

Министерство образования и науки Российской Федерации



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИШНКБ

\_\_\_\_\_ Баранов П.Ф.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 г.

## **ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 9  
по дисциплине “ Физические основы получения информации”

ТОМСК 2024

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 "ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ"

### 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Тепловые измерительные преобразования основаны на использовании тепловых процессов (нагрева, охлаждения, теплообмена) и зависимости основной характеристики этих процессов – температуры от свойств среды. Таким образом, характерным элементом теплового преобразования является измерение температуры, осуществляемое как правило путем преобразования температуры в электрический сигнал.

Преобразование температуры в электрический сигнал осуществляется на основе термоэлектрического и терморезистивного измерительных преобразований, использования полупроводникового  $p-n$  перехода, а также пирозлектрического измерительного преобразования. В настоящей работе рассматриваются термоэлектрическое и терморезистивное измерительные преобразования.

**Термоэлектрическое измерительное преобразование** основано на использовании *термоэлектрического эффекта*, сущность которого заключается в возникновении термо-эдс в цепи, состоящей из двух разнородных проводников или полупроводников (термоэлектродов) при различных температурах их спаев.

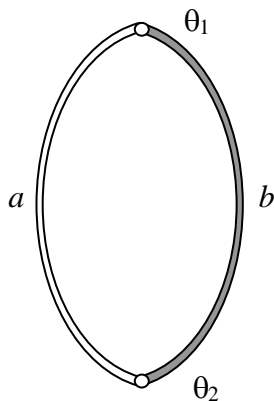


Рис. 1. Термоэлектрическая цепь

Возникновение термо-эдс  $e_{\theta}$  в замкнутой электрической цепи из двух проводников  $a$  и  $b$  (рис. 1) при различных температурах  $\theta_1$  и  $\theta_2$  их соединений (спаев) объясняется суммарным действием двух термоэлектрических эффектов: явления Томсона и явления Зеебека.

Явление, открытое в 1856 году английским физиком У. Томсоном, заключается в установлении на концах проводника, имеющего температурный градиент (рис. 2), некоторой разности потенциалов  $e_T(\Delta\theta)$ . Для случая однородного проводника величина эдс  $e_T(\Delta\theta)$  прямопропорциональна разности температур  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ :

$$e_T(\Delta\theta) = \psi_T \Delta\theta,$$

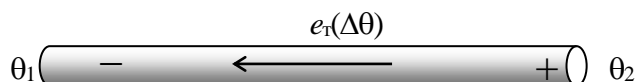


Рис. 2. Возникновение в проводнике эдс Томсона при разной температуре его концов:  $\theta_1 < \theta_2$

где  $\psi_T$  – коэффициент Томсона для данного материала проводника.

Причиной возникновения эдс Томсона является диффузия электронов от более нагретого конца к холодному.

Сущность явления, открытого в 1821 году немецким физиком Т. Зеебеком, заключается в возникновении в месте контакта двух разнородных проводников (рис. 3) эдс  $e_3(\theta)$ , являющейся функцией температуры контакта  $\theta$ . В первом приближении контактная эдс Зеебека прямопропорциональна температуре контакта:

$$e_3(\theta) = \psi_3 \theta,$$

где  $\psi_3$  – коэффициент, зависящий от сочетания контактирующих материалов.

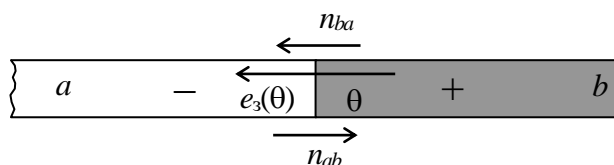


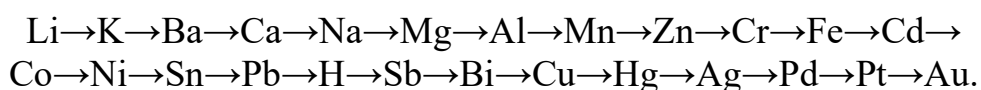
Рис. 3. Возникновение эдс Зеебека в месте контакта двух разнородных проводников:  $n_{ab} < n_{ba}$

В малом диапазоне изменения температуры можно считать, что  $\psi_3$  практически не зависит от температуры. В широком же диапазоне изменения температуры следует учитывать некоторую нелинейность этой зависимости.

Возникновение контактной эдс объясняется различной энергией выхода электронов для различных материалов. В случае если энергия выхода электронов из материала проводника  $a$  больше энергии выхода электронов из материала проводника  $b$ , число электронов  $n_{ab}$ , перешедших из  $a$  в  $b$ , будет меньше числа электронов  $n_{ba}$ , перешедших из  $b$  в  $a$ . В результате проводник  $a$  приобретет отрицательный потенциал относительно проводника  $b$ .

Впервые эффект появления эдс при контакте разнородных металлов был открыт в 1792 году итальянским физиком А. Вольта.

Электрохимический ряд активности металлов — последовательность, в которой металлы расположены в порядке увеличения их стандартных электрохимических потенциалов и уменьшения активности в окислительно-восстановительных реакциях в водных растворах  $\varphi_0$ :



Суммарная термо-эдс в электрической цепи рис. 1 равна сумме всех возникающих в ней эдс:

$$e_{\theta} = e_{tb}(\Delta\theta) - e_{ta}(\Delta\theta) + e_3(\theta_2) - e_3(\theta_1),$$

где  $e_{ta}(\Delta\theta)$  и  $e_{tb}(\Delta\theta)$  – эдс Томсона, возникающие соответственно в проводниках  $a$  и  $b$ ;  $e_3(\theta_1)$  и  $e_3(\theta_2)$  – эдс Зеебека, возникающие соответственно в первом и втором спае. Знаки слагаемых учитывают различные направления эдс.

При малых разностях температур спаев можно принять, что термо-эдс  $e_{\theta}$  прямопропорциональна разности температур:

$$e_{\theta} = k \Delta\theta, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент термо-эдс (удельная термо-эдс), различный для разных сочетаний металлов.

В широком диапазоне разностей температур коэффициент термо-эдс описывается уравнением второго порядка:

$$k = k_0 + k_1 \Delta\theta + k_2 (\Delta\theta)^2,$$

где  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от сочетания контактирующих металлов.

В таблице 1 приведены ориентировочные значения коэффициента термо-эдс для некоторых металлов по отношению к свинцу.

Таблица 1. Значения  $k$  для ряда металлов по отношению к Рв

Материал	$k$ , мкВ/К	Материал	$k$ , мкВ/К
Сурьма	+43	Олово	-0,2
Железо	+15	Алюминий	-0,4
Вольфрам	+3,6	Платина	-4,4
Медь	+3,2	Натрий	-6,5
Цинк	+3,1	Никель	-20,8
Золото	+2,9	Константан	-38
Свинец	0,0	Висмут	-68,0

Термоэлектрическое измерительное преобразование может быть использовано не только для преобразования температуры в электрический сигнал, но и для получения информации о химическом составе контактирующих металлов (в этом случае должна быть известна разность температур спаев).

Включение в электрическую цепь рис. 1 дополнительных проводников при условии равенства температур их концов не вызывает изменения суммарной термо-эдс  $e_{\theta}$ . Это дает возможность включения в электрическую цепь измерителя эдс без внесения искажения получаемой измерительной информации.

**Терморезистивное измерительное преобразование** основано на зависимости электрического сопротивления проводников и полупроводников от температуры.

Сопротивление твердых материалов электрическому току связано с процессом рассеяния электронов проводимости в результате их столкновений с локальными неподвижными центрами – примесями, дефектами, а также тепловыми колебаниями решетки – фононами. Другим фактором, влияющим на сопротивление, является концентрация в материале свободных электронов, определяемая количеством свободных уровней энергии зонной диаграммы. Математическим выражением указанных факторов является обратно пропорциональная зависимость удельного электрического сопротивления от средней длины свободного пробега электронов и их эффективной плотности.

Концентрация электронов проводимости у большинства металлов мало зависит от изменения температуры, но с ростом температуры усиливается рассеяние электронов фононами. Поэтому электрическое сопротивление проводников при нагреве увеличивается.

В узком температурном диапазоне зависимость электрического сопротивления проводников от температуры близка к линейной:

$$R(\theta) = R_0 [1 + \alpha_c (\theta - \theta_0)], \quad (2)$$

где  $R(\theta)$  – удельное электрическое сопротивление проводника при температуре  $\theta$ ;  $R_0$  – удельное электрическое сопротивление проводника при температуре  $\theta_0$ ;  $\alpha_c$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

В широком диапазоне температур зависимость электрического сопротивления от температуры носит нелинейный характер. Поэтому для измерительных преобразований, требующих высокой точности, используется аппроксимация температурной зависимости электрического сопротивления полиномом третьего порядка вида:

$$R(\theta) = R_0 [1 + a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^2 + c(\theta - \theta_0)^3],$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, определяемые химическим составом материала.

В отличие от металлов с ростом температуры в полупроводниковых материалах значительно возрастает концентрация носителей электрического тока. Влияние этого фактора превалирует над уменьшением с ростом температуры длины свободного пробега электронов. Поэтому в полупроводниках с ростом температуры резко возрастает удельная электрическая проводимость. Температура оказывает такое же влияние на электрическую проводимость полупроводников, как и другие энергетические воздействия: механическая деформация, оптическое и ионизирующее излучения.

Зависимость удельного электрического сопротивления полупроводников от температуры имеет ярко выраженный нелинейный характер. На рис. 4 показана типовая зависимость электрического сопротивления полупроводникового резистора (термистора) от температуры  $R(\theta)$ , а для сравнения приведена аналогичная зависимость для металла (платины). Анализ этих зависимостей показывает, что сопротивление термистора значительно чувствительнее к изменению температуры, но характеризуется гораздо

большой нелинейностью зависимости  $R(\theta)$  по сравнению с резистором из платины.

Зависимость сопротивления полупроводника от температуры можно аппроксимировать различными функциями, но наибольшее распространение получило экспоненциальное выражение:

$$R(\theta) = R_0 \left[ \exp \beta \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_0} \right) \right], \quad (3)$$

где  $R_0$  – сопротивление полупроводникового резистора при температуре  $\theta_0$ , К;  
 $R(\theta)$  – сопротивление полупроводникового резистора при температуре  $\theta$ , К;  
 $\beta$  – температурный коэффициент, определяемый материалом полупроводника и имеющий размерность К.

Величину  $\beta$  в узком диапазоне температур считают постоянной и не зависящей от изменения температуры (для приведенного на рис. 8.10 примера  $\beta=4000$  К). В широком диапазоне температур зависимость  $\beta$  от температуры аппроксимируют полиномами второй и третьей степени.

Достоинство полупроводниковых терморезисторов по сравнению с металлическими – высокая чувствительность. Недостатки заключаются в значительной нелинейности функции преобразования  $R(\theta)$ , ее сильной зависимости от химического состава материала, что обуславливает большой разброс характеристик даже для терморезисторов одного типа. В качестве недостатка следует также отметить относительно малый диапазон измеряемых температур (обычно  $-50\dots+150$  °С). Для термопар и металлических терморезисторов этот диапазон составляет  $-200\dots+2500$  °С.

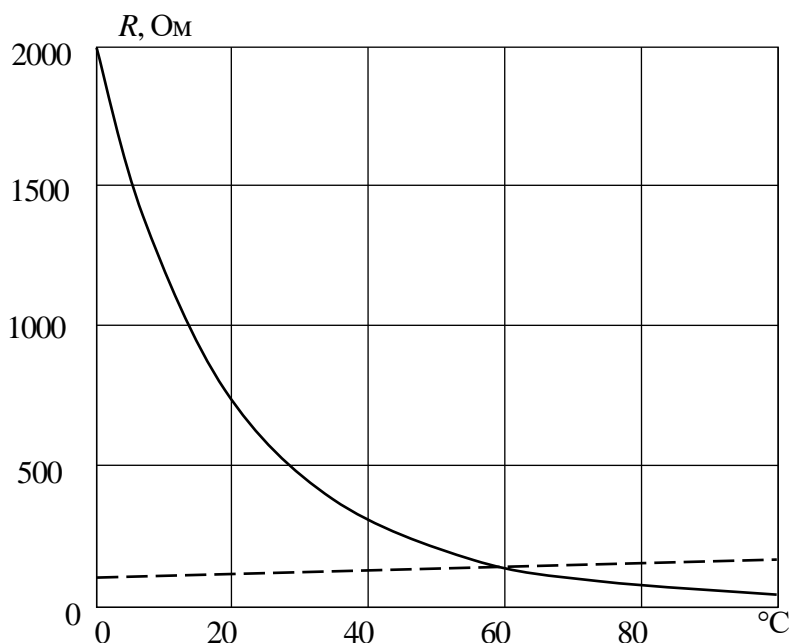


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления резисторов из полупроводника (сплошная линия) и платины (пунктирная линия) от температуры.

**Основные области применения тепловых измерительных преобразователей:** контактное и бесконтактное измерение температуры, являющейся важным параметром при протекании климатических, металлургических, химических и других процессов. Но также тепловые преобразователи широко используются для преобразования таких величин, как тепловой поток, скорость потока жидкости или газа, расход, химический состав, давление газов, влажность и т. п.

Тепловое поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые в свою очередь зависят от внутренней структуры объекта и, в частности, наличия внутренних и наружных дефектов.

## 2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

- 2.1. Какие тепловые процессы используются для тепловых преобразований?
- 2.2. В чем заключается сущность термоэлектрического преобразования температуры в электрический сигнал?
- 2.3. В чем заключается сущность эффекта Томсона?
- 2.4. В чем заключается сущность эффекта Зеебека?
- 2.5. Какова зависимость термо-эдс от температур спаев термоэлектрического преобразователя?
- 2.6. Что представляет собой электрохимический ряд активности металлов?
- 2.7. В чем заключается сущность терморезистивного преобразования температуры в электрический сигнал?
- 2.8. Какова зависимость от температуры электрического сопротивления металлического терморезистора?
- 2.9. Какова зависимость от температуры электрического сопротивления полупроводникового терморезистора?
- 2.10. Для решения каких измерительных задач может быть использовано измерительное преобразование в тепловых полях?

## 3. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с физическими основами измерительного преобразования температуры в электрический сигнал на основе термоэлектрического и терморезистивного измерительных преобразований. Экспериментальное исследование функций преобразования термоэлектрического, терморезистивного металлического и терморезистивного полупроводникового измерительных преобразователей.

## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ.

- 4.1. Экспериментальное определение зависимости термо-эдс термоэлектрического измерительного преобразователя от разности температур его спаев.
- 4.2. Определение коэффициента термо-эдс термоэлектрического измерительного преобразователя. Оценка отклонения от линейности его функции преобразования.

4.3. Экспериментальное определение зависимости электрического сопротивления металлического терморезистора от температуры.

4.4. Определение температурного коэффициента сопротивления металлического терморезистивного измерительного преобразователя. Оценка отклонения от линейности его функции преобразования.

4.5. Экспериментальное определение зависимости электрического сопротивления полупроводникового терморезистора от температуры.

4.6. Определение температурного коэффициента полупроводникового терморезистивного измерительного преобразователя. Оценка погрешности аппроксимации функции преобразования полупроводникового терморезистора экспоненциальной зависимостью.

## 5. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ.

Объектами исследований являются термоэлектрический, терморезистивный металлический и терморезистивный полупроводниковый измерительные преобразователи (рис. 5). Во всех экспериментах производится измерение температуры воды. Изменение температуры осуществляется при охлаждении предварительно нагретой воды, помещенной в специальную кювету. Измерение температуры осуществляется с помощью спиртового термометра с диапазоном измерения (0...100) °С. Для задания температуры 0 °С используется тающий лед, помещенной во вторую кювету.

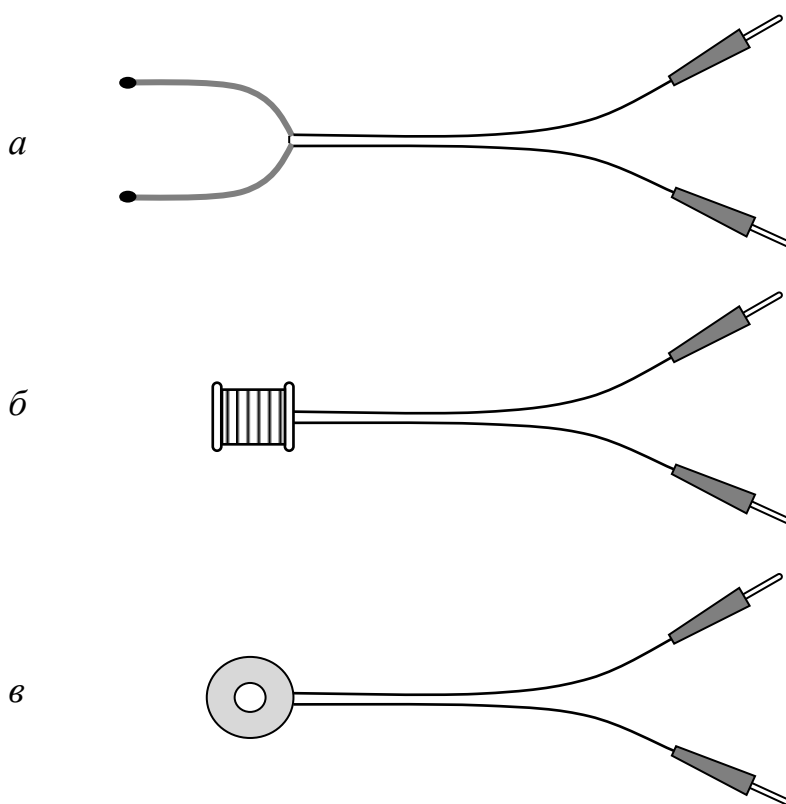


Рис. 5. Термоэлектрический (а) терморезистивный металлический (б) и терморезистивный полупроводниковый (в) измерительные преобразователи

Измерение выходной термо-эдс и сопротивлений терморезисторов осуществляется с помощью мультиметра МУ-65.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.

6.1. Экспериментальное определение зависимости термо-эдс  $e_{\theta}(\Delta\theta)$  термоэлектрического измерительного преобразователя от разности температур его спаев осуществляется с использованием двух кювет с горячей водой и водой, имеющей температуру тающего льда  $0^{\circ}\text{C}$  (рис. 6). Изменение температуры осуществляется при охлаждении предварительно нагретой воды от  $70^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ . В этом случае  $\theta_1 = 0$ ;  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \theta_2$ .

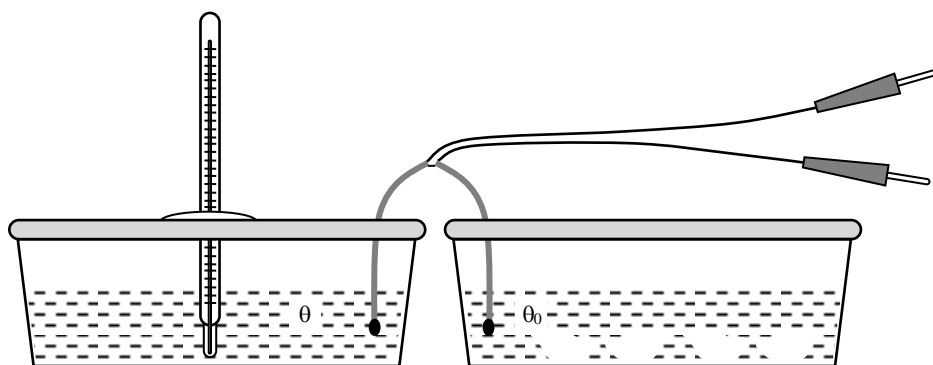


Рис. 6. Схема эксперимента по определению функции преобразования термоэлектрического измерительного преобразователя

По результатам эксперимента строится зависимость  $e_{\theta}(\Delta\theta)$ .

6.2. Определение коэффициента термо-эдс термоэлектрического измерительного преобразователя осуществляется с использованием выражения (1) в предположении, что зависимость  $e_{\theta}(\Delta\theta)$  имеет линейный характер:

$$k = \frac{e_{\theta}(\theta_{2\max}) - e_{\theta}(\theta_{2\min})}{\theta_{2\max} - \theta_{2\min}},$$

где  $e_{\theta}(\theta_{2\max})$  и  $e_{\theta}(\theta_{2\min})$  – результаты измерения термо-эдс при максимальном и минимальном значениях температуры горячей воды.

Оценка отклонения от линейности реальной функции преобразования термоэлектрического измерительного преобразователя осуществляется путем определения относительной погрешности:

$$\gamma(\theta_{2x}) = \frac{k\theta_{2x} - e_{\theta}(\theta_{2x})}{e_{\theta}(\theta_{2x})},$$

где  $\theta_{2x}$  – значение температуры горячей воды;  $e_{\theta}(\theta_{2x})$  – результат измерения значения термо-эдс.

6.3. Экспериментальное определение зависимости электрического сопротивления металлического терморезистора от температуры  $R(\theta)$  осуществляется с использованием кюветы с горячей водой (рис. 7). Изменение

температуры осуществляется при охлаждении предварительно нагретой воды от 70 °С до 30 °С.

По результатам эксперимента строится зависимость  $R(\theta)$ .

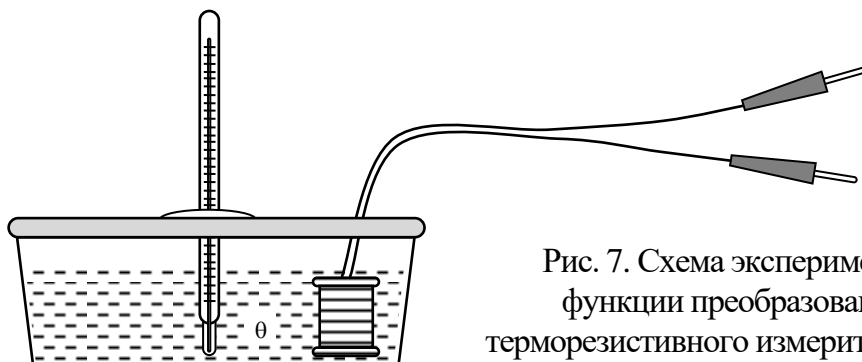


Рис. 7. Схема эксперимента по определению функции преобразования металлического терморезистивного измерительного преобразователя

6.4. Определение температурного коэффициента сопротивления металлического терморезистивного измерительного преобразователя осуществляется с использованием выражения (2) в предположении, что зависимость  $R(\theta)$  имеет линейный характер:

$$\alpha_c = \frac{R(\theta_{\max}) - R(\theta_{\min})}{R(\theta_{\min})(\theta_{\max} - \theta_{\min})},$$

где  $R(\theta_{\max})$  и  $R(\theta_{\min})$  – результаты измерения электрического сопротивления при максимальном и минимальном значениях температуры горячей воды.

Оценка отклонения от линейности реальной функции преобразования металлического терморезистивного измерительного преобразователя осуществляется путем определения относительной погрешности:

$$\gamma(\theta_x) = \frac{R_0 [1 + \alpha_c (\theta_x - \theta_0)] - R(\theta_x)}{R(\theta_x)},$$

где  $\theta_x$  – значение температуры горячей воды;  $R(\theta_x)$  – результат измерения значения электрического сопротивления. В качестве значения  $R_0$  используется  $R(\theta_{\min})$ .

6.5. Экспериментальное определение зависимости электрического сопротивления полупроводникового терморезистора от температуры  $R(\theta)$  осуществляется с использованием кюветы с горячей водой (рис. 8). Изменение

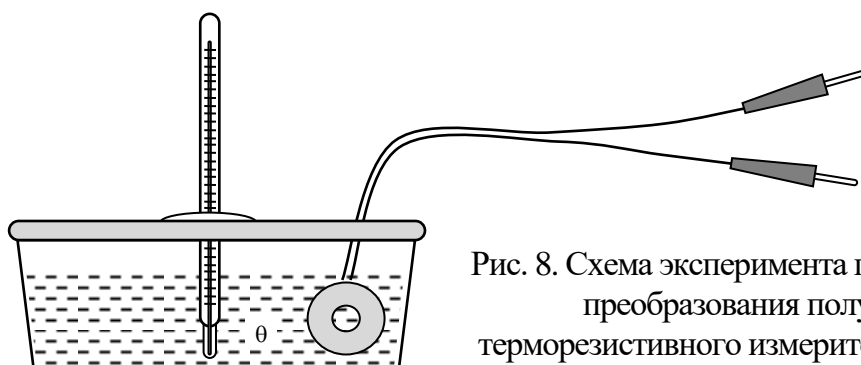


Рис. 8. Схема эксперимента по определению функции преобразования полупроводникового терморезистивного измерительного преобразователя

температуры осуществляется при охлаждении предварительно нагретой воды от 70 °С до 30 °С.

По результатам эксперимента строится зависимость  $R(\theta)$ .

6.6. Определение температурного коэффициента сопротивления полупроводникового терморезистивного измерительного преобразователя осуществляется с использованием выражения (3):

$$\beta = \frac{\ln \frac{R(\theta_{\max})}{R(\theta_{\min})}}{\frac{1}{\theta_{\max} + 273,15^{\circ}} - \frac{1}{\theta_{\min} + 273,15^{\circ}}},$$

где  $R(\theta_{\max})$  и  $R(\theta_{\min})$  – результаты измерения электрического сопротивления при максимальном и минимальном значениях температуры горячей воды.

Оценка погрешности аппроксимации функции преобразования полупроводникового терморезистора экспоненциальной зависимостью осуществляется путем определения относительной погрешности:

$$\gamma(\theta_x) = \frac{R_0 \left[ \exp \beta \left( \frac{1}{\theta_x + 273,15^{\circ}} - \frac{1}{\theta_0 + 273,15^{\circ}} \right) \right] - R(\theta_x)}{R(\theta_x)},$$

где  $\theta_x$  – значение температуры горячей воды °С;  $R(\theta_x)$  – результат измерения значения электрического сопротивления. В качестве значения  $R_0$  используется  $R(\theta_{\min})$ .

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 7.1. Название работы.
- 7.2. Цель работы.
- 7.3. Программа работы.
- 7.4. Схемы экспериментальных установок.
- 7.5. Основные соотношения, примеры расчетов.
- 7.6. Результаты экспериментов и расчетов, оформленные в виде таблиц.
- 7.7. Графики зависимостей.
- 7.8. Выводы.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- 8.1. Гольдштейн А.Е. Физические основы получения информации: учебник Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.
- 8.2. Гольдштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразований: учебн. пособие Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.

Составитель: профессор, д.т.н. А.Е. Гольдштейн.