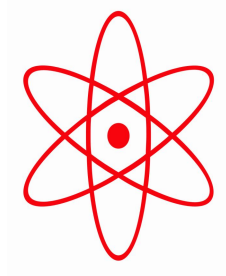


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФЭЛ-6

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОРЕЗИСТОРА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТЕРМОРЕЗИСТОРА.**

Тула, 2008 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОРЕЗИСТОРА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРА.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками терморезистора, провести экспериментальное исследование зависимости сопротивления образцов терморезисторов от температуры, определить температурные коэффициенты сопротивления терморезисторов.

Краткое описание сущности терморезистивного эффекта.

Терморезистор – это устройство, сопротивление которого сильно изменяется с изменением температуры. Это резистивный прибор, обладающий высоким ТКС (температурным коэффициентом сопротивления) в широком диапазоне температур. Различают терморезисторы с отрицательным ТКС, сопротивление которых падает с возрастанием температуры, часто называемые термисторами, и терморезисторы с положительным ТКС, сопротивление которых увеличивается с возрастанием температуры. Такие терморезисторы называются позисторами. Терморезисторы обоих типов изготавливают из полупроводниковых материалов с различными примесями.

В 1833 году Фарадей обнаружил отрицательный ТКС у сульфида серебра, но отсутствие сведений о явлении в контактах металл-полупроводник препятствовало изготовлению приборов с воспроизводимыми характеристиками. В 30-х годах уже двадцатого века у некоторых оксидов, как Fe_3O_4 и UO_2 , обнаружили высокий отрицательный температурный коэффициент сопротивления. В конце 30-х – начале 40-х этот ряд пополнился NiO , CoO , системой $\text{NiO-Co}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$. Интервал удельных сопротивлений расширился благодаря добавлению оксида меди Mn_3O_4 и в систему $\text{NiO-Mn}_2\text{O}_3$.

Терморезисторы с отрицательным ТКС изготавливаются из оксидов металлов с незаполненными электронными уровнями, и при достаточно низких температурах обмен электронами соседних ионов затрудняется, при этом электропроводность вещества мала. Если температура увеличивается, то электроны приобретают энергию в виде тепла, процесс обмена ионов электронами становится интенсивнее, поэтому резко увеличивается подвижность носителей заряда.

Приведем несколько слов о физических особенностях терморезисторов (вернее полупроводниковых материалов, на основе которых изготовлены терморезисторы), имеющих положительный температурный коэффициент

сопротивления в некотором интервале температур. Такие терморезисторы часто называют позисторами.

Терморезисторы с положительным ТКС условно можно разделить на 2 группы:

1. Терморезисторы из полупроводникового материала (обычно Si) в форме небольших пластин с двумя выводами на противоположных сторонах. Их применение основано на том, что легированные кристаллы Si (кремния) как n-, так и p- типа имеют положительный ТКС при температуре от криогенных до 150°С и выше, причем ТКС при комнатной температуре примерно равен 0,8% на 1°С.
2. Терморезисторы с большим ТКС (до 70% на 1°С), но в более ограниченном диапазоне температур. Материалом в данном случае является поликристаллический полупроводниковый титанат бария с большим изменением ТКС при температуре 120°С, соответствующей сегнетоэлектрической точке Кюри этого материала. Добавляя другие материалы, например титанат свинца или стронций, такое изменение ТКС можно получить при температурах от -100 до +250°С. Можно также изменить наклон кривой сопротивления так, что большое изменение температур будет происходить в более узком интервале температур, например 0-100°С.

При низких температурах титанат бария представляет собой диэлектрик с преобладающей спонтанной поляризацией, потенциальный барьер между кристаллами мал. Очень важна температура, соответствующая точке Кюри для TiBa. При нагреве до этой температуры спонтанная поляризация исчезает, возрастает высота барьера и, следовательно, сопротивление сильно увеличивается.

Устройство терморезисторов. Оценки параметров терморезисторов.

Температурная зависимость сопротивления является главной характеристикой терморезисторов, в значительной степени определяющей остальные характеристики этих изделий. Естественно, она аналогична температурной зависимости удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен данный терморезистор.

Измерения показывают, что температурная зависимость сопротивления большинства типов отечественных терморезисторов с отрицательным ТКС с достаточной для практики точностью во всем рабочем интервале температур или в его части аппроксимируется выражением:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (1.1)$$

где R_T – величина сопротивления терморезистора при температуре T (в градусах Кельвина), постоянная $A = A_{y0} \cdot \frac{l}{S}$ зависит от физических свойств материала и габаритов терморезистора (l – расстояние между электродами [см] и S – площадь поперечного сечения полупроводникового элемента

терморезистора [см^2]) и соответствует "холодному" сопротивлению терморезистора (при $20\text{ }^\circ\text{C}$); постоянная B зависит от физических свойств материала и может иметь одно или два значения в интервале рабочих температур.

Постоянная B является одной из важнейших характеристик терморезистора, т.к. она определяет его температурный коэффициент сопротивления (ТКС) α_T при температуре T α_T :

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = - \frac{B}{T^2} \quad (1.2)$$

ТКС может быть как положительным так и отрицательным. Константу B можно определить экспериментально, измерив сопротивление терморезистора при различных температурах. Из уравнения (1.1) можно получить:

$$\lg R_T = \lg A + \lg e \cdot \frac{B}{T} = \lg A + 0,4343 \cdot \frac{B}{T}, \quad (1.3)$$

Это выражение в координатах $\lg R$ и $\frac{1}{T}$ представляет уравнение прямой, что значительно облегчает определение интервала температур, в котором формула с необходимой точностью аппроксимирует действительную зависимость $R_T(T)$. По результатам измерений R_T и T строят график зависимости $\lg R_T = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Если через полученные экспериментально точки можно провести прямую, то считают, что в данном интервале температур выражение для R_T справедливо.

Для практических расчетов удобно исключить постоянную A . Написав формулу (1.1) для R_T для двух температур T_2 и T_1 и разделив одно на другое, получим:

$$R_{T_2} = R_{T_1} \cdot e^{\frac{B \cdot (T_1 - T_2)}{T_1 \cdot T_2}} \quad (1.4)$$

Из этой формулы можно рассчитать величину сопротивления терморезистора при любой температуре T_2 (в интервале рабочих температур), зная значение постоянной B и сопротивление образца при какой-то температуре T_1 .

Величина B определяется экспериментально методом наименьших квадратов (см. приложение) либо измерением сопротивления терморезистора при двух температурах T_1 и T_2 . Логарифмируя предыдущее выражение, легко получить:

$$B = \frac{2,303 \cdot \Delta \lg R}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}, \quad (1.5)$$

$$\text{где } \Delta \lg R = \lg R_{T_2} - \lg R_{T_1}, \text{ а } \Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}.$$

Размерность B – градусы Цельсия или Кельвина. Фактически здесь мы вычисляем B через тангенс угла наклона прямой к оси обратных температур $1/T$.

Зная величину B легко определить ТКС терморезистора α как это обычно принято по формуле (1.2).

Для позисторов температурные зависимости сопротивления, снятые в широких интервалах температур, имеют сложный характер. При достаточно низких и высоких температурах сопротивление уменьшается при увеличении температуры по закону, близкому к экспоненциальному. В промежуточной области сопротивление R резко возрастает при повышении температуры. Крутизной графика, а, следовательно, и величиной ТКС, можно управлять в широких пределах различными технологическими приемами.

Для многих типов позисторов сопротивление в довольно большом интервале температур (порядка нескольких десятков градусов Цельсия/Кельвина) меняется строго по экспоненциальному закону:

$$R_T = A \cdot e^{\alpha \cdot T}, \quad (1.6)$$

где A – постоянная, $\alpha \approx \text{const}$ – температурный коэффициент сопротивления в абсолютных единицах. Для этого типа терморезисторов величина температурной чувствительности B не вводится. При такой записи формулы все вышеприведенные выкладки для терморезисторов с отрицательным ТКС можно применить и в этом случае.

Логарифмируя выражение (1.6), получим:

$$\lg R_T = \lg(A) + \alpha \cdot T \cdot \lg e = \lg(A) + \alpha \cdot T \cdot 0,4343 \quad (1.7)$$

Из выражения (1.7) экспериментально определяют ТКС α методом наименьших квадратов или по аналогии со способом, описанным выше для термисторов (вычисляя тангенс угла наклона прямой к оси температур).

Терморезисторы изготавливаются из материала, изменяющего свое сопротивление с изменением температуры в соответствии с перечисленными выше основными зависимостями $R = f(T)$. В терморезисторах с отрицательным ТКС полупроводниковый материал – спеченная керамика, которой придают различные форму и размеры. Ее изготавливают из смеси оксидов металлов, таких, как Mn, Ni, Co, Cu, Fe. Изменяя состав материала и размеры терморезистора, можно получить сопротивления от 1 до 10^6 Ом при комнатной температуре и ТКС от -2 до 6,5% на 1°C .

Терморезисторы, как уже было сказано, изготавливаются разных размеров: от бусинок диаметром 0,2 мм, дисков и шайб диаметром 3-25 мм до стержней диаметром 12 и длиной до 40 мм. Бусиновые терморезисторы можно заливать стеклом, помещать в стеклянные или пластмассовые оболочки или в транзисторные корпуса. Дисковые защищают чаще изоляционными пленками из лака или эпоксидных смол.

Важная технологическая операция в производстве терморезисторов – создание омических контактов к термочувствительным элементам. Для этого на торцевых поверхностях термочувствительных элементов, выполненных в виде стержней, дисков или шайб создают серебряные контакты с помощью специальных паст. Для повышения стабильности параметров эти элементы подвергают термообработке при $200-300^\circ\text{C}$. Окончательная стабилизация

происходит путем прогрева элементов в течение сотен часов при максимальной рабочей температуре.

Когда терморезистивный элемент получен, его защищают специальными лаками, а в ряде случаев помещают в стеклянный или металлический корпус. При измерении сопротивления надо поддерживать температуру терморезистора с высокой точностью ($0,05-0,1^{\circ}\text{C}$), так как сопротивление является функцией температуры.

Материал для создания терморезисторов должен удовлетворять следующим требованиям: чисто электронная проводимость материала и возможность регулирования ее, стабильность характеристик материала в диапазоне рабочих температур, простота технологии изготовления изделий. Материалы должны быть нечувствительными к загрязнениям в процессе технологического изготовления изделий.

Наибольший интерес вызывают полупроводниковые материалы, обладающие большим ТКС, кроме комплекса необходимых свойств. Большое распространение получили CuO , Mn_3O_4 , Co_3O_4 , NiO и их смеси. На основе смесей оксидов меди и марганца получены полупроводниковые материалы с электропроводностью от 10^{-8} до 10^{-1} $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$. Электропроводность кобальто-марганцевых окисных полупроводников лежит в пределах от 10^{-9} до 10^{-3} $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$. Получение необходимой электропроводности и ТКС достигается выбором процентного соотношения оксидов металлов в композиции при использовании метода совместного охлаждения щелочью азотнокислых соединений марганца, кобальта, меди и последующего прокаливания гидратов окислов.

Также используют окислы титана, ванадия, железа. При изменении соотношения компонентов соответствующих материалов можно получить заданные значения удельного сопротивления и ТКС. Использованием указанных компонентов и несколько видоизмененных способов смешения и термического обжига удалось создать терморезисторы с косвенным подогревом (ТКП).

Интерес для производства терморезисторов вызывают тройные марганцевые системы окислов, так как электропроводность таких материалов слабо зависит от примесей, следовательно, можно получать на их основе терморезисторы с малым разбросом по сопротивлению и ТКС, а значит массовый выпуск терморезисторов с заданными электрическими параметрами.

Современные терморезисторы с отрицательным ТКС обычно изготавливают из следующих оксидных систем: никель-марганец-медь, никель-марганец-кобальт-медь, кобальт-марганец-медь, железо-титан, никель-литий, кобальт-литий, медь-марганец. Кроме того, практикуется добавление таких элементов, как железо, алюминий, цинк, магний, которые позволяют модифицировать свойства перечисленных систем.

Тенденции развития современных материалов с отрицательным ТКС выявили три основных направления в производстве терморезисторов. Главное – получение более стабильных терморезисторов. В результате

появились взаимозаменяемые высокостабильные приборы с отрицательным ТКС. Это было достигнуто за счет использования более чистых исходных материалов, подбора соответствующих композиций и тщательного контроля на всех стадиях изготовления терморезистора.

Второе направление – расширение верхней границы рабочих температур. Было создано несколько типов терморезисторов, у которых эта граница приблизительно равна 1000°C . Это было достигнуто за счет применения высокотемпературных материалов.

Третье направление – создание переключающих терморезисторов с отрицательным ТКС. Они имеют очень большое изменение сопротивления в узком интервале температур и называются терморезисторы с критической температурой и терморезисторы на основе металлоксидных соединений, в которых используется резкое изменение проводимости от полупроводниковой к металлической, например VO_2 с температурой перехода 68°C .

Довольно перспективное направление представляют собой терморезисторы с положительным ТКС. Терморезистивные элементы с положительным ТКС выпускают на основе титанато-бариевой керамики, сопротивление этих элементов значительно снижено добавлением редкоземельных элементов. Титанат бария BaTiO_3 – диэлектрик, поэтому его удельное сопротивление при комнатной температуре велико (10^{10} - 10^{12}) Ом·см. При введении туда примесей, таких, как лантан или церий, в ничтожно малых количествах (0,1-0,3 атомного процента) его удельное сопротивление уменьшается до 10-100 Ом·см. Если ввести эти примеси в титанат бария, его сопротивление в узком интервале температур увеличится на несколько порядков.

Типичная зависимость $R(T)$ для терморезисторов, снимающаяся в установившемся режиме приведена на рис. 1.

Масштаб по оси R взят возрастающий по закону 10^x , по оси T пропущен участок в интервале (0-223) К.

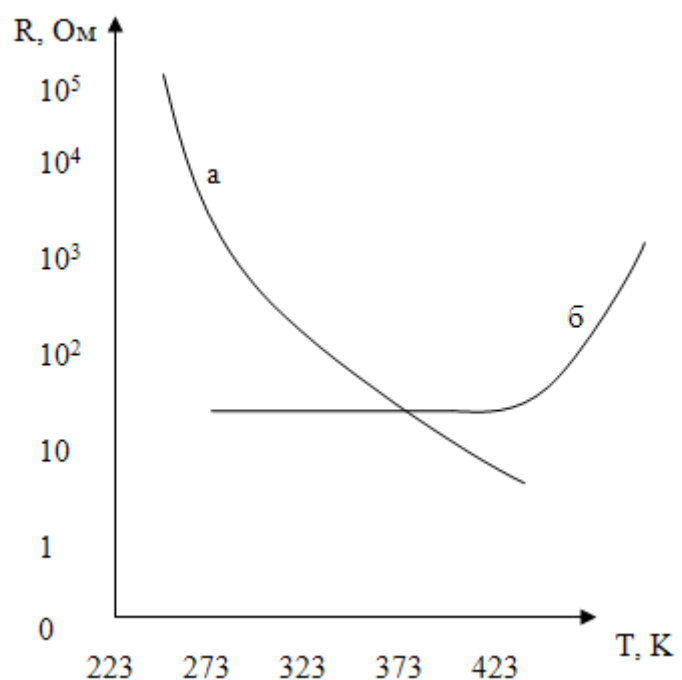


Рис. 1. Типичная зависимость $R(T)$ (а) – терморезистор с отрицательным ТКС, (б) – с положительным.

Применение терморезисторов в технике.

На основе терморезисторов действуют системы дистанционного и централизованного измерения и регулирования температуры, системы теплового контроля машин и механизмов, схемы температурной компенсации, схемы измерения мощности ВЧ. Терморезисторы находят применение в промышленной электронике и бытовой аппаратуре: рефрижераторах, автомобилях, электронагревательных приборах, телевизорах, системах центрального отопления и пр. В телевизорах часто используются терморезисторы с положительным ТКС для размагничивания кинескопа.

Самые первые устройства, где применялись терморезисторы – это датчики для измерения или регулирования температуры

Терморезисторы широко используются в различных устройствах не только в качестве датчиков температуры. После соответствующей модификации их можно применять в электронных устройствах задержки с достаточно широким интервалом времен задержки, в качестве конденсаторов или катушек индуктивности в низкочастотных генераторах, для защиты от выбросов напряжения в емкостных, индуктивных или резистивных схемах, в качестве ограничителей тока, напряжения, для измерения давления газа или теплопроводности.

Итак, терморезисторы находят применение во многих областях. Практически ни одна сложная печатная плата не обходится без терморезисторов. Они используются в температурных датчиках, термометрах, практически в любой, связанной с температурными режимами, электронике. В противопожарной технике существуют стандартные температурные датчики. Подобный датчик содержит два терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом, которые установлены на печатной плате в белом поликарбонатном корпусе. Один выведен наружу — открытый терморезистор, он быстро реагирует на изменение температуры воздуха. Другой терморезистор находится в корпусе и реагирует на изменение температуры медленнее. При стабильных условиях оба терморезистора находятся в термическом равновесии с температурой воздуха и имеют некоторое сопротивление. Если температура воздуха быстро повышается, то сопротивление открытого терморезистора становится меньше, чем сопротивление закрытого терморезистора. Отношение сопротивлений терморезисторов контролирует электронная схема, и если это отношение превышает пороговый уровень, установленный на заводе, она выдает сигнал тревоги. В дальнейшем такой принцип действия будет называться “реакцией на скорость повышения температуры”. Если температура воздуха повышается медленно, то различие сопротивлений терморезисторов незначительно. Однако, эта разница становится выше, если соединить последовательно с закрытым терморезистором резистор с высокой температурной стабильностью. Когда отношение суммы сопротивлений закрытого терморезистора и стабильного резистора и сопротивления открытого терморезистора превышает порог, возникает режим тревоги.

Датчик формирует режим «Тревога» при достижении внешней температуры 60°C вне зависимости от скорости нарастания температуры.

Конечно же, применение терморезисторов в качестве датчиков температуры имеет не только плюсы, но и свои минусы. Так, например, это инерционность, обусловленная постоянной времени τ , плохая стабильность в определенных условиях и т.д.

В примерах терморезисторов были указаны цели использования некоторых терморезисторов, среди них и температурная компенсация электрических цепей в широком диапазоне температур – еще одна область применения терморезисторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы и оборудование.

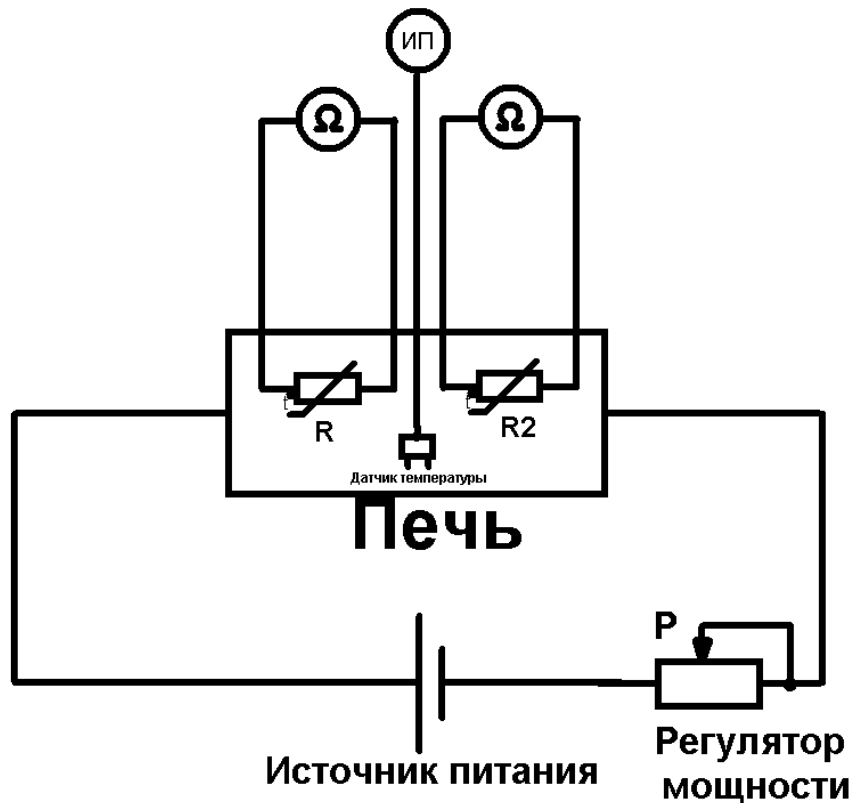


Рис. 2. Упрощенная принципиальная блок-схема установки ФЭЛ-6

Изучение характеристик терморезисторов производится на установке ФЭЛ-6, принципиальная блок-схема которой приведена на рис.2 (упрощенно). Конструктивно установка состоит из узкой и длинной электропечи (для равномерного нагрева) с регулируемой мощностью нагрева, в которую помещаются два (R и R2 на схеме, $R=R1$) исследуемых образца терморезисторов с положительным и отрицательным ТКС. Температура t в электропечи измеряется высокоточным цифровым термодатчиком, также введенным в полость электропечи. Сигнал с термодатчика подается через встроенное АЦП на измерительный прибор ИП и индицируется в **градусах Цельсия**. Точность измерения температуры термодатчика составляет ± 1 °С. Все измеренные и контролируемые параметры (мощность нагрева P , температура t а также сопротивления образцов R1 и R2 выводятся на LCD ЖКД дисплей). Для переключения омметра в режим измерения первого R1 либо второго R2 сопротивления служит кнопка «ОБРАЗЕЦ».

Скорость нагрева регулируется с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ». Удержание кнопок приводит к плавному возрастанию мощности печи. Для охлаждения предусмотрена возможность включения кулера нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Отключение кулера осуществляется нажатием той же кнопки. При перегревании электропечи

свыше $69\text{ }^{\circ}\text{C}$ срабатывает автоматическое включение охлаждения, а электропечь отключается.

Порядок выполнения.

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки рис. 2, разобраться в назначении ручек, кнопок и измерительного прибора. Проверить целостность сетевого провода
2. Включить установку в сеть $\sim 220\text{ В}$. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор.
3. Дать установке прогреться в течение трех минут.
4. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерения зависимости сопротивления терморезисторов от температуры. Во время нагрева в таблицу следует записывать показания омметров R_1 и R_2 (попеременно переключая их кнопкой «ОБРАЗЕЦ») и температуру электропечи в $^{\circ}\text{C}$ через каждые $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, остальные расчеты проводить после включения охлаждения.

Таблица 1

$t, ^{\circ}\text{C}$	$R, \text{кОм}$	$R_2, \text{кОм}$
30
32
34
...
	$B = \dots [\text{K}]$	$\alpha = \dots [1/\text{T}]$

5. Установить мощность нагрева печи равную 45-55 % от максимальной с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ», приступить к снятию зависимости R и R_2 сопротивлений терморезисторов от температуры t , записывая через 2 градуса значение показаний омметров и температуры. Измерение рекомендуется начинать при достижении в электропечи температуры $t \approx 28-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда печь достаточно равномерно прогреется и производить до температуры $t \approx 68\text{ }^{\circ}\text{C}$
6. При достижении температуры 45-50 $^{\circ}\text{C}$ мощность нагрева рекомендуется повысить до 70-90 %.
7. Нагрев производить до температуры $68\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего включить систему охлаждения нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Охлаждать нагреватель следует в течение получаса до достижения практически комнатной температуры $\approx 25-30\text{ }^{\circ}\text{C}$
8. Построить графики зависимостей сопротивлений терморезисторов $R_1(T)$ и $R_2(T)$ от температуры. При построении для последующих расчетов необходимо перевести все измеренные значения в СИ (температуру выразить в Кельвинах $T[\text{K}] = t[^{\circ}\text{C}] + 273$; сопротивления образцов выразить в Омах).

9. Построить график зависимости $\lg R_T = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (для терморезистора, сопротивление которого падает с ростом температуры) и график $\lg R_T = f(T)$ (для терморезистора, сопротивление которого растет с ростом температуры).
10. Для терморезистора R1, сопротивление которого падает с ростом температуры, методом наименьших квадратов (см. приложение) либо по формуле (1.5) определить коэффициент температурной чувствительности B и построить график зависимости его температурного коэффициента сопротивления (ТКС) α_T от температуры (см. формулу 1.2) в измеренном вами интервале температур 30—70 °С. При расчетах следует учитывать, что коэффициент k наклона прямой:

$$y = kx + C, \quad (2.1)$$

определяемый при помощи метода наименьших квадратов связан с температурной чувствительности B формулой, легко получаемой сравнением вида выражения (1.3) с уравнением прямой (2.1):

$$B = \frac{k}{0,4343} [K] \quad (2.2)$$

при этом $x = \frac{1}{T}$, $C = \lg A$.

11. Для терморезистора R2, сопротивление которого растет с ростом температуры аналогичным образом рассчитать с помощью метода наименьших квадратов температурный коэффициент сопротивления α_T (см. формулу 1.7). Сравнивая (1.7) с уравнение прямой (2.1) легко находим, что интересующий нас коэффициент α_T выражается аналогично (2.2):

$$\alpha_T = \frac{k}{0,4343} [1/K] \quad (2.3)$$

12. Все измеренные и вычисленные значения занести в таблицу 1.
13. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» в положение «выкл», при этом должен погаснуть сигнальный индикатор и вынуть вилку из розетки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Назовите причины температурной зависимости сопротивления терморезисторов.
2. Объясните работу термосопротивления с точки зрения зонной модели.
3. Назовите и охарактеризуйте основные параметры терморезисторов.
4. Как изготавливаются терморезисторы? Где они используются?
5. Объясните работу учебной установки согласно блок-схеме рис. 2.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Совместные измерения. Понятие о методе наименьших квадратов (МНК)
 Рассмотрим случай совместных измерений двух величин β и α . Если уравнения измерения, связывающие эти величины, линейны, то для определения β и α в результате многократных измерений некоторых других величин x_i и y_i получится линейная система условных уравнений, каждое из которых имеет вид

$$y_i = \beta x_i + \alpha \quad (1)$$

где x_i, y_i - результаты i -го измерения величин x и y ; β и α - искомые величины.

Система уравнений (1) будет, вообще говоря, несовместна, так как результаты измерений x и y неизбежно содержат погрешности. Поэтому из этих уравнений можно определить только оценки величин β и α (соответственно B и A), которые являются случайными величинами.

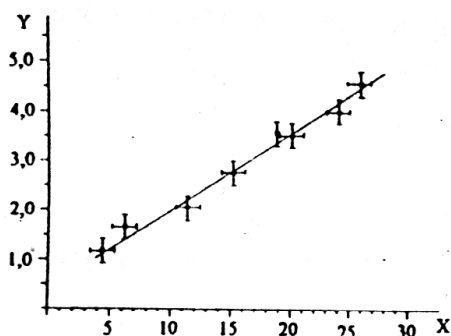


рис. 1

Для наглядности изложения представим все опытные данные x_i и y_i на графике (см. рис. 1). Геометрически задача измерения α и β состоит в определении параметров некоторой прямой: значения ординаты при нулевом значении абсциссы и тангенса угла наклона соответственно.

Так как между точками на графике можно провести не одну прямую, возникает задача — провести прямую наилучшим образом. Такая прямая характеризуется наиболее точными оцен-

ками коэффициентов β и α , т.е. наиболее вероятным.

Оценка β (значение B) определяется выражением

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Оценка α (значение A) определяется выражением

$$A = \bar{y} - B\bar{x}$$

Можно показать, что оценка стандартного отклонения коэффициента B выражается следующим образом:

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Интервал, в котором с установленной вероятностью α_0 может находиться коэффициент β , записывается в виде $\Delta B = t_{\alpha_0, (n-2)} \cdot S_B$

Тогда можно записать:

$$\beta = B \pm \Delta B$$

Стандартное отклонение коэффициента A определяется по формуле

$$S_A = \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{n-2}}$$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Мэклин Э. Д. Терморезисторы. М. 1983. 208 с.
2. Шашков А. Г. Терморезисторы и их применение. М. 1967. 320 с.
3. Зайцев Ю. В. Полупроводниковые резисторы. М. 1969. 48 с.
4. Шефтель И. Т. Терморезисторы. М. 1973. 416 с.
5. Зайцев Ю. В. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи. М. 1985. 120 с.
6. Гендин Г. С. Все о резисторах. Справочное издание. М. 2000. 192 с.
7. Дубровский В. В. Резисторы: справочник. М. 1991. 528 с.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ,
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»,
Россия, г. Тула**