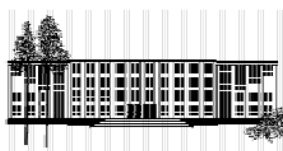


# **Измерительный практикум**

---

## **Лабораторная работа 4 (4.1, 4.2) Компенсационные методы измерений**



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Новосибирский государственный университет

Физический факультет  
Кафедра общей физики

## **Лабораторная работа 4 (4.1, 4.2) Компенсационные методы измерений**

### **Измерительный практикум**

Методическое пособие  
к лабораторным работам

© Интернет версия подготовлена для  
сервера Физического факультета НГУ  
<http://www.phys.nsu.ru>

Составители: к.ф.-м.н. А.В. Багинский  
к.т.н. О.А. Брагин

Новосибирск  
2006

**Оглавление**

<i>Введение</i> .....	4
<i>Потенциометр</i> .....	4
Принцип действия потенциометра .....	4
Одноконтурный потенциометр .....	5
Многоконтурные потенциометры .....	8
Термопара .....	8
Задания .....	10
Контрольные вопросы .....	11
<i>Мостовые методы измерения сопротивлений</i> .....	12
Одинарный мост .....	12
Двойной мост .....	13
Органы управления и клеммы для подключения внешних элементов моста .....	15
Задания .....	15

**Цель работы:** изучение компенсационных методов измерения ЭДС, напряжений и сопротивлений.

**Оборудование:**

1. Потенциометр постоянного тока; нормальный элемент Вестона; батарея питания потенциометра; нуль-индикатор, милливольтметр; термопара; нуль-термостат; печь с тиглем; источник питания печи; регистратор ЭДС термопары.

2. Мост постоянного тока, нуль-индикатор, источник питания моста (батарея, аккумулятор или др.), плата с сопротивлениями, малое проволочное сопротивление, образцовое сопротивление или магазин сопротивлений, катушка из тонкого медного провода, рамка с натянутой медной проволокой и подвижными потенциальными контактами, амперметр, переключатель полярности, реостат, штангенциркуль, микрометр.

## Введение

Существует класс электроизмерительных приборов, принцип действия которых основан на сравнения измеряемой (неизвестной) величины с известной, образцовой. В качестве элемента сравнения в таких приборах используются, как правило, рабочие эталоны единиц соответствующих величин: эталон напряжения, эталон сопротивления, эталон индуктивности и другие. Этим обеспечивается высокая точность и надежность измерений. Представителями данного класса приборов являются мосты и потенциометры.

## Потенциометр

### Принцип действия потенциометра

Потенциометры предназначены для измерения электродвижущих сил (ЭДС) и напряжений методом компенсации измеряемого напряжения эталонным. Суть компенсационного метода измерения напряжения ясна из рис. 1.1. Источник измеряемого напряжения  $U_x$  включается встречно регулируемому образцовому источнику  $U_{обр}$ . Меняя напряжение образцового источника, можно добиться нулевых показаний нуль-индикатора  $A$  (чувствительного вольтметра или амперметра) и тем самым произвести измерение  $U_x = U_{обр}$ .

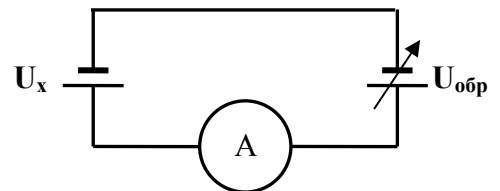


Рис. 1.1. Принцип действия потенциометра

$U_x$  – источник измеряемого напряжения;  $U_{обр}$  – источник образцового напряжения (элемент сравнения);  $A$  – нуль индикатор.

Выше отмечалось, что для обеспечения высокой точности измерений в качестве элемента сравнения  $U_{обр}$  необходимо применять эталон напряжения. К сожалению, регулируемых эталонов напряжения не существует. Поэтому измерение проводится в два этапа, как показано на рис. 1.2.

Здесь регулируемое опорное напряжение снимается с движка переменного сопротивления  $R_0$ , к которому поочередно подключаются источник эталонного напряжения  $E_N$  (рис. 1.2а) и источник измеряемого напряжения  $E_x$  (рис. 1.2б). Если  $U$  больше  $E_N$  и  $E_x$ , то, перемещая движок  $R_0$ , мы всегда “найдем” точку, в которой напряжение, снимаемое с делителя, равно напряжению подключенного к нему источника ( $E_N$  или  $E_x$ ) и скомпенсирует его (нуль-индикатор  $A$  покажет ноль). Пусть компенсация  $E_N$  и  $E_x$  произошла при сопротивлениях делителя  $R_N$  (рис. 1.2а) и  $R_x$  (рис. 1.2б), т.е.:

$$\frac{U}{R_0} R_N = E_N, \quad \frac{U}{R_0} R_x = E_x.$$

Отсюда:

$$\frac{E_N}{E_X} = \frac{R_N}{R_X}.$$

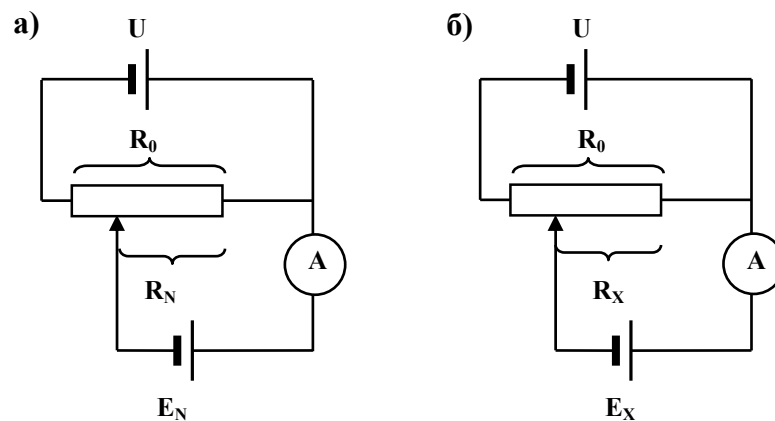


Рис. 1.2. Способ сравнения неизвестного напряжения  $E_X$  с эталонным напряжением  $E_N$ .  $R_0$  – переменное сопротивление;  $U$  – батарея (источник питания);  $E_N$  – источник эталонного напряжения;  $E_X$  – источник измеряемого напряжения;  $A$  – нуль-индикатор (чувствительный вольтметр или амперметр).

Таким образом, зная  $R_N$  и  $R_X$ , мы, тем самым, определили отношение измеряемого напряжения к эталонному. Именно эта методика (немного модифицированная) реализована в потенциометрах.

### Одноконтурный потенциометр

Схема измерений, показанная на рис. 1.2, вполне работоспособна, однако не удобна, т.к. требует вначале измерения сопротивлений  $R_N$  и  $R_X$ , затем расчета их отношения и вычисления  $E_X$ . Для упрощения процедуры измерения в реальном потенциометре строго фиксируют ток, протекающий через  $R_0$  (рабочий ток потенциометра). Это позволяет заранее отградуировать делитель напряжения (т.е. разметить и оцифровать положения движка  $R_0$ ) непосредственно в Вольтах (а не в Омах), что делает процедуру измерений гораздо более удобной – сразу после компенсации напряжения  $E_X$  его значение можно прочесть по оцифровке делителя. Градуировка делителя  $R_0$  производится при настройке потенциометра на заводе изготовителе при каком-то значении тока через делитель. В последующем, при проведении измерений, именно этот ток и будет рабочим.

Упрощенная схема потенциометра, показанная на рис. 1.3, отличается от схемы, приведенной на рис. 1.2, дополнительным сопротивлением  $R_b$ , предназначенным для регулирования тока в цепи  $R_0$ , отдельным входом для подключения рабочего эталона напряжения (нормального элемента Вестона) и переключателем  $\Pi$ , при помощи которого можно подключать к делителю  $R_0$  либо измеряемое, либо эталонное напряжение. Нормальный элемент используется для настройки рабочего тока при подготовке потенциометра к работе. Он, как видно из схемы, подключается в фиксированную точку делителя. Эта специальная контрольная точка, выбранная таким образом, чтобы при протекании через  $R_0$  рабочего тока напряжение в этой точке было в точности равным ЭДС нормального элемента Вестона. Поэтому, если при помощи переключателя  $\Pi$  подключить нормальный элемент к делителю, то при токе равном рабочему нуль-индикатор должен показать ноль. Если же это не так, то ток следует отрегулировать при помощи  $R_b$  добившись нулевых показаний индикатора. После того как рабочий ток установлен, потенциометр готов к работе.

Чтобы не загромождать рис. 1.3 деталями не существенными для понимания принципа работы потенциометра элементы схемы изображены здесь упрощенно, а некоторые узлы, имеющиеся в реальном приборе, не показаны. В связи с этим необходимо сделать несколько пояснений.

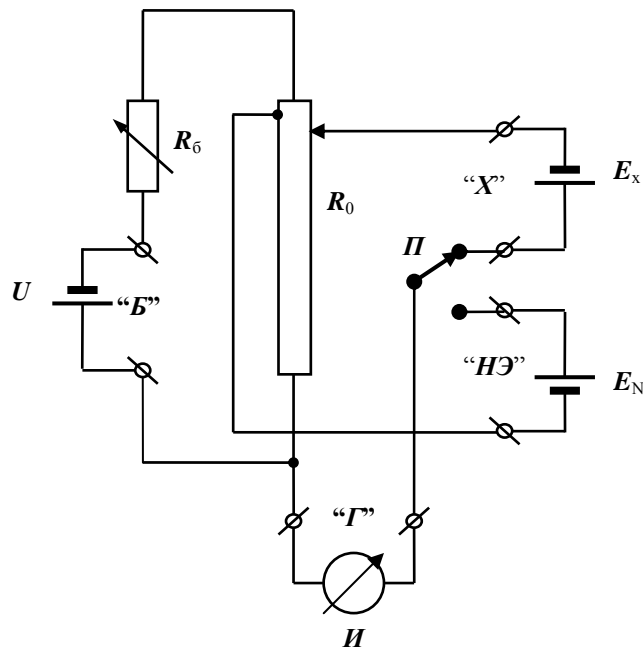


Рис. 1.3. Схема потенциометра

$R_6$  – балластное сопротивление для настройки рабочего тока;  
 $R_0$  – резистивный делитель напряжения;  $\Pi$  – переключатель рода работ;  
 $U$  – источник питания потенциометра;  $E_x$  – источник измеряемого напряжения;  
 $E_N$  – нормальный элемент Вестона;  $И$  – нуль-индикатор; “Б” (или “Батарея”),  
 “НЭ”, “Х”, “Г” – клеммы для подключения источника питания, нормального элемента,  
 источника измеряемого напряжения и нуль-индикатора.

**Делитель напряжения.** Делитель напряжения  $R_0$ , являющийся самым важным элементом потенциометра, показан на рис. 1.3 как простое переменное сопротивление. Очевидно, однако, что для точной компенсации измеряемого напряжения, а затем точного отсчета результата, делитель должен быть составным (т.е. состоять из нескольких последовательно включенных переменных сопротивлений разной величины, по принципу “грубо” → “средне” → “точно” → ...) и дискретным (для точного отсчета). Схема делителя приведена на рис. 1.4. Здесь каждое из переменных сопротивлений представляет собой цепочку из десяти одинаковых точно подобранных постоянных сопротивлений, которые коммутируются одиннадцатипозиционным переключателем. Сопротивления, выделенные на схеме пунктиром, коммутируются вдвоенным переключателем с тем, чтобы их значения изменялись синхронно – уменьшение величины верхнего (по схеме) сопротивления сопровождается точно таким же увеличением нижнего. Таким образом, при любом положении переключателей общее

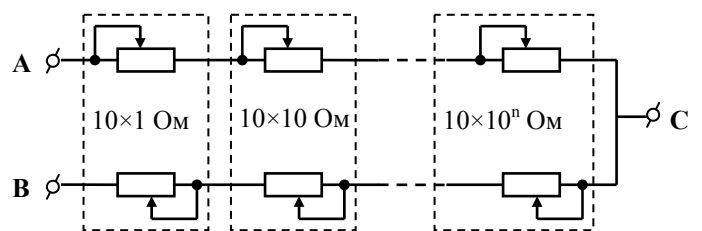


Рис 1.4. Схема делителя напряжения потенциометра

сопротивление цепи (между точками А и В) остается неизменным. Если рабочий ток потенциометра равен 1 мкА, то при указанных на схеме значениях сопротивлений изменение на ступень позиции левого (по схеме) переключателя приведет к изменению напряжения между точками В и С на 1 мкВ, следующего переключателя – на 10 мкВ и т.д.. Рукоятки переключателей смонтированы на лицевой панели потенциометра в виде единой “линейки” и расположены по мере убывания величин ступеней слева направо. Поэтому, номера позиций переключателей (0,1,2,3,...) представляют собой цифры в соответствующих десятичных разрядах общего числа и значение скомпенсированного напряжения (результат измерения)

просто прочитывается слева направо по номерам этих позиций, индицируемых в “окнах” рядом с каждым переключателем.

**Балластное сопротивление  $R_6$  для настройки рабочего тока** состоит из 3-х или 4-х (в зависимости от типа потенциометра) переменных сопротивлений разного номинала (“грубо” → “средне” → “точно”).

**Коррекция точки подключения нормального элемента.** ЭДС нормального элемента Вестона хотя и слабо, но зависит от температуры (в диапазоне рабочих температур от 1,018 В до 1,019 В). В соответствии с этим в потенциометрах предусмотрена возможность изменения точки подключения нормального элемента к делителю напряжения. На панели потенциометра имеется рукоятка, рядом с которой выгравировано число 1,018 – это начальные цифры ЭДС нормального элемента Вестона. Для выполнения температурной коррекции рукоятку необходимо повернуть так, чтобы дополнить число 1.018 до значения ЭДС нормального элемента при данной температуре. ЭДС нормального элемента при текущей температуре рассчитывают, руководствуясь его паспортными данными. При работе с потенциометрами класса ниже 0,01 ЭДС нормального элемента, которым комплектуется данная работа, можно рассчитывать по формуле:

$$\varepsilon = 1,01864 - [40,6 \cdot (t - 20) + 0,95 \cdot (t - 20)^2 - 0,01 \cdot (t - 20)^3] \cdot 10^{-6}$$

$\varepsilon$  – в Вольтах,  $t$  – в °С.

**Кнопки “Измерение” и переключатель чувствительности.** Кнопки “Измерение грубо” и “Измерение точно” предназначены для замыкания измерительной цепи и изменения чувствительности нуль-индикатора. Когда они отжаты, переключатель  $\Pi$  подключен к клеммам нуль-индикатора не непосредственно, как показано на рис. 1.3, а через очень большое, порядка нескольких Мом, сопротивление. Соответственно, источник измеряемого напряжения  $E_x$  подключен к делителю  $R_0$  через это сопротивление, а чувствительность нуль-индикатора сильно загружена. При нажатии кнопки “Измерение грубо” указанное сопротивление шунтируется сопротивлением  $\sim 500$  кОм, при нажатии кнопки “Измерение точно” – закорачивается и таким образом ступенчато меняется чувствительности нуль-индикатора. Начиная процедуру измерения, когда вы еще не знаете ни величины измеряемого напряжения, ни его полярности, нажимайте кнопку “измерение грубо” лишь на мгновение. Определив, в каком направлении и как быстро перемещается указатель нуль-индикатора, выполните предварительную компенсацию напряжений, а при необходимости измените полярность подключения  $E_x$ . Убедившись, что нуль-индикатор не перегружается, кнопку “Измерение грубо” можно зафиксировать в нажатом положении поворотом на 90° и произвести более точную компенсацию напряжения. Затем следует повторить эту же процедуру на чувствительном пределе.

У некоторых потенциометров (например, Р37) кнопка “измерение” с переключателем чувствительности не совмещена и предназначена только для замыкания измерительной цепи. У этих потенциометров есть отдельный многоступенчатый переключатель чувствительности. Устроен он так же как и описано выше, но имеет не одно, а несколько различных шунтирующих сопротивлений. Позиции переключателя оцифрованы в величинах этих добавочных сопротивлений.

**Кнопка “успокоение”** закорачивает вход нуль-индикатора и используется в случае его “зашкаливания”. Нажимать кнопку “успокоение” следует при отпущенной кнопке “измерение”. После устранения причины перегрузки индикатора кнопку “успокоение” отпускают.

**Внешние подключения.** Практически все потенциометры имеют два идентичных входа. Соответственно, переключатель рода работ  $\Pi$  имеет три рабочих положения:  $H\bar{Э}$  – к делителю напряжения подключен нормальный элемент,  $X_1$  – к делителю напряжения подключен первый вход (клеммы “ $X_1$ ”),  $X_2$  – к делителю напряжения подключен второй вход (клеммы “ $X_2$ ”). Назначение остальных клемм ясно из рис. 3. Замечание. При подготовке потенциометра к работе нормальный элемент следует присоединять к клеммам прибора

после того как подключен источник питания  $U$  (не наоборот!), строго соблюдая полярность подключения. Ошибка может привести к выходу из строя нормального элемента. При демонтаже схемы первым отсоединяется нормальный элемент.

### Многоконтурные потенциометры

Из изложенного выше ясно, что настроенный потенциометр представляет собой не что иное, как регулируемый источник напряжения с высокой дискретностью его изменения. Так 6-декдный потенциометр перекрывает диапазон более 1 В с дискретностью 1 мкВ. Создание прецизионного источника с таким большим динамическим диапазоном является сложной технической задачей. Проще использовать два или три включенных последовательно источника, каждый из которых обладает меньшей относительной дискретностью изменения выходного напряжения. Так, если вернуться к схеме, приведенной на рис 1.1, то вместо одного источника  $U_{обр}$  с выходным напряжением, например, 0...1 В и дискретностью его установки 1 мкВ можно включить последовательно два источника: 0...1 В с дискретностью 1 мВ и 0...1 мВ с дискретностью 1 мкВ. Многоконтурный потенциометр построен именно по этому принципу и представляет собой два (или больше) одноконтурных потенциометров, смонтированных в одном корпусе и соединенных так, чтобы снимаемые с них напряжения суммировались на едином входе многоконтурного потенциометра.

Имеющийся в лаборатории потенциометр Р37 является двухконтурным. При подготовке его к работе, необходимо установить два рабочих тока. Ток в “старшем” контуре настраивается с использованием нормального элемента, точно так же как у одноконтурного потенциометра. Образцовое напряжение для настройки рабочего тока во втором контуре поступает с делителя первого контура. Поэтому настройка потенциометра Р37, так же как и любого другого многоконтурного потенциометра, должна производиться в строгом порядке – нельзя настраивать ток в “младшем”, не настроив предварительно ток в “старшем” контуре. Что же касается собственно процесса измерений, то он ничем не отличается от описанного ранее.

### Термопара

Термопара, благодаря своей удивительной простоте и надежности наиболее часто применяется в практике температурных измерений. Принцип действия термопары основан на следующем физическом явлении. Если два проволочных проводника из различных металлов или сплавов (различающихся по работе выхода и концентрации электронов проводимости) соединить в одной точке, то часть электронов перейдет из одного проводника в другой, проводники зарядятся, и на их свободных концах появится разность потенциалов – контактная ЭДС. В практике электрических измерений это весьма вредное явление, особенно при измерении малых напряжений. Однако оно имеет и положительную сторону. Дело в том, что контактная ЭДС зависит от температуры и, следовательно, простейшая конструкция из двух, соединенных в одной точке проводников может использоваться в термометрии в качестве прекрасного датчика температуры - термопары. Проводники, из которых изготовлена термопара, называются термоэлектродами, а точка их соединения – спаем термопары.

Как измерить ЭДС термопары (термо-ЭДС)? Если подключить термоэлектроды непосредственно к регистрирующему прибору (потенциометру или микровольтметру с большим входным сопротивлением), мы получим еще два "термопарных спая" в точках контактов термоэлектродов с клеммами прибора. В результате регистрирующий прибор покажет суммарную ЭДС

$$E = E_{AB}(t_x) + E_{AKл}(t_0) + E_{BKл}(t_0),$$

где  $E_{AB}$  – термо-ЭДС рабочего спая;  $E_{AKл}$ ,  $E_{BKл}$  – термо-ЭДС в местах контактов термоэлектродов с клеммами прибора;  $t_x$  – температура рабочего спая термопары;  $t_0$  –



температура клемм прибора.

Так как при равенстве температур всех спаев суммарная ЭДС термопары должна равняться нулю это выражение можно преобразовать к виду:

$$E = E_{AB}(t_x) - E_{AB}(t_0) .$$

Отсюда видно, что термопарой измеряется разность  $t_x - t_0$ . Поэтому значение  $t_0$  нужно знать и при проведении измерений поддерживать постоянным, причем тем же самым, что и при градуировке термопары, когда определялась зависимость  $E(T)$ . Каких-либо физических ограничений на выбор величины  $t_0$  не существует, но общепринято термостатировать свободные концы термоэлектродов при  $t_0 = 0^\circ \text{C}$ . В таблицах номинальных статических характеристик термопар всегда приводят значения  $E(t)$  соответствующее температуре  $t_0 = 0^\circ \text{C}$ .

Таким образом, если термоэлектроды подключить непосредственно к клеммам прибора, температуру клемм придется поддерживать равной  $0^\circ \text{C}$ , что технически сложно. Поэтому применяют специальные способы подключения термопар.

Один из способов подключения термопары показан на рис. 1.5. Здесь термоэлектроды “надставлены” медными проводами, которые и присоединены к клеммам прибора. Так как клеммы потенциометров и чувствительных вольтметров изготавливают из меди или из сплавов, имеющих близкую к нулю контактную ЭДС в паре с медью, “паразитных” контактных ЭДС здесь не возникает, какую бы температуру не имели клеммы. Соединения медных проводов с термоэлектродами (так называемые “холодные спаи” термопары) помещают в сосуд с плавящимся льдом – термостатируют при температуре  $0^\circ \text{C}$ .

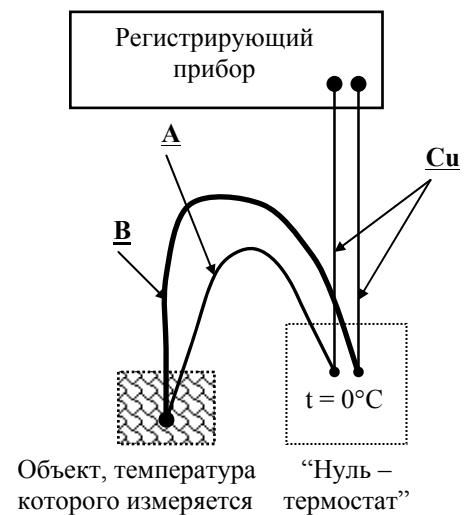


Рис. 1.5. Способ подключения термопары к регистратору. А, В – термоэлектроды; Cu – медные провода.

Другой способ подключения термопары показан на рис. 1.6. Здесь изображена так называемая дифференциальная термопара, представляющая собой, как видно из рис. 1.6, две “обычных” термопары, включенных встречно. ЭДС такой термопары пропорциональна разности температур ее спаев, а контактные ЭДС на клеммах прибора взаимно компенсируются, т.к. они одинаковы по величине и противоположны по знаку. Один из спаев (все равно какой) дифференциальной термопары используется, как рабочий, второй (“холодный спай”)– термостатируется при  $0^\circ \text{C}$  так же, как и у “обычной” термопары.

Один из

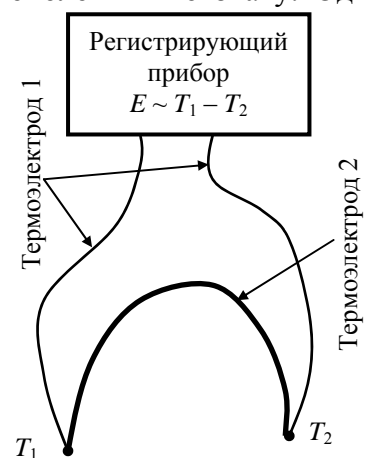


Рис. 1.6. Дифференциальная термопара

Чувствительностью термопары называется величина  $K = dE/dt$  ( $E$  – ЭДС термопары,  $t$  – температура). При подборе материалов термоэлектродов стремятся к тому, чтобы чувствительность была максимальной и не зависела от температуры. Наилучшей линейностью характеристики среди термопар с термоэлектродами из неблагородных металлов обладает хромель-алюмелевая (ХА) термопара ( $K = 40 \text{ мкВ/К}$  при  $0^\circ \text{C}$ ,  $K = 43 \text{ мкВ/К}$  при  $500^\circ \text{C}$ ), наивысшей чувствительностью – хромель-копелевая (ХК) термопара ( $K = 63 \text{ мкВ/К}$  при  $0^\circ \text{C}$ ,  $K = 88 \text{ мкВ/К}$  при

500°C). Как видно из приведенных численных значений, чувствительность термопары зависит от температуры. Однако если измерения производятся в сравнительно небольшом интервале температур, можно в первом приближении считать  $K = \text{const}$ . В этом случае температура может быть рассчитана по формуле (при термостатировании “холодных” спаев при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ):

$$t_x = K^{-1} \cdot E, ^\circ\text{C}.$$

Значение  $K$  можно рассчитать по экспериментально измеренной ЭДС термопары  $E^*$  при какой-либо известной температуре  $t^*$ .

Номинальная статическая характеристика  
термоэлектрического преобразователя Хромель - Алюмель

$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ
0	0,000	50	2,022	100	4,095	150	6,137	200	8,137
10	0,397	60	2,436	110	4,508	160	6,539	210	8,537
20	0,798	70	2,850	120	4,919	170	6,939	220	8,938
30	1,203	80	3,266	130	5,327	180	7,338	230	9,341
40	1,611	90	3,681	140	5,733	190	7,737	240	9,745

Номинальная статическая характеристика  
термоэлектрического преобразователя Хромель - Копель

$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ	$t, ^\circ\text{C}$	E, мВ
0	0,000	50	3,306	100	6,860	150	10,621	200	15,363
10	0,639	60	3,998	110	7,597	160	11,396	210	16,174
20	1,289	70	4,700	120	8,342	170	12,176	220	16,990
30	1,951	80	5,411	130	9,094	180	12,964	230	17,812
40	2,623	90	6,131	140	9,854	190	13,758	240	18,639

## Задания

1. Измерение ЭДС источника с большим внутренним сопротивлением.

Измерьте с помощью потенциометра и милливольтметра напряжение, возникающее между двумя проводниками из различных металлов, помещенными в стакан с водопроводной водой. Объясните различие показаний. Оцените внутреннее сопротивление источника ЭДС.

2. Измерение температуры термопарой.

Измерьте ЭДС термопары при температуре плавления олова ( $231,9^\circ\text{C}$ ). Определите, воспользовавшись таблицами номинальных статических характеристик термопреобразователей, тип термопары (у вас может быть либо ХА-термопара, либо ХК-термопара). Измерьте температуру кипящей воды и температуру собственного тела (в нескольких точках).

Схема измерения температуры плавления олова показана на рис. 1.7. К измерительной термопаре 4 подключаются параллельно два измерительных прибора: потенциометр 6 и прибор 5 для непрерывной регистрации ЭДС с выводом результатов в виде графика зависимости ЭДС от времени – термограммы. Так как фазовые переходы первого рода протекают при постоянной температуре, на термограмме будет наблюдаться характерная “полка” при температуре плавления олова. В это время необходимо произвести точное измерение ЭДС термопары потенциометром. Измерения необходимо проделать несколько раз как в режиме нагрева (плавление), так и в режиме охлаждения (кристаллизация). Сопоставьте показания потенциометра 6 и прибора непрерывной регистрации 5.

В линейном приближении, как указано в разделе “Термопара”, вычислите чувствительность термопары  $K$  по результатам измерения температур кипения воды ( $K_0$ ) и плавления олова ( $K_1$ ). Воспользовавшись значением  $K_0$  рассчитайте температуру плавления олова и, наоборот, воспользовавшись значением  $K_1$  рассчитайте температуру кипения воды. Объясните результаты.

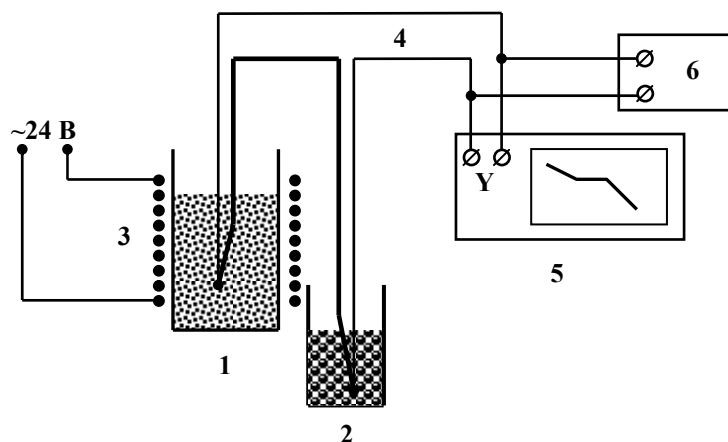


Рис 1.7. Схема измерения температуры плавления олова  
 1 – тигель с оловом; 2 – сосуд с водно-ледяной смесью;  
 3 – нагреватель; 4 – дифференциальная термопара; 5 –  
 регистратор ЭДС термопары; 6 – потенциометр.

3. Используя потенциометр как источник калиброванных напряжений, произведите поверку (правильность показаний) цифрового вольтметра.

#### Контрольные вопросы

1. Как увеличить диапазон измерений потенциометром в два раза?
2. Оцените, с какой точностью (относительной) необходимо подбирать сопротивления делителя напряжения потенциометра класса 0,01?

## Мостовые методы измерения сопротивлений

Мостами называются приборы, предназначенные для измерения сопротивлений методом сравнения. Для измерения сопротивлений более 50 Ом применяют одинарный мост – мост Уитстона. При измерении малых сопротивлений применяют двойной мост – мост Томпсона.

### Одинарный мост

Схема одинарного моста приведена на рис. 2.1. По сути, он представляет собой два делителя напряжения, включенных параллельно. Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R$  являются элементами моста и их значения известны. Сопротивление  $R_x$  – это неизвестное (измеряемое) сопротивление. Одно из сопротивлений моста (по схеме – это сопротивление  $R$ ) можно изменять в широких пределах, меняя, тем самым, коэффициент деления правого по схеме делителя напряжения, и, следовательно, потенциал в точке В. В процессе измерений мы меняем  $R$  в ту или иную сторону, добиваясь нулевых показаний индикатора  $\Gamma$ , включенного в измерительную диагональ моста – уравниваем мост. В этот момент потенциалы в точках А и В равны

$$\frac{UR_x}{R_x + R_1} = \frac{UR}{R + R_2},$$

и, следовательно:

$$R_x = R \frac{R_1}{R_2}.$$

Поскольку значения всех сопротивлений в правой части этого выражения нам известны, мы можем рассчитать  $R_x$ .

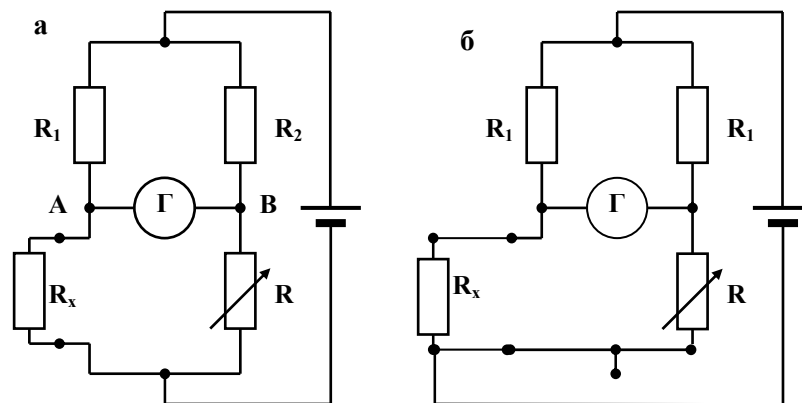


Рис. 2.1. Схема одинарного моста.

а – штатное (двухпроводное) подключение измеряемого сопротивления; б – трехпроводная схема подключения.

$R_x$  – измеряемое сопротивление;  $r$  – сопротивление подводящего провода;  $R_1$  и  $R_2$  – постоянные сопротивления моста;  $R$  – переменное сопротивление

Значения сопротивления  $R$  должны воспроизводиться очень точно и стабильно. Поэтому оно выполнено в виде магазина (набора) образцовых сопротивлений. Эти сопротивления соединены последовательно, группами по 10 шт. Величины сопротивлений в каждой группе одинаковы и отличаются от величин сопротивлений в соседних группах в 10 раз (например, группа 100-Омных сопротивлений, группа 10-Омных сопротивлений ... группа 0.01-Омных сопротивлений). Сопротивления внутри каждой группы коммутируются отдельным декадным переключателем. “Линейка” переключателей  $\times 100$  Ом,  $\times 10$  Ом,  $\times 1$  Ом,  $\times 0,1$  Ом,  $\times 0,01$  Ом смонтирована на лицевой панели моста. При помощи этой “линейки” можно выставить любое значение  $R$  до 1 кОм с дискретностью 0,01 Ом.

В процессе измерения сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  остаются постоянными, но их значения можно изменить (кратно десяти: 1 Ом, 10 Ом, 100 Ом ...) при помощи штепсельного переключателя на лицевой панели моста. Меняя отношение  $R_1/R_2$ , мы меняем диапазон измерений. Так, при  $R_1/R_2 = 1$  диапазон измерений составит (для рассмотренного выше примера) 0,01 Ом ... 1111,10 Ом. Установив  $R_1/R_2 = 100$ , мы будем иметь диапазон 1 Ом ... 111110 Ом, а при  $R_1/R_2 = 0,1$  – 0,001 Ом ... 111,110 Ом. Подбирая диапазон измерений, следует стремиться к тому, чтобы максимально "задействовать" линейку декадных переключателей магазина  $R$ . Этим минимизируется погрешность измерения. Так, предположим, что вам нужно измерить сопротивление менее 100 Ом, например, 15 Ом. Если  $R_1/R_2 = 1$ , то погрешность ваших измерений будет больше, чем можно бы было достичь, т.к. "старший" декадный переключатель линейки  $R$  не будет задействован, и вы будете иметь в результате не 5, а только 4 значащие цифры. В данном случае, для того чтобы выполнить измерения максимально точно, необходимо ввести отношение  $R_1/R_2 = 0,1$ .

Если внимательно проанализировать схему на рис. 2.1а, то можно увидеть, что при уравнивании моста измеряется не  $R_x$ , а  $R_x + r_1 + r_2$ , где  $r_1$  и  $r_2$  – сопротивления подводящих проводов, которыми  $R_x$  присоединяется к клеммам моста. Когда вкладом сопротивлений подводящих проводов пренебречь нельзя, можно использовать трехпроводную схему подключения  $R_x$ , показанную на рис. 2.1б. Условие равновесия моста при таком включении имеет вид (обратите внимание, что мост симметричный):

$$R_x + r_1 = R + r_2$$

и при равенстве сопротивлений подводящих проводов, они взаимно компенсируются. Такая схема позволяет расширить диапазон измерений  $R_x$  в область малых значений, однако на практике она применяется в случаях, когда  $R_x$  удалено от измерительной аппаратуры, т.е. не когда  $R_x$  мало, а когда  $r_1 + r_2$  велико. Для измерения же малых сопротивлений используется двойной мост.

### Двойной мост

При измерении малых сопротивлений трехпроводная схема подключения  $R_x$  не эффективна, т.к. вряд ли удастся обеспечить одинаковость сопротивлений подводящих проводов с приемлемой точностью, если  $R_x$  меньше этих сопротивлений.

На рис. 2.2 показана схема измерения сопротивлений, в которой задача исключения сопротивления подводящих проводов решается практически полностью. Обратите внимание, что здесь к каждому выводу сопротивления присоединено по два проводника. Это так называемая четырехпроводная схема включения сопротивлений в измерительную цепь. Два "токовых" проводника включаются в цепь источника питания, два "потенциальных" – присоединены к основаниям выводов сопротивления и идут к вольтметру. Очевидно, что токовые провода вообще не оказывают никакого влияния на результат измерений. Влияние потенциальных проводов при высоком входном сопротивлении вольтметра пренебрежимо мало. Сопротивление  $R_x$  рассчитывается здесь исходя из очевидного соотношения

$$\frac{R_x}{R_N} = \frac{U_x}{U_N}$$

по экспериментально измеренным значениям напряжений  $U_x$  и  $U_N$ .  $R_N$  – это образцовое сопротивление, значение которого известно с очень высокой точностью.

К сожалению эту схему невозможно применить в области очень больших и очень малых сопротивлений. Если  $R_x$  очень велико, то на результаты неизбежно скажется

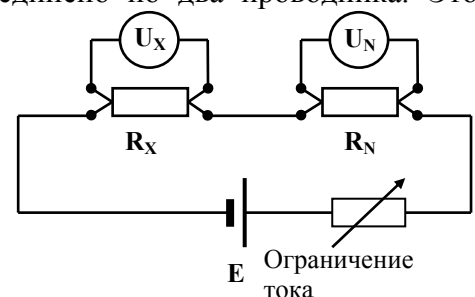


Рис. 2.2. Четырехпроводная схема включения сопротивлений в измерительную цепь.  
 $R_x$  и  $R_N$  – измеряемое и образцовое сопротивления;  $U_x$  и  $U_N$  – вольтметры, подключенные непосредственно к выводам  $R_x$  и  $R_N$ .

шунтирующее действие входного сопротивления вольтметра. При очень малых  $R_x$  ток в цепи  $R_x - R_N$  должен быть очень большим, чтобы обеспечить необходимую точность измерения  $U_x$  и  $U_N$ .

Задача измерения больших сопротивлений успешно решается с помощью одинарного моста Уитстона. Для измерения малых сопротивлений используется двойной мост Томпсона, схема которого показана на рис. 2.3. Собственно мост, как прибор, выделен на схеме пунктиром. В нижней части рисунка показана схема внешних цепей. Видно, что эта часть схемы тождественна схеме на рис. 2.2. Можно показать, что при балансе двойного моста, т.е. когда потенциалы в точках А и Б одинаковы, имеет место следующее соотношение:

$$\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 r}{R_N (R_4 + R_3 + r)} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right) = \frac{U_x}{U_N},$$

где  $U_x$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_x$ ,  $U_N$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_N$ .

Таким образом, при помощи моста Томпсона осуществляется непосредственное измерение отношения напряжений на последовательно включенных неизвестном и эталонном сопротивлениях. Равенство потенциалов в точках А и Б означает, к тому же, что через  $R_x$  и  $R_N$  течет один и тот же ток. Принимая это во внимание, получаем из предыдущего выражения:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 r}{(R_4 + R_3 + r)} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right)$$

Параметры схемы двойного моста выбираются так, чтобы второе слагаемое этого выражения обращалось в нуль. Для этого переключатели магазинов  $R_1$  и  $R_3$  располагают на одной оси ( $R_1 = R_3$  при любом положении переключателя), а штепсельными магазинами выставляют одинаковые значения  $R_2 = R_4$ . При этих условиях формула для расчета  $R_x$  приобретает вид:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N = \frac{R_3}{R_4} R_N.$$

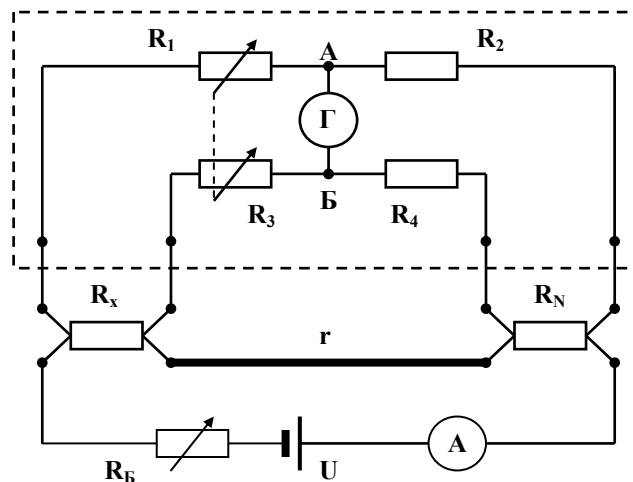


Рис. 2.3. Схема двойного моста Томпсона.

$R_1 - R_4$  – магазины сопротивлений моста;  $R_x$  и  $R_N$  – измеряемое и образцовое сопротивления;  $R_B$  – балластное сопротивление для регулирования тока;  $r$  – сопротивление соединительного провода;  $\Gamma$  – нуль индикатор моста;  $A$  – контрольный амперметр.

Рассматривая двойной мост, мы проводили аналогию между схемами, приведенными на рис. 2.2 и рис. 2.3. Однако если вы внимательно проанализируете эти схемы, то увидите, что полной аналогии здесь нет. Действительно, по потенциальным проводам, которыми  $R_x$  и  $R_N$  подключаются к клеммам двойного моста, течет ток и, следовательно, сопротивления этих проводников необходимо было бы учитывать. Однако в схеме двойного моста

подводящие провода включаются не последовательно с  $R_x$ , как в схеме одинарного, а последовательно с  $R_1$  и  $R_3$ , которые можно выбрать произвольно большими, что и делается. То же самое относится к подключению  $R_N$ . В результате оказывается возможным пренебречь как сопротивлением потенциальных проводов, так и контактными сопротивлениями переключателей.

### Органы управления и клеммы для подключения внешних элементов моста

Мосты, как правило, бывают универсальными, одинарно–двойными. Это означает, что прибор можно включить и по схеме одинарного моста, и по схеме двойного. В связи с этим не все клеммы моста задействованы в том или другом случаях. Общими являются только клеммы “Г” для подключения нуль-индикатора. При работе в режиме одинарного моста источник питания подключается к соответствующим клеммам прибора, сопротивление  $R_x$  – к клеммам “Х<sub>0</sub>” (одинарный). Остальные клеммы остаются свободными. При работе в режиме двойного моста вначале собирается внешняя цепь (см. рис. 2.3), а затем потенциальные выводы с  $R_x$  и  $R_N$  подключаются соответственно к клеммам “Х<sub>д</sub>” (двойной) и “Х<sub>Н</sub>”. Клеммы “Х<sub>0</sub>” и “Б” остаются свободными. Некоторые одинарно–двойные мосты комплектуются встроенными одним или двумя образцовыми сопротивлениями. Отсек с этими сопротивлениями располагается рядом с клеммами “Х<sub>Н</sub>”. Для соединения потенциальных выводов встроенных  $R_N$  с клеммами “Х<sub>Н</sub>” имеются специальные перемычки. Перемычки снимаются, если используется внешнее образцовое сопротивление. При работе в режиме одинарного моста наличие или отсутствие этих перемычек не играет роли.

Магазин сопротивлений плеча сравнения и штепсельные магазины общие для одинарного и двойного моста.

Кнопка “измерение” предназначена для подключения нуль-индикатора к измерительной диагонали моста. Она фиксируется в нажатом положении поворотом на 90°.

**Замечание.** Обозначения сопротивлений в формулах соответствуют обозначениям рисунков и могут не совпадать с обозначениями на приборе. У разных типов мостов могут быть и некоторые другие различия в обозначениях. Поэтому, приступая к работе, ознакомьтесь с описанием прибора.

## Задания

### Одинарный мост Уитстона

1. Одинарным мостом и тестером измерьте значения сопротивлений, имеющих на рабочем столе в виде сборки на плате. Сопоставьте полученные значения со значениями, написанными на сопротивлениях (номинальными значениями).
2. Измерьте сопротивление катушки из медного провода при нулевой (в стакане с водно-ледяной смесью) и комнатной температурах. (Какое из этих измерений следует выполнить первым?) Полагая следующую зависимость сопротивления медного провода от температуры

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + 4,3 \cdot 10^{-3}(T - T_0)),$$

определите комнатную температуру. Сопоставьте полученный результат с показанием ртутного термометра.

### Двойной мост Томпсона

1. Измерьте с максимальной точностью значения сопротивлений образцовых резисторов и двух проволочных образцов, имеющих на рабочем месте.
2. Измерьте сопротивление медного провода, используя устройство с подвижными потенциальными контактами, имеющееся на рабочем месте. Измерения выполните как минимум для пяти различных длин образца, изменяя положение подвижных потенциальных контактов. Постройте график зависимости сопротивления проводника от его длины. Измерьте диаметр проволоки микрометром как минимум в десяти разных точках. Рассчитайте удельное сопротивление меди и сравните свой результат со справочным значением.