

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

МЕТРОЛОГИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Томск, 2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. каф. КСУП

_____ Ю. А. Шурыгин

«Измерение сопротивлений на постоянном токе»

Руководство по выполнению лабораторной работы для студентов специальностей технического профиля при изучении дисциплин «Метрология и технические измерения», «Метрология и радиоизмерения», «Метрология и измерительная техника», «Метрология, стандартизация и сертификация» и прочих дисциплин метрологического профиля.

Разработчик:

ассистент каф. КСУП

_____ К. К. Жаров

Содержание

1 Цель работы.....	4
2 Основные положения.....	4
3 Приборы, используемые в работе.....	7
4 Домашнее задание.....	7
5 Контрольные вопросы.....	7
6 Лабораторное задание.....	8
7 Методические указания к выполнению работы.....	10
8 Оценка точности измерений.....	13
9 Рекомендуемая литература.....	16

1 Цель работы.

Целью работы является изучение методов измерения активных сопротивлений и анализ погрешностей полученных результатов.

2 Основные положения.

В данной лабораторной работе исследуются 3 метода измерений активных сопротивлений: метод непосредственной оценки, косвенный метод, и метод сравнения с мерой.

2.1 В методе непосредственной оценки величина измеряемого сопротивления определяется непосредственно по прибору (микроамперметру), шкала которого проградуирована в единицах сопротивлений (Ом, кОм, МОм).

Для измерения сопротивлений метод непосредственной оценки реализуется с помощью омметра, построенного по последовательной схеме (рисунок 2.1).

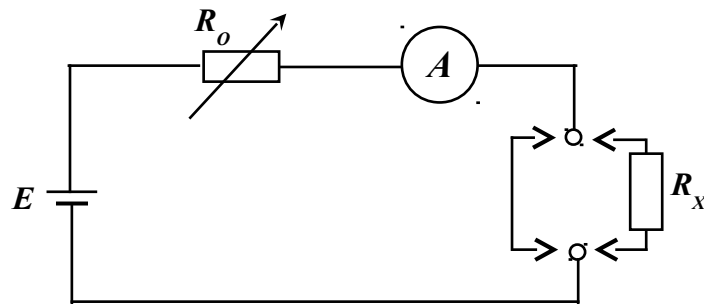


Рисунок 2.1 — структурная схема омметра

Показание амперметра определяется выражением:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_A + R_X} \quad (2.1)$$

где E – напряжение источника питания;

R_0 - переменный резистор, служащий для калибровки «0»;

R_A - внутреннее сопротивление электромеханического прибора, в качестве которого используется высокочувствительный амперметр;

R_X - испытуемый образец.

Из выражения (2.1) следует, что показания амперметра однозначно определяются величиной сопротивления R_X , поскольку E , R_0 , R_A - величины постоянные. Так как с течением времени напряжение батареи E падает, то перед каждым измерением следует устанавливать «0» омметра, закорачивая клеммы R_X . В этом случае ток I_A , как следует из выражения (2.1), изменением сопротивления регулировочного резистора R_0 устанавливается равным номинальному току I_N . Отсюда следует, что нуль омметра совмещен с максимальным показанием прибора, а нулевое показание прибора соответствует $R_X = \infty$, и шкала омметра неравномерная.

2.2 В косвенном методе измеряемое сопротивление определяется согласно известному закону Ома, т.е. зависимости тока и падения напряжения от измеряемого сопротивления:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (2.2)$$

В реальных измерительных схемах подключение измерительных приборов (амперметра и вольтметра) оказывает влияние на результат измерения, вызывая систематические методические погрешности, зависящие как от внутренних сопротивлений приборов, так и от способа подключения этих приборов в схему.

2.2.1 При измерении **малых** сопротивлений, т.е. величина которых сравнима с внутренним сопротивлением амперметра и значительно меньше внутреннего сопротивления вольтметра, используется схема с параллельным подключением вольтметра к измеряемому резистору, рисунок 2.3.

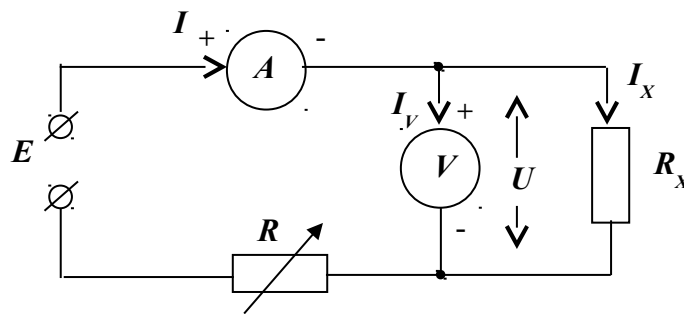


Рисунок 2.2 — схема для измерения малых сопротивлений

Для этой схемы справедливо выражение:

$$g_v + g_x = \frac{I}{U} \quad (2.3)$$

где: $g_v = 1/R_v$ - проводимость внутреннего сопротивления вольтметра;

$g_x = 1/R_x$ - проводимость измеряемого сопротивления;

U - падение напряжения на резисторе (показание вольтметра);

I - показание амперметра (сумма токов через вольтметр и измеряемое сопротивление).

Заменяя в формуле (2.3) проводимости через сопротивления и, решая уравнение относительно R_x , получим

$$R = \frac{U \cdot R_v}{I \cdot R_v - U} \quad (2.4)$$

Примечание: по этой схеме возможно измерение сопротивлений, сравнимых с внутренним сопротивлением вольтметра, но, как будет показано ниже, систематическая методическая погрешность значительно возрастает за счет неточности задания внутреннего сопротивления вольтметра.

2.2.2 При измерении **больших** сопротивлений, т.е. величина которых сравнима с внутренним сопротивлением вольтметра и значительно больше сопротивления амперметра, применяется схема с последовательным подключением амперметра и измеряемого резистора, (рисунок 2.3).

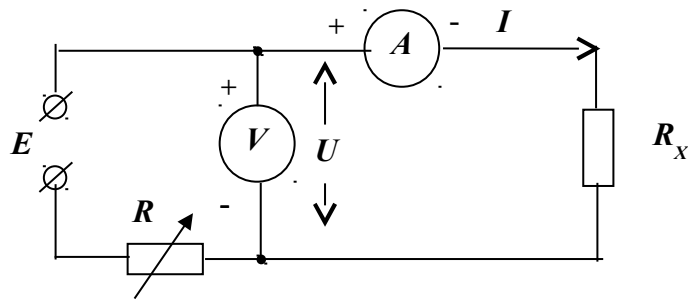


Рисунок 2.3 — схема для измерения больших сопротивлений

Для этой схемы справедливо выражение для определения измеряемого сопротивления:

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A \quad (2.5)$$

где U - показание вольтметра;

I - ток через измеряемый резистор;

R_A - внутреннее сопротивление амперметра.

Примечание: по этой схеме возможно измерение сопротивлений, сравнимых с внутренним сопротивлением амперметра, но, как будет показано ниже, систематическая методическая погрешность значительно возрастает за счет неточности задания внутреннего сопротивления амперметра.

2.3 Метод сравнения с мерой реализуется по схеме одинарного моста, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.4.

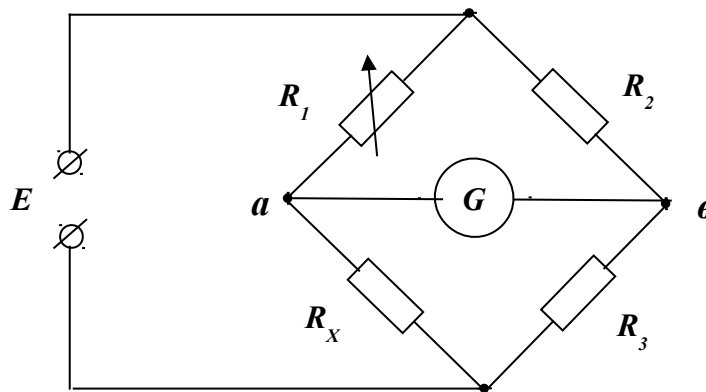


Рисунок 2.4

Сравнение измеряемого сопротивления с мерой, в качестве которой используются образцовые сопротивления R_1 , R_2 , R_3 производится по нулевым показаниям гальванометра G , включенного в диагональ ab . В этом случае потенциалы U_a и U_b равны, мост уравновешен изменением образцового сопротивления магазина R_1 . При этом выполняется условие равновесия

$$R_x \cdot R_3 = R_1 \cdot R_2, \quad (2.6)$$

из которого можно найти неизвестное сопротивление

$$R_x = R_1 \cdot \frac{R_2}{R_3}. \quad (2.7)$$

Таким образом, установив определенное соотношение сопротивлений резисторов R_2 и R_3 и добившись баланса моста резистором R_1 , неизвестное сопротивление будет определено по формуле (2.7).

3 Приборы, используемые в работе.

- 3.1 Прибор для измерения сопротивлений (АВО-5М).
- 3.2 Вольтметр класса точности 0,2.
- 3.3 Амперметр класса точности 0,2.
- 3.4 Источник питания (1.5 – 2) В.
- 3.5 Магазин сопротивлений или реостат.
- 3.6 Высокочувствительный гальванометр.
- 3.7 Одинарно-двойной мост Р 329.
- 3.8 Макет с измеряемыми малым и большим сопротивлениями.
- 3.9 Измеритель иммитанса Е7-21.

4 Домашнее задание.

- 4.1 Ознакомиться с принципом действия и устройством электромеханических омметров для измерения малых и больших сопротивлений.
- 4.2 Ознакомиться с косвенными методами измерения малых и больших сопротивлений.
- 4.3 Ознакомиться с принципом сравнения с мерой при мостовом методе измерения сопротивлений. Вывести математически основное условие равновесия моста.
- 4.4 Составить схемы всех экспериментов.
- 4.5 Ознакомиться с принципом работы измерителя иммитанса Е7-21 и измерением с его помощью активных сопротивлений.

5 Контрольные вопросы.

- 5.1 Какие виды измерений рассматриваются в данной лабораторной работе? Дайте им определения.
- 5.2 К какому виду измерений относятся:
 - 1) измерение сопротивления с помощью электромеханического омметра;
 - 2) измерение сопротивления косвенным методом вольтметра-амперметра;
 - 3) измерение сопротивления мостовым методом?
- 5.3 Объясните работу электромеханического омметра АВО-5М (калибровка, измерение).
- 5.4 Как определить погрешность измерения, проведенного электромеханическим омметром?

5.5 Как измерить малое сопротивление косвенным методом вольтметра-амперметра (т. е. какое сопротивление считается малым; какую схему нужно собрать для проведения этого измерения; как определить результат измерения, свободный от методической погрешности; как определить погрешность этого результата)?

5.6 Как измерить большое сопротивление косвенным методом вольтметра-амперметра (т. е. какое сопротивление считается большим; какую схему нужно собрать для проведения этого измерения; как определить результат измерения, свободный от методической погрешности; как определить погрешность этого результата)?

5.7 Что произойдет, если попытаться измерить большое сопротивление на схеме, предназначенной для измерения больших сопротивлений? Или наоборот, малое сопротивление на схеме, предназначенной для измерения больших сопротивлений? Сможем ли мы снять такое измерение? Что можно сказать о погрешности этого измерения?

5.8 Зачем в косвенном методе вольтметра-амперметра проводится три измерения с усреднением результата?

5.9 Приведите схему одинарного моста для измерения сопротивлений на постоянном токе. Объясните его работу. Приведите обоснование уравнения баланса моста.

5.10 Что такое чувствительность мостовой схемы? Как ее измерить? Как она влияет на точность измерения сопротивления? Как ее повысить?

5.11 Измерение сопротивления методом сравнения с мерой при помощи одинарного моста? Что является мерой, устройством сравнения, признаком сравнения, погрешностью меры, погрешностью сравнения в этом измерении?

5.12 Что такое «класс точности»? Какие классы точности используются в этой работе? Что они означают?

6 Лабораторное задание.

6.1 Омметром с непосредственным отсчетом типа АВО-5М измерить величину **большого и малого сопротивлений**, заданных преподавателем. Оценить точность измерений, исходя из класса точности прибора. Результат записать в виде $R_x = R_{изм} \pm \Delta R_x$, соблюдая правила округления.

6.2 Измерить величину **большого сопротивления**, установленного в п. 6.1, косвенным методом вольтметра-амперметра. Измерение провести **три** раза, изменяя в небольших пределах ток через измеряемое сопротивление. Пределы измерения вольтметра и амперметра устанавливать такими, чтобы их показания находились в последней трети шкалы прибора. Данные измерений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

№ п/п	Показание амперметра, А	Предел измерения амперметра, А	Показание вольтметра, В	Предел измерения вольтметра, В	Внутреннее сопротивление амперметра, Ом	Измеряемое сопротивление, Ом
1						
2						
3						

По результатам одного из измерений определить погрешность измерения. За **результат** измерения принять среднеарифметическое из трех измерений. Результат записать в виде $R_x = R_{изм} \pm \Delta R_x$, соблюдая правила округления.

6.3 Измерить величину **малого сопротивления**, установленного по п. 6.1, косвенным методом вольтметра-амперметра. Измерение провести **три** раза, изменяя в небольших пределах ток через измеряемое сопротивление. Пределы измерения вольтметра и амперметра выбирать такими, чтобы их показания находились в последней трети шкалы прибора. Данные измерений занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2

№ п/п	Показание амперметра, А	Предел измерения амперметра, А	Показание вольтметра, В	Предел измерения вольтметра, А	Внутреннее сопротивление вольтметра, Ом	Измеряемое сопротивление, Ом
1						
2						
3						

По результатам одного из измерений определить погрешность измерения. За **результат** измерения принять среднеарифметическое из трех измерений. Результат записать в виде $R_x = R_{изм} \pm \Delta R_x$, соблюдая правила округления.

6.4 Одинарным мостом измерить величину **большого сопротивления**, установленного на макете в п. 6.1, с помощью прибора Р329. Измерение провести **три** раза, устанавливая сопротивления моста R_2 и R_3 , равные 10, 100 и 1000 Ом. В каждом из трех случаев определить чувствительность моста. Рассчитать погрешность измерения сопротивления для **случая максимальной чувствительности** моста. Результат измерения записать в виде $R_x = R_{изм} \pm \Delta R_x$, соблюдая правила округления.

6.5 Измерить величины малого и большого сопротивлений с помощью измерителя иммитанса Е7–21. Определить погрешность измерения в каждом случае.

6.6 Результаты всех измерений свести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 — Сравнение методов измерения сопротивлений по точности

Объект измерения	Метод измерения	Результат измерения, Ом	Погрешность измерения, Ом
Большое сопротивление	непосредственной оценки		
	косвенный		
	сравнение с мерой		
	прибором Е7–21		
Малое сопротивление	непосредственной оценки		
	косвенный		
	прибором Е7–21		

7 Методические указания к выполнению работы.

7.1 Измерение сопротивлений омметрами с непосредственным отсчетом. Измерение с помощью омметра прибора АВО-5М.

Для проведения измерений необходимо:

1) Проверить нулевое положение стрелки прибора; при необходимости установить «0» арретиром (механическим регулятором нуля).

2) Поставить левый переключатель в положение R_x .

3) Правым переключателем выбрать необходимый предел измерения ($\Omega \times 1$; $\Omega \times 100$; $\Omega \times 10000$).

4) Для проведения калибровки (уст. 0) кратковременно замкнуть клеммы прибора «–» и « $V \simeq r_x$ »; вращением потенциометра «Уст. 0» установить стрелку прибора на максимальное отклонение, соответствующее нулевому показанию омметра. Если стрелка прибора не устанавливается, то следует заменить источник питания.

5) Разомкнуть зажимы, подключить к ним измеряемое сопротивление и снять отсчет по шкале « Ω ».

6) По окончании работы поставить левый переключатель в положение «ВЫКЛ».

Примечание: во избежание быстрого выхода из строя внутреннего источника питания (батарея, аккумулятор) следует все измерения проводить при кратковременном подключении измеряемого сопротивления, и немедленно после снятия отсчета размыкать цепь.

7.2 Измерение сопротивлений косвенным методом вольтметра-амперметра.

При сборке схем измерений в качестве источника питания используется стабилизированный выпрямитель ВСП-12. Для изменения тока в цепи в качестве сопротивления R используется магазин сопротивлений.

7.2.1 Для измерения **больших сопротивлений** собрать схему 2.3. Используя рекомендации, данные в п. 7.2.2, установить показания приборов в последней трети шкалы. Снять показания приборов и вычислить внутреннее сопротивление амперметра по формуле

$$R_A = \frac{U_A}{I_N} \quad (7.1)$$

где I_N - номинальный ток (предел измерения) амперметра;

U_A - падение напряжения на амперметре при протекании через него номинального тока.

Значения I_N и U_A указаны на шкале прибора.

По формуле (2.5) вычислить величину измеряемого сопротивления.

7.2.2 Для измерения **малых сопротивлений** собрать схему, изображенную на рисунке 2.2. После сборки схемы и **проверки ее преподавателем** установить предел измерения вольтметра 3 В (или больше), предел измерения амперметра (1,5–3) А и выше, сопротивление магазина максимальным. Включить питание и, уменьшая сопротивления магазина, добиться показаний вольтметра (0,5–1,0) В, затем изменить предел измерения амперметра до получения показаний в пределах шкалы. Дальнейшим манипулированием пределов амперметра, вольтметра и величины сопротивления магазина установить показания вольтметра и амперметра **в последней трети шкалы**. Снять показания приборов и вычислить внутреннее сопротивление вольтметра по формуле

$$R_V = \frac{U_N}{I_V} \quad (7.2)$$

где U_N - номинальное напряжение (предел измерения) вольтметра;

I_V - ток через вольтметр при номинальном напряжении.

Значения U_N и I_V указаны на шкале прибора.

По формуле (2.4) определить величину измеряемого сопротивления.

7.2.3

7.3 Измерение сопротивления методом сравнения с мерой.

Измерение больших и малых сопротивлений этим методом (но в этой лабораторной измеряются только большие сопротивления) производится с помощью одинарно-двойного моста Р329 класса точности 0,05. Измерение больших сопротивлений в пределах от 10 до 1000000 Ом производится по схеме одинарного моста, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.4.

Измерение производить в следующем порядке:

- 1) Собрать схему наружных соединений одинарного моста согласно рисунку 7.1.
- 2) Замкнуть перемычкой зажимы «+ R_N » и «- R_N ».
- 3) Подсоединить к зажимам «Г» внешний гальванометр, после чего разблокировать его контакты. Арретиром выставить стрелку прибора на нулевую отметку.

- 4) Подсоединить к зажимам « X_0 » измеряемое сопротивление.
- 5) Проверить положение кнопок «ГРУБО», «ТОЧНО». Они должны быть в отжатом состоянии.

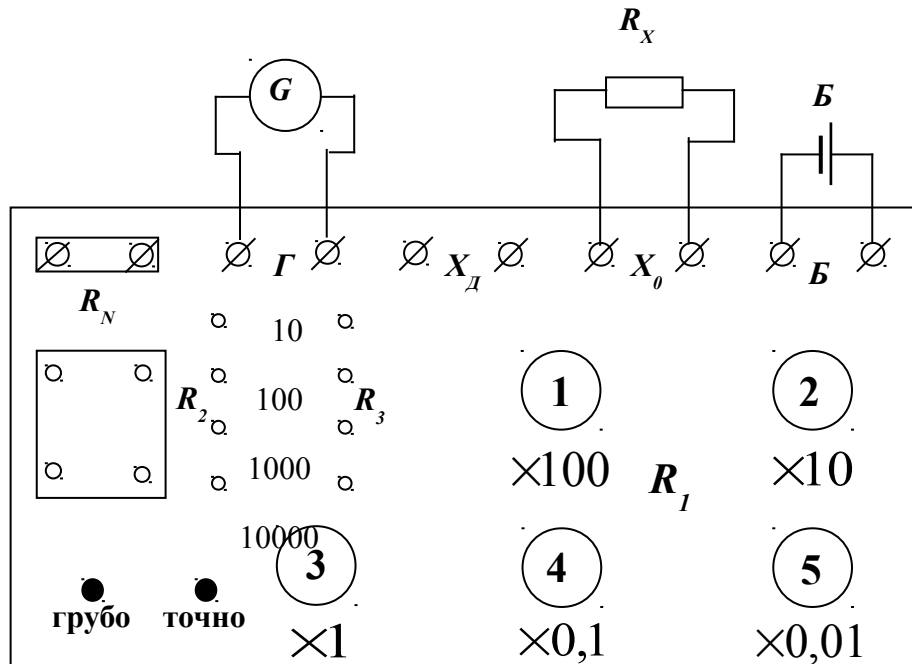


Рисунок 7.1

- 6) Подсоединить к зажимам « B » источник питания (соблюдение полярности не обязательно).
- 7) **Выставить ориентировочное значение** сопротивления R_1 , равное примерно R_x , **найденное при выполнении п. 7.2.1**
- 8) Установить сопротивления $R_2 = R_3 = 10$ Ом.
- 9) Включить источник питания.
- 10) При нажатой кнопке «ГРУБО» вращением ручек декад сопротивления R_1 добиться равновесия моста (нулевых показаний гальванометра).
- 11) Нажать кнопку «ТОЧНО» и вновь, изменяя **младшие разряды** сопротивления R_1 , добиться равновесия моста.
- 12) Вычислить измеряемое сопротивление по формуле (2.7).

Определить чувствительность моста, для чего:

- 1) Изменить величину сопротивления R_1 на некоторое значение ΔR с таким расчетом, чтобы при нажатой кнопке «ТОЧНО» получить отклонение гальванометра $\alpha = (10 - 20)$ делений.
- 2) Определить чувствительность моста по формуле

$$S_M = \frac{\alpha}{\frac{\Delta R}{R_1} 100\%} \quad (7.3)$$

Для повторного измерения установить сопротивления $R_2 = R_3 = 100$ Ом.

Повторить п.п. 9, 10, 11, 12.

Вновь, по предложенной выше методике, вычислить чувствительность моста.

Провести подобный эксперимент для случая установки сопротивлений $R_2 = R_3 = 1000 \text{ Ом}$.

За **результат измерения** принять тот, при котором определена максимальная чувствительность.

7.4 Измерение сопротивлений прибором Е7–21.

7.4.1 Провести калибровку измерителя иммитанса Е7–21 согласно инструкции по эксплуатации.

7.4.2 Подключить измеряемое сопротивление к прибору соединительными проводами. Провести измерение величин малого и большого сопротивлений в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

8 Оценка точности измерений.

8.1 Погрешность измерения сопротивлений методом непосредственного отсчета определяется через его класс точности. Условное обозначение класса точности омметра с неравномерной шкалой $\underline{2,5}$ означает, что класс точности присвоен по приведенной погрешности γ , равной отношению максимальной абсолютной погрешности $\Delta \ell$, выраженной в единицах длины (мм), к геометрической длине рабочей части шкалы ℓ , выраженной в тех же единицах:

$$\gamma = \frac{\Delta \ell}{\ell} \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Зная класс точности омметра $\gamma = 2,5$ и длину шкалы $\ell \approx 80 \text{ мм}$, получим максимальную абсолютную погрешность измерительного механизма

$$\Delta \ell = \frac{\ell \cdot \gamma}{100\%} = \frac{80 \cdot 2,5}{100} = \pm 2 (\text{мм}) .$$

Перевод погрешности измерительного механизма $\Delta \ell$ в погрешность измерения ΔR производится методом интерполяции. Для этого необходимо влево и вправо от показания омметра определить риски шкалы, которым соответствуют значения сопротивлений R_1 и R_2 . Затем с помощью линейки измерить расстояние между этими рисками ℓ (мм). Погрешность измерения сопротивления определится

$$\Delta R_x = \frac{R_2 - R_1}{\ell} \cdot \Delta \ell \quad (8.2)$$

Поскольку шкала омметра неравномерна, то и погрешность ΔR_x сильно зависит от показания омметра, а в некоторых точках шкалы даже от знака погрешности. В этом случае величины погрешностей вправо (+) и влево (-) от показания следует определить отдельно, используя формулу (8.2).

8.2 Оценка точности измерения сопротивления косвенным методом вольтметра-амперметра.

В основе определения погрешности косвенного измерения сопротивления используются формулы (2.4), (2.5). Общая погрешность будет складываться из частных погрешностей за счет неточности измерения тока и напряжения и частной погрешности за счет неточности задания сопротивления R_v в формуле

(2.4) и сопротивления R_A в формуле (2.5). Поскольку перечисленные погрешности носят систематический характер, общую погрешность косвенного измерения ΔR_X находим как алгебраическую сумму частных погрешностей.

8.2.1 Для определения погрешности измерения **малых сопротивлений** используется формула (2.4). Взяв частные производные и переходя к относительным погрешностям, получим в окончательном виде формулу для определения относительной погрешности малого сопротивления:

$$\delta R_X = \delta U + \delta I + (\delta U + \delta I + \delta R_V) \cdot \frac{R_X}{R_V}, \quad (8.3)$$

где δU - относительная погрешность измерения напряжения, определяемая классом точности прибора γ_U , пределом шкалы вольтметра U_N и его показанием U по формуле

$$\delta U = \frac{\gamma_U \cdot U_N}{U \cdot 100\%}, \quad (8.4)$$

δI - относительная погрешность измерения тока, определяемая классом точности амперметра γ_I , пределом шкалы амперметра I_N и его показанием I , по формуле

$$\delta I = \frac{\gamma_I \cdot I_N}{I \cdot 100\%}, \quad (8.5)$$

δR_V - относительная погрешность задания сопротивления вольтметра равная 1%.

Анализируя выражение (8.3) можно сделать заключение, что общая погрешность существенно уменьшается при измерении сопротивлений R_X много меньших R_V . При измерении же по схеме 2.2 сопротивлений, сравнимых с R_V , слагаемое в скобках в выражении (8.3) будет превалировать над остальными, величина которых определяется классом точности приборов, и общая погрешность резко возрастает.

Абсолютное значение погрешности определится выражением :

$$\Delta R_X = \delta R_X \cdot R_X \quad (8.6)$$

8.2.2 Для определения погрешности измерения **больших сопротивлений** используется формула (2.5). Взяв частные производные и, переходя к относительным погрешностям, получим:

$$\delta R_X = (\delta U + \delta I) + (\delta U + \delta I + \delta R_A) \cdot \frac{R_A}{R_X}, \quad (8.7)$$

где δU - относительная погрешность измерения напряжения, определяемая выражением (8.4);

δI - относительная погрешность измерения тока, определяемая выражением (8.5);

δR_A - относительная погрешность задания внутреннего сопротивления амперметра, равная 1 %.

Анализируя выражение (8.7) можно сделать заключение, что общая погрешность существенно уменьшается при измерении R_X много больших R_A . При измерении же по схеме 2.3 сопротивлений, сравнимых с R_A , второе

слагаемое в выражении (8.7) будет превалировать над остальными, величина которых определяется классом точности приборов, и общая погрешность резко возрастает.

Абсолютное значение погрешности определится выражением (8.6).

8.3 Оценка точности измерений методом сравнения с использованием односторонне-двойного моста Р 329.

Поскольку сравнение с мерой, в качестве которой используется сопротивление пяти декад R_1 , производится косвенно по выражению (2.7), то и общая погрешность будет складываться из частных погрешностей сопротивлений плеч моста и погрешности неточного уравнивания моста. Ввиду того, что закон распределения систематических погрешностей сопротивлений плеч моста неизвестен, а прибор Р 329 не подлежит поверке как учебный, для вычисления общей погрешности используется арифметическое суммирование частных погрешностей:

$$\Delta R_X = \frac{R_2}{R_3} \cdot \Delta R_1 + \frac{R_1}{R_3} \cdot \Delta R_2 + \frac{R_X}{R_3} \cdot \Delta R_3 + \Delta R_M, \quad (8.8)$$

где ΔR_M - абсолютная погрешность измерения за счет неточного уравнивания моста.

Переходя к относительным погрешностям, получим:

$$\delta R_X = \delta R_1 + \delta R_2 + \delta R_3 + \delta_M \quad (8.9)$$

где δR_1 - относительная погрешность декадной меры R_1 ;

$\delta R_2, \delta R_3$ - относительные погрешности плеч моста R_2 и R_3 , равные 0,015%;

δ_M - частная относительная погрешность измерения, обусловленная неточностью уравнивания моста.

$$\delta_M = \frac{\Delta \alpha}{S_M \cdot 100\%} \quad (8.10)$$

где S_M - чувствительность моста, определяемая выражением (7.3);

$\Delta \alpha$ - абсолютная погрешность уравнивания моста по гальванометру. $\Delta \alpha = (0.5 - 2)$ дел. в зависимости от тщательности установки равновесия.

Подставляя в формулу (8.10) выражение (7.3), получим:

$$\delta_M = \frac{\Delta R}{R_1} \cdot \frac{\Delta \alpha}{\alpha}, \quad (8.11)$$

где ΔR - отклонение сопротивления R_1 для получения разбаланса моста на α делений.

Для определения δR_1 сначала рассчитывают абсолютную погрешность ΔR_1 сопротивления R_1 . Так как сопротивление R_1 представляет собой магазин сопротивлений, его погрешность ΔR_1 будет складываться из погрешностей отдельных резисторов декад магазина, включенных в плечо R_1 моста при рав-

новесии. Например, если $R_1 = 234,56$ Ом, то сопротивление R_i будет представлено следующим образом:

$$R_1 = (2 \cdot 100 + 3 \cdot 10 + 4 \cdot 1 + 5 \cdot 0,1 + 6 \cdot 0,01) \text{ Ом.}$$

Поэтому величина ΔR_1 может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta R_1 = \sum_{i=1}^5 R_i \cdot \delta R_i = \sum_{i=1}^5 n_i \cdot \frac{\delta_i \% \cdot R_i}{100 \%} \quad (8.12)$$

где i - порядковый номер декады;

n_i - количество сопротивлений i - й декады, включенных в плечо R_1 при равновесии;

R_i - цена деления i -й декады, Ом;

δ_i - относительная погрешность каждого сопротивления i -й декады, которая определяется из таблицы 8.1.

Таблица 8.1

порядковый номер декады	i	1	2	3	4	5
цена деления сопротивления декады	R_i	100 Ом	10 Ом	1 Ом	0.1 Ом	0.01 Ом
относительная погрешность сопротивления декады	δ_i	0,015%	0,015%	0,15%	0,55%	1,0%

Определив ΔR_1 , находят величину $\delta R_1 = \frac{\Delta R_1}{R_1}$, а затем δR_x по формуле (8.9). При этом следует помнить, что при складывании все составляющие следует выразить в одном масштабе (в процентах или относительных единицах).

После определения δR_x находят абсолютную погрешность измерения сопротивления $\Delta R_x = \delta R_x \cdot R_x$, и результат записывают в виде $R_x = R_{\text{изм}} \pm \Delta R_x$, соблюдая при этом правила округления.

8.4 При измерении сопротивлений прибором Е7–21 погрешность измерения определяется в соответствии с техническими характеристиками прибора.

9 Рекомендуемая литература

9.1 Отчалко В.Ф. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебное пособие, — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2010. — 208 с

9.2 Евтихийев Н.Н., Купершмидт Я.А., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие для вузов, Москва: Энергоатомиздат, 1990, 352с.

9.3 Нефедов В.И., Сигов А.С., Бирюков В.К. Метрология и радиоизмерения: Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. — М.: Высшая школа, 2006. — 526 с.: ил