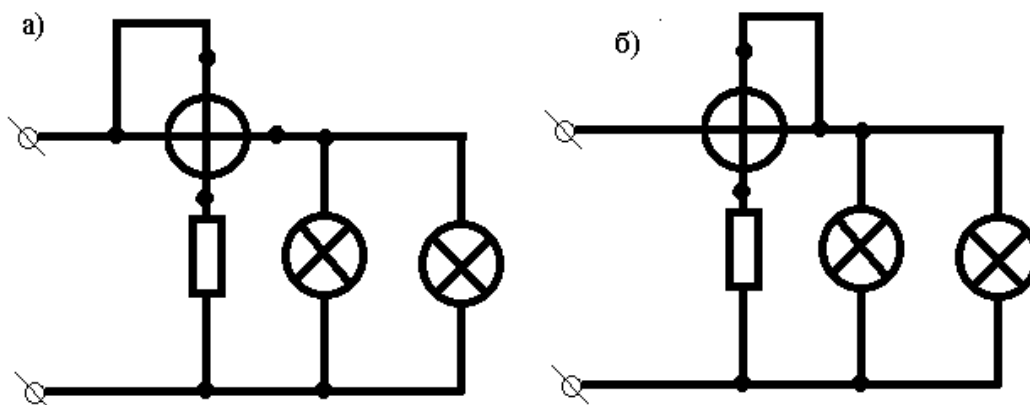


Рис. 7

По схеме рис. 7, а

$$P = UI + U_a I$$

где  $P$  – показания ваттметра;

$U_a$  – падение напряжения на последовательной обмотке;

$UI$  – действительное значение потребляемой мощности.

По схеме рис. 7, б

$$P = UI + UI_V$$

где  $I_V$  – ток, протекающий через рамку вольтметра.

2. Измерение активной мощности переменного тока осуществляется:

а) в четырехпроводных цепях трехфазного тока включением однофазных ваттметров в каждую фазу:

$$P = P_A + P_B + P_C$$

где  $P_A, P_B, P_C$  – показания ваттметров соответствующих фаз.

б) в трех проводных цепях трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз включением ваттметра в одну фазу, при этом мощность всей цепи определяется по формуле

$$P = 3P_\phi$$

где  $P_\phi$  – показания ваттметра в одной фазе.

в) в трех проводных цепях трехфазного тока при неравномерной нагрузке фаз методом двух ваттметров

$$P = P_1 + P_2$$

где  $P_1, P_2$  – показания ваттметров, включенных в две фазы трехпроводной цепи.

При одинаковой нагрузке фаз  $P_1$  и  $P_2$  могут быть определены по формулам

$$P_1 = U_L I_\phi \cos(30^\circ - \varphi); \quad P_2 = U_L I_\phi \cos(30^\circ + \varphi)$$

где  $U_L$  – линейное напряжение;

$I_\phi$  – фазный ток;

$\varphi$  – угол сдвига фаз.

3. В цепях трехфазного тока с применением измерительных трансформаторов тока и напряжения активная мощность равна

$$P_1 = k_{HI} k_{HU} P$$

где  $P_1$  – искомая мощность первичной цепи;

$P$  – показания ваттметра;

$k_{HI}$  – номинальный коэффициент трансформации по току;

$k_{HU}$  – номинальный коэффициент трансформации по напряжению.

4. Измерение реактивной мощности в цепях переменного тока производится путем применения специальных схем включения ваттметров. Однако в трехпроводной цепи реактивную мощность можно определить также по показаниям двух ваттметров:

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$$

где  $P_1, P_2$  – показания ваттметров активной мощности.

5. Определение средневзвешенного коэффициента мощности производится по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{W_p}{W_a}$$

где  $W_a, W_p$  – показания счетчиков активной и реактивной энергии/

При установке двух счетчиков активной энергии необходимое значение реактивной энергии определяется по формуле

$$W_p = \sqrt{3} (W_{a1} - W_{a2})$$

где  $W_{a1}, W_{a2}$  – показания первого и второго счетчиков.

6. Измерение энергии в цепях переменного тока производится так же методами, что и измерение мощности, только в схемах вместо ваттметров применяются счетчики.

7. Номинальная постоянная счетчика

$$c_H = \frac{W}{N} \text{вт} \cdot \text{сек/об}$$

где  $W$  – энергия, регистрируемая счетчиком за определенное число оборотов;

$N$  – число оборотов счетчика.

8. Действительная постоянная счетчика

$$c = \frac{Pt}{N_1} \text{вт} * \text{сек/об}$$

где  $P$  – мощность, которая поддерживалась при испытании или поверке счетчика, или мощности приемника;

$N_1$  – число оборотов, которое сделал диск счетчика за время испытания или работы;

$t$  – время испытания или работы.

9. Абсолютная погрешность счетчика

$$\Delta c = c_H - c$$

10. Относительная погрешность счетчика

$$\gamma = \frac{c_H - c}{c} 100\%$$

11. Поправочный коэффициент, т. е. величина на которую надо умножить показания счетчика, чтобы получить действительно израсходованную энергию,

$$k = \frac{c_H}{c}$$

12. Относительная погрешность измерения мощности энергии, вносимая при включении ваттметров и счетчиков через измерительные трансформаторы и зависящая от погрешностей самих трансформаторов, а также от угла сдвига фаз нагрузки, может быть определена по формулам:

при измерении мощности в однофазной цепи переменного тока

$$\gamma = \gamma_U + \gamma_I + 0,0291 \operatorname{tg} \varphi (\delta_U - \delta_I)$$

при измерении мощности по схеме двух ваттметров в цепи трехфазного переменного тока

$$\begin{aligned} \gamma = & \frac{1}{2} (\gamma_{I1} + \gamma_{I2} + \gamma_{U1} + \gamma_{U2}) + 0,00842 (\delta_{I1} - \delta_{U1} - \delta_{I2} + \delta_{U2}) + \\ & + 0,289 \operatorname{tg} \varphi (\gamma_{I2} + \gamma_{U2} - \gamma_{I1} - \gamma_{U1}) + 0,0145 \operatorname{tg} \varphi (\delta_{I1} - \delta_{U1} + \delta_{I2} - \delta_{U2}) \end{aligned}$$

при чисто активной нагрузке

$$\gamma = \frac{1}{2} (\gamma_{I1} + \gamma_{I2} + \gamma_{U1} + \gamma_{U2}) + 0,00842 (\delta_{I1} - \delta_{U1} - \delta_{I2} + \delta_{U2})$$

где  $\gamma_U, \gamma_I$  – относительные погрешности трансформаторов по току и напряжению соответствующих фаз;

$\delta_U, \delta_I$  – угловые погрешности трансформаторов, мин;

$\varphi$  – угол сдвига фаз нагрузки, град.

## 10. Задачи

**22.** Для определения мощности электропечи были измерены: напряжение сети 220 в вольтметром на 300 в класса точности 1,5; ток 350а амперметром на 500 а класса точности 2,5. Рассчитать мощность печи и наибольшую возможную абсолютную и относительную погрешности при ее измерении. Составить схему измерения.

*Решение*

1. Мощность печи

$$P = UI = 220 * 350 = 77\text{квт}$$

2. Наибольшая относительная погрешность измерения напряжения

$$\gamma_U = \gamma_D \frac{U_H}{U_1} = 1,5 \frac{300}{200} = 2,2\%$$

3. Наибольшая относительная погрешность измерения тока

$$\gamma_I = \gamma_D \frac{I_H}{I_1} = 2,5 \frac{500}{350} = 3,6\%$$

4. Наибольшая относительная погрешность измерения мощности

$$\gamma_P = \gamma_U + \gamma_I = 2,2 + 3,6 = 5,8\%$$

5. Наибольшая абсолютная погрешность измерения мощности

$$\Delta P = \frac{\gamma_D P}{100\%} = \frac{5,5 * 77}{100} = 4,5\text{квт}$$

**23.** При измерении мощности приемника постоянного тока напряжением 120 в использован электродинамический ваттметр:  $U_H = 120$  в,  $I_H = 2,5$ а; сопротивление  $r_a$  последовательной обмотки 0,12 ом, номинальный ток параллельной обмотки  $I_B = 30$  ма. По какой схеме следует включить ваттметр, чтобы при протекании максимального тока получить наименьшую погрешность?

*Решение*

1. Мощность (по схеме рис. 7,а)

$$P = U' I_B = I_H (U_H + U_a) = U_H I_H + I_H^2 r_a = 120 * 2,5 + (2,5^2) * 0,12 = 300,75\text{вт}$$

2. Мощность (по схеме рис. 7,б)

$$P = I' U_H = I_H U_H + U_H I_a = 120 * 2,5 + 120 * 0,03 = 303,6\text{вт}$$

3. Пологая, что  $P_n = U_n I_n = 120 \cdot 2,5 = 300 \text{ вт}$  – Истинное значение мощности, относительная погрешность измерения будет:

для схемы 7, а

— — —

для схемы 7, б

— —

**24.** В цепи трехфазного тока мощность измеряется по схеме двух ваттметров, нагрузка фаз равномерная, фазный ток  $5 \text{ а}$ , линейное напряжение  $120 \text{ в}$ , полная мощность, измеренная ваттметрами, составляет  $807 \text{ вт}$ . Определить показания каждого ваттметра.

*Решение*

1. Показания ваттметров могут быть определены по формулам

$$\cos(30^\circ - \varphi) \quad \cos(30^\circ + \varphi)$$

2. Неизвестным является только значение угла  $\varphi$ , которое определим из формулы

—

где  $P = 807 \text{ вт}$  по показаниям ваттметров;

$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{ф}}$  – полная мощность цепи по показаниям приборов.

—

$\text{ва};$

—

3. Показания ваттметров определим по формулам

$$\cos(30^\circ - 39^\circ) \quad 2 \text{ вт};$$

$$\cos(30^\circ + 39^\circ) \quad \text{вт}$$

4. Проверка

$807 \text{ вт}$

**25.** Амперметр на ток  $5 \text{ а}$ , вольтметр на  $110 \text{ в}$ , ваттметр на  $5 \text{ а}$  и  $120 \text{ в}$  со шкалой на 120 делений включены через трансформаторы тока  $100/5$  и напряжения  $6000/100$  для измерения тока, напряжения и мощности потребителя. Амперметр показывает  $4 \text{ а}$ , вольтметр  $110 \text{ в}$ . Определить мощность цепи и показания ваттметра в делениях шкалы при различных значениях  $\cos\varphi$ : 1; 0,5; 0,3.

*Решение*

1. Коэффициент трансформации:

по току

$$k_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{100}{5} = 20$$

по напряжению

$$k_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6000}{100} = 60$$

2. Цена деления ваттметра

$$C_p = \frac{IU}{n} = \frac{5 \cdot 120}{120} = 5 \text{ вт/дел}$$

3. При  $\cos \varphi = 1$  вся мощность будет активной. Показания ваттметра

$$P = UI \cos \varphi = 4 \cdot 110 = 440 \text{ вт}$$

Показания ваттметра в делениях шкалы

$$P' = \frac{440}{5} = 88 \text{ дел}$$

Мощность цепи

$$P_1 = P' C_p k_I k_U = 88 \cdot 5 \cdot 20 \cdot 60 = 528 \text{ квт}$$

4. При  $\cos \varphi = 0,5$  показания ваттметра

$$P = UI \cos \varphi = 4 \cdot 110 \cdot 0,5 = 220 \text{ вт}$$

Показания ваттметра в делениях шкалы

$$P' = \frac{220}{5} = 44 \text{ дел}$$

Мощность цепи

$$P_1 = P' C_p k_I k_U = 44 \cdot 5 \cdot 20 \cdot 60 = 264 \text{ квт}$$

5. При  $\cos \varphi = 0,3$  показания ваттметра

$$P = UI \cos \varphi = 4 \cdot 110 \cdot 0,3 = 132 \text{ вт}$$

Показания ваттметра в делениях шкалы

$$P' = \frac{132}{5} = 26,4 \text{ дел}$$

Мощность цепи

$$P_1 = P' C_p k_I k_U = 26,4 * 5 * 20 * 60 = 158,4 \text{ квт.}$$

**26.** На счетчике написано «400 оборотов якоря = 1 гвтч». Определить потребляемую мощность, если диск счетчика сделал за 30 сек 10 оборотов.

*Решение*

1. Мощность потребления

$$P = \frac{W}{t}$$

2. Для счетчика дано, что 400 оборотов якоря = 1 гвтч. Зная, что 1 гвтч = 100 вт, 1 час = 3600 сек, получим

$$400 \text{ оборотов} = 100 * 3600 = 36 * 10^4 \text{ вт*сек}$$

3. Энергия регистрируемая счетчиком за один оборот

$$C_H = \frac{W}{N} = \frac{36 * 10^4}{4 * 10^2} = 9 * 10^2 \text{ вт*сек/об}$$

4. Энергия регистрируемая счетчиком за 30 сек

$$W = C_H N' = 9 * 10^2 * 10 = 9 * 10^3 \text{ вт*сек}$$

5. Мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P = \frac{W}{t} = \frac{9 * 10^3}{30} = 0,3 * 10^3 = 300 \text{ вт.}$$

**27.** При проверке счетчика постоянного тока поддерживались неизменными: напряжение 120 в, ток 7 а. В течение трех интервалов времени длительностью 5 мин каждый были измерены число оборотов счетчика, которые оказались равными 175, 176, 174. Чему равна постоянная счетчика?

*Решение*

1. Мощность потребителя

$$P = UI = 120 * 7 = 840 \text{ вт}$$

2. Среднее значение числа оборотов за 5 мин

$$N = \frac{175 + 176 + 174}{3} = 175 \text{ оборотов}$$

3. Энергия, потребляемая за промежуток времени, равный 5 мин,

$$W = Pt = 840 * 5 * 60 = 840 * 300 = 252000 \text{ вт} * \text{сек}$$

4. Постоянная счетчика

$$c = \frac{W}{N} = \frac{252000}{175} = 1440 \text{ вт} * \text{сек} / \text{об}$$

28. Для проверки однофазного счетчика активной энергии типа СО на ток 5 а и напряжение 127 в, для которого 1 квтч равняется 2500 оборотов диска, воспользовались электродинамическим ваттметром со шкалой на 150 делений при  $U_H = 150$  в,  $I_H = 5$  а. Отклонение ваттметра составило 92 деления. За 3 мин счетчик сделал 57 оборотов. Определить погрешность счетчика.

Решение

1. Номинальная постоянная счетчика

$$c_H = \frac{W}{N} = \frac{1000 * 60 * 60}{2500} = 1440 \text{ вт} * \text{сек} / \text{об}$$

2. Для определения действительной постоянной надо определить мощность, для чего найдем цену деления ваттметра:

$$c_p = \frac{IU}{n} = \frac{5 * 150}{150} = 5 \text{ вт} / \text{дел}$$

Следовательно, мощность

$$P = Nc_p = 92 * 5 = 460 \text{ вт}$$

3. Действительная постоянная счетчика

$$c = \frac{Pt}{N} = \frac{460 * 3 * 60}{57} = 1450 \text{ вт} * \text{сек} / \text{об}$$

4. Абсолютная погрешность

$$\Delta c = c_H - c = 1440 - 1450 = -10 \text{ вт} * \text{сек} / \text{об}$$

5. Относительная погрешность

$$\gamma = \frac{c_H - c}{c} 100\% = -\frac{10 * 100}{1450} = -0,69\%$$

29. На щитке счетчика написано «120 в, 5 а, 1 квтч = 500 оборотов диска». Определить номинальную и относительную погрешности, поправочный коэффициент  $k$ , если при поверке счетчика при постоянном напряжении 120 в и токе 4 а его диск сделал 42 оборота за 1 мин.

Решение

1. Номинальная постоянная счетчика

$$c_H = \frac{W}{N} = \frac{1 \cdot 100 \cdot 60 \cdot 60}{500} = 720 \text{ вт} \cdot \text{сек/об}$$

2. Действительная постоянная счетчика

$$c = \frac{IUt}{N_1} = \frac{120 \cdot 4 \cdot 60}{42} = 686 \text{ вт} \cdot \text{сек/об}$$

3. Абсолютная погрешность

$$\Delta c = c_H - c = 720 - 686 = 34 \text{ вт} \cdot \text{сек/об}$$

4. Относительная погрешность

$$\gamma = \frac{c_H - c}{c} 100\% = -\frac{720 - 686}{686} 100 = 4,96\%$$

5. Поправочный коэффициент, показывающий, во сколько раз надо уменьшить показания счетчика, чтобы получить действительно израсходованную энергию,

$$k = \frac{W}{W_H} = \frac{c}{c_H} = \frac{686}{720} 0,953$$

## 11. Выбор измерительной аппаратуры

### Основные рекомендации

При выборе измерительной аппаратуры необходимо руководствоваться следующими соображениями.

1. По роду тока определяется система измерительного прибора. Приборы магнитоэлектрической системы поверяются и применяются только в цепях постоянного тока; индивидуальные – только в цепях переменного тока; термоэлектрические и электромагнитные приборы – как на постоянном, так и на переменном токе. Следует обращать внимание на знак рода тока на шкале прибора.

2. При выборе образцового прибора по его номинальной величине необходимо, чтобы его верхний предел измерения был равен или близок верхнему пределу измерения поверяемого прибора, но не меньше.

3. При выборе по классу точности образцовый прибор должен иметь класс точности не менее чем в три раза выше класса точности поверяемого прибора. Приборы классов 1,5 и 2,5 поверяются Образцовым прибором класса 0,5; приборы класса 1,0 – образцовым прибором класса 0,2; приборы класса 0,5 – приборами класса 0,1; приборы класса точности 0,1 и 0,2 поверяются компенсаторами с применением нормальных элементов 2,0 класса.

4. Схема поверки и применяемая аппаратура должны обеспечивать:

а) возможность плавной регулировки показания приборов на протяжении всей рабочей части шкалы при поверке всех оцифрованных делений шкалы;

б) наименьший расход энергии;

в) удобство в работе.

## 12. Задачи

30. Для измерения методом амперметра и вольтметра сопротивления, величина которого может находиться в пределах от 0,2 до 3 ом, имеется следующее оборудование: источник тока напряжением 6 в и допустимым током 6 а; реостат для регулирования тока сопротивлением 0,5 ом и допустимым током 10а. Подобрать необходимые измерительные приборы (амперметр и вольтметр) при условии, что измерение должно производиться с точностью не менее 3%.

Решение

1. Схема измерения приведена на рис. 8.

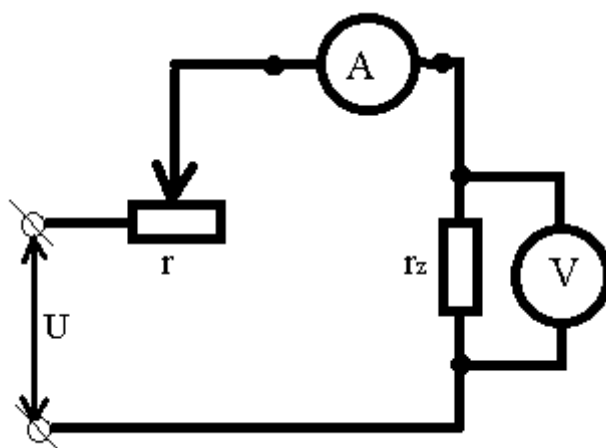


Рис. 8

2. Определим возможные пределы измерения по току.

При включении реостата  $r = 0,5$  ом и измеряемого сопротивления 0,2 ом ток будет равен

$$I_1 = \frac{U}{r+r_1} = \frac{6}{0.5+0.2} = 8.5a$$

При другом крайнем значении измеряемого сопротивления 3 ом ток будет

$$I_2 = \frac{U}{r+r_2} = \frac{6}{0.5+3} = 1,71a$$

Если выбрать амперметр на  $10\text{ а}$ , то измерения во втором случае будут очень неточным, так как показания прибора будут находится в пределах примерно  $1/5$  шкалы. Для того, чтобы при измерении наименьшего сопротивления ток не превышал  $5\text{ а}$ , общее сопротивление схемы должно быть

$$r = \frac{U}{I} = \frac{6}{5} = 1,2\text{ ом}$$

Руководствуясь табл. 1 приложения, выбираем реостат с сопротивлением  $r_p = 1\text{ ом}$ . В этом случае ток при измерении наибольшего измеряемого сопротивления будет

$$I = \frac{U}{r+r_p} = \frac{6}{4} = 1,5\text{ а}$$

Амперметр по току выбираем  $5\text{ а}$ . При определении его класса точности исходим из указанной в условии точности  $3\%$ . Так как для этого случая относительная погрешность измерения  $\gamma_r = \gamma_U + \gamma_I$ , а погрешность амперметра и вольтметра принимается равными, погрешностью от каждого прибора будет  $1,5\%$

Класс точности при измерении методом непосредственной оценки

$$\gamma_d = \frac{\gamma_H I_2}{I_H} = \frac{1,5 * 1,5}{5} = 0,45\%$$

Выбираем амперметр класса точности  $0,5$ .

Для выбора вольтметра определим пределы напряжения на измеряемом сопротивлении:

$$U_1 = I_1 r_1 = 5 * 0,2 = 1\text{ в}$$

$$U_2 = I_2 r_2 = 1,5 * 3 = 4,5\text{ в}$$

По номинальному напряжению выбираем вольтметр на  $5\text{ в}$ .

Для определения класса точности исходим из ранее определенной условием точности  $1,5\%$ . Необходимый класс точности находим по формуле

$$\gamma_d = \frac{\gamma_U U_2}{U_H} = \frac{1,5 * 1}{5} = 0,3\%$$

Выбираем вольтметр класса точности  $0,2$ .

Проверим, какая погрешность будет при выбранных классах точности приборов для худших случаев измерения:

$$\gamma_I = \gamma_d \frac{I_H}{I_1} = 0,5 \frac{5}{1,5} = \frac{2,5}{1,5} = 1,66\%$$

$$\gamma_U = \gamma_d \frac{U_H}{U_1} 0,2 \frac{5}{1} = \frac{2,5}{1,5} = 1\%$$

Общая погрешность измерения будет

$$\gamma_r = \gamma_U + \gamma_I = 1,66 + 1 = 2,66\%$$

**31.** Подобрать необходимую аппаратуру для проверки индукционного ваттметра класса точности 1,5 с номинальными значениями: тока 5 а, напряжения 120 в, мощности 600 вт. Поверка ведется по схеме с регулированием тока и напряжения. Составить схему измерения.

*Решение*

1. Выбираем схему, в которой возможно регулировать как ток, так и напряжение (рис. 9).

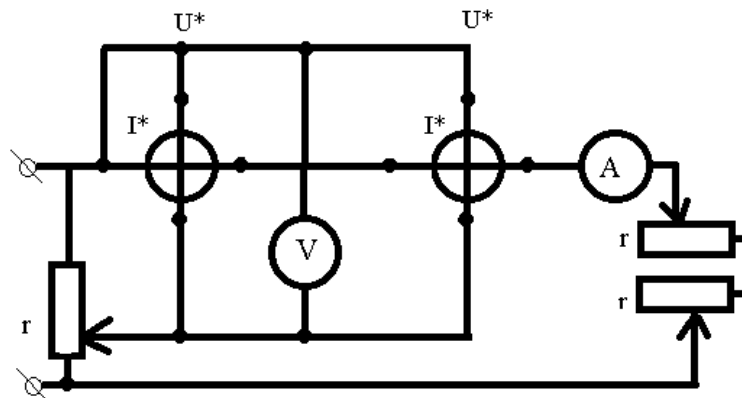


Рис. 9

2. Образцовый ваттметр выбираем электродинамической системы класса точности 0,5, что в три раза выше класса точности испытуемого ваттметра. Его номинальные данные: ток 5 а, напряжение 150 в, мощность 750 вт, шкала на 150 делений.

3. Так как вольтметр и амперметр не используются при определении погрешности ваттметра, а служат только для контроля режима работы цепи, выбираем амперметр электромагнитной системы на ток 5а класса точности 1,5; вольтметр также электромагнитной системы напряжением 150 в класса точности 1,5.

4. Сопротивление необходимых реостатов определяется следующим образом. Первая оцифрованная точка шкалы поверяемого ваттметра соответствует примерно 10 % номинальной мощности ваттметра. Примем для расчета  $P = 60$  вт, что соответствует току в цепи

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{120} = 0,5 \text{ а}$$

сопротивление реостата

$$r = \frac{U}{I} = \frac{120}{0,5} = 240 \text{ ом}$$

Подбираем сопротивление двух реостатов  $r_1$  и  $r_2$  (см. рис. 9) так, чтобы обеспечить возможность получения сопротивления  $240 \text{ ом}$  при токе  $5 \text{ а}$ .

5. Сопротивление потенциометра для питания параллельных ветвей определяется из следующих соображений:

а) по данным табл. 2 (см. приложение) определяем мощность параллельных цепей

$$P_{\text{пц}} = P_1 + P_2 + P_3 = 6 + 5 + 6 = 17 \text{ в а}$$

б) ток, потребляемый параллельными цепями,

$$I_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{U} = \frac{17}{120} = 0,141 \text{ а}$$

в) сопротивление параллельных цепей

$$r_{\text{пц}} = \frac{U_{\text{пц}}}{I} = \frac{120}{0,14} = 857 \text{ ом}$$

Руководствуясь табл. 1 приложения, выбираем потенциометр сопротивлением  $r = 830 \text{ ом}$  и с доступным током  $0,7 \text{ а}$ . Потенциометр с меньшим сопротивлением брать не рекомендуется, потому что мощность собственного потребления увеличится. При выборе же сопротивления, большего, чем сопротивление параллельных цепей, нельзя будет добиться регулировки напряжения на потенциометре.

г) суммарный ток реостата

$$I_p = \frac{U}{r} + I_{\text{пц}} = \frac{120}{830} + 0,141 = 0,285 \text{ а}$$

## Приложение

### Таблица 1

Нормальный ток, <i>a</i>	Номинальное сопротивление реостатов, <i>ом</i>	
	Малой модели	Большой модели
0,20	4300	6000
0,35	2200	3400
0,45	1290	1960
0,60	820	1250
0,75	545	830
0,90	380	580
1,0	280	424
1,4	160	245
1,7	100	155
2,1	68	104
2,6	48	73
3,0	35	53
3,4	26	40
4,0	20	31
4,5	16	24
5,0	12,5	19
5,5	10,5	16
6,2	8,5	13
7,0	7,0	11

### Таблица 2

Приборы		Мощность, <i>вт (ва)</i>	
		Амперметров и последовательных обмоток при токе $5a$	Вольтметров и параллельных цепей при напряжении 100 <i>в</i>
Амперметры	магнитоэлектрические	0,2 – 0,5	–
»	детекторные	0,2 – 0,5	–
»	термоэлектрические	1 – 2,5	–
»	электромагнитные	1 – 2,5	–
»	электродинамические	3,5 – 10	–
»	индукционные	4 – 7,5	–
»	тепловые	2 – 2,5	–
Вольтметры	магнитоэлектрические	–	0,1 – 1
»	детекторные	–	0,1 – 1
»	электромагнитные	–	4 – 6
»	электродинамические	–	6 – 12
»	индукционные	–	5 – 10
»	тепловые	–	8 – 15
Ваттметры	электродинамические	1,5 – 5	3 – 5
»	индукционные	2 – 5	3 – 6

Фазометры	электродинамические	3,5	5 – 8
»	ферродинамические	3,5	5 – 8
Счетчики	индукционные	1 – 2,5	1 – 4
Герцметры		–	2 – 5