

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**До друку дозволяю**

Проректор \_\_\_\_\_  
проф. Романовський О.Г.

**У світ дозволяю**

Проректор \_\_\_\_\_  
проф. Романовський О.Г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

по курсу «Аналоговые измерительные приборы» (часть 2)  
для студентов специальности 7.091302  
«Метрология и измерительная техника»  
дневной и заочной форм обучения

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 2 от 14.05.2003 г.

Харьков НТУ «ХПИ» 2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

по курсу «Аналоговые измерительные приборы» (часть 2)

для студентов специальности 7.091302

«Метрология и измерительная техника»

дневной и заочной форм обучения

Харьков 2003

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

по курсу «АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ»  
ЧАСТЬ 2

для студентов специальности 7.091302  
«Метрология и измерительная техника»  
дневной и заочной форм обучения

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 2 от 14.05.2003 г.

**Харьков • НТУ «ХПИ» • 2003**

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Аналогові вимірювальні прилади» (частина 2), для студентів спеціальності 7.091302 «Метрологія та вимірювальна техніка» денної та заочної форм навчання / Уклад. В.І.Дякін, Бондаренко В.І., О.П. Давіденко, Л.П. Єрмоловська – Харків: НТУ «ХП», 2003.– 69 с.– Рос. мовою

Укладачі: В.І. Дякін  
В.І. Бондаренко  
Л.П. Єрмоловська  
О.П. Давіденко

Рецензент В.М. Балєв

Кафедра вимірювально-інформаційної техніки

В.І. Дякін, 2003 р.  
В.І. Бондаренко, 2003 р.  
Л.П. Єрмоловська, 2003 р.  
О.П. Давіденко, 2003 р.  
НТУ «ХП», 2003 р.

## Лабораторная работа № 7

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАНИЙ ВОЛЬТМЕТРОВ ОТ ФОРМЫ КРИВОЙ И ЧАСТОТЫ ИЗМЕРЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: исследование влияния формы кривой и частоты измеряемого напряжения на показания электромеханических вольтметров различных систем; ознакомление с правилами эксплуатации измерительного генератора типа ЛЗ1; приобретение навыков работы с указанными приборами.

### Сравнительные характеристики вольтметров разных систем

Шкалы подавляющего большинства вольтметров, предназначенных для измерения переменных напряжений, градуируют в действующих значениях синусоидального напряжения. При измерении несинусоидальных напряжений вольтметрами различных типов возможны значительные погрешности, избежать которых можно, зная систему прибора, его принцип действия и градуировку шкалы.

Для измерений переменных напряжений, которые могут содержать и постоянные составляющие, применяют вольтметры магнитоэлектрические, выпрямительные, термоэлектрические, электронные, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, электростатические.

Принципы действия и уравнения шкал этих приборов определяют, какое значение переменного напряжения (среднее, действующее, амплитудное) измеряется прибором.

Так, например, из принципа действия магнитоэлектрического вольтметра, работа которого основана на взаимодействии катушки с током с полем постоянного магнита, и его уравнения шкалы

$$\alpha = S_u U_{cp}, \quad (7.1)$$

где  $\alpha$  – угол отклонения подвижной части;  $S_u$  – чувствительность к напряжению;  $U_{cp}$  – среднее значение измеряемого напряжения за период, т.е. постоянная составляющая  $U_0 = U_{cp}$ , следует, что магнитоэлектрическим вольтметром можно измерять постоянную составляющую (среднее за

период) напряжения любой формы.

Выпрямительные вольтметры, представляющие собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с одним или несколькими полупроводниковыми выпрямителями, измеряют среднее выпрямленное значение напряжения  $U_{\text{ср.в}}$  любой формы. Однако шкалы выпрямительных вольтметров, как правило, градуируют в действующих значениях синусоидального напряжения, поэтому их показания  $U_X$  при любой форме кривой напряжения равны:

$$U_X = 1,1U_{\text{ср.в}} \text{ – при двухполупериодном выпрямлении} \quad (7.2)$$

$$U_X = 2,22U_{\text{ср.в}} \text{ – при однополупериодном выпрямлении} \quad (7.3)$$

Отсюда следует, что выпрямительные приборы показывают действующее значение напряжения только при синусоидальной форме, для которой коэффициент формы  $K_\phi=1,11$ . В случае отличия формы кривой измеряемого напряжения от синусоиды в показаниях приборов возникает методическая погрешность  $\delta_M$ :

$$\delta_M = \left[ \frac{1,11}{K_\phi} - 1 \right] 100\% , \quad (7.4)$$

где  $K_\phi$  – коэффициент формы кривой измеряемого напряжения.

При повышении частоты измеряемого напряжения показания выпрямительного вольтметра уменьшаются из-за шунтирующего действия емкостей диодов и уменьшения выпрямленной составляющей тока через магнитоэлектрический измерительный механизм. Для уменьшения частотной погрешности применяют схемы частотной компенсации. Выпрямительными приборами измеряют переменные напряжения и токи в диапазоне частот 20 Гц – 50 кГц.

Электромагнитные вольтметры работают на принципе взаимодействия магнитного поля катушки с током и ферромагнитного сердечника, их уравнение шкалы имеет вид:

$$\alpha = KU^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha} , \quad (7.5)$$

где  $U$  – действующее значение измеряемого напряжения;  $L$  –

индуктивность катушки прибора;  $K$  – коэффициент пропорциональности. Из уравнения (7.5) следует, что электромагнитные вольтметры измеряют и показывают действующее значение напряжения независимо от формы кривой. Однако при искаженной форме измеряемого напряжения и при наличии высших гармоник, частоты которых выходят за пределы рабочего диапазона прибора, возможно появление погрешности. Так, при одном и том же действующем значении напряжения кривые острой формы дадут иное значение индукции в сердечнике, нежели кривые плоской формы. Поэтому ввиду сложности расчета магнитного поля с нелинейными элементами (ферромагнитными сердечниками) аналитических формул для расчета погрешности от изменения формы кривой напряжения для электромагнитного механизма не существует. С увеличением частоты частотная погрешность электромагнитных вольтметров возникает из-за размагничивающего действия сердечника и увеличения полного сопротивления вольтметра, что приводит к уменьшению показаний. Для уменьшения частотной погрешности добавочное сопротивление шунтируют конденсатором. Частотный диапазон электромагнитных вольтметров узкий, обычно не превышает 25 Гц – 3 кГц.

Электродинамические и ферродинамические вольтметры, принцип работы которых основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих в подвижной и неподвижной катушках, имеют следующее уравнение шкалы:

$$\alpha = KU^2 \frac{\partial M}{\partial \alpha}, \quad (7.6)$$

где  $U$  – действующее значение измеряемого напряжения;  $M$  – взаимоиндуктивность подвижной и неподвижной катушек.

Из уравнения (7.6) следует, что приборы этих систем измеряют и показывают действующее значение напряжения. При увеличении частоты показания электродинамических и ферродинамических вольтметров уменьшаются из-за увеличения индуктивного сопротивления катушек и усиления размагничивающего действия вихревых токов в металлических частях приборов. Частотный диапазон этих приборов узкий, обычно не превышает 10 Гц – 5 кГц.

Наименьшее влияние изменения частоты и формы кривой

напряжения имеет место в термоэлектрических и электростатических вольтметрах. Уравнение шкалы термоэлектрического вольтметра, состоящего из термопреобразователя и магнитоэлектрического измерительного механизма, имеет вид:

$$\alpha = KU^2, \quad (7.7)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения.

Из уравнения (7.7) следует, что эти приборы измеряют и показывают действующее значение напряжения независимо от формы кривой и частоты, поскольку отклонение  $\alpha$  определяется количеством выделенного в термопреобразователе тепла, которое не зависит ни от частоты, ни от формы кривой тока или напряжения. Частотный диапазон термоэлектрических приборов очень широкий и составляет 10 Гц – 100 МГц.

Принцип действия электростатических приборов основан на взаимодействии подвижных и неподвижных электрически заряженных пластин.

Уравнение шкалы для них имеет вид:

$$\alpha = KU^2 \frac{\partial C}{\partial \alpha}, \quad (7.8)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения;  $C$  – емкость, образуемая электродами в виде пластин.

Из принципа действия и уравнения (7.8) следует, что электростатические вольтметры измеряют и показывают действующее значение напряжения независимо от формы кривой и частоты в широком частотном диапазоне, вплоть до 5 – 10 МГц. Верхний частотный предел ограничивается величиной тока через измерительный механизм и возможностью появления резонанса напряжений из-за наличия индуктивности соединительных проводов и емкости вольтметра  $C_V$ .

Таким образом, вольтметры электромагнитной, электродинамической, термоэлектрической и электростатической систем измеряют и показывают действующее значение измеряемого напряжения, а приборы магнитоэлектрической системы – постоянную составляющую



(среднее значение) измеряемой величины, независимо от формы кривой напряжения.

Вольтметры выпрямительной системы измеряют средневыпрямленное значение измеряемого напряжения  $U_{\text{ср.в}}$  любой формы, а показывают (при градуировке шкалы в действующих значениях синусоидального напряжения) в 1,11 или 2,22 раз больше, в зависимости от схемы выпрямления (двухполупериодной и однополупериодной).

### Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки показана на рис. 7.1

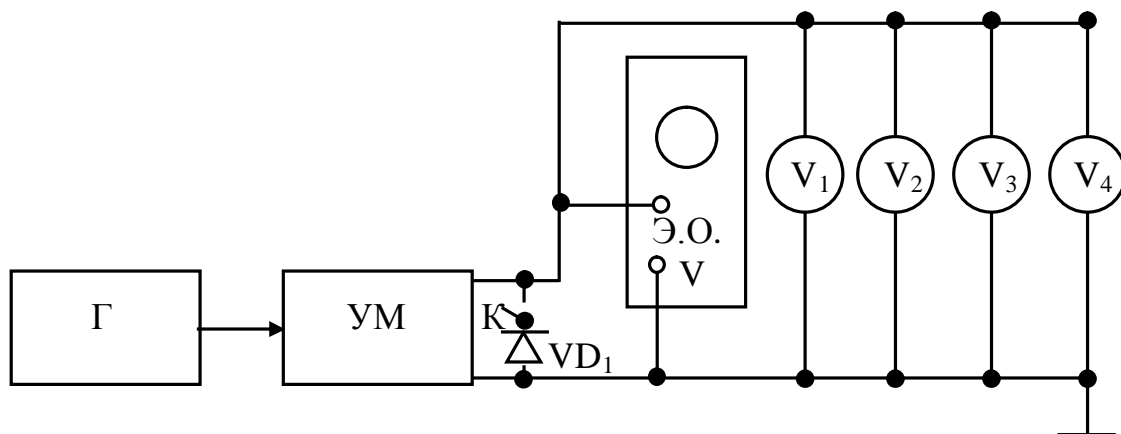


Рисунок 7.1

Г – задающий генератор, формирующий сигналы прямоугольной, треугольной и синусоидальной форм в диапазоне частот от 20 Гц до 10 МГц; УМ – усилитель мощности; ЭО – электронный осциллограф;  $V_1$  – вольтметр, измеряющий и показывающий полное амплитудное значение напряжения  $U_m$ ;  $V_2$  – магнитоэлектрический вольтметр;  $V_3$  – электромагнитный вольтметр;  $V_4$  – выпрямительный вольтметр с двухполупериодной схемой выпрямления, открытым входом и шкалой, градуированной в действующих значениях синусоидального напряжения.

К измерительной схеме могут быть подключены и вольтметры других систем (по указанию преподавателя).

Амплитудный вольтметр  $V_1$  состоит (рис. 7.2, а) из магнитоэлектрического измерительного механизма ИМ и амплитудного

(пикового) детектора с открытым входом, пропускающим постоянную составляющую напряжения. Рассмотрим работу прибора при подаче на вход синусоидального напряжения. При увеличении входного напряжения конденсатор  $C$  быстро заряжается через открытый диод  $VD$  до амплитудного значения измеряемого напряжения (участок  $ab$  рис. 7.2 б).

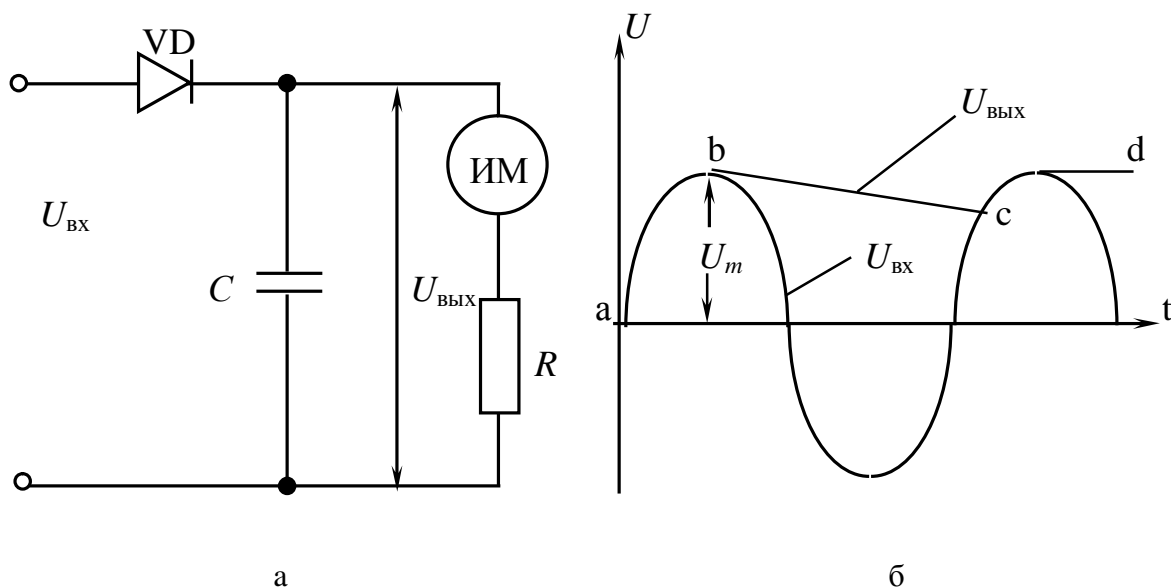


Рисунок 7.2

При уменьшении напряжения  $U_{вх}$  диод закрывается, и конденсатор медленно разряжается через большое сопротивление резистора  $R$  и сопротивление катушки  $ИМ$  (участок  $bc$ ). Когда входное напряжение становится равным напряжению на конденсаторе, диод открывается и конденсатор подзарядается до  $U_m$  и т.д. Среднее значение напряжения на конденсаторе близко к  $U_m$ , т.е. отклонение стрелки магнитоэлектрического  $ИМ$  определяется амплитудой измеряемого напряжения. При наличии в кривой напряжения постоянной составляющей амплитудный вольтметр с открытым входом и шкалой, градуированной в амплитудных значениях измеряемого напряжения, будет измерять и показывать полную амплитуду напряжения любой формы.

### **Опыт 1. Исследование влияния формы кривой напряжения на показания вольтметров разных систем**

1 Перед началом эксперимента определить расчетным путем показания вольтметров  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  при измерении напряжений, форма

кривых которых задана в табл. 7.1. Расчет выполнить для амплитуды напряжения  $U_{1m}$ , заданной руководителем. При вычислении использовать связь между амплитудным, действующим и средневыпрямленным значениями напряжения любой формы:

$$K_a = \frac{U_m}{U}, \quad (7.9)$$

$$K_\phi = \frac{U}{U_{\text{ср.в}}}, \quad (7.10)$$

где  $K_a$  – коэффициент амплитуды;  $K_\phi$  – коэффициент формы кривой напряжения.

Значения  $K_a$  и  $K_\phi$  заданы в табл. 7.1. Результаты расчета внести в табл. 7.1.

2 Собрать схему согласно рис. 7.1. Подключить к сети шнур питания генератора, усилителя мощности и электронного осциллографа. Включить указанные приборы.

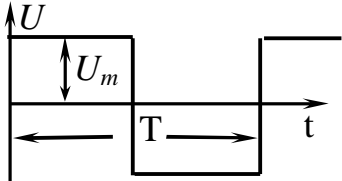
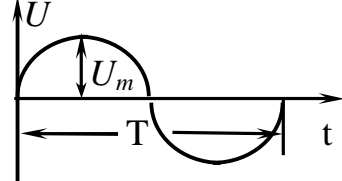
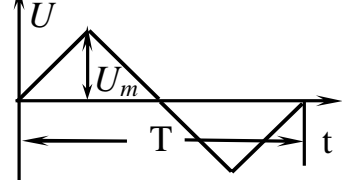
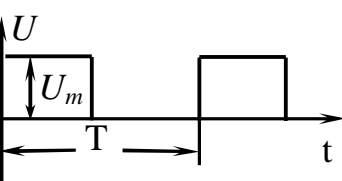
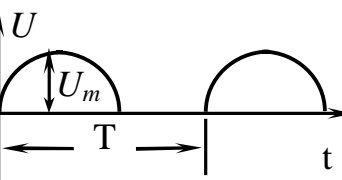
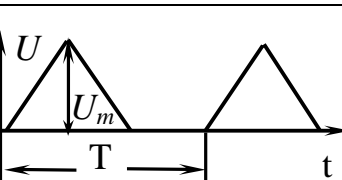
Нужное значение частоты генератора, заданное руководителем, установить с помощью переключателя МНОЖИТЕЛЬ и ручки ЧАСТОТА. Отсчет частоты произвести по шкале генератора с помощью светящегося столба индикаторной лампы.

Для выбора формы выходного сигнала генератора нажать соответствующую кнопку переключателя РОД РАБОТ. При этом для получения напряжений форм 1, 2, 3 табл. 7.1 ключ К усилителя мощности должен быть разомкнут, диод  $VD_1$  отключен. Для формирования напряжений форм 4, 5, 6 табл. 7.1 ключ К усилителя мощности необходимо замкнуть, при этом включается диод  $VD_1$ , не пропускающий отрицательную полуволну напряжения. В результате в кривых напряжений форм 4, 5, 6 возникает постоянная составляющая.

Ручкой УРОВЕНЬ генератора установить заданное преподавателем значение напряжения  $U_{1m}$  по шкале вольтметра  $V_1$  и поддерживать его неизменным в течение всего опыта.

Пользуясь ручками управления на передней панели осциллографа, установить устойчивое изображение на экране нескольких периодов измеряемого напряжения.

Таблица 7.1

№ п/п	Показания вольтметров В  Форма напряжения	Измеритель полной амплитуды $V_1$	Магнито- электри- ческий		Электро- магнитный		Выпрямительный		Коэффициенты амплитуды и формы	
			расчет.	экспер.	расчет.	экспер.	расчет.	экспер.	$K_a$	$K_\phi$
1									1	1
2									$\sqrt{2}$	1,11
3									$\sqrt{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
4									$\sqrt{2}$	$\frac{\pi}{2}$
5									2	$\frac{\pi}{2}$
6									$\sqrt{6}$	$\frac{2}{3}\sqrt{6}$

Определить экспериментальные показания вольтметров  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  и результаты занести в табл. 7.1. Проанализировать возможные причины несовпадения расчетных и экспериментальных данных.

### Опыт 2. Исследование влияния частоты измеряемого напряжения на показания электромеханических вольтметров

В опыте используется схема рис. 7.1. Эксперимент производится при постоянной амплитуде выходных сигналов генератора с изменением их частот.

Переключателем РОД РАБОТ выбрать синусоидальную форму выходного напряжения, разомкнуть ключ К усилителя мощности. Изменяя частоту, в соответствии с данными табл. 7.2. и обеспечивая неизменной амплитуду выходного напряжения генератора, заданную преподавателем, снять показания вольтметров  $V_1$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ , заполнить табл. 7.2.

Таблица 7.2

Частота, Гц	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
Показания вольтметров $V_1$											
$V_2$ магнитоэлектрической системы											
$V_3$ электромагнитной системы											
$V_4$ выпрямительной системы											

Замкнуть ключ К усилителя мощности и при форме кривой 5 напряжения снять частотную характеристику магнитоэлектрического вольтметра  $V_2$ . Результаты эксперимента внести в табл. 7.2.

По данным эксперимента построить зависимость  $U_X = F(f)$  вольтметров  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ . По оси частот  $f$  использовать логарифмический масштаб.

## Оформление отчета

В отчете привести схему рис. 7.1, таблицы 7.1 и 7.2 с результатами вычислений и измерений, частотные характеристики вольтметров  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ .

## Контрольные вопросы

1 Каковы принципы действия электромеханических вольтметров различных систем?

2 Какие вольтметры измеряют среднее значение (постоянную составляющую) напряжения несинусоидальной формы?

3 Что такое коэффициент амплитуды и коэффициент формы кривой напряжения?

4 Для каких форм кривых напряжений совпадают среднее значение (постоянная составляющая) и среднев्यпрямленное значение?

5 Чем обусловлена частотная погрешность электромеханических приборов?

6 Показания каких вольтметров практически не зависят от формы кривой напряжения?

7 Вольтметрами каких систем можно измерять напряжения радиочастот?

8 Каким образом можно снять частотную характеристику вольтметра?

## Литература

1 Основы метрологии и электрические измерения: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Е.М. Душина. – Л: Энергоатомиздат, 1987. – С. 117, 132, 138–139, 141–144, 147–152, 394 – 400.

## Лабораторная работа 8

### ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЁХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Цель работы: изучение методов измерения активной и реактивной мощности в трехфазных цепях; приобретение навыков работы с приборами.

## Измерение активной мощности

Измерение активной мощности в трехфазных цепях осуществляется методами одного, двух и трех однофазных ваттметров.

Метод одного прибора. Если трехфазная цепь трехпроводная, симметричная и нулевая точка доступна для подключения, то для измерений мощности всей системы можно использовать один однофазный ваттметр, включенный на ток и напряжение любой фазы (рис. 8.1).

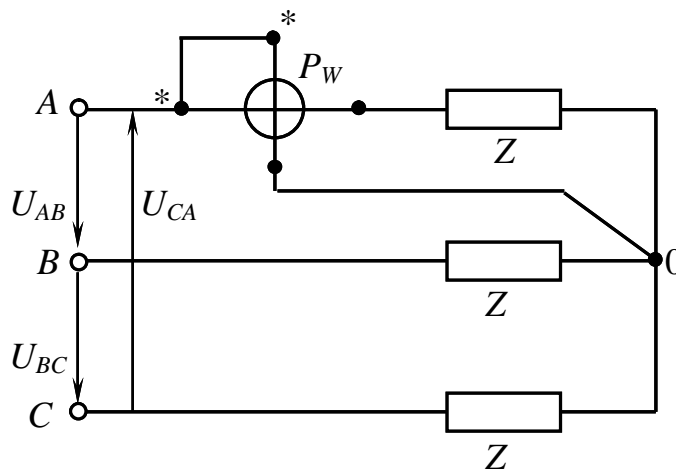


Рисунок 8.1

Для получения мощности всей системы показание ваттметра утраивают:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} \quad (8.1)$$

Ваттметр, на шкале которого наносят утроенные значения мощности, называют трехфазным одноэлементным.

В тех случаях, когда нулевая точка недоступна для подключения, применяется схема включения ваттметра с искусственной нулевой точкой (рис. 8.2). Если выполнить условие  $r_V + r_1 = r$ , где  $r_V$  – сопротивление катушки напряжения ваттметра, то симметрия системы сохранится, и ваттметр покажет мощность одной фазы. Мощность трехфазной системы определяется умножением на три показания ваттметра в соответствии с выражением (8.1).

Метод двух приборов. Этот метод применяют в несимметричных трехпроводных цепях трехфазного тока. Активную мощность всей цепи можно измерить двумя однофазными ваттметрами или одним трехфазным двухэлементным ваттметром, причем токовые катушки включают в любые

2 фазы, а цепи напряжения включают между «своей» фазой, в которой подключена токовая катушка, и «свободной» фазой, где не включен ваттметр. Один из вариантов включения двух ваттметров приведен на рис. 8.3.

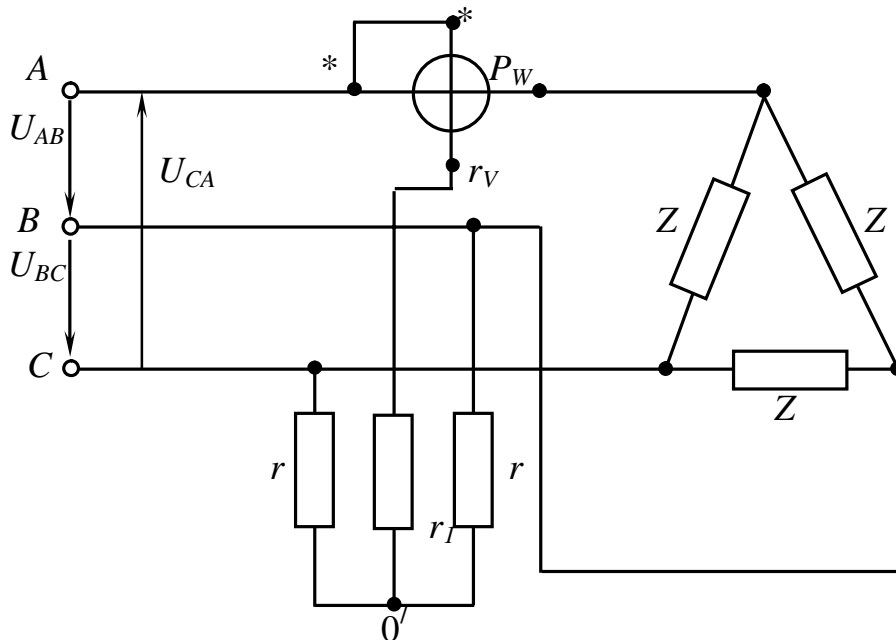


Рисунок 8.2

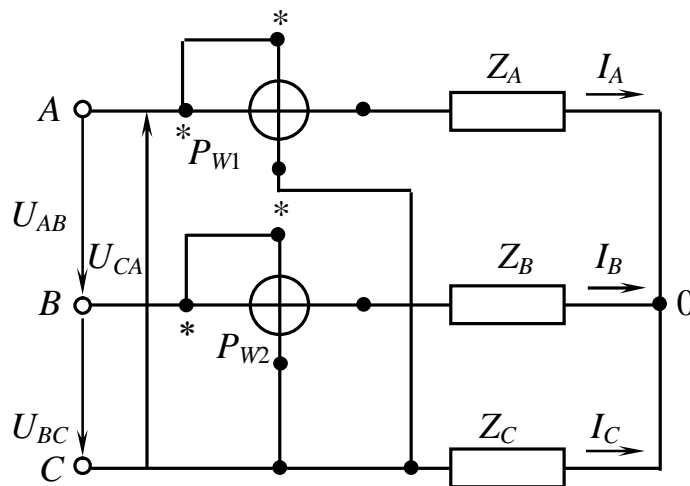


Рисунок 8.3

Как известно, алгебраическая сумма показаний ваттметров равна суммарной активной мощности трехфазной цепи, т.е., применительно к схеме рис. 8.3, имеем:



$$P = P_{W1} + P_{W2} = I_A U_{AC} \cos(I_A \hat{U}_{AC}) + I_B U_{BC} \cos(I_B \hat{U}_{BC}) \quad (8.2)$$

Из выражения (8.2) следует, что показание каждого ваттметра в отдельности не имеет физического смысла, может быть положительным, отрицательным, равным нулю, в зависимости от угла сдвига фаз. Физический смысл имеет только алгебраическая сумма (с учетом знаков) показаний приборов.

Метод трех приборов. Этот метод применяется для измерения мощности в трехфазных несимметричных четырехпроводных системах (с нулевым проводом). Токовые катушки ваттметров включают в три фазы, цепи напряжения – между соответствующей фазой и нулевым проводом, т.е. на фазные напряжения. При таком включении каждый из ваттметров измеряет мощность одной фазы.

Полная мощность системы определяется как алгебраическая сумма показаний ваттметров (рис. 8.4)

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} \quad (8.3)$$

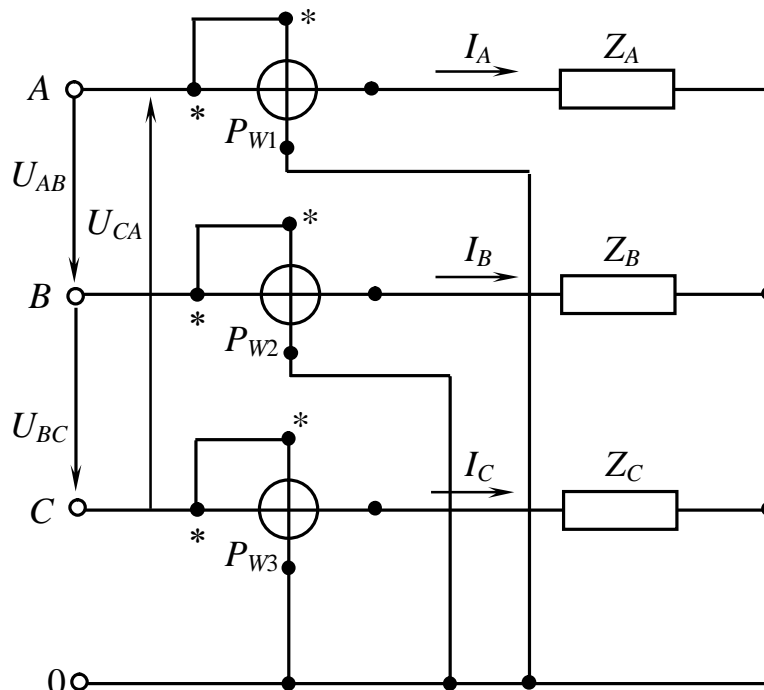


Рисунок 8.4

Для измерения мощности можно использовать один трехфазный трехэлементный ваттметр, состоящий из трех неподвижных и трех

подвижных катушек, засаженных на общую ось, так что механические моменты их алгебраически складываются.

### **Измерение реактивной мощности**

Низкий коэффициент мощности  $\lambda = \cos \varphi$  приемников электроэнергии ведет к большому потреблению реактивной энергии, что весьма отрицательно отражается на работе всей энергетической системы в целом. Генераторы, трансформаторы, линии передачи загружены «неработающим» реактивным током, вследствие чего возникают большие дополнительные потери активной мощности и падения напряжения в линиях передач, активная мощность турбин и генераторов не используется полностью, возрастает стоимость выработанной электроэнергии и стоимость эксплуатации всей системы.

Отсюда следует, что вопросы рационального использования электроэнергии, повышения экономичности и надежности работы энергосистем неразрывно связаны с повышением  $\cos \varphi$ , с разгрузкой станций и сетей от неработающего реактивного тока. Для осуществления этих мер необходимо наравне с активной мощностью ежедневно измерять реактивную мощность, как на электростанциях, так и у потребителей.

Существующая на Украине система тарификации электроэнергии предусматривает штрафные надбавки к стоимости кВтч при  $\cos \varphi$  ниже установленного среднего значения (0,85) и льготный тариф при коэффициенте мощности выше среднего значения.

Измерение реактивной мощности трехфазной системы осуществляют обычными ваттметрами активной мощности, включаемыми по специальным схемам.

Можно сформулировать следующие правила включения однофазных ваттметров в трехфазные цепи для измерения реактивной мощности по методу одного, двух и трех приборов:

- 1) токовые катушки необходимо включать в трехфазную цепь точно так же, как это осуществлялось при измерении активной мощности;
- 2) цепи напряжения необходимо включать на линейные напряжения, между следующими в порядке чередования фазами по отношению к линии, в которую включена токовая обмотка. Если, например, токовая катушка ваттметра включена в фазу  $A$ , то цепь напряжения необходимо

включить между фазами  $B$  (к генераторному зажиму ваттметра) и  $C$ .

### Метод одного прибора

Метод одного прибора используется при включении обычного однофазного электродинамического или ферродинамического ваттметра, предназначенного для измерения активной мощности, в симметричную трехфазную трех- или четырехпроводную цепь. На рис.8.5 показана схема включения ваттметра и векторная диаграмма для случая симметричной нагрузки.

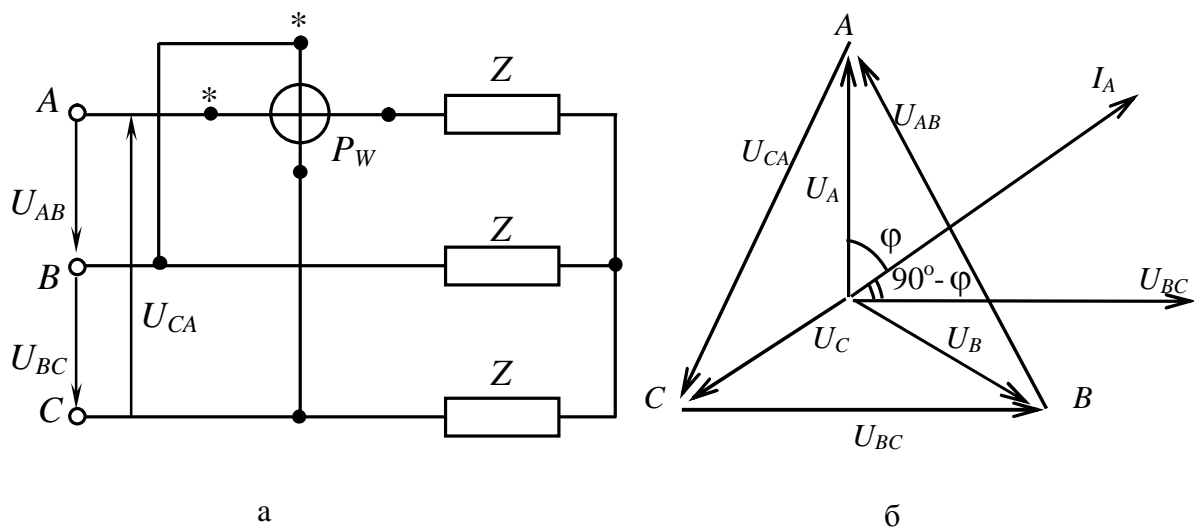


Рисунок 8.5

Показание ваттметра в рассматриваемом случае равно:

$$P_W = U_{BC} I_A \cos(U_{BC} \hat{I}_A) = UI \cos(90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi \quad (8.4)$$

где  $U$  и  $I$  – линейные напряжение и ток.

Реактивная мощность симметричной трех или четырехпроводной цепи равна:

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad (8.5)$$

С учетом (8.5), находим, что для получения реактивной мощности всей цепи показание ваттметра, определяемое выражением (8.4), необходимо умножить на  $\sqrt{3}$ , т.е.

$$Q = \sqrt{3}P_W = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad (8.6)$$

### Метод двух приборов

Это измерение применяется в трехфазной трехпроводной цепи, как при симметрии, так и при простой асимметрии (линейные напряжения симметричны, фазные токи и напряжения несимметричны). Токовые катушки ваттметров включают в любые две фазы, а цепи напряжения – на линейные напряжения, между следующими в порядке чередования фазами. Так, на схеме рис. 8.6 а, токовая катушка ваттметра  $P_{W1}$  включена в фазу  $A$ , а цепь напряжения – между фазами  $B$  и  $C$ ; токовая катушка ваттметра  $P_{W2}$  включена в фазу  $C$ , а цепь напряжения – между фазами  $A$  и  $B$ . На рис. 8.6 б приведена векторная диаграмма для симметричной трехфазной цепи.

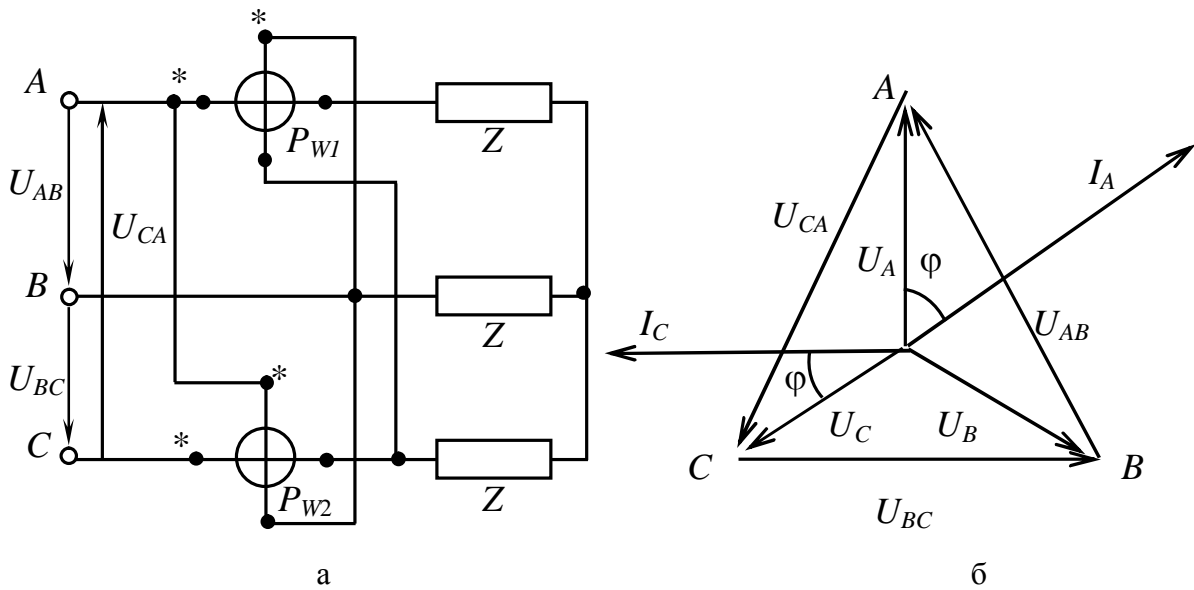


Рисунок 8.6

Показания ваттметров в рассматриваемом случае равны:

$$P_{W1} = U_{BC} I_A \cos \left( U_{BC} \hat{I}_A \right) = UI \cos (90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi \quad (8.7)$$

$$P_{W2} = U_{AB} I_C \cos \left( U_{AB} \hat{I}_C \right) = UI \cos (90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi \quad (8.8)$$

Найдем алгебраическую сумму показаний ваттметров:

$$P_{W1} + P_{W2} = 2UI \sin \varphi \quad (8.9)$$

Анализируя выражение (8.9), видим, что для получения реактивной мощности всей цепи (8.5) необходимо выражение (8.9) разделить на 2 и умножить на  $\sqrt{3}$ , т.е.

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2}(P_{W1} + P_{W2}) \quad (8.10)$$

### Метод трех приборов

Измерение реактивной мощности с использованием метода трех приборов применяется в трехфазных четырехпроводных цепях, как при симметрии, так и при простой асимметрии.

На рис. 8.7 а показано включение трех ваттметров  $P_{W1}, P_{W2}$  и  $P_{W3}$  для измерения реактивной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи. На рис 8.7 б построена векторная диаграмма для полностью симметричной трехфазной цепи.

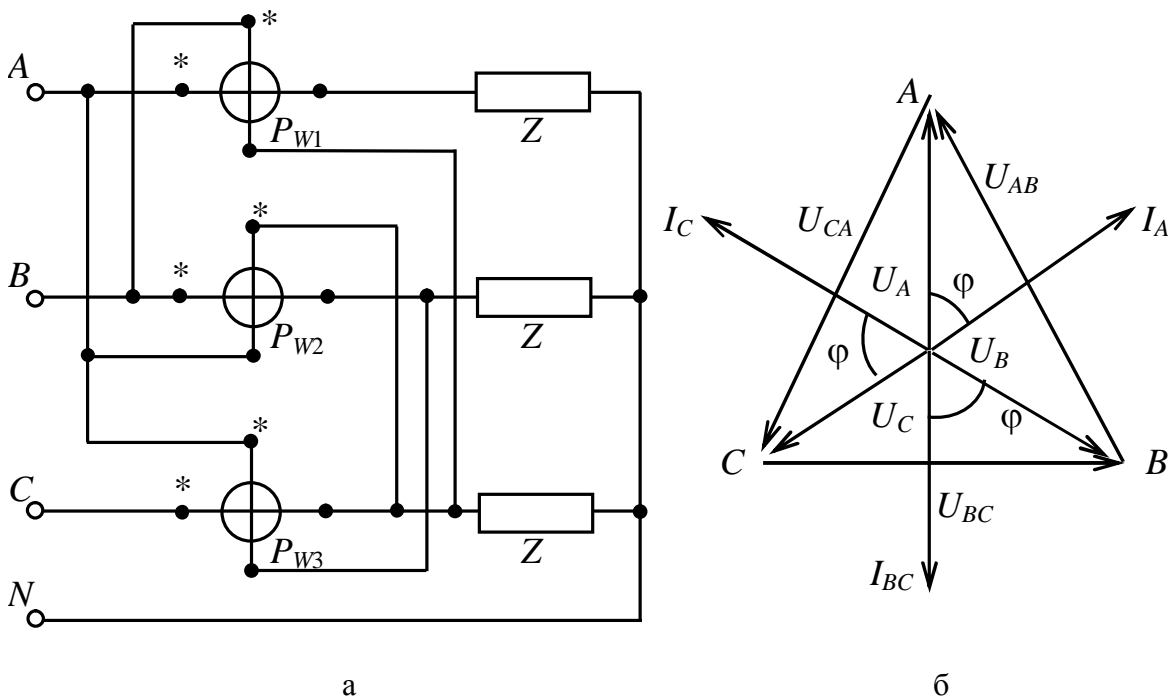


Рисунок 8.7

Определим показания ваттметров:

$$P_{W1} = U_{BC} I_A \cos \left( \overset{\wedge}{U_{BC}} I_A \right) = UI \cos(90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi \quad (8.11)$$

$$P_{W2} = U_{CA} I_B \cos \left( \overset{\wedge}{U_{CA}} I_B \right) = UI \cos(90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi \quad (8.12)$$

$$P_{W3} = U_{AB} I_C \cos \left( \overset{\wedge}{U_{AB}} I_C \right) = UI \cos(90^\circ - \varphi) = UI \sin \varphi \quad (8.13)$$

Алгебраическая сумма показаний ваттметров:

$$P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = 3UI \sin \varphi \quad (8.14)$$

Разделив выражение (8.14) на  $\sqrt{3}$ , получим реактивную мощность трехфазной цепи:

$$Q = \frac{P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}}{\sqrt{3}} = \frac{3UI \sin \varphi}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}UI \sin \varphi \quad (8.15)$$

### Описание измерительной установки

На рис.8.8 приведена принципиальная схема исследуемой трехфазной цепи. Приемником электрической энергии в каждой фазе является реостат и катушка индуктивности, соединенные последовательно. Питание цепи осуществляется от трехфазной сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Линейные напряжения сети 30 В.

На передней панели макета расположены 4 ряда клемм ( $a_1, b_1, \dots, a_2, b_2, \dots, c_4, d_4$ ) и тумблеры SA1–SA4, позволяющие собрать нужную схему для измерения активной или реактивной мощности, не производя изменений и переключений в самой схеме. Так, например, для измерения активной мощности фазы А приемника последовательная цепь ваттметра подключается к клеммам, находящимся по обе стороны от тумблера SA1 (например, к клеммам  $b_1$  и  $d_1$ ). При размыкании тумблера SA1 токовая цепь ваттметра оказывается включенной последовательно с фазой А приемника. Параллельная цепь ваттметра присоединяется к клеммам с индексами «1» и «4» (например, к клеммам  $a_1$  и  $d_4$ ), напряжение между которыми равно фазному напряжению фазы А.

Токи в фазах измеряются амперметрами, линейное напряжение – одним вольтметром. Активная и реактивная мощность измеряется электродинамическим ваттметром, который поочередно включается на нужный ток и напряжение.

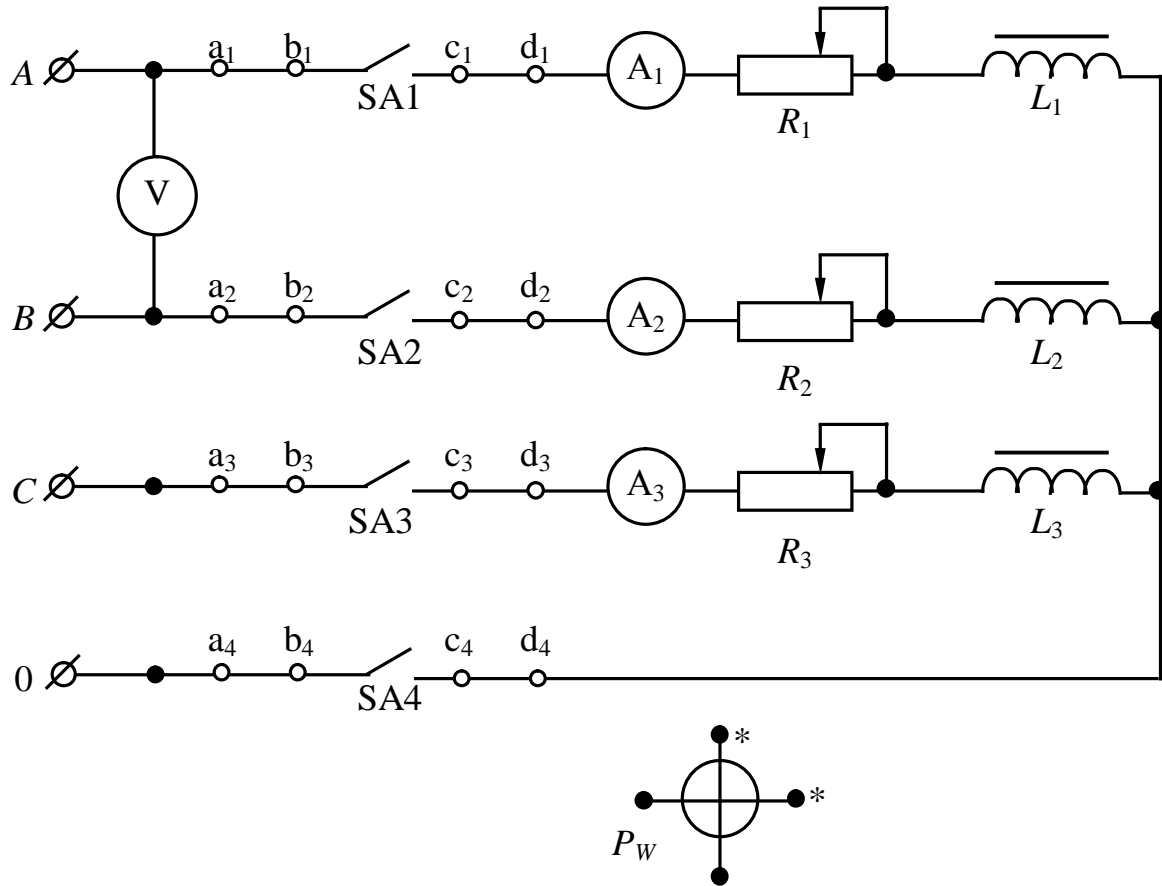


Рисунок 8.8

### Порядок выполнения работы

- 1 Ознакомьтесь с макетом и оборудованием рабочего места.
- 2 Измерить активную мощность симметричной трехпроводной цепи с доступной нулевой точкой методом одного прибора, для чего:
  - включить ваттметр в схему рис. 8.8 для измерения активной мощности одной фазы (по указанию руководителя). Установить необходимые пределы измерения ваттметра по току и напряжению ( $I_H=2,5$  А,  $U_H=30$  В).
  - тумблеры SA1 – SA4 установить в нужное положение;
  - после проверки схемы руководителем включить источник питания и реостатами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  установить токи фаз, заданные руководителем;

- показания вольтметра, амперметров и ваттметра записать в табл. 8.1;
- по соотношению (8.1) определить активную мощность трехфазной цепи;
- отключить источник питания.

3 Измерить реактивную мощность симметричной трехпроводной цепи методом одного прибора для тех же значений фазных токов. При этом токовую катушку ваттметра включить в указанную руководителем фазу, цепь напряжения включить на линейное напряжение по правилу, указанному выше. Опыт провести в той же последовательности, что и при измерении активной мощности. Результаты измерений и вычислений внести в табл. 8.1.

Таблица 8.1.

Характеристика трехфазной цепи	Метод измерения	$U_{AB}$ В	$I_A$ А	$I_B$ А	$I_C$ А	Активная мощность			Реактивная мощность			Коэффициент мощности $\lambda$
						$P_W$		$P$ Вт	$P_W$		$Q$ ВАР	
						дел	Вт		дел	ВАР		
трехпроводная симметричная с доступной нулевой точкой	Метод одного прибора											
трехпроводная симметричная с недоступной нулевой точкой												

Полную реактивную мощность цепи определить по соотношению (8.6). Коэффициент мощности цепи  $\lambda$  определить по соотношению:

$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (8.16)$$

$S$  – полная (кажущаяся) мощность нагрузки.



4 Измерить активную мощность симметричной трехпроводной цепи с недоступной нулевой точкой методом одного прибора. Токовую цепь ваттметра включить в фазу, указанную руководителем, к двум другим фазам подключить магазины сопротивлений, на которых установить сопротивления, равные сопротивлению параллельной цепи ваттметра (рис. 8.2).

После образования искусственной нулевой точки и проверки схемы руководителем включить схему и провести измерения, результаты которых записать в табл. 8.1, сравнить эти результаты с полученными ранее результатами.

5 Измерить активную мощность несимметричной трехпроводной цепи методом двух приборов, руководствуясь вышеизложенным правилом включения ваттметров и схемой рис. 8.3.

Для создания асимметрии сопротивлением одной из фаз установить разные токи  $I_A \neq I_B$  (по указанию преподавателя). Поочередно включая ваттметр на нужные фазные токи и линейные напряжения в соответствии со схемой рис. 8.3, определить показания прибора  $P_{W1}$  и  $P_{W2}$  с учетом знака, результаты измерения записать в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Характеристика трехфазной цепи	Метод измерения	$U_{AB}$ В	$I_A$ А	$I_B$ А	$I_C$ А	Активная мощность			Реактивная мощность			Коэффициент мощности $\lambda$
						$P_{W1}$ Вт	$P_{W2}$ Вт	$P$ Вт	$P_{W1}$ ВАР	$P_{W2}$ ВАР	$Q$ ВАР	
трехпроводная несимметричная	метод двух приборов											

Активную мощность цепи определить по соотношению (8.2).

6 Измерить реактивную мощность несимметричной трехпроводной цепи методом двух приборов, руководствуясь вышеуказанными правилами включения и схемой рис. 8.6. Реактивную мощность цепи определить по соотношению (8.10). Пользуясь соотношением (8.16), вычислить коэффициент мощности трехфазной цепи.

7 Измерить активную мощность несимметричной четырехпроводной цепи методом трех приборов, руководствуясь схемой рис. 8.4. Замкнув

тумблером SA4 цепь нулевого провода и установив в фазах неодинаковые токи  $I_A \neq I_B \neq I_C$  (по указанию руководителя), измерить активную мощность несимметричного трехфазного приемника поочередным включением ваттметра в каждую из фаз. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Характеристика трехфазной цепи	Метод измерения	$U_{AB}$ В	$I_A$ А	$I_B$ А	$I_C$ А	Активная мощность				Реактивная мощность				Коэффициент мощности $\lambda$
						$P_{W1}$ Вт	$P_{W2}$ Вт	$P_{W3}$ Вт	Ошибки! Ошибки связи.	$P_{W1}$ ВАР	$P_{W2}$ ВАР	$P_{W3}$ ВАР	$Q$ ВАР	
четырёхпроводная несимметричная	метод трех приборов													

Полную активную мощность цепи определить по соотношению (8.3).

8 Измерить реактивную мощность несимметричной четырехпроводной цепи методом трех приборов, руководствуясь правилами, указанными выше и схемой рис. 8.7. Измерение провести при поочередном включении ваттметра на фазные токи и соответствующие линейные напряжения. Результаты измерений и вычислений внести в табл. 8.3. Суммарную реактивную мощность цепи определить по соотношению (8.15). Пользуясь соотношением (8.16), определить коэффициент мощности цепи  $\lambda$ .

### Оформление отчета

В отчете привести схемы рис. 8.1–8.7, таблицы 8.1–8.3 с результатами измерений и вычислений.

### Контрольные вопросы

1 Укажите способы измерения активной мощности трехфазных цепей.

2 Начертите схему измерения активной мощности трехфазного приемника:

- одним ваттметром;
- двумя ваттметрами;
- тремя ваттметрами.

3 Начертите схему измерения реактивной мощности трехфазного приемника:

- одним ваттметром;
- двумя ваттметрами;
- тремя ваттметрами.

4 Для чего необходимо измерять реактивную мощность в трехфазных системах?

5 В каких трехфазных системах реактивную мощность можно измерить двумя или тремя ваттметрами активной мощности?

### **Литература**

1 Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов. Под. ред. Е.М. Душина.- Л.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 133-135, 400-410.

2 Электрические измерения: Учебное пособие для вузов / В.Н. Малиновский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – С. 182-188.

### **Лабораторная работа № 9**

#### **ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ**

Цель работы – изучение методов и техники измерения сопротивлений на постоянном токе омметрами и уравновешенными мостами постоянного тока.

Измерение сопротивлений представляет наиболее широко развитую область электроизмерительной техники как в отношении методов измерения, так и используемой аппаратуры.

Измерение сопротивлений может осуществляться различными методами: косвенным методом с помощью двух приборов (амперметра и вольтметра); методом одного прибора, прямым методом, основанным на

применении приборов непосредственной оценки (омметров, мегомметров); методом сравнения, основанным на применении мостов и компенсаторов.

Разнообразие методов в значительной степени объясняется весьма широким диапазоном величин сопротивлений, которые подлежат измерению (от  $10^{-8}$  до  $10^{14}$  Ом и выше), большим разнообразием объектов измерения, различными условиями измерений (лабораторные, полевые и др.), различными требованиями к точности определения результатов измерения.

### Опыт 1. Измерение сопротивления мегомметром

Для измерения очень больших сопротивлений, порядка тысяч килоом и выше, как например, для измерения сопротивления изоляции, весьма часто пользуются мегомметрами. Мегомметр представляет собой омметр, в котором в качестве измерительного механизма используется магнитоэлектрический логометр.

Логометрами называют электроизмерительные приборы, измеряющие отношения двух токов. Специфической особенностью логометров является отсутствие у них механического противодействующего момента. Противодействующий момент, как и вращающий, создается электрическим путем.

На рис. 9.1 показан логометр магнитоэлектрической системы.

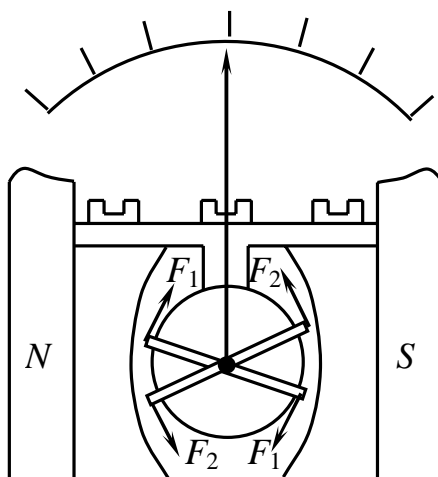


Рисунок 9.1

Подвижная часть логометра состоит из двух рамок, укрепленных на общей оси и жестко скрепленных между собой. Одна из рамок создает вращающий момент, другая – противодействующий.

Один или оба момента должны изменяться с изменением угла отклонения подвижной части. Зависимость момента от угла отклонения рамок обычно достигается благодаря неравномерности воздушного зазора.

Моменты, создаваемые силами  $F_1$  и  $F_2$ , для магнитоэлектрического измерительного механизма (рис. 9.1) определяются

$$M_1 = B_1 S_1 W_1 I_1; \quad M_2 = B_2 S_2 W_2 I_2$$

где  $S_1$ ;  $W_1$ ;  $S_2$ ;  $W_2$  – площади и числа витков рамок 1 и 2.

Индукция магнитного поля  $B_1$  и  $B_2$  вследствие наличия неравномерного зазора не остается постоянной, а меняется в зависимости от положения подвижной части, т.е. от угла поворота рамок  $\alpha$  :

$$B_1 = f_1(\alpha) \quad \text{и} \quad B_2 = f_2(\alpha).$$

Равновесие подвижной части определяется равенством

$$M_1 = M_2,$$

т.е. 
$$B_1 S_1 W_1 I_1 = B_2 S_2 W_2 I_2.$$

Полагая  $S_1 = S_2$ , и  $W_1 = W_2$ , получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)}.$$

Решая это уравнение относительно  $\alpha$ , находим:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (9.1)$$

Наиболее распространенная схема логометра с последовательным соединением измеряемого сопротивления показана на рис. 9.2.

Токи в рамках логометра могут быть определены из уравнений

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_X}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2 + R_\partial}.$$

Используя уравнение (9.1), получим:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{R_2 + R_\partial}{R_1 + R_X}\right). \quad (9.2)$$

Из этого выражения видно, что отклонение подвижной части не зависит от напряжения, а зависит от величины измеряемого сопротивления  $R_X$ .

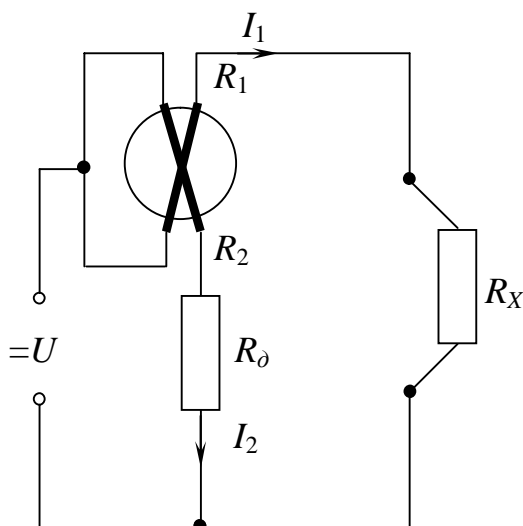


Рисунок 9.2

Мегомметры не нуждаются в питании ни от аккумуляторов, ни от сухих батарей, т.к. снабжены собственным генератором, встроенным в прибор. Ротор генератора приводится во вращение ручкой со скоростью обычно в пределах 90 – 120 об/мин. Поскольку сопротивление изоляции зависит от приложенного напряжения, мегомметры выпускаются с номинальным напряжением 100, 250, 500, 1000, 2500 В.

### Порядок выполнения опыта

Объект измерения указывается преподавателем. Если измеряется сопротивление изоляции, например, трансформатора, то при измерении

сопротивлений изоляции относительно сердечника один зажим Л присоединяется к одной из обмоток, другой зажим З – к сердечнику. При измерении сопротивления изоляции между обмотками один зажим мегомметра, например, Л присоединяется к одной из обмоток, а другой З – к другой обмотке.

Данные измерений вносятся в табл. 9.1.

Таблица 9.1.

№№ п/п	Измеряемое сопротивление (наименование)	Результат измерения сопротивления, МОм

### Опыт 2. Измерение сопротивлений на одинарном мосте

При измерении сравнительно больших сопротивлений (от 10 до  $10^6$  Ом) применяются одинарные мосты. Измерительными мостами называются приборы сравнения, предназначенные для измерений сопротивлений или величин, функционально с ними связанных.

На рис. 9.3 приведена схема одинарного моста, состоящая из четырех сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , называемых плечами моста. К точкам  $ac$  подключен источник питания, а к точкам  $bd$  – нулевой индикатор. Эти цепи называются диагоналями моста.

Наиболее распространенным методом измерения с помощью мостов является нулевой метод, характеризующийся отсутствием тока в диагонали нулевого индикатора.

Ток в цепи диагонали индикатора может быть равен нулю только при равенстве нулю разности потенциалов между точками  $b$  и  $d$ , т.е. в момент равновесия моста. При равновесии моста  $I_U = 0$ ;  $I_1 = I_2$  и  $I_3 = I_4$ , падения напряжения в плечах соответственно равны:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad I_2 R_2 = I_4 R_4$$

Разделив первое уравнение на второе, получим условие равновесия моста.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}; \quad R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (9.3)$$

Отсюда следует, что если измеряемое сопротивление включить в одно из плеч моста, например, вместо сопротивления  $R_1$ , то его можно будет определить после уравнивания моста из равенства:

$$R_X = R_1 = R_3 \frac{R_2}{R_4} \quad (9.4)$$

Равновесие моста может быть достигнуто различными способами:

- 1) изменением сопротивления  $R_3$  при некотором постоянном отношении  $\frac{R_2}{R_4}$  (магазинные мосты);
- 2) изменением отношения  $\frac{R_2}{R_4}$  при некотором постоянном сопротивлении  $R_3$  (линейные мосты).

На практике большое распространение получили мосты первого типа.

Сопротивление  $R_X$ , определяемое из соотношения (9.4), состоит из сопротивления, подлежащего измерению, сопротивления соединительных проводников, с помощью которых подключено измеряемое сопротивление, а также из переходных сопротивлений контактов в местах присоединения измеряемого сопротивления.

При измерении сопротивлений, во много раз превышающих сопротивления соединительных проводников и переходных сопротивлений, значения последних можно пренебречь.

Однако, если измеряемое сопротивление соизмеримо с сопротивлением соединительных проводников и с переходным сопротивлением контактов, возникает большая погрешность измерения.

Для уменьшения погрешности, вносимой сопротивлением соединительных проводников, в некоторых одинарных мостах используется четырехзажимная схема включения  $R_X$ . В таких мостах измеряемое сопротивление подключается к четырем зажимам с помощью четырех соединительных проводников (рис. 9.4). При таком подключении измеряемого сопротивления  $R_X$  погрешность будет уменьшена, т.к. сопротивления участков 1 – 5 и 4 – 6 не входят в плечи моста и на результат измерения не влияют, а влияние сопротивлений участков 2 – 5, 3 – 6 будет уменьшено, если сопротивления плеч  $R_2$  и  $R_3$  будут значительно превосходить их по величине.



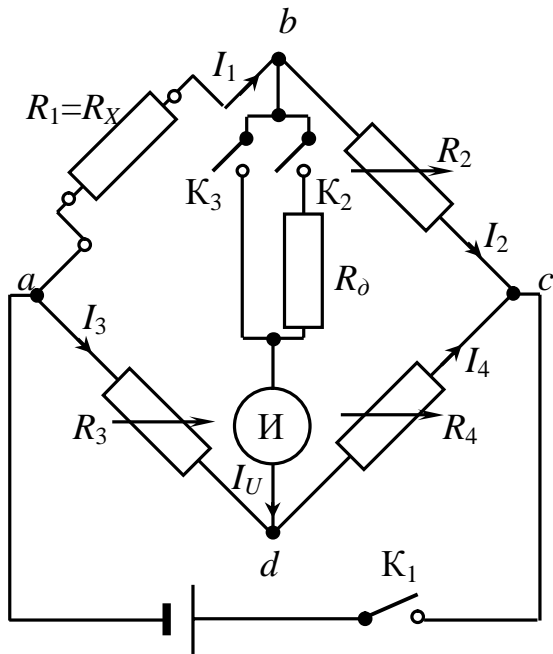


Рисунок 9.3

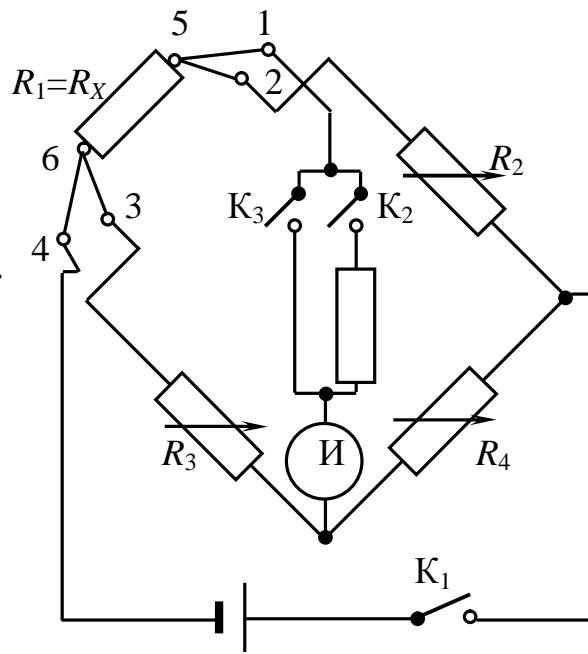


Рисунок 9.4

### Порядок выполнения опыта

В данном опыте применяется одинарный мост Р 316, принципиальная схема которого показана на рис 9.5. Мост Р 316 предназначен для измерения на постоянном токе электрического сопротивления в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $10^6$  Ом.

Конструкция моста позволяет производить измерения сопротивлений по двухзажимной или четырехзажимной схеме включения измеряемого сопротивления. Отношение сопротивлений плеч  $\frac{R_2}{R_4}$  можно установить в пределах от  $10^{-7}$  до 100 в десятикратном отношении, сравнительное сопротивление  $R_3$  от 0 до 10000 Ом через 1 Ом (рис. 9.5).

Питание моста производить от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 220 или 127 В. Предусматривается возможность питания моста от наружного источника постоянного тока через зажимы «НБ» (рис. 9.5).

В качестве нулевого индикатора используется гальванометр. В случае неисправности внутреннего индикатора, а также при питании моста

от наружного источника тока, через зажимы «НГ» рис. 9.5 подключается наружный индикатор.

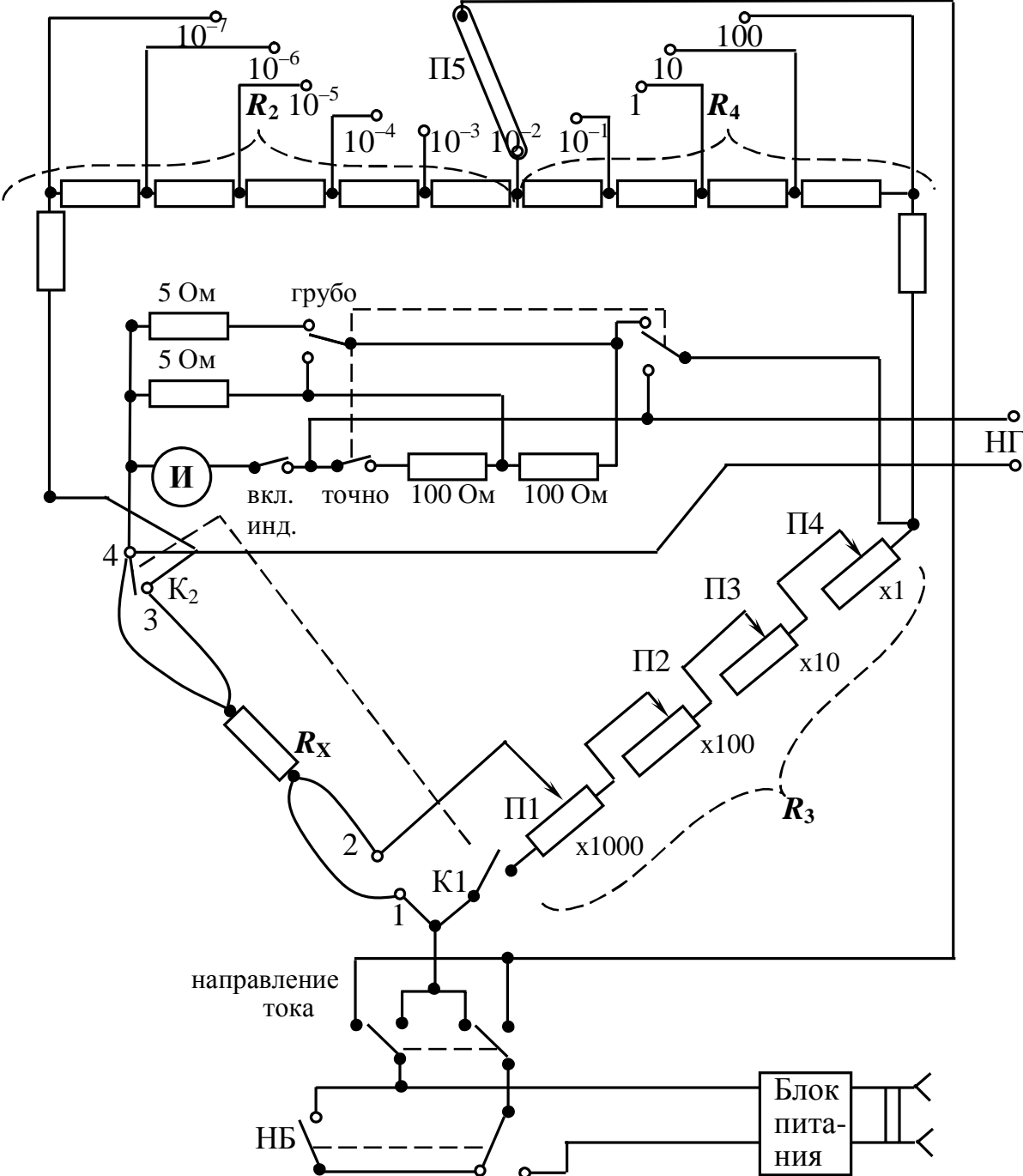


Рисунок 9.5

Расположение узлов моста показано на рис. 9.6.

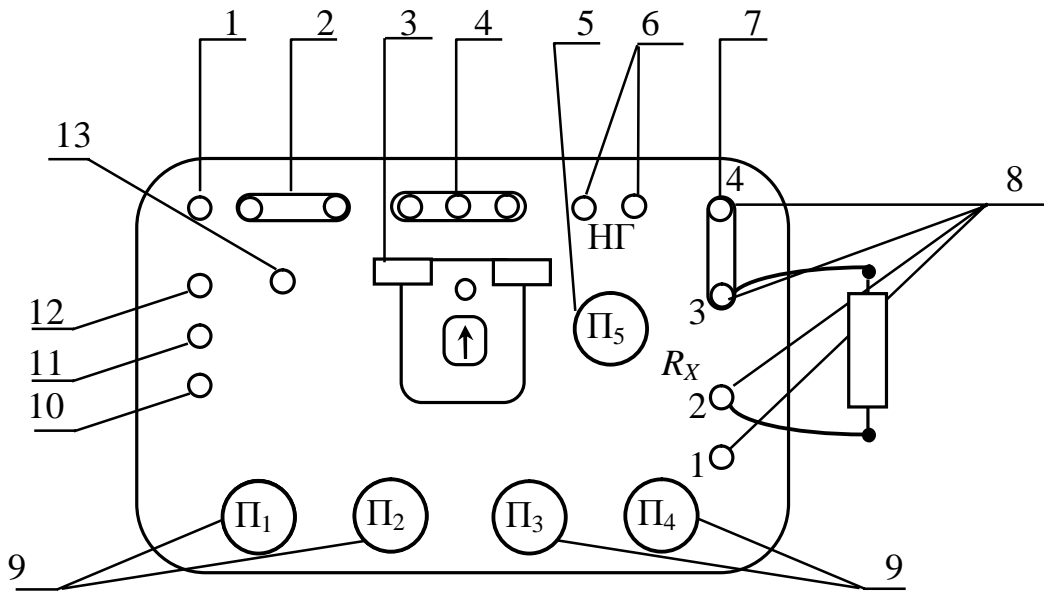


Рисунок 9.6

1 – кнопка для изменения направления тока в диагонали питания моста; 2 – переключатель замыкает зажимы «НБ» и одновременно подключает выпрямители в схему моста; 3 – корректор индикатора. Диапазон работы корректора ограничен красными отметками по шкале; 4 – токоподводы для включения прибора в сеть; 5 – переключатель отношения сопротивлений; 6 – зажимы для подключения наружного гальванометра; 7 – переключатель для замыкания зажимов «3» и «4» при измерении сопротивлений от 20 до  $10^6$  Ом; 8 – зажимы для подключения измеряемого сопротивления; 9 – переключатели магазинов резисторов в сравнительном плече; 10 – Кнопка «ТОЧНО»; 11 – кнопка «ГРУБО»; 12 – кнопка «Включение индикатора», включается только при работе моста со встроенным индикатором; 13 – тумблер для включения и выключения прибора.

### Измерение сопротивлений

Перед началом измерения необходимо отключить все кнопки на панели управления моста. Вилку шнура включить в сеть переменного тока, после чего тумблер – 13 (рис. 9.6) перевести в положение «ВКЛ», при этом загорается индикаторная лампочка.

Измеряемое сопротивление в пределах от 20 до  $10^6$  Ом (по указанию руководителя) подключается по двухзажимной схеме (рис.9.5), для чего замыкаются зажимы «3» и «4» с помощью переключки  $K_2$ . При замыкании переключкой зажимов «3» и «4» автоматически замыкается кнопка  $K_1$ . К зажимам «2» и «3» подключается измеряемое сопротивление.

Если порядок измеряемого сопротивления известен, то по таблице, указанной на внутренней стороне крышки, переключателем П<sub>5</sub> устанавливается соответствующее отношение сопротивлений  $\frac{R_2}{R_4}$ .

Если же порядок измеряемого сопротивления неизвестен, переключатель П<sub>5</sub> устанавливается в любое положение, затем нажимается кнопка «ГРУБО». Если при нажатии кнопки наблюдается резкий отброс стрелки индикатора, это свидетельствует о неудачном выборе отношения сопротивлений  $\frac{R_2}{R_4}$ . В этом случае необходимо переключателем П<sub>5</sub> установить другое отношение сопротивлений  $\frac{R_2}{R_4}$ , так чтобы отклонение стрелки индикатора было минимальным. Дальнейшее уравнивание схемы производится ручками декадных переключателей П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub> и П<sub>3</sub> (рис. 9.6) до тех пор, пока отклонение стрелки не будет превышать 0,5 – 0,8 мм от нулевой отметки.

Окончательное уравнивание схемы производится переключателем П<sub>3</sub> и П<sub>4</sub> после нажатия кнопки «ТОЧНО».

Для снижения погрешностей, возникающих от влияния термо и контактных ЭДС, каждое измерение производится дважды, с изменением направления тока. Для изменения направления тока в диагонали моста служит переключатель «ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТОКА». Результаты измерений заносятся в табл. 9.2.

$R_x$  вычисляется по формуле:

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_4}$$

где:  $R_3$  – величина сопротивления, установленная переключателями П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub>, П<sub>3</sub>, П<sub>4</sub>;  $\frac{R_2}{R_4}$  – отношение сопротивления плеч моста, установленное переключателем П<sub>5</sub>.

Наибольшая допустимая погрешность измерения сопротивления мостом Р316 в диапазоне  $0,01 \div 10^5$  Ом составляет  $\pm 0,2\%$ .

Причины погрешностей:

- 1) неточность изготовления образцовых сопротивлений;
- 2) недостаточная чувствительность моста к сопротивлению, не

позволяющая точно установить равновесие моста;

3) не учитываемые сопротивления соединительных проводов и контактов;

4) влияние термо и контактных ЭДС в цепи гальванометра и в местах присоединения измеряемого сопротивления.

Таблица 9.2

№ образца	$\frac{R_2}{R_4}$ по переключателю П <sub>5</sub>	Положительное направление тока в диагонали моста		Обратное направление тока в диагонали моста		Среднее значение $R_{XCP}$ , (Ом)	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием погрешности $R_0 = R_{XCP} - \Delta R$
		$R_3$ , Ом	$R_X$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_X$ , Ом		относит, %	абсолют, $\Delta R$	
1									
2									
3									

Измерение сопротивлений от  $10^{-5}$  до 20 Ом производится по четырехзажимной схеме включения, для чего кнопка К<sub>1</sub> и перемычка К<sub>2</sub> разомкнуты (рис.9.5). Измеряемое сопротивление  $R_X$  присоединяется к зажимам 1, 2, 3, 4 с помощью четырех проводников. Сопротивление проводников, идущих к зажимам «2» и «3», должно быть не более 0,005 Ом.

Процесс уравнивания и подсчет результата производится так же, как и при измерении сопротивлений от 20 до  $10^6$  Ом.

### Опыт 3. Измерение сопротивлений двойным мостом

Двойной мост предназначен для измерения малых сопротивлений в диапазоне ( $10^{-8}$ –1) Ом.

При измерении таких сопротивлений одинарным мостом возникают значительные погрешности вследствие влияния, оказываемого сопротивлением соединительных проводников, которыми измеряемое

сопротивление присоединяется к мосту, а также влияния переходных сопротивлений контактов.

Принципиальная схема двойного моста показана на рис. 9.7. Измеряемое сопротивление  $R_X$  и образцовое сопротивление  $R_N$  подключены к токовым (1 – 4, 7 – 8) и к потенциальным (2 – 3, 9 – 10) зажимам. С помощью потенциальных зажимов к  $R_X$  и  $R_N$  подключены две пары сопротивлений  $R_1, R_3$  и  $R_2, R_4$ , между которыми включен нуль-индикатор – обычно гальванометр магнитоэлектрической системы.

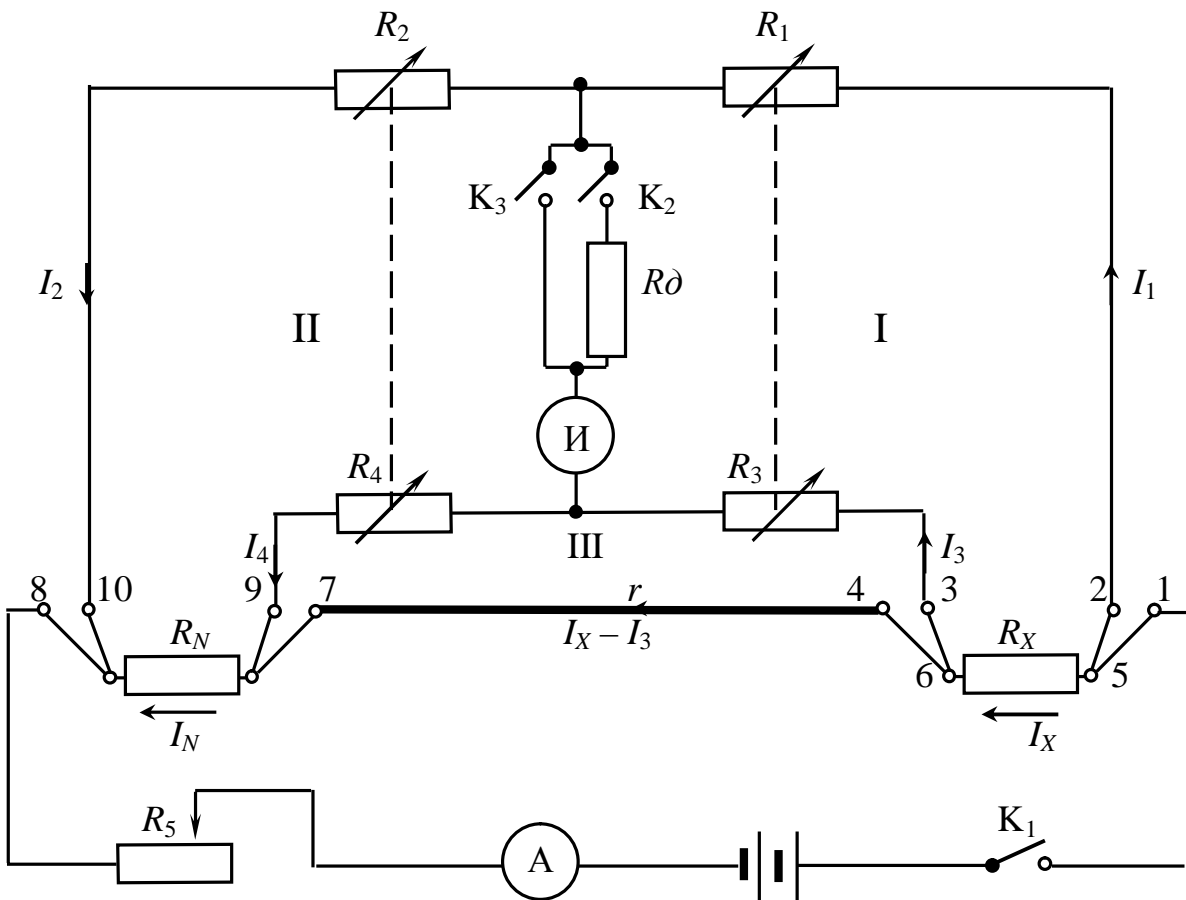


Рисунок 9.7

Равновесие моста фиксируется по отсутствию тока в нуль-индикаторе. При равновесии двойного моста по II закону Кирхгофа для I, II и III контуров (рис 9.7) можно записать:

1.  $I_1 R_1 = I_3 R_3 + I_X R_X$
2.  $I_2 R_2 = I_4 R_4 + I_N R_N$

$$3. I_3 R_3 + I_4 R_4 = (I_X - I_3) r.$$

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_4, \quad I_X = I_N$$

Решив эти уравнения относительно  $R_X$ , найдем:

$$R_X = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{r \cdot R_4}{r + R_3 + R_4} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) \quad (9.5)$$

Для исключения влияния сопротивления  $r$ , величина которого неопределенная, второе слагаемое в правой части уравнения (9.5) необходимо обратить в нуль. Этого добиваются выполнением условия

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Если это условие выполнено, то уравнение (9.5) примет вид:

$$R_X = R_N \frac{R_1}{R_2} = R_N \frac{R_3}{R_4} \quad (9.6)$$

Равенство  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  выполняется автоматически, путем механического соединения движков сопротивлений  $R_1, R_3$  и  $R_2, R_4$  (рис.9.7).

Для того чтобы некоторая неточность выполнения условия  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  не создавала заметной погрешности при определении измеряемого сопротивления по формуле (9.6), сопротивление  $r$  стремятся сделать как можно меньше.

При включении измеряемого сопротивления по схеме рис.9.7 получают высокую точность измерения, поскольку сопротивление подводящего проводника участка 1 – 5 входит в цепь, подводящую ток к мосту, и не влияет на результат измерения. Сопротивления подводящих проводников участков 2 – 5 и 3 – 6 суммируются соответственно с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_3$ , которые делают не менее 10 Ом, с тем, чтобы они были значительно больше сопротивлений этих участков. Сопротивление участка 4 – 6 должно быть как можно меньше, т.к. его величина суммируется с сопротивлением  $r$ . Аналогичное влияние оказывают и соединительные проводники сопротивления  $R_N$ .

## Порядок выполнения опыта

В данном опыте используется мост постоянного тока типа МОД (мост одинарно-двойной), которым можно производить измерения как по схеме двойного, так и по схеме одинарного моста.

Схема соединений двойного моста типа МОД-58 представлена на рис. 9.8.

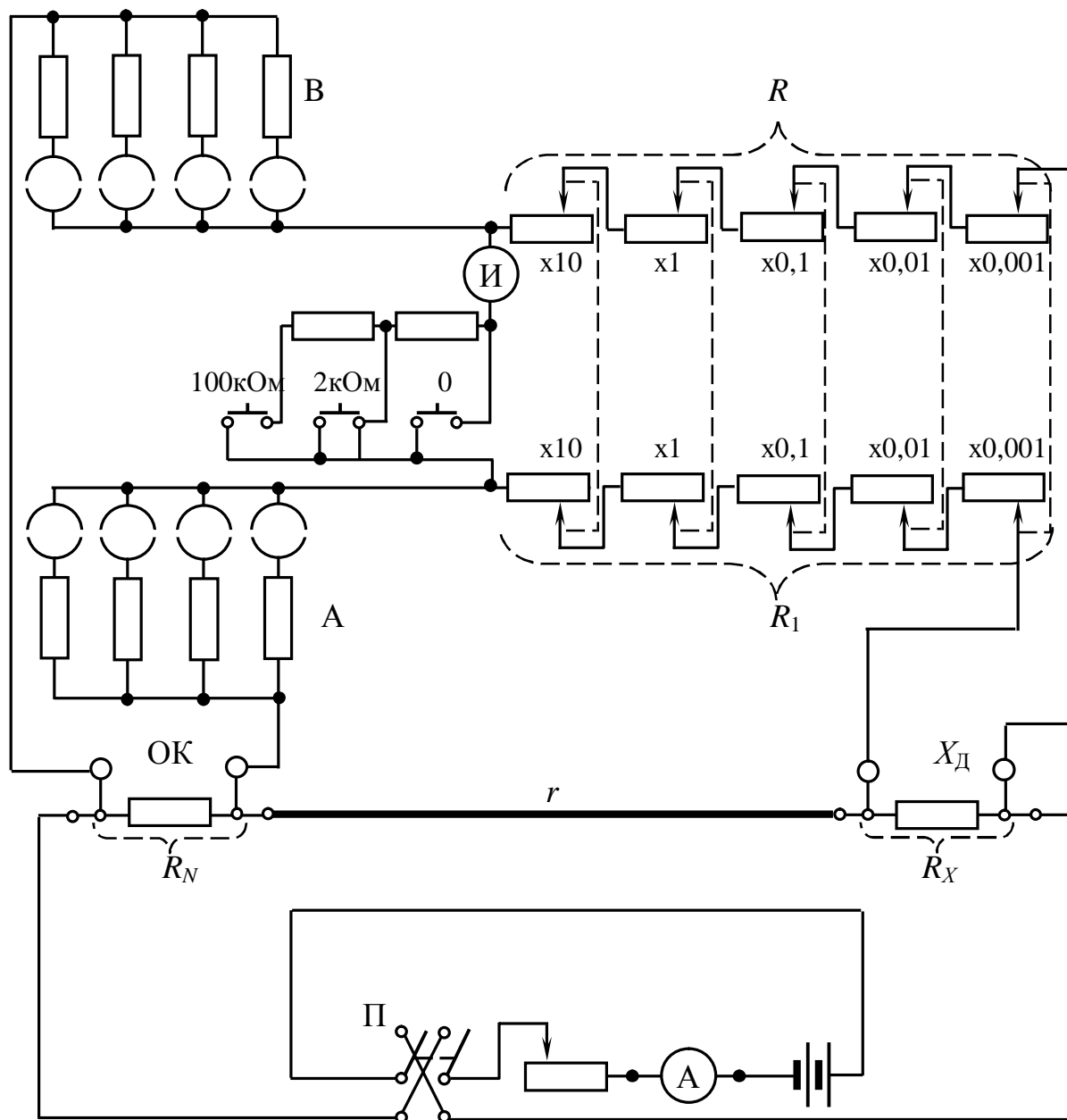


Рисунок 9.8

При такой схеме соединений двойного моста плечи  $R$  и  $R_1$  выполнены в виде пяти декадных рычажных магазинов с сопротивлениями



9x10; 9x1; 9x0,1; 9x0,01; 10x0,001 Ом. Плечи А и В выполнены в виде штепсельных магазинов с сопротивлениями по 10, 100, 1000 и 10000 Ом.

Для соблюдения равенства  $R = R_1$  в этих мостах рычаги магазина  $R$  механически жестко соединены с соответствующими рычагами магазинами  $R_1$ . Равенство сопротивлений А и В обеспечивается во время работы включением одинаковых сопротивлений на штепсельных магазинах.

Для подготовки моста к работе необходимо собрать схему согласно рис. 9.8. Если порядок измеряемого сопротивления  $R_X$  известен, то значение образцового сопротивления  $R_N$  и сопротивлений  $A = B$  можно выбрать по таблице, приведенной на крышке прибора.

Изменением сопротивлений плеч моста  $R$  и  $R_1$  (рис. 9.8) уравновесить мост при поочередном замыкании кнопок «100 кОм», «2 кОм» и «0». Произвести отчет по магазину сопротивления и вычислить значения измеряемого сопротивления по формуле (9.6)

$$R_X = R_N \frac{R}{B},$$

где:  $R_N$  – величина образцового сопротивления;  $R$  – величина сопротивления, установленная на двояном рычажном магазине;  $B$  – величина сопротивления, установленная на штепсельном магазине.

Если величина сопротивления  $R_X$  неизвестна, то прежде чем производить точное измерение, следует произвести предварительное измерение  $R_X$  при произвольно выбранных величинах сопротивлений  $R_N$  и  $B$ .

После чего производят окончательное измерение сопротивления.

Для снижения погрешностей, возникающих из-за влияния термо-ЭДС, могущих возникнуть в местах соединения разнородных металлических проводов, уравновешивание моста производят дважды при двух направлениях тока. Изменение направления тока производится с помощью переключателя П. Окончательный результат измерения определяется как среднее арифметическое значение данных, полученных при различных направлениях тока от источника.

Для моста МОД-58 наибольшая допустимая погрешность измерения сопротивления в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $10^7$  Ом не превышает 0,05%.

Результаты измерений занести в табл. 9.3.

Таблица 9.3

№№ п/п	Прямое направление тока в диагонали моста				Обратное направление тока в диагонали моста				$R_{XCP}$ Ом	Наибольшая основная погрешность		Результат измерения с указанием погрешности $R_0 = R_{XCP} - \Delta R$
	$R_N$	$R_{Ом}$	$B$	$R_X$ Ом	$R_N$	$R_{Ом}$	$B$	$R_X$ Ом		относит. $\delta, \%$	абсолют. $\Delta R$	

### Оформление отчета

В отчете должны быть представлены таблицы с результатами измерений и схемы рис. 9.2, рис. 9.3, рис. 9.7, а также расчетные формулы.

### Контрольные вопросы

1 Устройство и принцип действия омметра – логометра. Влияние изменения напряжения на показания омметра.

2 Мегомметр. Устройство, источник питания, пределы измерения.

3 Одинарный мост. Условие равновесия. Последовательность включения источника питания и нуль-индикатора.

4 Погрешности при измерении сопротивлений: влияние сопротивлений соединительных проводников, контактных сопротивлений, термо-ЭДС.

5 Выбор сопротивлений плеч моста с целью обеспечения максимальной точности измерений.

6 Двойной мост. Схема. Условия равновесия. Особенности подключения измеряемого сопротивления. Источники погрешности измерения сопротивлений.

### Список литературы

1 Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов. Под ред. Е.М. Душина.– Л.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 118, 121, 191 – 193.

## Лабораторная работа 10

### **ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА И СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫСОКООМНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПШТВ – 1**

Цель работы: ознакомление с устройством, принципом действия компенсатора постоянного тока ручного уравнивания; изучение особенностей высокоомного компенсатора, освоение техники измерения на нем при поверке электроизмерительных приборов электромеханической группы.

#### **Компенсационный метод измерения и принципиальная схема компенсатора постоянного тока**

Среди многообразия методов и средств измерений особое место занимают методы уравнивания, которые предполагают использование образцовых мер высокой точности и высокочувствительных устройств сравнения.

Методы уравнивания, реализованные в мостовых и компенсационных схемах, находят широкое применение при измерениях с высокой точностью напряжений, токов и сопротивлений и поверке измерительных приборов.

Компенсационный метод измерения основан на сравнении неизвестной величины с известной (образцовой) путем уравнивания. Он применяется для измерения ЭДС, напряжения (и величин, функционально с ними связанных) и заключается в том, что с неизвестным (измеряемым) напряжением встречно включается известное (компенсирующее) напряжение, которое регулируется до наступления уравнивания (компенсации). Момент равенства измеряемого и компенсирующего напряжений определяется по отсутствию реакции нуль-индикатора, т.е. сравнение этих напряжений осуществляется нулевым способом.

Основным достоинством компенсационного метода измерения является отсутствие потребления мощности от объекта измерения – в момент компенсации от источника измеряемой ЭДС (напряжения) ток не потребляется (если не считать токов, меньших по величине, чем ток, равный порогу чувствительности нуль-индикатора), в соединительных проводах, которыми компенсатор подключается к измеряемому объекту,

не наблюдается падений напряжения, следовательно, не нарушается режим работы цепи, в которой производится измерение. Этот режим эквивалентен идеальному случаю – включению вольтметра с бесконечно большим сопротивлением и позволяет исключить погрешность взаимодействия.

Вторым важным достоинством этого метода является высокая точность измерения – измеряемое напряжение отсчитывается по величине компенсирующего, известного с высокой степенью точности.

Компенсационные схемы – компенсаторы – получили свое название от принципа, заложенного в основу их работы. Компенсаторы для измерения ЭДС или напряжений часто называют потенциометрами. На рис. 10.1 изображена упрощенная схема потенциометра постоянного тока.

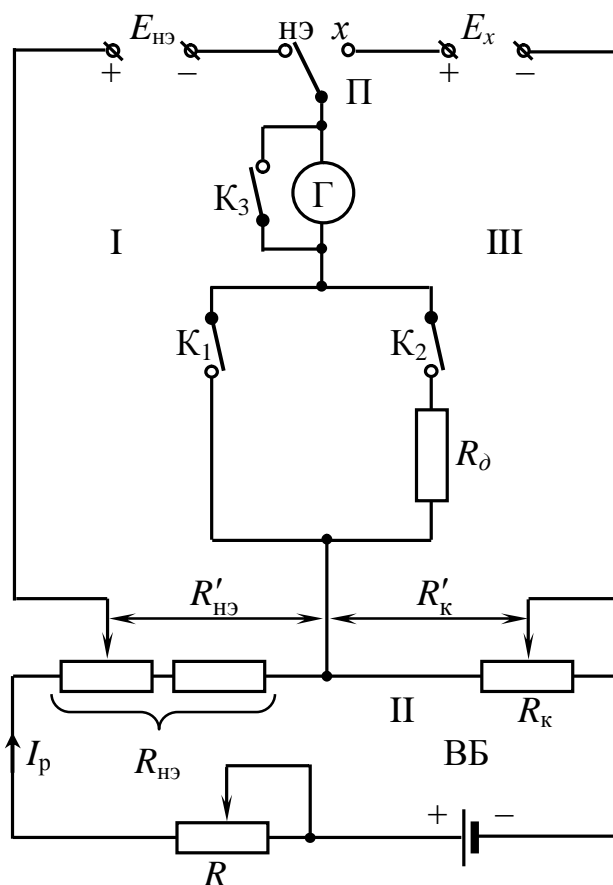


Рисунок 10.1

В схеме можно рассматривать три цепи (три контура). Первая цепь может быть названа цепью нормального элемента (контур I). В нее входит нормальный элемент с ЭДС  $E_{нэ}$ , гальванометр  $\Gamma$  и  $R'_{нэ}$  – часть образцового сопротивления  $R_{нэ}$ . Вторая цепь может быть названа цепью рабочего тока

или вспомогательной (контур II). Она содержит вспомогательную батарею ВБ (ЭДС ее должна быть больше ЭДС нормального элемента), регулируемое сопротивление  $R$ , образцовое сопротивление  $R_{нэ}$  и магазин компенсационного сопротивления  $R_k$ . Третья цепь (контур III) – измерительная состоит из источника измеряемой ЭДС или напряжения  $E_x$ , гальванометра  $\Gamma$  и  $R'_k$  – той части магазина компенсационного сопротивления  $R_k$ , которая в каждом конкретном случае является общей для контуров II и III.

### Погрешность измерения напряжения (ЭДС) компенсатором

Если компенсатор подготовлен к работе, то в контуре II (рис. 10.1) установлен рабочий ток  $I_p$ . При этом  $E_{нэ} = U_{нэ} = I_p R'_{нэ}$ . Это значит, что падения напряжений от  $I_p$  на сопротивлениях  $R_{нэ}$  и  $R_k$  будут соответствовать градуировке этих сопротивлений в вольтах.

Для измерения  $E_x$  переключатель II переводится в положение «X» и изменением сопротивления  $R_k$  добиваются отсутствия тока в цепи гальванометра. Тогда, очевидно,  $E_x = I_p R'_k$ , но  $I_p = \frac{E_{нэ}}{R'_{нэ}}$ , следовательно,

$$E_x = E_{нэ} \frac{R'_k}{R'_{нэ}}. \quad (10.1)$$

Таким образом, правомерно сделать вывод, что неизвестное напряжение (или ЭДС) сравнивается с образцовой мерой – ЭДС  $E_{нэ}$ . Это справедливо лишь при условии постоянства рабочего тока  $I_p$ . Поэтому к его источнику, т.е. к ВБ, предъявляются требования высокой стабильности. Значение  $E_x$  сразу отсчитывается по состоянию магазина компенсационного сопротивления  $R_k$ , т.е. по  $R'_k$ .

Высокая точность компенсационного метода измерения напряжения определяется:

1 Отсутствием погрешности взаимодействия, обусловленной собственным потреблением прибора.

2 Высокой точностью, с которой известно компенсирующее напряжение.

3 Высокой точностью установления самого факта уравнивания двух напряжений.

Анализируя выражение (10.1), погрешность измерения напряжения можно определить как

$$\delta_U = \delta_{НЭ} + \delta_{R_k} + \delta_{R_{НЭ}} + \delta_{\Gamma}, \quad (10.2)$$

где  $\delta_{НЭ}$  – погрешность определения  $E_{НЭ}$ ;  $\delta_{R_k}, \delta_{R_{НЭ}}$  – погрешности изготовления  $R_k$  и  $R_{НЭ}$ ;  $\delta_{\Gamma}$  – погрешность установления самого факта компенсации (двух встречно включенных напряжений) при помощи гальванометра.

Так как значение ЭДС НЭ, рассчитанное по соответствующей формуле, округляют до ближайшего значения в пятом знаке, то очевидно, что максимально возможная погрешность может составить

$$\delta_{НЭ} = \frac{\Delta E_{НЭ}}{E_{НЭ}} \cdot 100\% = \pm \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{1,0180} \cdot 100\% \approx \pm 0,005\% .$$

Следует учесть, что  $\delta_{НЭ}$  может быть принята как величина, равная классу точности НЭ. Насыщенные НЭ выпускаются следующих классов точности: 0,001; 0,002; 0,005; ненасыщенные – 0,001; 0,005; 0,02.

Погрешности подгонки сопротивлений  $R_{НЭ}$  и  $R_k$  при изготовлении составляют  $\delta_R \leq \pm 0,01\%$ .

Чтобы сопротивления  $R_{НЭ}$  и  $R_k$  не изменяли своей величины с течением времени и под воздействием внешних условий (например, температуры, влажности), их выполняют из манганина и подвергают старению.

Точность установления самого факта компенсации двух напряжений определяется чувствительностью применяемого нуль-индикатора. Допустим, что измеряется напряжение порядка 1 В и в качестве нуль-индикатора используется гальванометр с постоянной по напряжению  $C_U = 10^{-5}$  В/дел. Чувствительность считается оптимальной, если гальванометр реагирует на изменение сопротивления на единицу младшей декады (дискреты) компенсатора, так как точность сравнения двух напряжений, кроме чувствительности нуль-индикатора, определяется еще и величиной ступеньки ступенчато-регулируемого компенсирующего напряжения. Поскольку в момент равновесия гальванометр не дает заметного отклонения, то очевидно, что разность  $\Delta U = U_x - U_k$  меньше  $10^{-5}$  В. Следовательно,

погрешность в определении равенства двух напряжений составит

$$\delta_{\Gamma} = \frac{\Delta U}{U_x} \cdot 100\% \leq \pm \frac{10^{-5}}{1} \cdot 100\%; \quad \delta_{\Gamma} \leq \pm 0,001\% .$$

Мы знаем, что постоянство величины  $I_p$  зависит от стабильности ЭДС вспомогательной батареи ВБ. Обычно стабильность ЭДС ВБ ниже стабильности ЭДС НЭ, поэтому при длительной работе с потенциометром делают периодические проверки величины рабочего тока.

Просуммировав полученные составляющие, можно сделать вывод, что погрешность измерения напряжения (ЭДС) компенсатором постоянного тока не превышает 0,01 – 0,02%.

### **Чувствительность компенсатора постоянного тока**

Одной из основных характеристик потенциометра является чувствительность, равная

$$S_n = S_{\text{ск}} \cdot S_{\Gamma} = \frac{\Delta I}{\Delta E_x} \cdot \frac{\Delta \alpha}{\Delta I} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta E_x}, \quad (10.3)$$

где  $S_{\Gamma}$  – чувствительность гальванометра;  $S_{\text{ск}}$  – чувствительность схемы компенсатора;  $\Delta I$  – приращение тока в цепи гальванометра, вызванное изменением, в ранее уравновешенной измерительной цепи, измеряемого напряжения на величину  $\Delta E_x$ ;  $\Delta \alpha$  – изменение отклонения подвижной части гальванометра.

Учитывая, что  $S_{\Gamma}$  величина известная и постоянная, чувствительность потенциометра зависит от чувствительности схемы компенсатора, которая является величиной переменной

$$S_{\text{ск}} = \frac{\Delta I}{\Delta E_x} .$$

При одном и том же значении  $\Delta E_x$  приращение тока гальванометра  $\Delta I$ , в каждом конкретном случае, пропорционально полному сопротивлению измерительной цепи (контур III схемы рис. 10.1)

$$R_{\text{из}} = R_{\Gamma} + R_{\text{вн}} ,$$

где  $R_{\Gamma}$  – внутреннее сопротивление гальванометра;  $R_{\text{вн}}$  – сопротивление

внешней, по отношению к гальванометру, части цепи (при замене всех источников ЭДС их внутренними сопротивлениями,  $R_{ВВ} = 0$ ), равное

$$R_{ВН} = \frac{R_k (R_{НЭ} + R)}{R_k + R_{НЭ} + R} + R_x, \quad (10.4)$$

где  $R_k = \frac{U_k}{I_p}$ ;  $R_{НЭ} + R = \frac{E_{ВВ}}{I_p} - R_k$ ;

здесь  $R_x$  – сопротивление источника измеряемого напряжения.

Тогда,

$$S_{ск} = \frac{1}{R_{из}} = \frac{1}{R_{Г} + R_{ВН}}, \quad (10.5)$$

так как

$$\Delta I = \frac{\Delta E_x}{R_{из}}.$$

Значение сопротивления  $R_{ВН}$  непостоянно и во многом зависит от изменения  $R'_k$ , т.е. в конечном счете, от значения измеряемой  $E_x$ .

Чувствительность схемы компенсатора, а, следовательно, и чувствительность потенциометра монотонно возрастают при уменьшении всех составляющих сопротивления  $R_{из}$ . Именно поэтому чувствительность низкоомного потенциометра выше, чем высокоомного.

### **Порядок выполнения работы**

Перед тем как приступить к работе, следует подробно ознакомиться с принципиальной схемой компенсатора и основными техническими данными используемого в работе потенциометра типа ППТВ–1.

#### Потенциометр ППТВ–1

Потенциометры, выпускаемые промышленностью, могут быть разделены на две основные группы – потенциометры большого сопротивления (высокоомные) и потенциометры малого сопротивления (низкоомные). Потенциометры первой группы имеют сопротивление измерительной цепи в пределах 10000 – 40000 Ом. Рабочий ток обычно равен  $10^{-4} \div 10^{-3}$  А. Применяются они для измерения ЭДС и напряжения до 1 ÷ 2,5 В и, в основном, предназначаются для поверки приборов класса



точности 0,1; 0,2; 0,5 , а также для лабораторных исследований.

Полная схема потенциометра ППТВ–1 приведена на рис. 10.2.

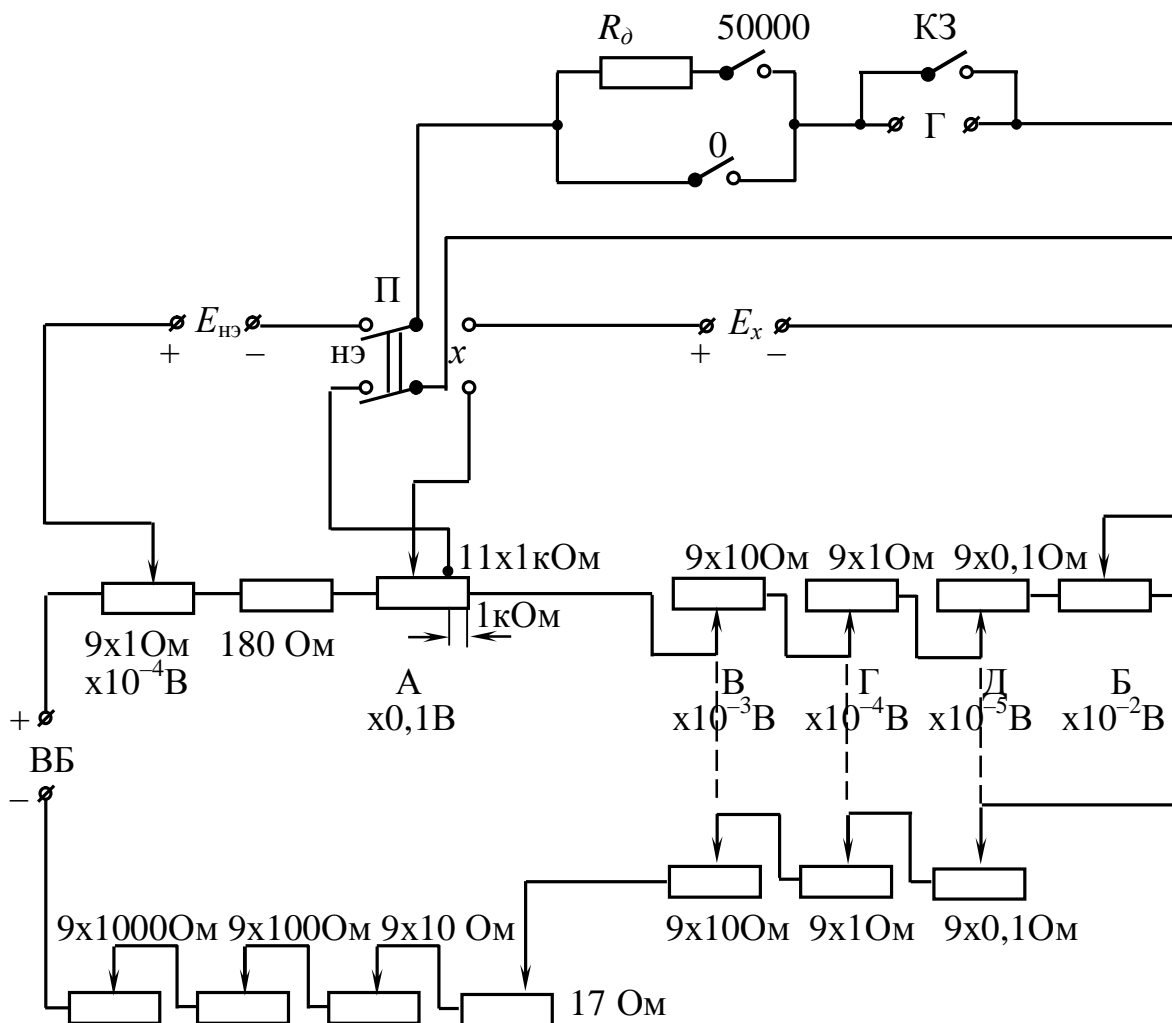


Рисунок 10.2

Регулировка рабочего тока ( $I_p = 10^{-4} \text{ А}$ ) рассчитана на использование вспомогательного источника (ВБ) напряжением 1,2 В. Предел измерения потенциометра может быть увеличен с помощью калиброванного делителя напряжения, причем коэффициент деления делителя напряжения выбирают из соображений возможно более полного использования декад компенсирующего сопротивления прибора.

Потенциометр позволяет отсчитать соответственно по декадам компенсирующего сопротивления десятые, сотые, тысячные, десяти- и стотысячные доли вольта. Сопротивление всех пяти декад компенсирующего сопротивления равно  $12000 \Omega$ . Величины падений

напряжений на каждой ступени декад А, Б, В, Г, Д обозначены на верхней панели в виде множителей у соответствующих ручек. Декады В, Г, Д выполнены двойными, что обеспечивает при их регулировке постоянство сопротивления цепи рабочего тока. Для регулировки рабочего тока в компенсаторе предусмотрены трехдекадный магазин сопротивлений  $9 \times 1000 + 9 \times 100 + 9 \times 10$  Ом и переменное сопротивление 17 Ом. В качестве сопротивления  $R_{НЭ}$  (по схеме рис. 10.1) используются последовательно соединенные часть декады А компенсирующего сопротивления (10 ступеней по 1000 Ом), постоянное сопротивление 180 Ом и декада переменного сопротивления  $9 \times 1$  Ом. Ручка этой декады выведена на верхнюю панель прибора, на которой кроме зажимов «НЭ», «ВБ», «Х», «Г» (рис.10.3) и ручек соответствующих переменных сопротивлений, находятся кнопки «0», «50000», «КЗ» и двухпозиционный переключатель («НЭ–Х»).

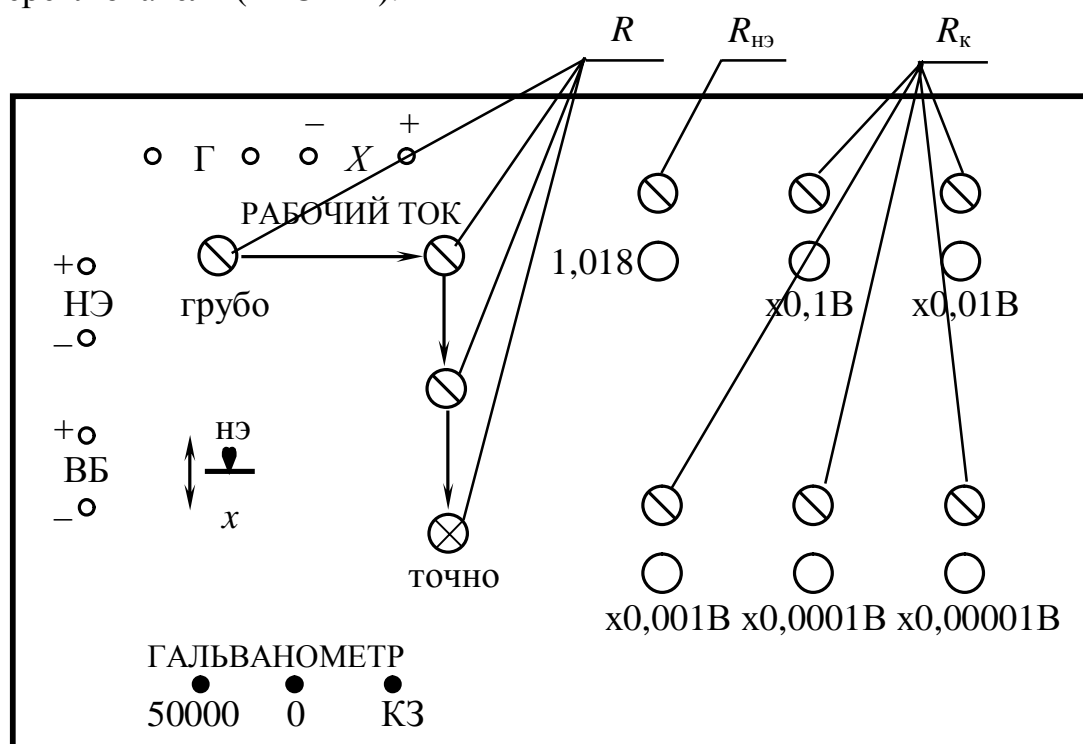


Рисунок 10.3

В качестве источника эталонной ЭДС в схеме компенсатора применяется нормальный элемент. Нормальные элементы (НЭ) выпускаются промышленностью двух типов: насыщенные и ненасыщенные. Согласно стандарту насыщенные элементы выпускаются двух классов – I и II, ненасыщенные – в качестве элементов III класса. Насыщенные НЭ обладают высокой степенью однотипности. Значения

ЭДС нормальных элементов укладываются в очень узкие границы – примерно от 1,0185 до 1,0187 В при температуре элемента, равной +20°С, т.е. расхождения в ЭДС отдельных элементов не превышает 200 мкВ.

Весьма важным свойством НЭ является высокая стабильность значения ЭДС каждого отдельного элемента при надлежащих условиях хранения и применения. Значение ЭДС НЭ может сохраняться неизменным в течение многих лет с погрешностью до нескольких десятков микровольт. Государственный стандарт допускает годовые изменения ЭДС НЭ I класса – не более 500 мкВ и II класса – не более 100 мкВ. Значение ЭДС НЭ довольно сильно, но закономерно, зависит от температуры. Для всех насыщенных НЭ эта зависимость выражается формулой

$$E_{\text{НЭ } t} = E_{\text{НЭ } 20^{\circ}} - 40,6 \cdot 10^{-6} (t^{\circ} - 20^{\circ}) - 0,95 \cdot 10^{-6} (t^{\circ} - 20^{\circ})^2 + 0,01 \cdot 10^{-6} (t^{\circ} - 20^{\circ})^3.$$

Последнее слагаемое практически учитывается только при самых точных измерениях и расчете  $E_{\text{НЭ}}$  до десятых долей милливольт.

НЭ обладает внутренним сопротивлением 500 – 1000 Ом.

При пользовании НЭ следует соблюдать определенные меры предосторожности:

а) не подвергать их толчкам и тряске; после транспортировки необходимо выдержать не менее 24 часов до начала эксплуатации;

б) не перегружать; ток, отбираемый от элемента, должен быть не более 1 мкА;

в) хранить при малых колебаниях температуры и оберегать от действия солнечных лучей;

г) не рекомендуется применять НЭ при температурах ниже +5°С и выше +30°С.

Критическое сопротивление гальванометра, обеспечивающее наиболее быстрое успокоение подвижной части, выбирается из условия

$$R_{\text{вн}} \approx 0,8R_{\text{кр}}.$$

Из анализа выражения 10.4 следует, что в схеме компенсатора ППТВ–1 гальванометр должен иметь относительно большое критическое сопротивление.

## Основные технические характеристики компенсатора ПШТВ–1

Класс точности	Количество декад	Предел измерения	Значение рабочего тока	Единица младшей (последней) декады	Сопротивление измерительной цепи	Допустимая по техническим условиям абсолютная погрешность, $\Delta U$	Напряжение источника питания
%		В	А	В	Ом	В	В
0,03	5	1,2	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	12000	$\pm(300U_{кx} + U_{км}) \cdot 10^{-6}$	1,2–2,2

### Опыт 1. Подготовка компенсатора к работе

Подготовка прибора к работе заключается в установке рабочего тока в компенсаторе. Это реализуется компенсационным методом с применением меры ЭДС – нормального элемента. Необходимо заметить, что калиброванные  $R_{нэ}$  и  $R_k$  проградуированы в вольтах и сделано это при протекании через них тока  $I_p$ . Поэтому, если на  $R_{нэ}$  установить  $R'_{нэ}$ , соответствующий падению напряжения (по градуировке на этом сопротивлении)  $U_{нэ}$ , равному  $E_{нэ}$ , и изменять сопротивление  $R$  до тех пор, пока ток, проходящий через гальванометр, станет равным 0 ( $E_{нэ}$  скомпенсирована напряжением  $U_{нэ}$ ), можно, таким образом, установить в контуре II рабочий ток.

#### Порядок выполнения опыта

- 1 Собрать схему компенсатора (рис. 10.1), подключив к нему вспомогательную батарею, нормальный элемент и гальванометр.
- 2 Определить температуру в помещении.
- 3 Рассчитать ЭДС нормального элемента.
- 4 Установить на компенсаторе сопротивление  $R'_{нэ}$ , соответствующее рассчитанному значению ЭДС нормального элемента.
- 5 Предъявить схему преподавателю.
- 6 Переключатель «НЭ–Х» перевести в положение «НЭ» и установить рабочий ток, для чего регулировкой сопротивления  $R$  добиться нулевого показания гальванометра.

Примечание. Процесс уравнивания компенсатора следует начинать при минимальной чувствительности нуль-индикатора

( $R_0 = 50 \text{ кОм}$ ). Кнопка «50000» включается кратковременно отрывисто и регулировка тока производится декадной частью сопротивления  $R$ . Для успокоения подвижной части гальванометра периодически включается кнопка «КЗ» в момент прохождения указателя через 0. Если при крайних положениях сопротивления  $R$  указатель гальванометра отклоняется в одну и ту же сторону от нулевого положения, то это свидетельствует о том, что схема имеет дефекты (неправильная полярность подключения  $E_{\text{нз}}$  или ВБ, несоответствие значения  $E_{\text{вб}}$  указанному значению, обрыв цепи и т.д.). Окончательная, точная регулировка  $I_p$  производится изменением реохордной части сопротивления  $R$  при постоянно нажатой кнопке «0».

7 Показать преподавателю результат.

## Опыт 2. Проверка миллиамперметра

Основным требованием к схеме измерения и оборудованию, используемому для проверки измерительных приборов, является обеспечение условия

$$\delta_{\text{изм}} \leq (0,2 \div 0,3) \gamma_m,$$

где  $\delta_{\text{изм}}$  – погрешность измерения образцовым прибором;  $\gamma_m$  – класс точности поверяемого прибора.

Как видно из соотношения, при проверке приборов класса точности 0,1; 0,2 необходимо обеспечить погрешность измерения  $(0,02 \div 0,05)\%$ . Такую точность измерения можно получить, как мы знаем, применяя в качестве образцового прибора компенсатор, погрешность измерения которым в каждом конкретном случае может быть определена из выражения

$$\delta_k = \pm \left[ c + d \left( \frac{U_{\text{км}}}{U_x} - 1 \right) \right],$$

где  $c$  – относительная погрешность измерения компенсатором в наиболее благоприятных ( $U_{\text{км}} = U_x$ ) условиях – класс точности компенсатора;  $U_{\text{км}}$  – предел его измерения;  $U_x$  – значение измеряемого напряжения;  $d = 40 \frac{\Delta U}{U_{\text{км}}}$  – для компенсаторов класса 0,0001 – 0,03;  $\Delta U$  – единица

младшей декады компенсатора (дискрета).

Второе слагаемое характеризует влияние аддитивной составляющей погрешности измерения при уменьшении измеряемой величины  $U_x$ .

Для поверки миллиамперметра последовательно с ним включается образцовое сопротивление  $R_{обр}$  и эта цепь запитывается независимым (от компенсатора) источником (схема рис. 10.4).

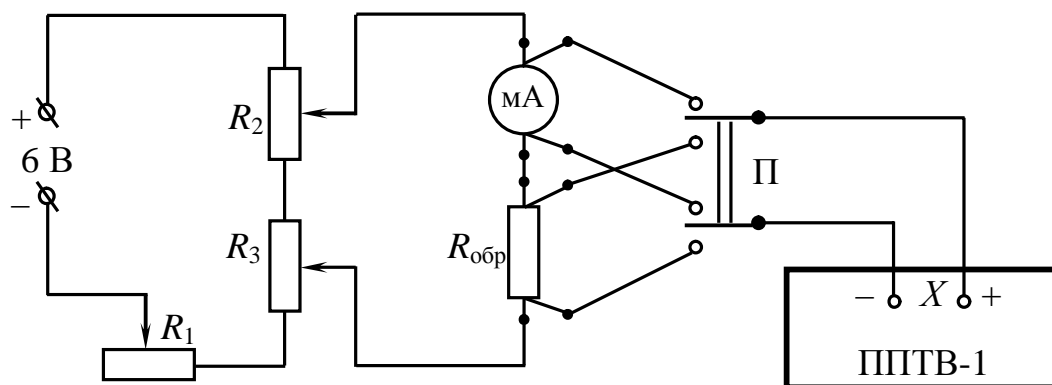


Рисунок 10.4

Поверка миллиамперметра сводится к измерению компенсатором падения напряжения на образцовом сопротивлении  $R_{обр}$  от тока, протекающего через поверяемый прибор и  $R_{обр}$ .

При этом

$$U_{обр} = I_x R_{обр} = I_p R'_k,$$

тогда

$$I_x = I_p \frac{R'_k}{R_{обр}} \quad (10.6).$$

Отсюда следует, что для измерения тока компенсатором, в последнем обязательно необходимо установить рабочий ток, то есть подготовить компенсатор к работе.

Методика измерения напряжения компенсатором описана в разделе «Погрешность измерения напряжения компенсатором» данных методических указаний.

Согласно требованиям государственного стандарта поверка прибора осуществляется на всех оцифрованных делениях его шкалы путем определения в каждой из этих точек вариации показаний, поправки,

которая, как правило, определяется в делениях, а также наибольших абсолютной и приведенной погрешностей, по значениям которых делается заключение о классе точности прибора.

Определяя вариации прибора на оцифрованных делениях, измерения падения напряжения на  $R_{обр}$  следует проводить дважды, для каждой цифровой отметки, при подходе к ней слева и справа (при возрастании и убывании тока).

### Порядок выполнения опыта

1 Собрать схему рис. 10.4, не подключая источник питания 6 В.

2 Установить регулировочные реостаты  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  в положение, соответствующее минимальному напряжению в контуре поверяемого прибора.

3 Подать напряжение 6 В на схему регулировки питания, обратив особое внимание на полярность источника, с тем, чтобы падение напряжения на сопротивлении  $R_{обр}$  подключалось бы встречно с падением напряжения на сопротивлении  $R_k$  (схемы компенсатора) от рабочего тока (на зажимах «X» компенсатора указана полярность).

4 Убедиться в возможности плавной регулировки напряжения во всем диапазоне измеряемых величин (от первого оцифрованного деления до  $\alpha_m$  поверяемого прибора).

5 Рассчитать значение падений напряжений  $U_{обр}$  на сопротивлении  $R_{обр}$  от токов, соответствующих оцифрованным делениям поверяемого прибора, и занести их в таблицу 10.1.

6 Установить показание поверяемого прибора на первое оцифрованное деление  $\alpha_x$ , аккуратно подводя стрелку к делению слева и установить в соответствующие положения ручки сопротивления  $R_k$  потенциометра.

**Внимание!** Если при регулировке напряжения стрелка поверяемого прибора случайно перешла оцифрованное деление (даже на незначительную часть деления, но так, что для восстановления стрелки на это деление придется подводить ее к делению справа), то необходимо уменьшить показания прибора на  $5 \div 10$  делений шкалы и опять, увеличивая напряжение, установить стрелку прибора на оцифрованное деление, подводя ее к нему только слева.

7 Переключателем П подать на компенсатор падение напряжения с  $R_{обр}$  и провести измерение действительного значения измеряемого напряжения ( $U_{хд1} \rightarrow$ ), для чего на компенсаторе переключатель «НЭ»–«Х» перевести в положение «Х» и, изменяя компенсирующее сопротивление, добиться отсутствия отклонения указателя гальванометра.

Примечание. В течение всего опыта цепь гальванометра замыкается отрывисто кнопкой «50000» при грубой регулировке и затем – постоянно кнопкой «0» при точной регулировке. После каждого измерения необходимо обязательно разомкнуть цепь гальванометра (кнопка «0»).

Отсчитать показания компенсатора в вольтах и занести данные ( $U_{хд1} \rightarrow$ ) в таблицу 10.1.

Таблица 10.1

Показания поверяемого прибора		Расчетное значение падения напряжения на $R_{обр}$ .	Действительное значение падения напряжения на $R_{обр}$ (показания $R_k$ компенсатора)			Наибольшая абсолютная погрешность поверяемого прибора	Действительное значение измеряемой величины в делениях поверяемого прибора	Поправка к показаниям поверяемого прибора	Вариация показаний поверяемого прибора
$\alpha_x$	$I_x$	$U_x = I_x R_{обр}$	$U_{хд1}$ $\rightarrow$	$U_{хд2}$ $\leftarrow$	$U_{хдср}$	$\Delta I = \frac{U_x - U_{хд}}{R_{обр}}$	$\alpha_0 = \frac{U_{хдср}}{R_{обр} C_i}$	$C = \alpha_0 - \alpha_x$	$\frac{U_{хд2} - U_{хд1}}{R_{обр}}$
дел	мА	В	В	В	В	мА	дел	дел	мА

8 Провести измерения на всех оцифрованных делениях поверяемого прибора (повторить действия по пп. 6 и 7).

9 Провести измерения на всех оцифрованных делениях поверяемого прибора, подходя к делениям строго справа (повторить действия аналогично указанным в пп. 6, 7) и занести данные ( $U_{хд2} \leftarrow$ ) в таблицу 10.1.

10 Провести расчет всех остальных, указанных в табл. 10.1, величин, предварительно рассчитав постоянную поверяемого прибора по току

$$C_i = \frac{I_m}{\alpha_m} \left[ \frac{\text{мА}}{\text{дел}} \right];$$



11 Определить следующие характеристики поверяемого прибора:

а) наибольшую приведенную вариацию

$$\beta = \frac{(I_{\text{зд}2} - I_{\text{зд}1})_m}{I_m} \cdot 100\% = \frac{(U_{\text{зд}2} - U_{\text{зд}1})_m}{R_{\text{обр}} I_m} \cdot 100\% ;$$

б) наибольшую приведенную погрешность

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta I_m}{I_m} \cdot 100\% ;$$

в) класс точности  $\gamma_m$ .

### Опыт 3. Измерение сопротивления поверяемого прибора

Схема рис. 10.4 предназначена и для измерения сопротивления поверяемого прибора  $R_x$ . Если его величина примерно известна, то образцовое сопротивление  $R_{\text{обр}}$  по величине выбирается того же порядка. При помощи переключателя П к зажимам компенсатора подключается поочередно  $R_{\text{обр}}$  и  $R_x$ . Измеренные компенсатором падения напряжений соответственно равны

$$U_{\text{обр}} = I_p R'_{\text{к}1} = I_x R_{\text{обр}}$$

$$U_x = I_p R'_{\text{к}2} = I_x R_x ,$$

и затем используются для определения  $R_x$

$$\frac{U_x}{U_{\text{обр}}} = \frac{R'_{\text{к}1}}{R'_{\text{к}2}} = \frac{R_x}{R_{\text{обр}}}$$

Отсюда следует, что, в отличие от измерения компенсатором напряжения (ЭДС) и тока, при измерении сопротивления не требуется точная установка  $I_p$ , но важно сохранить на время измерения стабильность токов: в контуре рабочего тока компенсатора и тока, протекающего через  $R_{\text{обр}}$  и  $R_x$ .

Учитывая, что ток, протекающий через  $R_{\text{обр}}$  и  $R_x$ , за время проведения опыта может несколько измениться и предположив, что он

будет монотонно спадать, необходимо одно из падений напряжений ( $U_x$  или  $U_{обр.}$ ) измерять дважды (до и после измерения другого) и взять для расчетов их среднеарифметическое значение. При этом  $R_x$  определится как

$$R_x = \frac{U_x}{\frac{U_{обр1} + U_{обр2}}{2}} R_{обр} = \frac{U_{x1} + U_{x2}}{2 U_{обр}} R_{обр}. \quad (10.7).$$

### Порядок выполнения опыта

1 Собрать схему (рис. 10.4), обратив особое внимание на полярность подключения (через переключатель П) падений напряжений на  $R_{обр}$  и  $R_x$  к компенсатору.

2 После проверки схемы преподавателем установить на приборе (сопротивление которого измеряется) ток, близкий к номинальному.

3 Рассчитать падение напряжений на  $R_{обр}$  и, если  $R_x$  известно хотя бы примерно, на  $R_x$ .

4 На компенсаторе выставить  $R_k \approx U_{обр}$ , т.е.  $R'_{к1}$

5 Переключатель П установить в положение измерения падения напряжения на  $R_{обр}$ .

6 Компенсатором измерить  $U_{обр.1}$  и занести в таблицу 10.2.

Таблица 10.2

Падение напряжения на $R_{обр}$			Падение напряжения на $R_x$	$R_{обр}$	$R_x$
$U_{обр.1}$	$U_{обр.2}$	$U_{обр. ср}$	$U_x$		
В	В	В	В	Ом	Ом

7 Переключатель П поставить в нейтральное положение.

8 На компенсаторе выставить  $R_k \approx U_x$ , т.е.  $R'_{к2}$

9 Переключатель П установить в положение измерения падения напряжения на  $R_x$ .

10 Компенсатором измерить  $U_x$  и занести в таблицу 10.2.

11 Повторить действия по пп. 7, 4, 5, 6 и измерить  $U_{обр.2}$ .

12 Рассчитать  $R_x$ .

## Содержание отчета

В отчете должны быть приведены: принципиальная схема компенсатора (рис. 10.1) и схема измерения тока и сопротивления (рис. 10.4); таблицы экспериментальных и расчетных данных (табл. 10.1, 10.2); построенная по данным таблицы 10.1 кривая поправок к поверяемому прибору  $C = f(\alpha_x)$ ; основные расчетные формулы.

## Контрольные вопросы

- 1 Принцип действия компенсатора постоянного тока. Достоинства компенсационного метода.
- 2 Как конструктивно выполнено сопротивление  $R_k$ ?
- 3 Какие физические величины можно измерить компенсатором?
- 4 Назначение нормального элемента в схеме компенсатора. Как изменяется его ЭДС от температуры окружающей среды?
- 5 Как правильно подключать измеряемую ЭДС к компенсатору?
- 6 Какими составляющими определяется точность измерения на потенциометре?
- 7 Как подготовить компенсатор к работе? Нужно ли знать обязательно величину  $I_p$ ?
- 8 Как измерить напряжение с помощью компенсатора?
- 9 Как расширить предел измерения компенсатора по напряжению?
- 10 Как влияет неточность установки  $I_p$  на точность измерения компенсатором напряжения, тока и сопротивления?

## Список литературы

- 1 Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Е.М. Душина.– Л. Энергоатомиздат, 1987.– С. 56–61, 199–203.
- 2 Электрические измерения / Под ред. А.В. Фремке и Е.М. Душина.– Л. Энергия, 1980.– С. 205–209.
- 3 Э.А. Писаревский, Электрические измерения и приборы. – Энергия, 1970.– С. 219–234.
- 4 Методические указания к лабораторным работам по курсу «Электрические измерения электрических и неэлектрических величин». (Специальные методы измерений).– Харьков, ХПИ, 1989.

## Лабораторная работа 11

### **ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ЭДС И ТОКОВ НИЗКООМНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Цель работы: ознакомление с принципом действия компенсатора постоянного тока ручного уравнивания; изучение особенностей низкоомного компенсатора, освоение техники измерения на нем.

#### **Общие сведения**

В технике измерений часто возникает необходимость в измерении малых ЭДС постоянного тока. Так, например, при исследовании термопреобразователей, которые используются для построения измерителей действующего значения тока и напряжения, а также в качестве квадраторов, т.е. преобразователей, выходная величина которых (обычно не превышающая нескольких милливольт) пропорциональна квадрату входной. Термо-ЭДС, развиваемая термопарой, составляет от 10 до 60 мкВ/°С.

Измерение малых ЭДС представляет большие трудности, так как в измерительной цепи возможно наличие паразитных контактных и термо-ЭДС, соизмеримых с контролируемой величиной. Использование в этих случаях высокоомных компенсаторов нерационально вследствие увеличения погрешности измерения. Одна из причин такого роста погрешности измерения малых ЭДС заключается в том, что при обычном для высокоомных компенсаторов рабочем токе в отсчете участвует малое число декад компенсирующего сопротивления.

Как правило, такие измерения проводятся с помощью низкоомных компенсаторов постоянного тока.

#### **Порядок выполнения работы**

Прежде, чем приступить к работе, следует в начале подробно ознакомиться с принципом действия компенсатора постоянного тока ручного уравнивания, его схемой, методикой измерения напряжения (ЭДС), тока и сопротивления (описаны в методических указаниях к лабораторной работе 10), а затем рассмотреть особенности и основные технические данные используемого в работе потенциометра типа ППТН-1.

## Потенциометр ППТН-1

Известно, что потенциометры, выпускаемые промышленностью, могут быть разделены на две основные группы – потенциометры большого сопротивления (высокоомные) и потенциометры малого сопротивления (низкоомные). Потенциометры второй группы имеют сопротивление измерительной цепи в пределах десятков (а иногда – сотен) Ом. Рабочий ток этих потенциометров составляет 1–10–25 мА. Применяются они для точных измерений малых ЭДС и напряжений, так как обладают значительно большей чувствительностью, чем высокоомные (см. лабораторная работа 10, раздел «Чувствительность компенсаторов постоянного тока»).

Полная схема потенциометра ППТН-1 приведена на рис. 11.1.

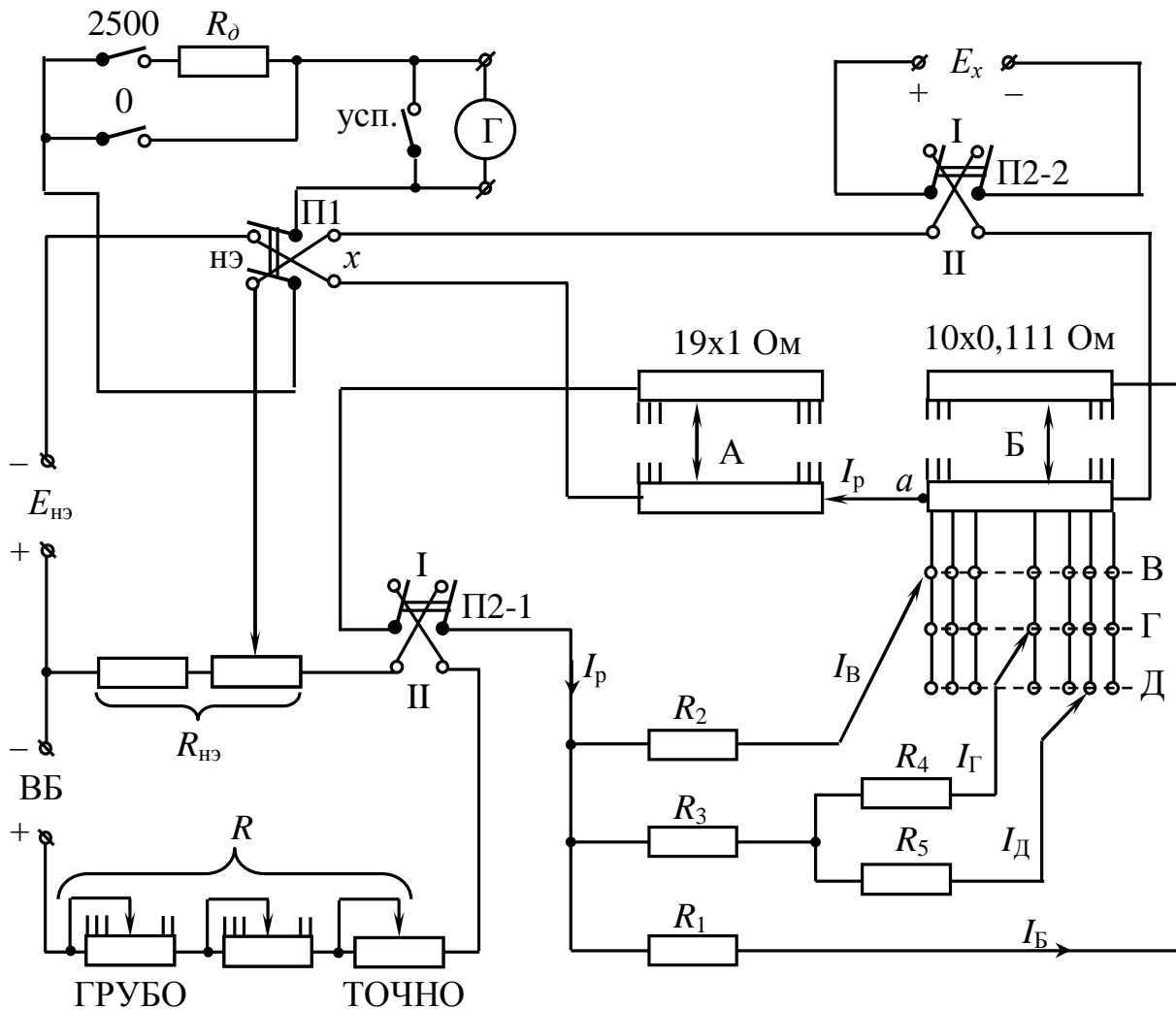


Рисунок 11.1

Регулировка рабочего тока ( $I_p = 10^{-3} \text{ A}$ ) рассчитана на использование вспомогательного источника (ВБ) напряжением от 3,6 до 4,6 В. Верхний предел измерения потенциометра равен 20,111 мВ.

Потенциометр позволяет отсчитать по декадам А, Б, В, Г, Д компенсирующего сопротивления соответственно единицы (до 19), десятые, сотые, тысячные и десятитысячные доли милливольт. Сопротивление компенсационной цепи со стороны зажимов гальванометра равно 20 Ом и практически не зависит от значения измеряемой ЭДС. Величины падений напряжений на каждой ступени декад А, Б, В, Г, Д обозначены на верхней панели прибора в виде множителей у соответствующих ручек (рис. 11.2).

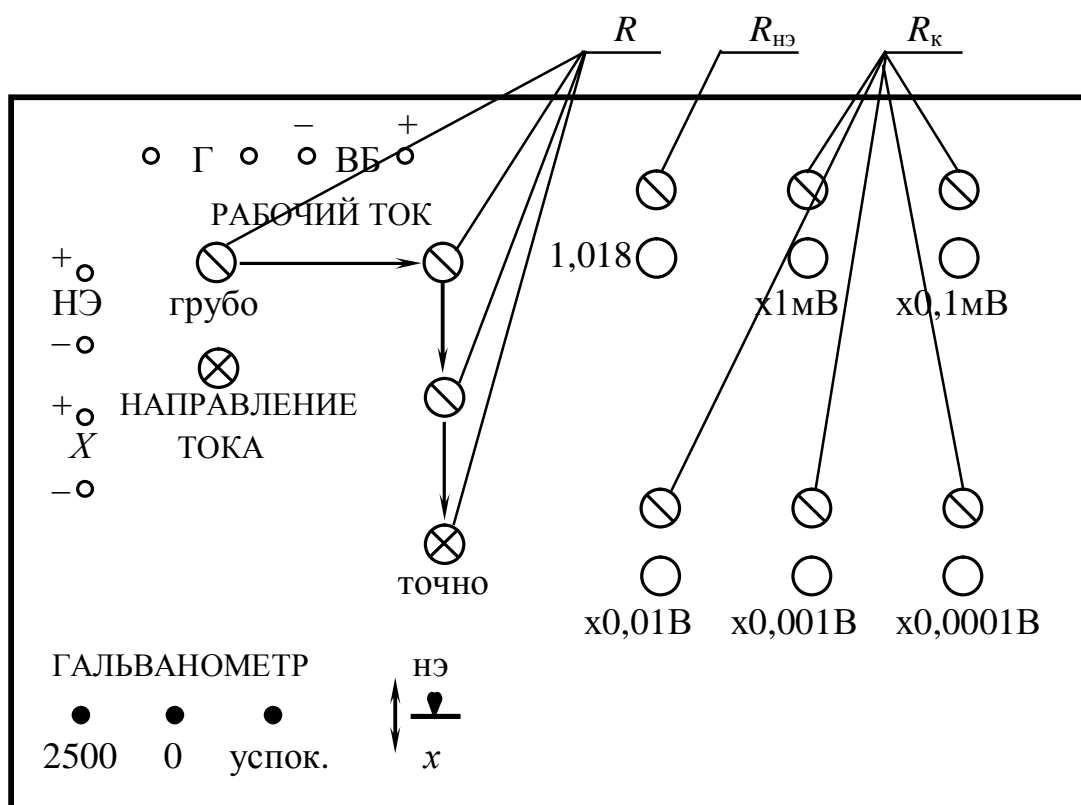


Рисунок 11.2

Декады А, Б выполнены двойными, а при построении остальных трех рабочих декад В, Г, Д использован способ суперпозиции токов. От источника ВБ, через переключатель П2-1 (рис. 11.1), рабочий ток поступает в токораспределительное устройство, состоящее из сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ , разветвляется на четыре части  $I_B, I_V, I_\Gamma, I_D$ ,

находящиеся в соотношении 1:0,1:0,01:0,001, и проходит через щетки декадных переключателей Б, В, Г, Д, образующих совместно с двойной декадой Б схему суперпозиции токов. В зависимости от положения щеток декад Б, В, Г, Д разветвленные части рабочего тока проходят через то или иное число компенсирующих сопротивлений двойной декады Б и к точке «а» подходят, слившись в суммарный рабочий ток, равный 1 мА, который далее проходит по тому или иному количеству компенсирующих сопротивлений двойной декады А. Двойные декады А и Б, как известно, имеют кроме компенсирующих, замещающие сопротивления, что и позволяет поддерживать сопротивление цепи рабочего тока постоянным при регулировке этих декад.

Двойные декады А и Б составляют соответственно 19х1 Ом и 10х0,1111 Ом. Трущиеся контакты (щетками) переключателей всех компенсационных декад практически не влияют на результат измерения, так как они включаются последовательно с большими сопротивлениями  $R_1 - R_5$ , которые соответственно равны 998,8 Ом, 10000 Ом, 81820 Ом, 10000 Ом, 100000 Ом.

Если учесть, что  $I_p = I_B + I_V + I_\Gamma + I_D$ , то

$$I_B = \frac{I_p}{1,111}.$$

Компенсирующее напряжение можно определить как

$$U_k = I_p \frac{R_A}{19} (n_A + 0,1n_B + 0,001n_\Gamma + 0,0001n_D),$$

где  $n$  – положение переключателей щеток каждой из пяти компенсационных декад;  $R_A$  – полное сопротивление декады А.

Для регулировки рабочего тока в компенсаторе предусмотрены: трехдекадный магазин сопротивлений для грубой регулировки и переменное сопротивление (реохорд) – для точной.

При точных измерениях малых ЭДС особое значение приобретают погрешности, вносимые паразитными контактными и термо-ЭДС компенсатора (не путать с термо-ЭДС термопреобразователя, который является объектом исследования). Для исключения этих погрешностей в схеме потенциометра предусмотрена возможность одновременно изменять направления рабочего тока (переключатель П2-1) и полярность включения

измеряемой ЭДС  $E_x$  (переключатель П2-2). Переключатели П2-1 и П2-2 схемы рис. 11.1 управляются ручкой «НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА» (рис. 11.2). При неизменных по знаку и величине паразитных ЭДС производят два измерения при разных положениях переключателя П2 и, взяв среднеарифметическое значение их результатов, получают действительное значение измеряемой ЭДС.

В качестве источника эталонной ЭДС в схеме низкоомного компенсатора применяется нормальный элемент, ЭДС которого может находиться в пределах от 1,01800 до 1,01895 В.

### Основные технические характеристики компенсатора ППТН-1

Класс точности	Количество декад	Предел измерения	Значение рабочего тока	Единица младшей (последней) декады	Сопротивление измерительной цепи	Допустимая по техническим условиям абсолютная погрешность, $\Delta U$	Напряжение источника питания
%		В	А	В	Ом	В	В
0,015	5	$20,111 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$	20	$\pm (150U_{кх} + 2U_{км}) \cdot 10^{-6}$	3,6–4,6

В связи с невысоким сопротивлением измерительной цепи компенсатора критическое сопротивление гальванометра, обеспечивающее наиболее быстрое успокоение подвижной части, должно быть относительно небольшим.

### **Опыт 1. Подготовка компенсатора к работе**

Подготовка прибора к работе заключается в установке рабочего тока в компенсаторе. Это реализуется путем установки на сопротивлении  $R_{нэ}$ , проградуированном в вольтах, его части  $R'_{нэ}$ , численно равной  $E_{нэ}$ , и последующим изменением сопротивления  $R$  до тех пор, пока ток гальванометра станет равным нулю.

#### **Порядок выполнения опыта**

1 Собрать схему, подключив к компенсатору (рис. 11.2) вспомогательную батарею, нормальный элемент и гальванометр.



- 2 Определить температуру в помещении.
- 3 Рассчитать ЭДС нормального элемента.
- 4 Установить на компенсаторе сопротивление  $R'_{нэ}$ , численно равное рассчитанному значению ЭДС нормального элемента.
- 5 Предъявить схему преподавателю.
- 6 Переключатель «НЭ–Х» перевести в положение «НЭ» и установить рабочий ток, для чего регулировкой сопротивления  $R$ , добиться нулевого положения подвижной части гальванометра.
- 7 Показать преподавателю результат.

Примечание. Переключатель «НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА» должен находиться в одном из крайних положений. Процесс уравнивания компенсатора следует начинать при минимальной чувствительности нуля-индикатора ( $R_0 = 2500 \text{ Ом}$ ). Кнопка «2500» включается кратковременно, отрывисто и регулировка тока производится декадной частью сопротивления  $R$ . Для успокоения подвижной части гальванометра периодически, в момент прохождения указателя через нуль, включается кнопка «УСПОКОЕНИЕ». Если при крайних положениях сопротивления  $R$ , указатель гальванометра отклоняется в одну и ту же сторону от нулевого положения, то это свидетельствует о том, что схема имеет дефекты (неправильная полярность подключения  $E_{нэ}$  или ВБ, несоответствие значения  $E_{ВБ}$  указанному значению, обрыв цепи и т.д.). Окончательная, точная регулировка  $I_p$  производится изменением реохордной части сопротивления  $R$  при постоянно нажатой кнопке «0».

## **Опыт. 2. Определение вольт-амперной характеристики преобразователя**

Объектом исследования является используемый в работе термопреобразователь, представляющий собой вакуумный прибор, в баллоне которого расположены нить накала (нагреватель) и термopара.

ЭДС на выходе термопреобразователя равна

$$E = KI^2$$

где  $K$  – коэффициент преобразования,  $I$  – ток нагревателя.

Такой преобразователь действующего значения тока работает в диапазоне частот до 100 МГц, а ЭДС на его выходе не зависит от формы и рода тока нагревателя.

Очевидно, определение вольт-амперной характеристики преобразователя с помощью компенсатора постоянного тока возможно только на постоянном токе. Методика измерения компенсатором напряжения (выражение 10.1) и тока (выражение 10.6) описаны в лабораторной работе 10. Исходными в этом процессе являются данные исследуемого термопреобразователя: при номинальном токе в 10 мА он развивает ЭДС порядка 1,2 мВ.

### Порядок выполнения опыта

1. Собрать схему рис 11.3, не подключая источник 6 В.

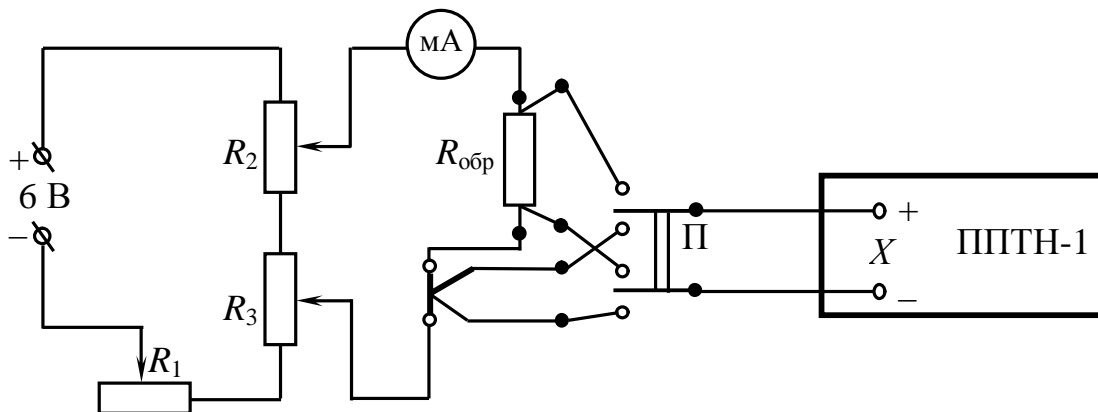


Рисунок 11.3

2 Установить регулировочные реостаты  $R_1, R_2, R_3$  в положение, соответствующее подаче минимального напряжения в контур нагревателя термопреобразователя.

3 Подать на схему напряжение 6В, обратив особое внимание на полярность его подключения, с тем, чтобы падение напряжения на сопротивлении  $R_{обр}$  подключалось бы (через переключатель П) встречно с падением напряжения на сопротивлении  $R_k$  схемы компенсатора от рабочего тока (на клеммах «X» компенсатора указана полярность).

4 Установить ток через нагреватель термопреобразователя  $I_x = 10\text{мА}$  (контроль осуществляется по миллиамперметру).

5 Подать на вход компенсатора, через переключатель П падение напряжения на  $R_{обр}$ , измерить его действительное значение ( $U_{обр+}$ ) и занести в табл. 11.1.



Примечание. В процессе измерения, вначале, на компенсаторе установить декады  $R_k$  в положение, соответствующее значению  $R'_k$ , численно равному расчетному значению  $I_x \cdot R_{обр}$ , а затем, корректируя  $R'_k$ , добиться отсутствия отклонения указателя гальванометра, не забывая о том, что цепь гальванометра замыкается при грубой регулировке отрывисто кнопкой «2500», а при точной – постоянно кнопкой «0». После каждого измерения обязательно разомкнуть цепь гальванометра (кнопка «0»).

6 Изменить положение переключателя «НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА» на противоположное и, повторив действия по п. 5, измерить ( $U_{обр} -$ ) и занести в табл. 11.1.

7 Перевести переключатель П в положение, при котором на вход компенсатора подается ЭДС термопреобразователя.

8 Установить  $R'_k$ , равное измеряемой ЭДС – 1,2 мВ, измерить ее действительное значение ( $E_0 -$ ) и занести в табл. 11.1.

9 Изменив положение переключателя «НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА» на противоположное, измерить ( $E_0 +$ ) и занести в табл. 11.1.

10 Рассчитать  $U_{обр.ср}, I_0, E_{0 ср.}$  и коэффициент преобразования термопреобразователя

$$K = \frac{E_{0ср}}{I_0^2}, \quad (11.1)$$

после чего получить  $E_p$  и  $\delta$ , т.е. заполнить табл. 11.1 для тока  $I_x = 10\text{мА}$ , исключая позицию б, так как она рассчитывается для предварительной оценки величины выходной ЭДС преобразователя, которая для тока 10 мА нам известна.

11 Получить у преподавателя задание: значения величин токов ( $I_x$ ) вольт-амперной характеристики исследуемого термопреобразователя и, произведя предварительный расчет его выходной ЭДС, заполнить позицию б табл. 11.1 для этих значений токов.

12 Повторить действия пп. 5, 6, 7, 8, 9 и занести все экспериментальные и расчетные данные в табл. 11.1.

Примечание. Выполняя действие по п. 8, устанавливать на компенсаторе декады сопротивления  $R_k$  в положение, соответствующее

значениям  $R'_k$ , равным расчетным значениям выходной ЭДС (позиция 6 табл. 11.1).

### Содержание отчета

В отчете должны быть приведены: схема измерения (рис. 11.3), таблица с экспериментальными и расчетными данными, расчет коэффициента преобразования, вольт-амперная характеристика  $E_{0cp} = f_1(I_0)$  и кривая погрешности  $\delta = f(I_0)$  исследуемого термопреобразователя.

### Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается принцип действия компенсатора постоянного тока?
- 2 В чем состоят особенности конструкции сопротивления  $R_k$ ?
- 3 Каково назначение нормального элемента в схеме компенсатора? Правила обращения с НЭ.
- 4 Как подготовить компенсатор к работе?
- 5 Каковы особенности измерения малых ЭДС постоянного тока? Назначение переключателя «НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА» в схеме компенсатора.
- 6 Назначение ключей «2500», «0», «УСПОКОЕНИЕ» в цепи гальванометра. Исходя из каких соображений подбирается в схему компенсатора гальванометр, по такой характеристике, как критическое сопротивление?

### Список литературы

- 1 Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Е.М. Душина.– Л. Энергоатомиздат, 1987.– С. 56–61, 199–203.
- 2 Э.А. Писаревский, Электрические измерения и приборы. – Энергия, 1970.– С. 219–234.
- 3 Методические указания к лабораторным работам по курсу «Электрические измерения электрических и неэлектрических величин». (Специальные методы измерений).– Харьков, ХПИ, 1989.
- 4 Лабораторная работа 10 настоящих методических указаний.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних робіт  
з курсу «Аналогові вимірювальні прилади» (частина 2)  
для студентів спеціальності 7.091302  
“Метрологія та вимірювальна техніка”  
денної та заочної форм навчання

Російською мовою

Укладачі: ДЯКІН Віктор Іванович,  
БОНДАРЕНКО Валерій Іванович,  
ЄРМОЛОВСЬКА Людмила Павлівна,  
ДАВІДЕНКО Олександр Петрович

Відповідальний за випуск С.І. Кондрашов

Роботу до друку рекомендував О.І. Рогачов

В авторській редакції

Дизайн Тополов Ігор Іванович

План 2003 р., п. 141

Підписано до друку . Формат 60×84 1/16. Папір офсет. Друк – ризографія.  
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. . Обл. - вид. арк. .  
Наклад 100 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №196 від 10.07.2000р.

---

Друкарня НТУ “ХПІ”