

№2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Ознакомление с приборами и методами измерения электрических сопротивлений.

2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.

Принадлежности к мостику Уитстона: реохорд, магазин сопротивлений, гальванометр, амперметр, ключ, провода, измеряемые сопротивления, мост постоянного тока типа НВЛ-47.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

Теоретической основой измерения электрического сопротивление является закон Ома

$$I = \frac{U}{R}, (1)$$

связывающий протекающий по проводнику ток, сопротивление проводника и падение напряжения на нём.

В свою очередь, сопротивление проводника определяется материалом проводника и его размерами

$$R = \rho \frac{l}{S}, (2)$$

где ρ - удельное сопротивление, характеризующее материал проводника;

l и S - его длина и площадь поперечного сечения.

Принципиально уравнение (2) может использоваться для измерения R , если известно ρ и экспериментально определены l и S . Однако на практике такой метод неудобен и не может обеспечить высокой точностью измерения.

Более совершенны электрические методы измерений. Электрическое сопротивление измеряют омметрами и измерительными мостами.

На рис.1 приведена электрическая схема омметра, применяемого для измерения сравнительно больших сопротивлений.

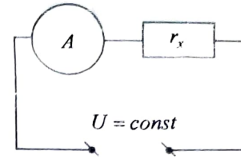


Рис.1

В качестве измерительного прибора A используется магнитно-электрический миллиамперметр, для которого

$$\alpha = SI, (3)$$

где α - показания прибора (угол поворота подвижной части)

S - чувствительность прибора

I - протекающий ток

Для приведенной схемы

$$\alpha = S \frac{U}{r + r_x}, (4)$$

где r - сопротивление прибора.

Из формулы (4) следуют основные особенности: шкала прибора носит гиперболический характер; ноль шкалы совмещен с максимальным углом отклонения подвижной части.

В качестве источника питания омметры имеют сухую батарею. С течением времени напряжение батареи падает, т.е. условие $U = const$ не выполняется, что приводит к большой погрешности. Для компенсации в миллиамперметре есть специальный магнитный шунт, позволяющий выполнить условие $SU = const$. Компенсация производится при накоротко замкнутых зажимах r_x : рукоятку шунта перемещают до установления стрелки прибора на отметке 0.

Омметры обладают сравнительно невысокой точностью (класс 1,5 или 2,5).

Главное преимущество – это малые габариты и вес, что позволяет создать небольшие переносные приборы.

Следующим по точности является метод вольтметра и амперметра.

Измерения производятся по двум схемам, показанным на рис.2.

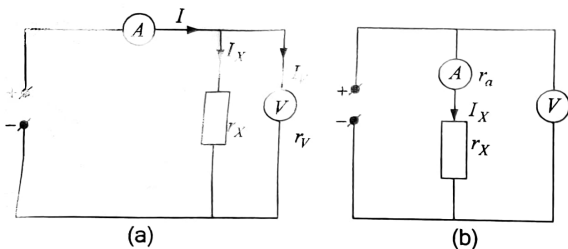


Рис. 2

В обоих случаях получается лишь приближенное значение измеряемого сопротивления

$$r_x' = \frac{U}{I}, (5)$$

Действительное значение сопротивления r_x для схемы (a):

$$r_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - U/r_v}, (6)$$

Погрешность возникает за счет того, что амперметр учитывает не только ток I_x , но и ток I_v , отвлекаяющийся в вольтметр. Схему целесообразно применять для измерения малых сопротивлений.

Для схемы (b):

$$r_x = \frac{U - I_x \cdot r_a}{I_x}, (7)$$

Погрешность появляется из-за неточного показания вольтметра, так как, кроме напряжения на измеряемом сопротивлении, он учитывает также падение напряжения на амперметре. Схема применяется для измерения больших сопротивлений.

Преимуществом метода является то, что по измеряемому сопротивлению можно пропустить такой же ток, как и в условиях его работы, что очень важно при измерении сопротивлений, значение которых зависит от тока.

Наиболее высокая точность достигается при измерении сопротивлений мостовым методом. В этом методе измеряемое сопротивление сравнивается с эталонным.

Принципиальная схема моста постоянного тока (мостика Уитстона) приведена на рис.3.

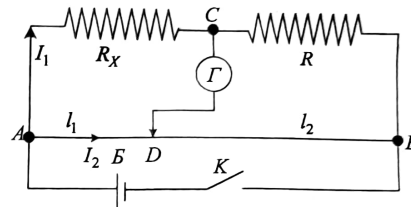


Рис.3

Она состоит из реохорда AB, известного сопротивления R , измеряемого сопротивления R_x , гальванометра Γ (высокочувствительного прибора для измерения малых токов), батареи и ключа. Реохорд представляет собой тонкую металлическую проволоку общей длиной l , натянутую вдоль измерительной линейки. Вдоль реохорда может перемещаться ползунок с контактом Д, положение которого определяет длины l_1 и l_2 , так что $l = l_1 + l_2$. Если контакт Д отсоединить от реохорда, то ток будет протекать от узла А к узлу В по двум ветвям: ветви $R_x - R$ (ток I_1) и реохорду (ток I_2).

Ветвь СД (при замкнутом контакте Д) позволяет току перейти из одной основной ветви в другую, как по «мостику», откуда вся схема получила название моста.

Обозначим потенциалы узлов схемы через $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_D$. При перемещении ползунка Д по реохорду потенциал φ_D может изменяться от φ_A до φ_B и, в частности, принимать значение $\varphi_D = \varphi_C$. Равенство определяется по отсутствию ток через гальванометр

$$I_G = \frac{\varphi_C - \varphi_D}{R_G} = 0 \text{ при } \varphi_D = \varphi_C. \text{ Эта операция подбора положения}$$

движка, при котором $I_G = 0$, называется уравниванием моста, а мост, через гальванометр которого не течет ток, называется уравновешенным.

Покажем, что в уравновешенном мосте неизвестное R_x определяется по известным R, l_1, l_2 .

Для этого воспользуемся вторым правилом Кирхгофа для контуров АСД и СВД. Получим соответственно:

$$I_1 R_x - I_2 R_{AD} = 0 \text{ и } I_1 R - I_2 R_{DB} = 0.$$

$$\text{отсюда } I_1 R_x = I_2 R_{AD} \text{ и } I_1 R = I_2 R_{DB}$$

Разделив почленно, получим

$$R_x = R \frac{R_{AD}}{R_{DB}}, (8)$$

Т.к. $R_{AD} = \rho \frac{l_1}{S}$, а $R_{DB} = \rho \frac{l_2}{S}$, то равенство (8) принимает вид

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}, (9)$$

Рассмотренный мостик Уитстона дает наглядное представление о методе измерений, но может быть использован в сравнительно небольшом пределе измерений (от 1 до 1000 Ом) и с ограниченной точностью. Более универсальны и удобны в работе различные мосты промышленного изготовления, из которых в настоящей работе применяется мост постоянного тока МВЛ-47. Принципиальная схема моста приведена на рис.4.

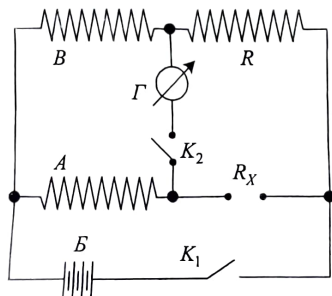


Рис.4

Постоянное сопротивление R называется плечом сравнения.

Сопротивление осуществлено в виде рычажного магазина известных сопротивлений, встроенных в мост. Эти сопротивления выполнены отдельными декадами, включены последовательно и позволяют набирать сопротивления до 10^4 Ом с наименьшей

ступенью в 0,1 Ома. Вместо реохорда применяется специальный штепсельный магазин сопротивления, позволяющий задавать различные отношения сопротивлений плеч моста А и В, называемых плечами отношения. На панели моста выведены зажимы для подключения измеряемого сопротивления, а также гальванометра G и батареи B которые включаются на время измерения ключами K_2 и K_1 . Величина измеряемого сопротивления R_x определяется по равенству

$$R_x = R \cdot \frac{A}{B}, (10)$$

где R - значение сопротивления по рычажному магазину плеча сравнения;

А и В значения сопротивлений по штепсельному магазину плеч отношений.

В схеме моста не имеет значения, в какую диагональ включен гальванометр, в какую источник питания. На рис.4 они изменены местами по сравнению с рис.3. Однако это не изменяет окончательного выражения (10), которое совпадает с (8).

Мост позволяет проводить измерение сопротивлений от 1 до 10^6 Ом. Абсолютная погрешность плеча сравнения $\Delta R = \pm(0.0005R + 0.005)$ Ом. Относительная погрешность плеч

$$\text{отношений не превышает } \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B}{B} \approx 0,025\%$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Измерение сопротивления мостиком Уитстона.

1. Собрать схему мостика Уитстона

2. Подвижной контакт установить посередине реохорда. При равенстве плеч ($l_1 = l_2$) точность измерения наибольшая.

3. Подобрать сопротивление R магазина так, чтобы ток через гальванометр прекратился.

В начале подбора ключ K замыкают кратковременно. Если стрелка значительно отклонилась от нулевого положения, то ключ размыкают, изменяют сопротивление магазина и вновь замыкают ключ. Если

уравновешивание моста не удается осуществить подбором сопротивления R , то окончательное уравновешивание осуществляют небольшим перемещением ползунка реохорда. Разомкнуть ключ.

Измеренные l_1 , l_2 реохорда и сопротивления R записать в таблицу 1.

4. Немного изменить сопротивление магазина (на 3-5%) в обе стороны от ранее установленного значения и перемещением ползунка реохорда в каждом случае вновь уравновесить мост.

Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	l_1	l_2	R	R_x
1				
2				
3				

II. Измерение сопротивлений мостом МВЛ-47.

На мосте МВЛ-47 проводят измерение двух сопротивлений (предыдущего и нового) по отдельности и при последовательном и параллельном их включении. Для этого:

1. К зажимам Б, Г и Х моста подключить соответственно батарею, гальванометр и измеряемое сопротивление.

2. Установить штепселя плеч сравнения первоначально в

$$\text{положение } \frac{A}{B} = \frac{100 \text{ Ом}}{100 \text{ Ом}} = 1$$

3. Нажать ключ K_1 батареи, а затем кратковременно ключ K_2 гальванометра. Изменением сопротивления рычажного магазина (плеча сравнения) уравновешивают мост. Изменение сопротивления производят при разомкнутых ключах. Ключи размыкают в обратной последовательности: сначала K_2 , а затем K_1 . Если пределов рычажного магазина не хватает для уравновешивания моста, изменить первоначальное соотношение плеч сравнения.

4. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2.

	A/B	$R_{\text{маг}}$	R_{1x}	$R_{\text{пар}}$	$R_{\text{послед}}$
Сопротивление R_1				—	—
Сопротивление R_2				—	—
Параллельное соединение			—		—
Последовательное соединение			—	—	

4.2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 1 записать окончательный результат измерения:

$$R_x = \overline{R_x} \pm \Delta R_x; \varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} \cdot 100\ldots\%$$

где $\Delta R_x = t_\alpha(n) \cdot S$ - абсолютная погрешность измерения;

$t_\alpha(n) = t_{0,95}(3) = 4,3$ - коэффициент Стьюдента

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta R_x)^2}{n(n-1)}} - \text{средняя квадратичная погрешность серии}$$

измерений

2. По данным таблицы 2 и сведениям о погрешностях, приведенным при описании моста МВЛ-47, записать окончательный результат измерений:

$$R_1 = R_{1x} \pm (R_{1x} + 10) \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \varepsilon = \frac{R_{1x} + 10}{R_{1x}} \cdot 5 \cdot 10^{-4}$$

$$R_2 = R_{2x} \pm (R_{2x} + 10) \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \varepsilon = \frac{R_{2x} + 10}{R_{2x}} \cdot 5 \cdot 10^{-4}$$

$$R_{\text{пар}} = R_{x_пар} \pm \Delta R_{\text{пар}}; \varepsilon_{\text{пар}} = \quad \%$$

$$R_{\text{послед}} = R_{x_послед} \pm \Delta R_{\text{послед}}; \varepsilon_{\text{послед}} = \quad \%$$

$$\text{где } \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} = \frac{R+10}{R} \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-4}$$

3. Рассчитать $R'_{\text{пар}}$ и $R'_{\text{посл}}$ по формулам

$$R'_{\text{пар}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad R'_{\text{посл}} = R_1 + R_2$$

и сравнить с результатом пункта 2. (попадание расчетных значений в доверительный интервал экспериментальных).

4. Сравнить относительную погрешность измерения R_1 мостиком Уитстона и мостом МВЛ-47.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Преимущества и недостатки омметров.
2. Преимущества и недостатки метода вольтметра и амперметра.
3. Основное преимущество мостового метода.
4. Почему схема называется мостовой.
5. Сформулируйте правила Кирхгофа.
6. Выведите соотношение (10) для измерения сопротивления по методу уравновешенности моста.
7. Докажите, что наименьшая погрешность в мостике Уитсона достигается при $l_1 = l_2$

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М., «Наука», 2002
2. Электрические измерения. Под ред. Фремке А.В. Л., «Энергия». 1973.
3. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. Ивероной В.И. М., «Наука», 1968.