

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»**

Кафедра «Физика»
Лаборатория электрофизики

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО
КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА**

Методические указания
к лабораторной работе № 224

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2005

Цель лабораторной работы – установление зависимости сопротивления металлического проводника от температуры и определение температурного коэффициента сопротивления.

1. Элементы теории проводимости

При исследовании электрических явлений было установлено, что металлы хорошо проводят электрический ток.

Электрический ток представляет собой упорядоченное (т. е. имеющее определенное направление) перемещение электрических зарядов.

Способность веществ пропускать электрический ток под действием постоянного электрического напряжения называется *электропроводностью*. Количественно электропроводность вещества оценивается его удельной проводимостью σ , представляющей коэффициент пропорциональности между напряженностью электрического поля E и возникающей в веществе под действием электрического поля плотностью тока j .

$$\sigma = j/E.$$

Величина, обратная удельной проводимости, называется *удельным сопротивлением*.

$$\rho = 1/\sigma. \quad (1)$$

Необходимым условием наличия электропроводности у любого материала является существование в нем *свободных заряженных частиц* – носителей заряда. Чем больше концентрация n (количество заряженных частиц в единице объема), тем меньше удельное сопротивление:

$$\rho = E/nV_{др}q, \quad (2)$$

где q – заряд частицы;

$V_{др}$ – средняя скорость частицы в направлении электрического поля (без учета теплового движения).

Высокая электропроводность металлов обусловлена особым строением кристаллической решетки. К металлам относятся элементы, у которых электроны внешних оболочек (валентные электроны) сравнительно слабо связаны с атомными ядрами. При объединении атомов в кристалл эти электроны теряют связь с индивидуальными ядрами, становятся "сво-

бодными" электронами, принадлежащими всему кристаллу. *Свободные электроны* перемещаются в металлической кристаллической решетке подобно электронному газу и являются *носителями заряда в металлах*.

В узлах кристаллической решетки металла находятся атомы без валентных электронов ("ободранные" атомы с некомпенсированным положительным зарядом) – положительные ионы. Между ионами действуют электрические силы отталкивания. Свободные электроны уравнивают эти силы и удерживают ионы в положении равновесия. Всякий раз, когда ион выходит из положения равновесия, например при тепловых колебаниях, свободные электроны перераспределяются в пространстве так, что возникают силы, возвращающие ион в положение равновесия. При этом возникают *тепловые флуктуации плотности*.

В зависимости от точки зрения на законы движения свободных электронов в металле можно говорить о классической и о квантовой теориях проводимости.

Согласно *классической теории*, в отсутствие электрического поля свободные электроны хаотически движутся и сталкиваются подобно упругим шарикам с ионами металла. Длина свободного пробега электронов λ (расстояние от одного столкновения до другого) совпадает с расстоянием между ионами – периодом решетки $d = 2 \cdot 10^{-10}$ м и *не зависит от температуры*. Столкновения повторяются через промежуток времени τ , равный отношению

$$\tau = \lambda / \langle V \rangle,$$

где $\langle V \rangle$ – средняя скорость хаотического движения свободных электронов.

Если в металлическом образце создать электрическое поле напряженностью E (подключить образец к источнику напряжения), то на каждый электрон начнет действовать сила

$$F = e E,$$

в результате чего на быстрое беспорядочное движение электронов накладывается их упорядоченное движение в направлении, противоположном направлению вектора E , произойдет "дрейф" электронов, начнется макроскопический перенос заряда, то есть возникнет электрический ток.

В процессе свободного пробега электроны движутся равноускоренно с ускорением

$$a = eE/m,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

Поскольку масса иона в десятки тысяч раз больше массы электрона, то в момент удара об ион электрон полностью теряет скорость направленного движения $V_{др}$. За время τ скорость электрона изменяется от 0 до $V_{др} = eE\tau/m$.

Поэтому средняя скорость дрейфа между двумя последовательными столкновениями

$$\langle V_{др} \rangle = eE\tau/2m.$$

Учитывая выражение (2), для удельного сопротивления получим

$$\rho = 2m/e^2 n\tau.$$

При наличии внешнего электрического поля скорость электрона складывается из скорости хаотического движения и скорости дрейфа. Скорость дрейфа пренебрежимо мала по сравнению со скоростью хаотического движения. Например, для меди

$$\langle V_{др} \rangle = j/en = 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Если уподобить хаотическое движение электронов тепловому движению молекул идеального газа (идея Друде), то при температуре $T = 300 \text{ К}$

$$\langle V \rangle = (8kT/\pi m)^{1/2} = 10^5 \text{ м/с.}$$

Поэтому и при наличии внешнего электрического поля $\tau = \lambda/\langle V \rangle$.

С учетом этого можно записать

$$\rho = 2m \langle V \rangle / e^2 n \lambda. \quad (3)$$

Данная формула применяется как в классической, так и в квантовой теории.

Если следовать *классической теории*, длина свободного пробега λ совпадает с расстоянием между ионами (периодом решетки $d = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$) и не зависит от температуры, а $\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$. Подставив эти выражения в формулу (3), получим

$$\rho = 2m/e^2 n d \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (4)$$

то есть удельное сопротивление растет пропорционально корню квадратному из температуры, что противоречит опыту.

Экспериментально было установлено, что для чистых металлов зависимость удельного сопротивления от температуры в широком диапазоне температур носит линейный характер:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_p t), \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление металла при температуре t °С;

ρ_0 – удельное сопротивление при 0 °С;

α_p – температурный коэффициент удельного сопротивления.

Согласно *квантовой теории*, движение электронов аналогично распространению электронной волны. Электрон в кристалле движется в постоянном *периодическом* электрическом поле, создаваемом ионами и остальными электронами, причем пространственный период электрического поля совпадает с периодом d кристаллической решетки. Исключительно важным оказалось установление того факта, что в идеальной решетке при движении в периодическом электрическом поле электроны *не испытывают сопротивления движению*. Из этого фундаментального факта следует, что электрическое сопротивление металлов может возникнуть только при *нарушениях периодичности решетки*. В реальной решетке всегда есть *искажения* правильности решетки – центры рассеяния электронной волны.

Центрами рассеяния являются:

- 1) примеси;
- 2) дефекты структуры кристалла;
- 3) флуктуации плотности, возникающие в результате тепловых колебаний ионов в узлах кристаллической решетки – тепловых флуктуаций.

Из-за наличия центров рассеяния электронная волна проходит через кристаллическую решетку не только в прямом направлении, но и рассеивается в стороны подобно тому, как рассеивается световой луч при распространении в мутной среде.

Каждый вид нарушения периодичности решетки вносит свой вклад в длину свободного пробега электрона. Влияние примесей и дефектов не зависит от температуры. Тепловые колебания ионов тем больше, чем выше температура. Было установлено, что *из-за влияния тепловых флуктуаций длина свободного пробега изменяется обратно пропорционально температуре*. В квантовой теории показано, что *средняя скорость хаотического движения электронов не зависит от температуры*. Таким образом, можно заключить, что для чистых металлов, где основную роль играют тепловые колебания ионов, удельное сопротивление ρ прямо пропорционально T , что согласуется с экспериментом. В удельном сопротивлении *сплавов* заметную роль играют примеси и дефекты, поэтому ρ сплавов слабее зависит от температуры.

2. Температурный коэффициент сопротивления

Сопротивление проводника длиной L и постоянным поперечным сечением S определяется выражением

$$R = \rho L/S.$$

Температурным коэффициентом сопротивления называется величина α_R , численно равная относительному изменению сопротивления при нагревании на один градус:

$$\alpha_R = dR/RdT.$$

Температурный коэффициент сопротивления отличается от температурного коэффициента удельного сопротивления на величину температурного коэффициента расширения металла $\alpha_l(10^{-5})$, поэтому можно приравнять $\alpha_R = \alpha_p = \alpha$ и записать для электрического сопротивления

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (6)$$

где R_0 — сопротивление при температуре 0°C ;

R_t — сопротивление при температуре $t^\circ\text{C}$.

Из этого выражения можно определить:

$$\alpha = (R_t - R_0)/R_0 t, \quad (7)$$

если известны R_0 и R_t . Можно измерить сопротивление R_1 при температуре t_1 и сопротивление R_2 при температуре t_2 и вычислить α по следующей формуле:

$$\alpha = (R_2 - R_1)/(R_1 t_2 - R_2 t_1). \quad (8)$$

Задача эксперимента сводится к точному определению сопротивления металлического проводника при различных температурах.

3. Методы определения электрического сопротивления

1. Метод амперметра-вольтметра. Сопротивление можно вычислить по измеренным значениям силы тока I , проходящего через проводник, и напряжению U между его концами:

$$R = U/I.$$

Этот метод не отличается большой точностью, ошибка может достигать десятков процентов от измеряемой величины.

2. Метод измерения сопротивления с помощью моста. Данный метод является одним из наиболее точных.

Простейший мост постоянного тока (мост Уитстона) состоит из четырех сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 и R_4 источника тока ε с ключом К и гальванометра Γ (рис. 1).

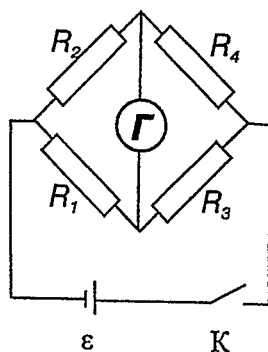


Рис. 1

Если подобрать сопротивления так, чтобы ток через гальванометр был равен нулю (мост уравновешен), то в этом случае будут выполняться следующие равенства:

1) ток через R_1 равен току через R_3 .

$$I_1 = I_3;$$

2) ток через R_2 равен току через R_4 .

$$I_2 = I_4;$$

3) напряжение на R_1 равно напряжению на R_2 .

$$I_1 R_1 = I_2 R_2,$$

4) напряжение на R_3 равно напряжению на R_4 .

$$I_3 R_3 = I_4 R_4.$$

С учетом этих равенств можно получить следующее соотношение:

$$R_1/R_2 = R_3/R_4, \quad (9)$$

которое является условием равновесия моста.

Включив, например, вместо сопротивления R_4 неизвестное сопротивление R_x и уравновесив мост, можно определить величину неизвестного сопротивления по формуле:

$$R_x = R_3 R_2 / R_1. \quad (10)$$

Обычно вместо R_3 включают магазин сопротивлений (или переменное сопротивление). Сопротивления R_1 , R_2 и R_3 должны быть известны. При достаточно чувствительном гальванометре, включенном в диагональ моста, можно измерять сопротивление с точностью до десятых долей Ома. Недостатком схемы является то, что неконтролируемые сопротивления соединительных проводов прибавляются к сопротивлениям R . Кроме того, здесь не учитывается влияние паразитных термоЭДС, легко возникающих во всех контактах цепи.

3. Метод компенсации является одним из основных приемов точных лабораторных электрических измерений электродвижущих сил, токов и сопротивлений. При этом способе измерений на результате не сказывается сопротивление соединительных проводов, сила тока, текущего через исследуемое сопротивление, не входит в конечный результат, полностью исключается влияние термоЭДС.

4. Описание установки

Схема установки представлена на рис. 2.

Объектом исследования является отрезок металлической проволоки, помещенный для предохранения от повреждения в латунный стакан. Исследуемый проводник помещен в термостат, снабженный термометром для измерения температуры внутри термостата (и проводника). Концы проводника выведены к клеммам на термостате и соединены проводом с мостом P577, служащим для измерения сопротивления.

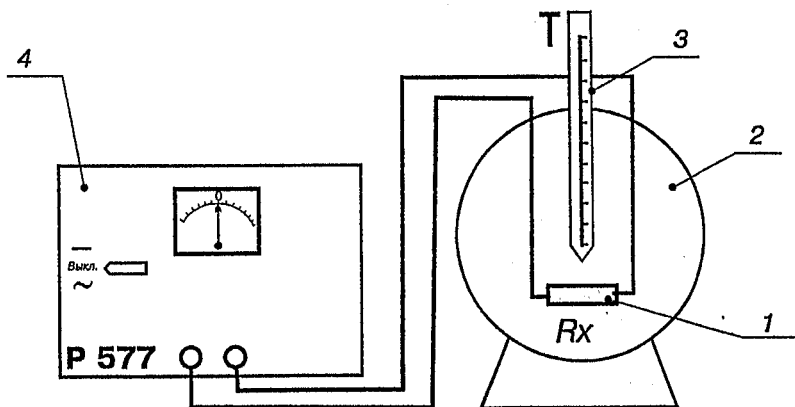


Рис. 2:

1 – исследуемый проводник; 2 – термостат; 3 – термометр;
4 – мост переменного тока P577

Лицевая панель моста P577 показана на рис. 3.

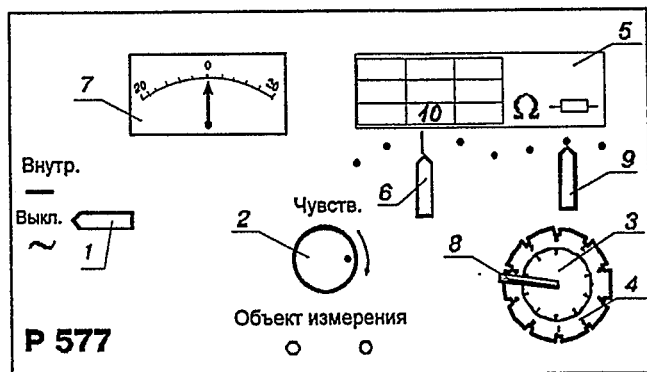


Рис. 3

При снятии показаний мост должен быть уравновешен (стрелка гальванометра установлена на ноль). Тогда (см. измерения с помощью моста Уитстона)

$$R_x = R_3 R_2 / R_1. \quad (11)$$

Роль сопротивления R_3 играет переменное сопротивление, величина которого регулируется с помощью ступенчатого переключателя 4 (подробно показан на рис. 4). С его помощью нужно добиваться, чтобы стрелка гальванометра встала на "0" (мост уравновешен).

Отношение R_2/R_1 выведено на переднюю панель прибора как "множитель".

5. Инструкция по работе с мостом переменного тока P577

Мост переменного тока P577 предназначен для измерения емкостей, индуктивностей и сопротивлений.

1. Подключить прибор к сети переменного тока.
2. Подсоединить измеряемое сопротивление к зажимам "объект измерения".
3. Рукоятку "чувствит." 2 установить в крайнее левое положение, ручку 9 – в среднее положение, ручку 6 – поставить в положение "×10".
4. Ручку (1) установить в положение "внутр.", то есть включить в верхнее положение. На световом табло 5 в правом верхнем углу должен высветиться знак "Ω —".

5. Установить рукоятку "чувствит." 2 в такое положение, чтобы стрелка микроамперметра 7 отклонилась на 20 делений.

6. Ступенчатым переключателем 4, расположенным в правом нижнем углу, добиться, чтобы стрелка микроамперметра встала на "0" (мост уравновешен). Для этого сначала нужно использовать внешний, ступенчатый переключатель 4, а когда стрелка микроамперметра будет близка к нулю – вращать внутренний плавный переключатель 3.

7. На ступенчатом переключателе есть индикатор положения 8, по которому производят отсчет сопротивления. На внешней шкале отсчитываются целые значения измеряемого сопротивления (на рис. 4 это число 8, на внутренней шкале – сотые доли (на рис. 4 это 0,63)). Так как ручка 6 (множитель) стоит в положении 10, то величина измеряемого сопротивления

$$R_x = 8,63 \times 10 = 86,3 \text{ Ом.}$$

8. После окончания измерений переключатель 1 установить в положение "выкл.", отсоединить прибор от сети переменного тока.

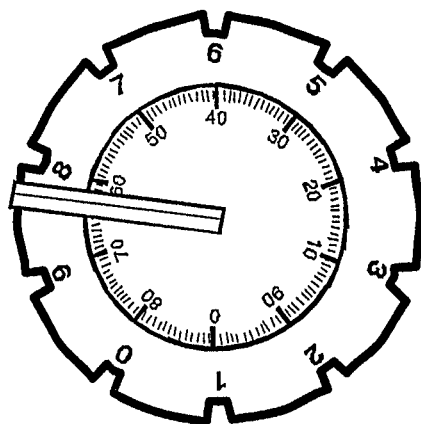


Рис. 4

6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться на рабочем месте с установкой и работой измерительных приборов.
2. Включить в сеть мост P577.
3. Занести начальную температуру проводника в таблицу.

Таблица

$t, ^\circ\text{C}$	$R_{\text{нагр.}}, \text{Ом}$	$R_{\text{охлад.}}, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$

4. Измерить сопротивление проводника при этой температуре. Данные занести в таблицу.

5. Включить термостат. По мере нагревания проводника через каждые четыре градуса записывать показания термометра и значения исследуемого сопротивления, пока температура не достигнет 100°C .

6. Выключить термостат, открыть дверцу и повторить измерения в режиме охлаждения проводника (чтобы учесть тепловую инерцию установки).

7. После проведения измерений выключить мост P577, переведя переключатель \mathcal{K} в положение "выкл."

8. Определить сопротивление R проводника при данной температуре как среднее значение сопротивлений при нагревании и охлаждении.

9. По полученным значениям построить график зависимости сопротивления проводника от температуры. Убедиться, что получилась линейная зависимость.

10. Продолжив прямую – линейную зависимость R от t – до пересечения с осью ординат, определить значение R_0 – сопротивление при 0°C .

11. Вычислить температурный коэффициент сопротивления α либо по формуле (7), либо по формуле (8).

12. Оценить погрешность $\Delta\alpha$ методом оценки погрешностей при косвенных измерениях физических величин.

13. По справочнику определить материал проводника.

7. Контрольные вопросы

1. Как изменяется сопротивление металлического проводника при повышении температуры? Объясните эту зависимость.

2. Почему определение сопротивления через показания амперметра и вольтметра является грубым методом?

3. Как необходимо отрегулировать мост постоянного тока, чтобы он был "уравновешен"?

4. Что понимается под тепловой инерцией установки?

5. Выведите формулу для определения неизвестного сопротивления с помощью моста постоянного тока.

Содержание

1. Элементы теории проводимости	1
2. Температурный коэффициент сопротивления	5
3. Методы определения электрического сопротивления	—
4. Описание установки	7
5. Инструкция по работе с мостом переменного тока Р577	8
6. Порядок выполнения работы	9
7. Контрольные вопросы	10