

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

КАФЕДРА № 6 МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ

МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ.

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОВЕДЕНИЕ
КАЛИБРОВКИ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Санкт-Петербург

2022

Составители: Т.П. Мишура, К.В. Епифанцев

Рецензент: кандидат технических наук

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы, краткие методические указания к ее выполнению, требования к содержанию и оформлению отчета по дисциплинам «Метрология, стандартизация и сертификация», «Метрология» для всех технических специальностей и направлений, «Общая теория измерений» для 270301.

Предназначены для студентов основных технических направлений и специальностей университета очной и очно-заочной форм обучения.

Подготовлены к публикации кафедрой «Метрологическое обеспечение инновационных технологий и промышленной безопасности» и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом Санкт-Петербургским государственным университетом аэрокосмического приборостроения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Целью лабораторного практикума является развитие практических навыков при работе со средствами измерений различных физических величин с учетом их метрологических характеристик.

Студенты допускаются к выполнению лабораторной работы только при успешной сдаче зачета по предыдущей работе и при соответствующей предварительной подготовке.

Для подготовки к работе необходимо ознакомиться с основными теоретическими сведениями по методике предстоящих измерений, схемой лабораторной установки, измерительными приборами, входящими в ее состав, с общими требованиями по электробезопасности и подготовить форму отчета по предстоящей работе.

Форма отчета должна содержать титульный лист, наименование пунктов задания, схемы измерений, схемы (структурные или электрические принципиальные) основных приборов, изучаемых в работе, и таблицы для записи показаний приборов и полученных результатов измерений.

Отчет, представляемый к зачету по лабораторной работе, в окончательном виде также должен содержать расчетные формулы, кривые расчетных и экспериментальных зависимостей, выполненные при использовании любого программного обеспечения, и выводы по каждому пункту задания.

При построении градуировочной кривой средства измерения масштаб графика следует выбирать, руководствуясь правилами, изложенными в Приложении 1.

В процессе подготовки к зачету следует обратить внимание на контрольные вопросы, приводимые в конце описания каждой лабораторной работы, и пользоваться литературой, перечисленной в указателе.

1.1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Для измерения напряжения применяются стрелочные и электронные цифровые приборы. Они относятся к классу вольтметров.

Напряжение постоянного тока может быть измерено вольтметрами электромагнитной, электро- и ферродинамической или электростатической систем. Но наиболее широко в измерительной практике используются вольтметры, имеющие измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

Устройство и принцип действия. Магнитоэлектрический измерительный механизм (рис. 1,а) выполнен в виде постоянного магнита 1, снабженного полюсными наконечниками 2, между которыми укреплен стальной сердечник 3. В кольцеобразном воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником, помещена подвижная катушка 5, намотанная на алюминиевый каркас 6 (рис.1,б). Катушка выполнена из очень тонкого провода и укреплена на оси, связанной со стрелкой спиральными пружинами 4 или растяжками. Через эти же пружины или растяжки осуществляется подвод тока к катушке.

При прохождении тока I по катушке на каждый из ее проводников будет действовать электромагнитная сила. Суммарное действие всех электромагнитных сил создает вращающий момент M , стремящийся повернуть катушку и связанную с ней стрелку при-

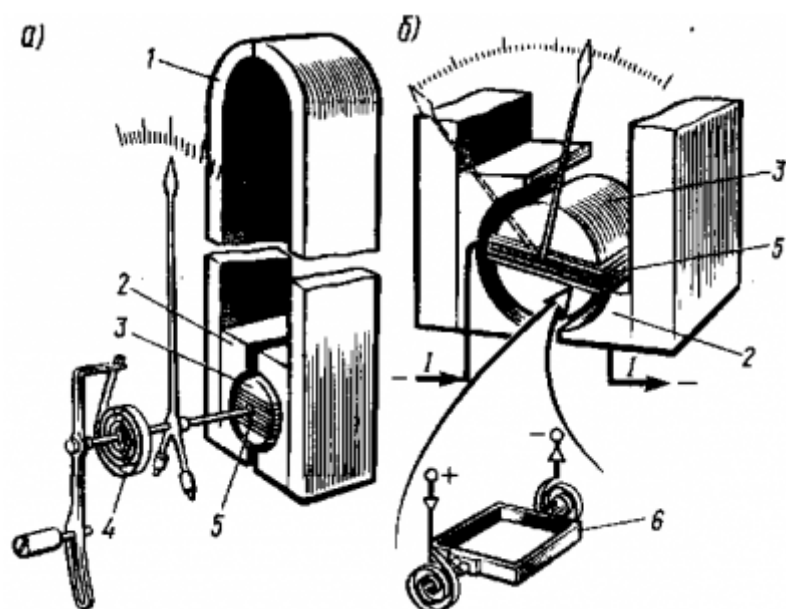


Рис. 1. Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма

бора на некоторый угол α . Так как индукция B магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, неизменна и не зависит от тока I , то

$$M = c_1 I$$

где c_1 — постоянная величина, зависящая от конструктивных параметров данного прибора (числа витков катушки, ее размеров, индукции B в воздушном зазоре). Повороту подвижной части измерительного механизма препятствует противодействующий момент $M_{пр}$, создаваемый спиральными пружинами или растяжками. Этот момент пропорционален углу закручивания, т. е. углу поворота α подвижной части; при этом

$$M_{пр} = c_2 \varphi$$

где c_2 — постоянная величина, зависящая от жесткости спиральных пружин или растяжек. Поворот подвижной части измерительного механизма и стрелки будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент M , создаваемый током I , не уравновесится противодействующим моментом $M_{пр}$.

В момент равновесия $M = M_{пр}$, откуда получим:

$$\varphi = (c_1/c_2) I = kI$$

Следовательно, угол поворота φ подвижной части пропорционален измеряемому току I . Поэтому магнитоэлектрические приборы имеют равномерную шкалу. Постоянная величина k называется *чувствительностью прибора*, она характеризуется углом поворота стрелки в градусах или в делениях шкалы, приходящимся на единицу изменения измеряемой величины.

Величина, обратная чувствительности, $c=1/k$ называется *постоянной прибора*, или *ценой деления*. Если умножить отсчет по шкале на цену деления прибора c , то можно определить значение измеряемой величины. Для устранения колебаний подвижной системы прибора при переходе стрелки из одного положения в другое электроизмерительные приборы снабжают воздушными или магнитно-индукционными демпферами.

Воздушный демпфер (рис. 2, а) выполнен в виде цилиндрической камеры, внутри которой перемещается крыло 1 в виде поршня, связанного с подвижной системой. При перемещении подвижной части происходит торможение движущегося крыла в камере 2, и колебания подвижной части быстро затухают.

Магнитно-индукционный демпфер (рис. 2, б) выполнен в виде неподвижного постоянного магнита 3, который при повороте подвижной системы прибора индуцирует вихревые токи в металлическом (алюминиевом) секторе 4, установленном на оси прибора.

Взаимодействие этих токов с магнитом создает согласно правилу Ленца силу, тормозящую подвижную систему и обеспечивающую быстрое затухание колебаний стрелки. В магнитоэлектрических приборах роль демпфера выполняет алюминиевый каркас 6 катушки (см. рис. 2,б). При повороте

подвижной части прибора изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас катушки. Благодаря этому в каркасе индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем магнита создает тормозной момент, обеспечивающий быстрое успокоение подвижной части.

Для того чтобы любой электроизмерительный прибор обеспечил требуемую точность измерений, необходимо, чтобы отклонение подвижной системы прибора определялось только вращающим моментом, создаваемым катушкой, и противодействующим усилием пружины. Для устранения влияния силы тяжести, создающей погрешности при измерениях, подвижную систему прибора (рис. 3) уравнивают противовесами 5 (рис. 3, а), представляющими собой стержни с перемещающимися по ним грузиками.

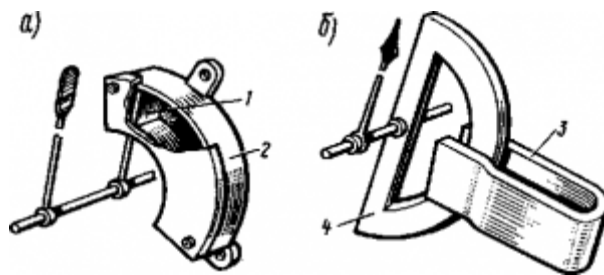


Рис. 2. Воздушный (а) и магнитно-индукционный (б) демпферы

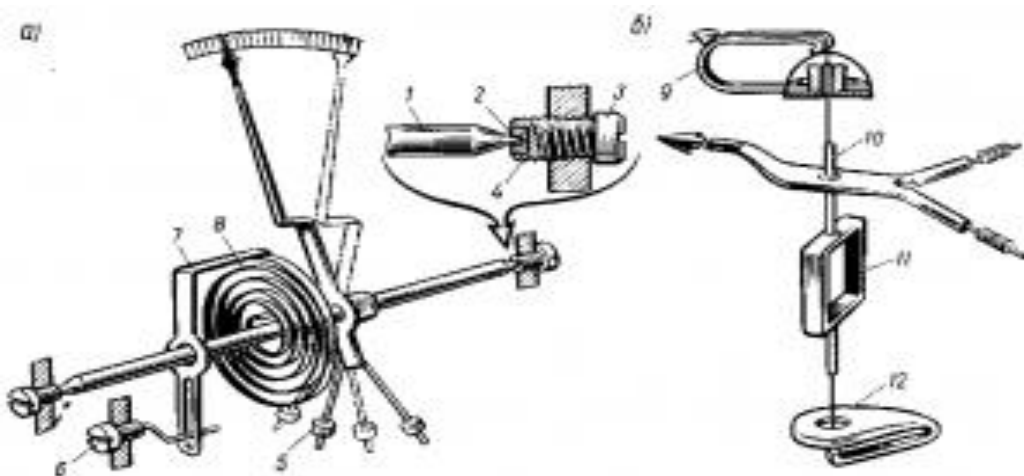


Рис. 3. Устройство подвижной части электроизмерительного прибора

Для уменьшения влияния трения оси приборов снабжают тщательно отполированными стальными наконечниками 1, выполненными из материала с высокой износостойкостью (закаленная сталь, вольфрамо-молибденовый сплав и пр.). Наконечники вращаются в подпятниках 4, выполняемых с вкладышами 2 из корунда, агата, рубина и т. п. Зазоры между наконечниками и подпятником регулируются стопорным винтом 3.

Электроизмерительные приборы обычно снабжают корректором — приспособлением, позволяющим устанавливать стрелку в нулевое положение. Корректор состоит из винта 6, выходящего из корпуса, и поводка 7, при помощи которых можно смещать на некоторое расстояние точку закрепления спиральной пружины 8, создающей противодействующее усилие. В большинстве современных электроизмерительных приборов подвижная часть 11 подвешивается на двух растяжках 10 — упругих металлических лентах, которые служат для подвода тока к катушке прибора и одновременно создают противодействующий момент (рис. 323,б). Растяжки прикреплены к двум плоским пружинам 9 и 12, расположенным во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Кроме рассмотренного выше измерительного механизма с внешним (по отношению к катушке) постоянным П-образным магнитом, существуют механизмы с магнитами другой формы (цилиндрической, в виде призмы, а также с внутрирамочными неподвижными и подвижными магнитами).

Применение прибора. Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения тока и напряжения в электрических цепях постоянного тока. В частности, на э.п.с. и тепловозах их используют в качестве амперметров и вольтметров. В амперметрах и вольтметрах катушка прибора имеет различное сопротивление и включается по различным схемам.

Для уменьшения проходящего по катушке тока и компенсации влияния температуры на показания прибора в вольтметрах последовательно с

катушкой включают добавочный резистор, который обычно встраивается в корпус прибора. Сопротивление этого резистора значительно больше сопротивления катушки, и он выполнен из материала, электрическое сопротивление которого весьма мало зависит от температуры (константан, манганин и пр.). В амперметрах параллельно катушке прибора часто включают образцовый резистор, называемый *шунтом*.

Сопротивление шунта значительно меньше сопротивления катушки прибора, вследствие чего измеряемый ток в основном проходит по шунту. Шунты и добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения приборов.

Из принципа действия магнитоэлектрического прибора следует, что направление отклонения его стрелки зависит от направления тока I , проходящего по катушке. Следовательно, при включении этих приборов в цепь постоянного тока должна быть соблюдена правильная полярность, при которой стрелка отклоняется в требуемую сторону. Для переменного тока магнитоэлектрические приборы непригодны, так как при питании катушки переменным током среднее значение создаваемого ею вращающего момента равно нулю и стрелка прибора будет стоять на нуле, испытывая чуть заметные колебания.

Достоинством приборов магнитоэлектрической системы являются простота конструкции, надежность, равномерность шкалы, высокая точность и независимость показаний от посторонних магнитных полей. К недостаткам относится много влияющих величин (температура окружающей среды, внешнее магнитное поле, частота переменного электрического тока), непригодность для измерения переменного тока, необходимость соблюдения полярности при включении и чувствительность к перегрузкам (при перегрузке тонкая проволока катушки и спиральные пружины, подводящие к ней ток, могут сгореть).

При измерении напряжения вольтметром измерительный прибор подключается к участку электрической цепи, на котором необходимо измерить напряжение параллельно (рис.3).

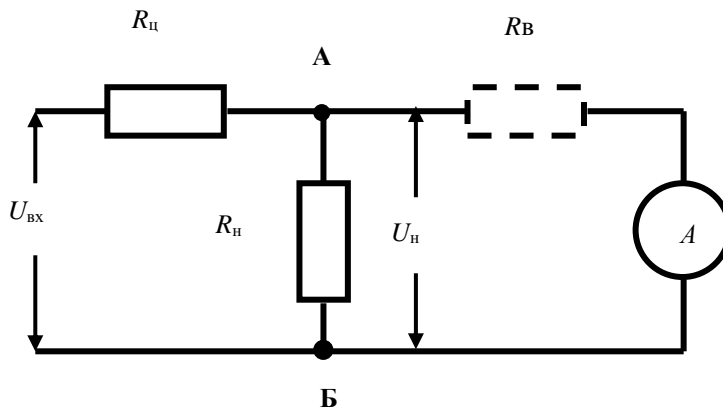


Рис.3. Схема подключения вольтметра при измерении электрического напряжения

Напряжение $U_{вх}$ подается на электрическую цепь, состоящую из – эквивалентного сопротивления электрической цепи $R_{ц}$ и электрического сопротивления участка цепи $R_{н}$, на котором измеряется напряжение. Необходимо измерить напряжение $U_{н}$, падающее на сопротивлении $R_{н}$. В данной работе исследуются характеристики магнитоэлектрического вольтметра.

Вольтметр, состоящий амперметра постоянного тока A и добавочного сопротивления $R_{в}$ подключается к зажимам А и Б. Введение добавочного сопротивления необходимо для повышения электрического сопротивления амперметра, так как собственное сопротивление амперметра очень мало.

В вольтметрах данного типа измерение напряжения заменяется измерением тока. Напряжение между зажимами А и Б можно выразить через

ток и сопротивление в цепи вольтметра $U_{в} = I_{в} R_{в}$. Отсюда $\frac{R_{н}}{R_{в}}$. Постоянная

амперметра $C = \frac{I}{\alpha}$. Ее можно преобразовать к виду $C = \frac{U_{в}}{R_{в} \alpha}$, откуда $C R_{в} = \frac{U}{\alpha}$.

Константы C и R_B – величины постоянные, что обеспечивает линейность шкалы вольтметра.

Измерительный прибор обеспечивает малую погрешность только в том случае, когда собственное сопротивление прибора $R_B \gg R_H$. Это условие особенно трудно выполнить при измерении напряжения на участках с большим сопротивлением в так называемых слаботочных цепях или при измерении напряжений в схемах, содержащих операционные усилители. В этом случае применяют электронные вольтметры с входным сопротивлением до сотен МОм. Невыполнение этого условия приводит к систематической методической погрешности, которая приблизительно совпадает со значением отношения $\frac{R_H}{R_B}$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОНОЙ РАБОТЫ

1. Цель работы: ознакомление с типовыми вольтметрами постоянного напряжения, овладение методикой измерений постоянных напряжений, приобретение навыков градуировки вольтметров.

2. Описание магнитоэлектрического вольтметра

Вольтметр выполнен в виде макета по схеме (рис. 4). Основными элементами вольтметра является магнитоэлектрический микроамперметр и добавочный резистор R_1 .

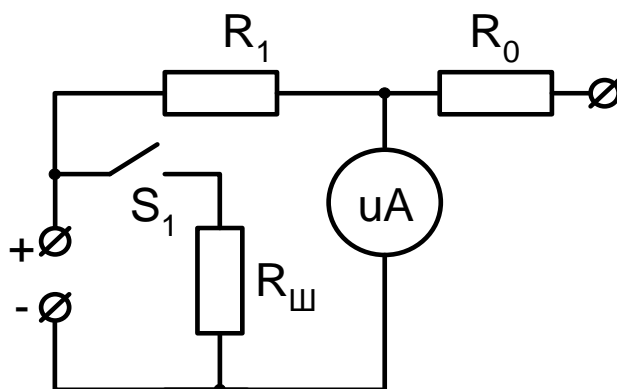


Рис.4. Схема магнитоэлектрического вольтметра.

Для экспериментального определения поправки на ответвление тока в цепь вольтметра в схему введен контрольный шунт - $R_{ш}$. Контрольный шунт подключается параллельно входу вольтметра с помощью переключателя S_1 ("Контрольный шунт").

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Градуировка магнитоэлектрического вольтметра.

Градуировка выполняется путем сравнения показаний α_x градуируемого вольтметра (в делениях) с показаниями V_o образцового вольтметра (в вольтах). В качестве образцового вольтметра используется мультиметр MXD-4660. Схема градуировки показана на рис.5.

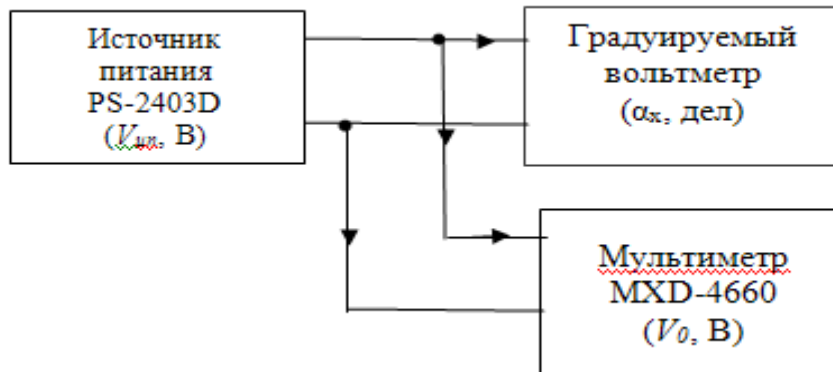


Рис. 5. Схема градуировки вольтметра

Одновременно с градуировкой производится проверка точности встроенного вольтметра источника питания.

Результаты измерения заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

Отсчет по шкале α_x , дел.	Показания образцового вольтметра V_0 , В	Показания вольтметра источника питания $V_{ип}$, В	Погрешность измерения напряжения $\delta U_{ип}$, %
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			

По измеренным данным необходимо рассчитать погрешность измерения напряжения встроенным вольтметром источника питания в каждой точке по формуле

$$\delta U_{ип} = \left| \frac{V_0 - V_{ип}}{V_0} \right| \cdot 100\%.$$

Привести пример вычислений для одной точки.

По результатам измерений необходимо построить график градуировки. По оси абсцисс откладывается отсчет по шкале градуируемого вольтметра в делениях (α_x , дел), а по оси ординат – показания образцового вольтметра в вольтах (V_0 , В). График строится в любом программном обеспечении.

3.2. Измерение внутреннего сопротивления градуируемого вольтметра.

Измерение производится косвенным методом по схемам (рис. 6, 7).

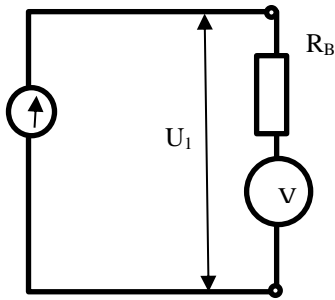


Рис. 6. Схема измерения U_1

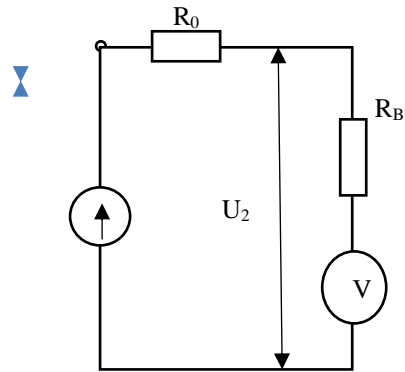


Рис. 7. Схема измерения U_2

Для измерения сопротивления вольтметра используется образцовый резистор $R_0=270\text{кОм}$, встроенный в лабораторный градуируемый вольтметр. Измерение производится в два этапа. Сначала градуируемый вольтметр подключается непосредственно к клеммам регулируемого источника питания так же, как и в п. 3.1. (рис. 6), а значение напряжения с помощью регулируемого источника устанавливается равным или близким верхнему пределу измерения (50дел). Это напряжение источника питания U_1 . Затем вольтметр подключается к источнику напряжения через образцовый резистор R_0 и измеряется напряжение U_2 на клеммах вольтметра согласно рис. 7. Часть напряжения источника питания, измеренного в первом случае (U_1) падает на сопротивлении R_0 , поэтому измеренное напряжение U_2 будет меньше U_1 .

Полученные результаты заносятся в таблицу 2.

Таблица 2

Тип вольтметра	Класс точности (%)	Показания		$R_{0,кОм}$	$R_{в, Ом}$	Погрешность		
		$U_1,$ дел.	$U_2,$ дел.			$и$		
						$\delta U_1,$ %	δU_2 %	$\delta R_{в}$,
Магнитоэлектри								

По полученным результатам измерений U_1 и U_2 с учетом значения R_0 вычисляется сопротивление R_B вольтметра.

$$R_B = \frac{R_0}{((U_1/U_2)-1)}.$$

Погрешности измерения напряжений U_1 и U_2 вычисляются по формуле

$$\delta U_{1,2} = \frac{U_{п}}{U_{1,2}} \cdot \delta, \%$$

$U_{п}$ – верхний предел измерения (50 дел);

$U_{1,2}$ – показания вольтметра (табл. 2);

$\delta, \%$ – предел допускаемой погрешности вольтметров (класс точности), указанный на шкале прибора.

Относительная погрешность внутреннего сопротивления градуируемого вольтметра определяется по формуле (методика вывода формулы для δR_B приведена в Приложении А):

$$\delta R_B = |\delta R_0| + \left| \frac{U_1}{U_1 - U_2} \cdot \delta U_1 \right| + \left| \frac{U_1}{U_1 - U_2} \cdot \delta U_2 \right|, \quad (4)$$

где δR_0 - относительная погрешность образцового сопротивления R_0

$(\delta R_0 = \pm 1\%)$; $\delta U_1, \delta U_2$ – значения погрешностей, рассчитанных по формуле (3).

Необходимо привести все расчеты.

3.3. Проверка режимов работы основных каскадов электронного блока.

Производится путем измерения постоянных напряжений в различных контрольных точках схемы, выведенных на переднюю панель электронного блока с помощью магнитоэлектрического вольтметра и мультиметра (рис.8).

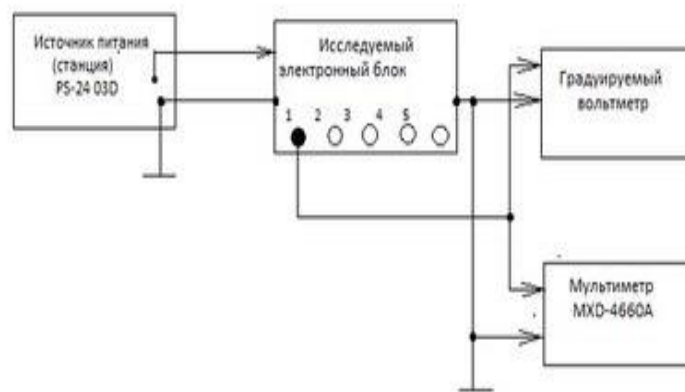


Рис. 8. Схема измерения напряжения с помощью градуированного вольтметра и мультиметра

Измерить напряжение в каждой точке необходимо дважды магнитоэлектрическим вольтметром. Первый раз – с отключенным шунтом, второй раз – с подключенным шунтом. Результаты измерения занести в таблицу 3.

Таблица 3

Точки схемы	Показ ания мульт иметр а, V_0 , В	Показания магнитоэлектрического вольтметра							
		Отсчеты		Поправка C , дел	Исправл енный отсчет $a =$ $a_{изм} + C$	Напряж ение без попраки V , В	Напряж ение с поправк ой V_n , В	Погрешн ость без поправк и	Погрешн ость с поправк ой
		$a_{изм}$, дел (без шунта)	a_k , ДЕЛ (с шунто м)						
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

По результатам измерений рассчитать поправку по формуле

$$C = U_{изм} \frac{U_{изм} - U_k}{2U_k - U_{изм}}$$

Где $U_{изм}$ - напряжение с отключенным шунтом; U_k – напряжения с подключенным шунтом;

Причем вместо значений напряжения $U_{изм}$ и U_k в формулу можно подставлять эквивалентные отсчеты $a_{изм}$ или a_k .

Рассчитать исправленный отсчет по формуле

$$a = a_{изм} + C.$$

Привести пример расчета для одной точки.

Перевести значения исправленного отсчета из делений в вольты по графику градуировки (п. 3.1) и результаты занести в таблицу 3.

Рассчитать погрешность измерения магнитоэлектрическим вольтметром без поправки и с поправкой.

$$\delta_{безпоп} = \frac{V_0 - V}{V} 100\%,$$

$$\delta_{\text{погр}} = \frac{V_0 - V_n}{V_0} 100\%.$$

Привести примеры расчетов. Сравнить полученные результаты.

4. Выводы по работе

По каждому пункту работы сделать выводы

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия магнитоэлектрической измерительной системы.
2. Почему магнитоэлектрические приборы имеют равномерную шкалу?
3. Назначение и устройство воздушного демпфера в магнитоэлектрической системе.
4. Почему показания вольтметра меньше истинного значения измеряемого напряжения?
5. Какие существуют пути определения поправки на погрешность, обусловленную потреблением вольтметром тока?
6. Из каких элементов состоит магнитоэлектрический вольтметр?
7. Как осуществляется градуировка вольтметра?
8. Каким методом производится в работе измерение сопротивления вольтметра?
9. Как рассчитать погрешность косвенного измерения?
10. Как уменьшить погрешность измерения сопротивления вольтметра?
11. Перечислите метрологические характеристики магнитоэлектрического вольтметра.
12. Достоинства и недостатки магнитоэлектрического вольтметра.

Список используемой литературы

Электрорадиоизмерения. Практикум Шишмарёв, В. Ю. Электрорадиоизмерения. Практикум : практическое пособие для вузов / В. Ю. Шишмарёв. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 234 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-08587-7. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/454287> (дата обращения: 17.04.2020) <https://urait.ru/catalog/full/prikladnye-nauki-tehnika/metrologiya-standartizaciya-i-sertifikaciya?page=2>

Метрология и радиоизмерения : учебно-методическое пособие / Т. П. Мишура, К. В. Епифанцев ; С.-Петербург. гос. ун-т аэрокосм. приборостроения. - Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2020. - 78 с. : рис., табл. - Библиогр.: с. 77 (7 назв.). - Б. ц. - Текст : непосредственный. http://lib.aanet.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=418

Погрешность косвенного измерения

Косвенными измерениями называются такие, в которых объектами измерений являются величины, связанные с искомой величиной известной зависимостью:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – величины, значения которых определены прямыми измерениями; y – искомая величина, выражаемые через x_1, x_2, \dots, x_n .

В практике измерений таких случаев достаточно много.

Относительная погрешность косвенного измерения вычисляется по формуле:

$$\delta = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \right| \cdot \frac{\Delta x_1}{y} + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \right| \cdot \frac{\Delta x_2}{y} + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \right| \cdot \frac{\Delta x_n}{y},$$

где $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_n$ – абсолютные погрешности прямых измерений величин x_1, x_2, \dots, x_n .

На практике чаще бывает известна относительная погрешность прямого измерения величины X , то есть

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x}.$$

Подставив в формулу относительной погрешности δ выражение для δ_{x_i} , получаем более удобное для вычислений выражение:

$$\delta = \left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \frac{x_1}{y} \cdot \delta_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \frac{x_2}{y} \cdot \delta_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_n} \cdot \frac{x_n}{y} \cdot \delta_n \right|.$$

Выражения в скобках представляют частные погрешности косвенного измерения.

Пример

Вывести выражение для погрешности косвенного измерения сопротивления вольтметра (см. описание лабораторной работы №1) через измеренные значения U_1, U_2, R_0 , связанные выражением

$$R_B = \frac{R_0}{U_1/U_2 - 1} = \frac{R_0 \cdot U_2}{U_1 - U_2}.$$

Первая частная производная (погрешность за счет R_0):

$$\delta R_0 = \frac{U_2}{U_1 - U_2} \cdot \frac{R_0 \cdot (U_1 - U_2)}{R_0 \cdot U_2} \cdot \delta R_0 = \delta R_0.$$

Вторая частная производная (погрешность за счет U_2):

$$\frac{R_0 \cdot (U_1 - U_2) + R_0 \cdot U_2}{(U_1 - U_2)^2} \cdot \frac{U_2 \cdot (U_1 - U_2)}{R_0 \cdot U_2} \cdot \delta U_2 = \frac{U_1}{U_1 - U_2} \delta U_2.$$

Третья частная производная (погрешность за счет U_1):

$$\frac{-1 \cdot R_0 \cdot U_2}{(U_1 - U_2)^2} \cdot \frac{U_1 \cdot (U_1 - U_2)}{R_0 \cdot U_2} \cdot \delta U_1 = -\frac{U_1}{U_1 - U_2} \delta U_1.$$

Окончательное выражение для δR_B :

$$\delta R_B = |\delta R_0| + \left| \frac{U_1}{(U_1 - U_2)} \cdot \delta U_1 \right| + \left| \frac{U_1}{(U_1 - U_2)} \cdot \delta U_2 \right|.$$