

**А. В. Бахтин
М. О. Слюта**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**А. В. Бахтин
М. О. Слюта**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ

Учебное пособие

2-е издание, дополненное и переработанное

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2024

УДК 681.3(075)
ББК 32.965я7
Б 307

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры АПХП Санкт-Петербургского государственного
технологического института (Технического университета)

И. В. Рудакова;

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой АТПиП Высшей школы
технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна

Д. А. Ковалев

Бахтин, А. В.

Б 307 Технологические измерения и приборы. Методы и средства измерения
температуры: учебное пособие. — 2-е изд., доп. и перераб. / А. В. Бахтин,
М. О. Слюта. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 70 с.
ISBN 978-5-91646-391-0

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам следующих дисциплин:
«Информационно-измерительная техника», «Контрольно-измерительная техника в
электротехнических комплексах», «Технологические измерения и приборы», «Измерительно-
информационные средства для систем управления», «Информационно-измерительная
техника и технологии в АСУ» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки:
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.04
«Управление в технических системах».

В учебном пособии раскрываются понятия и определения термометрии,
температурных шкал и эталонов. Приведены основные методы и технические средства,
используемые для измерения температуры, области их применения и вопросы передачи
сигналов термоизмерительных приборов.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения, а
также может быть использовано при самостоятельном изучении курса и подготовке к
занятиям студентами всех форм обучения и направлений.

УДК 681.3(075)
ББК 32.965я7

ISBN 978-5-91646-391-0

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024
© Бахтин А. В., Слюта М. О., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	4
1.1. Общие сведения	4
1.2. Температурные шкалы и единицы измерения.....	5
1.3. Международная температурная шкала.....	10
2. КОНТАКТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ.....	18
2.1. Механические термометры (термометры расширения твердых тел).....	18
2.2. Жидкостные термометры.....	21
2.3. Манометрические газовые и конденсационные термометры. Газовые термометры.....	25
2.4. Электрические контактные термометры.....	26
2.4.1. Термометры сопротивления.....	26
2.4.2. Средства измерений, работающие в комплекте с термопреобразователями сопротивления.....	34
2.4.3. Термоэлектрические термометры (термопары)	44
2.4.4. Средства измерений сигналов термоэлектрических термометров	52
3. БЕСКОНТАКТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ (ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ)	65
3.1. Пирометры полного излучения (радиационные).....	67
3.2. Пирометры частичного излучения (оптические).....	67
3.3. Пирометр с исчезающей нитью (переносной)	68
3.4. Цветовые пирометры.....	69
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	70

1. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

1.1. Общие сведения

Температура – параметр теплового состояния, характеризующийся средней кинетической энергией поступательного движения молекул.

В вакууме температура определяется мощностью потоков лучистой энергии, пронизывающих тело.

Температурная шкала – ряд отметок внутри температурного интервала, ограниченного двумя легко воспроизводимыми температурами кипения и плавления химически чистых веществ.

Первые термометры появились в XVI веке (Галилей) и были водяными.

Для того чтобы сделать краткий обзор способов измерения температуры, следует разграничить научные и производственные методы и практические приемы. Для измерения могут быть использованы любые свойства твердых, жидких и газообразных веществ, изменяющиеся в зависимости от температуры: физическое или химическое состояния, линейные размеры, электрические свойства, скорость звука в газах (акустическая термометрия), собственная частота колебаний кварцевых резонаторов и т. д.

Однако многие из этих параметров можно измерять только с применением сложной и дорогостоящей аппаратуры или при жесткой стабилизации параметров окружающей среды. Поэтому далее рассмотрены только те методы измерения температуры, которые уже нашли применение в промышленности.

Современная электронная аппаратура для переработки измерительных сигналов дала новый толчок быстрому развитию электрических контактных термометров. Одновременно она позволила измерять с помощью радиационных пирометров даже очень малую энергию излучения тел с низкой температурой. Разработана новая технология, позволившая изготавливать чувствительные элементы контактных электрических термометров с чрезвычайно малыми размерами (оболочечные элементы). Это положительно повлияло на уменьшение помех – искажений температурного поля вокруг самого датчика – и на динамику процесса измерения.

На рис. 1 ориентировочно указаны современные области применения термометров наиболее распространенных типов. Границы этих областей у различных фирм-изготовителей неодинаковы. В ближайшее время предельные температуры применения термометров, особенно электрических, могут еще сместиться в сторону более высоких и, главным образом, в сторону более низких температур.

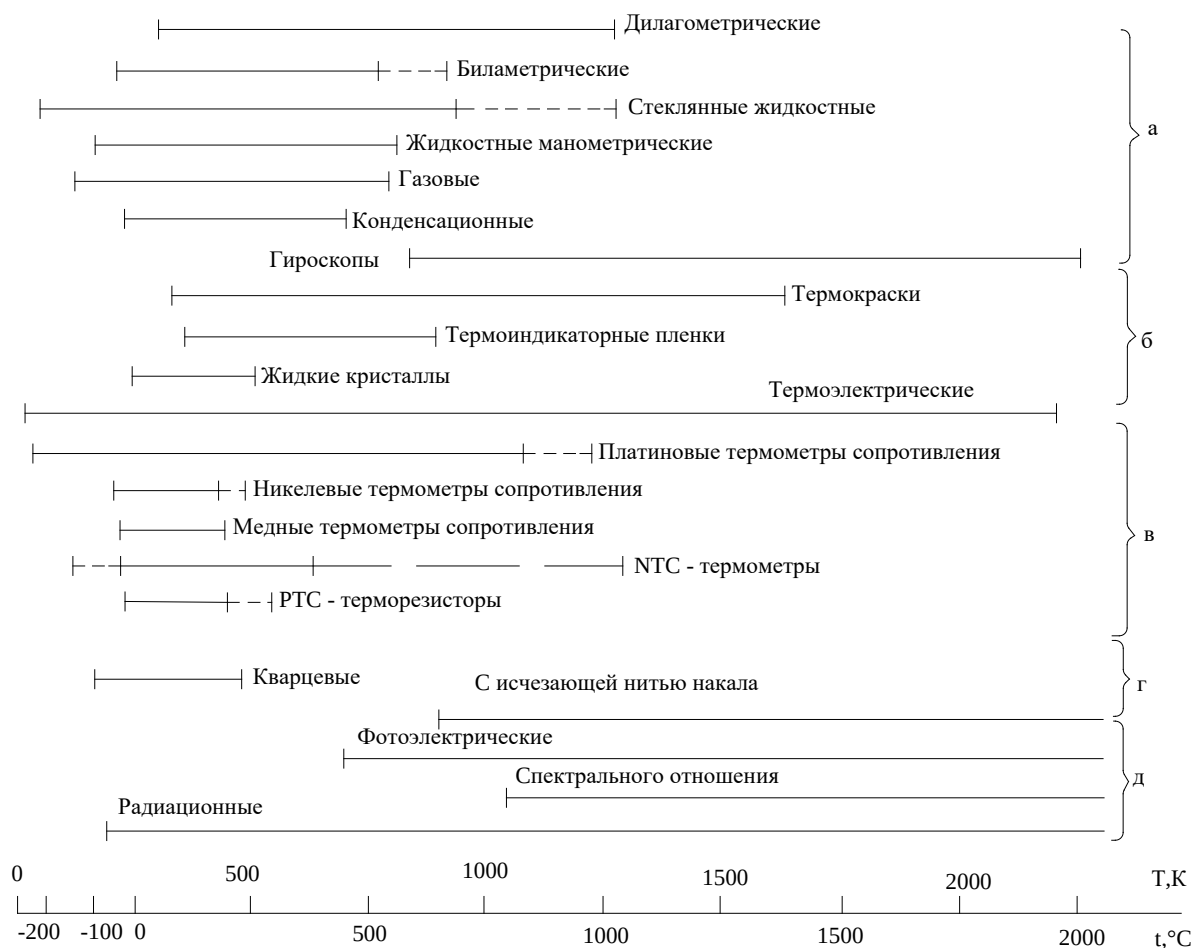


Рисунок 1 – Области применения термометров наиболее распространенных типов:

a – механические контактные; *б* – механические особых типов (СК-конусы Зегера); *в* – электрические контактные; *г* – электрические особые NTS, PTC – терморезисторы, соответственно, с отрицательным и положительным температурными коэффициентами; *д* – пирометры

Штриховыми линиями на рис. 1 показаны области температур, в которых термометры могут быть использованы только кратковременно. При длительном воздействии таких температур ухудшается точность измерения или изменяются механические свойства чувствительного элемента.

1.2. Температурные шкалы и единицы измерения

Температурные измерения должны проводиться по соответствующей шкале. Одной из таких шкал является термодинамическая температурная шкала. Однако эту шкалу очень трудно воспроизвести. Поэтому для практического использования была введена эмпирическая международная практическая температурная шкала (IPT, МПТШ), которая основывается на шести первичных (основных) и многочисленных вторичных реперных точках, характеризующих

естественные температуры фазовых превращений (главным образом это точки затвердевания и кипения), и на интерполяционных уравнениях, используемых между этими точками.

Реперные точки могут быть воспроизведены в любое время с высокой точностью. Для измерений между основными реперными точками используют интерполяционные эталонные приборы: платиновый термометр сопротивления, термоэлектрические термометры (термопары) с электродами из платинородиевого сплава и платины и оптические пирометры.

Для технических измерений различие между обеими указанными ранее температурными шкалами пренебрежимо мало, поэтому по МПТШ можно применять также единицы измерения термодинамической шкалы. В зависимости от того, какой температуре присвоено нулевое значение, получают шкалу Кельвина или шкалу Цельсия. Шкала Кельвина начинается с абсолютного нуля, причем единица – 1 кельвин [K] – согласно определению составляет $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды (которая практически не зависит от давления):

Температура в кельвинах обозначается буквой T . Единицей разности температур (температурного интервала) тоже является 1 кельвин [K] и определяется по формуле (1):

$$1\text{K}=(\theta_{\text{тройной точки}} - \theta_{\text{абсолютного нуля}})/273,16. \quad (1)$$

Известная температурная шкала Цельсия начинается с точки таяния льда. Нулевая точка этой шкалы расположена на 273,15 K выше абсолютного нуля и на 0,01 K ниже тройной точки воды, которая является одной из основных реперных точек.

Температуры точек кипения воды и таяния льда являются функциями давления p ; при $p_0 = 1,013$ бар градус по шкале Цельсия определяется по формуле (2):

$$1^{\circ}\text{C}=(\theta_{\text{точки кипения}} - \theta_{\text{точки таяния}})/100. \quad (2)$$

Единицей шкалы является градус Цельсия [$^{\circ}\text{C}$], равный по величине кельвину [K]. Температура по шкале Цельсия обозначается буквой t .

С учетом изложенного численное соотношение имеет вид (3):

$$^{\circ}\text{C}=^{\circ}\text{K}-273,15. \quad (3)$$

В англоязычных странах до сих пор иногда используют температурные шкалы Фаренгейта [$^{\circ}\text{F}$] и Ранкина [$^{\circ}\text{Ra}$]. Численные значения температур по этим шкалам пересчитывают по следующим формулам (4), (5):

$$^{\circ}\text{F}=\frac{9}{5} * ^{\circ}\text{C} + 32. \quad (4)$$

$$^{\circ}\text{Ra} = ^{\circ}\text{F} + 459,67. \quad (5)$$

Реперные точки. Каждый термометр следует время от времени подвергать повторной поверке, так как старение материала чувствительного элемента или чрезмерная нагрузка на него могут изменить его первоначальную характеристику. Перед приемосдаточными измерениями, в которых должно быть подтверждено, например, достижение гарантированных показателей потребления теплоты, все приборы для измерения температуры должны проходить поверку.

Поверку приборов осуществляют сравнением их показаний с температурной шкалой. Практически это можно сделать двумя способами: сравнением показаний в одной или в нескольких основных или вторичных реперных точках; сравнением с показанием образцового (стандартного) прибора в идентичных условиях окружающей среды.

Поверка по реперной точке обеспечивает максимально возможную точность. Однако такая поверка имеет недостаток, заключающийся в том, что сравнение осуществляется только в некоторых дискретных точках температурной шкалы, между которыми приходится интерполировать. Для такой поверки требуется специальное контрольное оборудование, позволяющее с большой тщательностью установить реперные точки.

Затраты времени, особенно на подготовку, во время которой во всех элементах оборудования должно быть достигнуто установившееся температурное состояние, очень значительны. Поэтому поверку в реперных точках проводят редко. Исключением являются те реперные точки, которые могут быть реализованы простыми средствами в любой малой лаборатории: точка таяния льда ($0,00\text{ }^{\circ}\text{C}$), тройная точка воды ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), точка кипения воды ($100,00\text{ }^{\circ}\text{C}$), а иногда и точка кипения серы ($444,6\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Термостаты. Поверка датчиков температуры может быть осуществлена гораздо проще, чем измерением в реперной точке, если применить сравнение с показаниями образцового (стандартного) прибора – стеклянного жидкостного термометра, термометра сопротивления, термоэлектрического термометра (термопары), зависимость погрешности которых от температуры известна заранее. Такие сравнительные измерения могут быть проведены в большинстве лабораторий, если только в них есть соответствующие испытательные устройства – градуировочные ванны или термостаты, в которых можно в течение длительного времени поддерживать постоянную температуру, варьируя ее в определенных рабочих пределах.

Качество поверки определяется точностью образцового термометра, поэтому оно ниже, чем при поверке в реперной точке. Однако для большинства промышленных измерений достигаемая точность поверки достаточна.

Температуру можно регулировать с помощью контактного термометра с точностью от $0,01$ до $0,10\text{ K}$ (в зависимости от особенностей примененной аппаратуры). В последнее время начали применяться полупроводниковые датчики сопротивления, которые могут управлять мощностью нагрева непосредственно с помощью тиристоров. Постоянство температуры при этом улучшается на целый порядок.

Реомюр – шкала 80 делений (так как он заполнял термометр спиртом, а спирт расширяется на 0,0008 от температуры плавления льда до кипения воды).

В 1847 г. Фаренгейт, используя охлаждающие смеси, имитировал самую низкую температуру и принял ее за 0; 2-я точка – температура таяния льда; 100 (98) °F – температура здорового человека; 212 °F – точка кипения воды.

Цельсий сначала принял за ноль температуру кипения воды, а за 100 – температуру плавления льда, а затем перевернул.

Переход от °C к °F определяется по формуле (6):

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} * (t^{\circ}\text{F} - 32). \quad (6)$$

Жозеф Николя Делиль разделил шкалу на 150 делений (от таяния льда до кипения воды).

Недостаток этих шкал: показания зависят от свойств вещества, которым заполняется термометр.

Впервые термодинамическая шкала была предложена Кельвином в 1848 г.

В основу был положен термодинамический цикл Карно идеальной тепловой машины, состоящий из двух изотерм и двух адиабат (рис. 2).

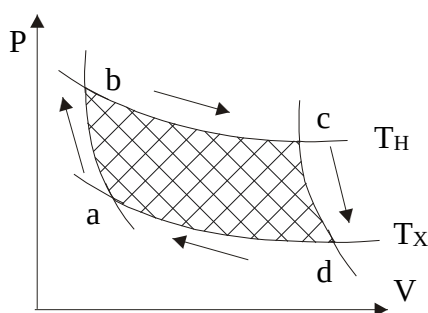


Рисунок 2 – Термодинамический цикл:
bc и da – адиабаты; ab и cd – изотермы

Карно доказал, что КПД цикла не зависит от свойств рабочего вещества и определяется температурами нагревателя и холодильника:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = \frac{T_H - T_X}{T_H}, \quad (7)$$

$$\frac{Q_H}{Q_X} = \frac{T_H}{T_X}, \quad (8)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (9)$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \frac{T_2}{T_3} \text{ и т. д.} \quad (10)$$

Впервые термодинамическая шкала была осуществлена в 100-градусном интервале (0 – таяние, 100 – кипение).

Интервал температур определяется по формуле:

$$T = \frac{Q}{Q_{100} - Q_0} 100. \quad (11)$$

Возможность осуществления такой шкалы появилась с открытием газовых законов Шарля и Гей-Люссака, на основе которых были созданы газовые термометры.

Закон Шарля:

$$P_t = P_0(1 + \beta t), \quad (12)$$

где β – коэффициент температурного расширения;

$$\beta = \frac{1}{273,15} \left[\frac{1}{\text{градус C}} \right];$$

$$P_t = 0;$$

$$t = -1/\beta.$$

Закон Гей-Люссака:

$$v_t = v_0(1 + \beta t). \quad (13)$$

Термодинамическая шкала неудобна при воспроизведении, поэтому имеются ее усовершенствования.

МТШ-27 – международная температурная шкала 1927 г., построена на шести реперных (постоянных) точках, значения температур которых определялись в разных странах газовыми термометрами. В промежутках между точками шкалы температуры воспроизводились с помощью эталонов (платиновый преобразователь температуры, платинородий-платиновая термопара, пирометр излучения) и интерполяционных формул.

МПТШ-48 (международная практическая температурная шкала) – вместо температуры плавления льда ввели тройную точку воды, которая лежит на 0,01 °C выше точки плавления льда.

МПТШ-68 – охватывала больший температурный интервал от 13,81 до 6300 К (13,81 – тройная точка равновесного водорода, 54 К – тройная точка кислорода, и т. д.).

МТШ-90 – тот же интервал, но другие, более точные реперы.

1.3. Международная температурная шкала

Международная температурная шкала (МТШ-90) представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Международная температурная шкала МТШ-90

Состояние фазового равновесия	Значение температуры, К (°C)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81 (-259,34)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33,330 кПа (250 мм рт.ст.)	17,042 (-256,108)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28 (-252,87)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102 (-246,048)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361 (-218,789)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188 (-182,962)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16 (0,01)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15 (100)
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73 (419,58)
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08 (961,93)
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58 (1064,43)

Значения температур даны для состояния равновесия при давлении, равном 101,325 кПа (760 мм рт. ст.), за исключением тройных точек и точки 17,042 К.

Примечание. Состояние равновесия между твердой и жидкой фазами олова (точка затвердевания олова) имеет значение $t = 231,9681\text{ }^{\circ}\text{C}$ и может быть использовано вместо точки кипения воды.

Тройная точка воды. Температура тройной точки воды может быть реализована в герметичных стеклянных ампулах, содержащих только воду высокой чистоты с изотопным составом, соответствующим в значительной мере океанской воде. Ампулы имеют осевой колодец для термометров;

температура тройной точки воды реализуется в любом месте, где лед находится в равновесии с поверхностью вода-пар.

Метод, рекомендуемый для приготовления тройной точки воды, состоит в формировании толстого слоя льда вокруг осевого колодца для термометра охлаждением изнутри, а затем в оттаивании достаточного количества этого слоя льда также изнутри, вследствие чего получают новую поверхность раздела вода-лед, примыкающую к колодцу. В течение первых часов, следующих за приготовлением тройной точки воды, температура, измеряемая в осевом колодце, поднимается довольно быстро на несколько десятитысячных кельвина, становясь стабильной по прошествии периода от одного до трех дней. Это первоначальное изменение температуры, вероятно, вызывается ростом ледяных кристаллов или медленным исчезновением натяжения в кристаллах. Тройная точка, приготовленная таким образом и содержащаяся в ледяной ванне, способна сохранять температуру постоянной с отклонением не более 0,1 мК в течение нескольких месяцев. Даже в ампулах с водой из различных источников, если работать с ними указанным способом, расхождения в полученных температурах не должны превышать 0,2 мК. Значительное повышение температуры термометра выше температуры тройной точки воды может быть вызвано искусственным или солнечным светом, падающим на ампулу, в связи с чем рекомендуется проводить измерения в ампулах, достаточно защищенных от излучения. Различное содержание изотопов в природной воде может вызвать заметные расхождения в значениях температуры тройной точки.

Тройная точка, точка 17,042 К и точка кипения равновесного водорода. Водород имеет две молекулярные модификации (обозначается приставками «орто» и «пара»); их наличие объясняется различными относительными ориентациями двух ядерных спинов в двухатомных молекулах. Равновесная орто-пара концентрация зависит от температуры и при комнатной температуре соответствует примерно 75 % ортоводорода и 25 % параводорода (так называемый нормальный водород). После ожижения это соотношение медленно меняется со временем; соответствующие изменения происходят и в физических свойствах водорода.

В точке кипения равновесная концентрация соответствует 0,21 % орто- и 99,79 % параводорода. Температура кипения водорода этого состава («равновесного») ниже температуры кипения нормального водорода примерно на 0,12 К. Температура равновесия между твердой, жидкой и газообразной фазами водорода может быть реализована использованием достаточного количества жидкого водорода в присутствии какого-либо катализатора в полости медного блока, в который вмонтированы платиновые термометры сопротивления и который находится в вакууме. Температуру блока понижают до тех пор, пока водород не затвердеет. Затем температуру медленно повышают и наблюдают переход в тройной точке. Температуру равновесия между жидким и газообразным водородом обычно реализуют статическим методом. В соответствии с этим методом в блоке из металла, обладающего высокой теплопроводностью, имеется полость, в которой создается и поддерживается

температура, близкая к точке кипения (погружением блока в жидкий водород). Измерения заключаются в сравнении показаний конденсационного термометра, сконструированного указанным образом, и платиновых термометров сопротивления, смонтированных в плотно пригнанных гнездах, высверленных в металлическом блоке и расположенных как можно ближе к полости. Правильность измерений можно проверить, показав, что полученные значения не зависят от отношения объема жидкого водорода к объему пара в полости.

Точка кипения неона. Точка кипения неона может быть реализована способом, подобным описанному для водорода.

Тройная точка и точка кипения кислорода. Тройная точка и точка кипения кислорода могут быть реализованы способом, подобным описанному для водорода. Особенно следует позаботиться о чистоте кислорода в конденсационном термометре. Кислород является достаточно чистым, когда нормальная точка кипения остается постоянной при неоднократной откачке его паров.

Точка кипения воды. Температуру равновесия между жидкой водой и ее паром обычно реализуют динамическим методом: термометр погружают в насыщенные пары воды. Для эталонных работ рекомендуется использовать закрытые системы, в которых кипятильник и манометр соединены с маностатом, наполненным воздухом или, предпочтительнее, гелием.

Кипятильник должен быть сконструирован так, чтобы избежать загрязнений воды. Термометр необходимо защитить от излучений тех деталей аппаратуры, температура которых отлична от точки кипения. Если температура равновесия достигнута, то, после приведения результатов измерения к постоянному давлению, полученное значение температуры не будет зависеть от продолжительности измерений скорости подачи тепла в кипятильник и глубины погружения термометра. Изменение содержания дейтерия в воде вызывает изменение температуры кипения воды в том же направлении, что и для тройной точки воды, но примерно в три раза меньше.

Точка затвердевания олова и цинка. Температуры затвердевания могут быть реализованы с очень высокой воспроизводимостью наблюдением за горизонтальной частью кривой «температура-время», характеризующей медленное затвердевание очень чистых металлов. Для плавления и затвердевания олова и цинка можно использовать тигель из очень чистого искусственного графита (99,999 % по массовой доле) диаметром около 5 см, с осевым колодцем для термометра. Глубина погружения термометра в металл должна быть достаточной для устранения влияния теплопередачи по проводам термометра на температуру его чувствительного элемента. Удобно держать тигель с металлом в пирексовой или кварцевой пробирке в инертной атмосфере и нагревать его в печи с металлическим блоком.

Процедура охлаждения металла при определении точки затвердевания должна быть такой, чтобы чувствительный элемент термометра имел возможно лучший тепловой контакт с поверхностью раздела твердой и жидкой фаз металла и находился с ней в тепловом равновесии. Вскоре после начала кристаллизации должна появиться или твердая оболочка, оформившаяся на

стенках тигля, или твердая корка вокруг колодца для термометра. Олово высокой чистоты (составляющей 99,9999 % по массовой доле) при охлаждении из жидкого состояния переохлаждается на 20-30 К перед затвердеванием. Критерием достаточной чистоты образца цинка или олова является то, что значение температуры, соответствующее плоскому участку кривой плавления, меняется не более чем на 1 мК.

Точки затвердевания серебра и золота. Температуру равновесия между жидкой и твердой фазами серебра и золота реализуют в закрытых тиглях либо из очень чистого искусственного графита, либо из плавленого кварца. Если тигель графитовый, рекомендуется предотвратить доступ воздуха к нему во избежание окисления графита. Расплавленное серебро должно быть защищено, чтобы не допустить растворения в нем кислорода, вызывающего понижение точки затвердевания.

Слиток металла необходимо нагреть до однородной температуры, на несколько кельвинов превышающей температуру точки плавления металла, и затем медленно охладить.

Термоэлектрический термометр, подлежащий эталонированию, помещенный в защитную трубку из подходящего огнеупорного материала, с огнеупорными изоляторами, разделяющими оба электрода, погружают в расплавленный металл, которому затем дают остыть. Глубина погружения термоэлектрического термометра в металл должна быть достаточной, чтобы исключить теплопередачу по электродам.

Достигнута ли температура равновесия, можно проверить по следующим признакам: электродвижущая сила термоэлектрического термометра не должна зависеть от небольших изменений глубины погружения в расплавленный металл во время последовательных охлаждений и должна оставаться постоянной не менее 5 мин во время одного охлаждения.

Чтобы использовать точку затвердевания золота в качестве реперной для области шкалы, определяемой в соответствии с законами излучения, необходимо иметь черное тело. Для его реализации тигель, содержащий золото, должен быть изменен таким образом, чтобы обеспечить погружение излучателя, имеющего однородную температуру, в золото. Черное тело легче осуществить, если излучатель изготовлен из материала, обладающего высокой излучательной способностью. Для этой цели очень подходит графит.

Вторичные реперные (постоянные) точки. Наряду с основными реперными точками МТШ-90 имеются и другие реперные точки. Некоторые из них и их температуры по МТШ-90 указаны в табл. 2. За исключением температур тройных точек и температур, вычисляемых по уравнениям, определяющим зависимость давления паров от температуры, остальные являются температурами равновесия системы при давлении, равном 101,325 кПа (760 мм рт. ст.).

Таблица 2 – Вторичные реперные (постоянные) точки

Состояние фазового равновесия	Температура, К (°C)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами нормального водорода (тройная точка нормального водорода)	13,956 (-259,194)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами нормального водорода (точка кипения нормального водорода)	20,397 (-252,753)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами неона (тройная точка неона)	24,555 (-248,595)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона	27,102 (-246,048)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами азота (тройная точка азота)	63,148 (-210,002)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода	90,188 (-182,962)
Равновесие между твердой и парообразной фазами двуокиси углерода (точка возгонки двуокиси углерода)	194,674 (-78,476)
Равновесие между твердой и жидкой фазами ртути (точка затвердевания ртути)	234,288 (-38,862)
Равновесие между льдом и насыщенным воздухом водой (точка таяния льда)	273,15 (0)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами феноксибензола (дифенилового эфира) (тройная точка феноксибензола)	300,02 (26,87)
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами бензойной кислоты (тройная точка бензойной кислоты)	395,52 (122,37)
Равновесие между твердой и жидкой фазами индия (точка затвердевания индия)	429,784 (156,634)
Состояние фазового равновесия	Температура, К (°C)
Равновесие между твердой и жидкой фазами висмута (точка затвердевания висмута)	544,592 (271,442)
Равновесие между твердой и жидкой фазами кадмия (точка затвердевания кадмия)	594,258 (321,108)
Равновесие между твердой и жидкой фазами свинца (точка затвердевания свинца)	600,652 (327,502)

Окончание табл. 2

Состояние фазового равновесия	Температура, К (°C)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами ртути (точка кипения ртути)	629,81 (356,66)
Равновесие между жидкой и парообразной фазами серы (точка кипения серы)	717,824 (444,674)
Равновесие между твердой и жидкой фазами медь-алюминиевой эвтектики	821,38 (548,23)
Равновесие между твердой и жидкой фазами сурьмы (точка затвердевания сурьмы)	903,89 (630,74)
Равновесие между твердой и жидкой фазами алюминия (точка затвердевания алюминия)	933,52 (660,37)
Равновесие между твердой и жидкой фазами меди (точка затвердевания меди)	1357,6 (1084,5)
Равновесие между твердой и жидкой фазами никеля (точка затвердевания никеля)	1728 (1455)
Равновесие между твердой и жидкой фазами кобальта (точка затвердевания кобальта)	1767 (1494)
Равновесие между твердой и жидкой фазами палладия (точка затвердевания палладия)	1827 (1554)
Равновесие между твердой и жидкой фазами платины (точка затвердевания платины)	2045 (1772)
Равновесие между твердой и жидкой фазами родия (точка затвердевания родия)	2236 (1963)
Равновесие между твердой и жидкой фазами иридия (точка затвердевания иридия)	2720 (2447)
Равновесие между твердой и жидкой фазами вольфрама (температура плавления вольфрама)	3660 (3387)

Эталонная база России. В России существуют два государственных первичных эталона температуры. Первый (ГЭТ 35-2010) находится во ВНИИФТРИ и работает в диапазоне от 0,3 К до 273,16 К. В его состав входят наборы эталонных термометров сопротивления в трех блоках сравнения, откалиброванные по газовому термометру постоянного объема, а также аппаратура для реализации плавления гелия-3, комплект аппаратуры для реализации температуры реперных точек международной температурной шкалы МТШ-90, криостаты сравнения, аппаратура для точных измерений сопротивления (рис. 3).

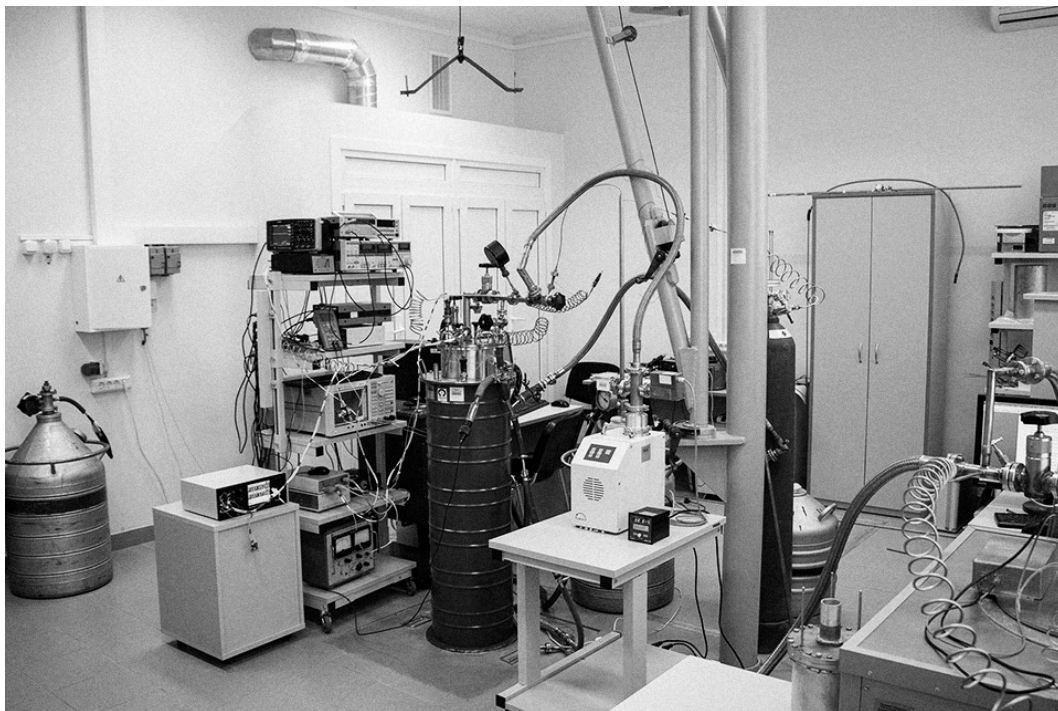


Рисунок 3 – Аппаратура для точных измерений

Эталон единицы температуры – кельвина. Сейчас этот эталон воспроизводит единицу температуры (которая по действующему до сегодняшнего дня определению равна $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды) по температурным зависимостям эталонных термометров, стабильность которых проверяется сличением между собой в криостатах сравнения, а также с температурой реперных точек, что обеспечивает воспроизведение единицы температуры в соответствии с Международной шкалой МТШ-90 и Предварительной низкотемпературной шкалой ПНТШ-2000.

Кроме того, во ВНИИФТРИ разработали акустический газовый термометр, определяющий термодинамическую температуру по скорости звука в газообразном гелии с высокой точностью – в диапазоне от 0,8 К до 273,16 К. Именно этот термометр планируется ввести в состав ГЭТ 35-2010 для улучшения точности воспроизведения и передачи единицы температуры – кельвина на основе первичного метода акустической газовой термометрии, основанного на законах термодинамики и статистической физики. Это позволит воспроизводить и передавать единицу температуры в соответствии с новым определением кельвина и обеспечивать единство измерений в области низких температур после переопределения кельвина.

Второй государственный эталон (ГЭТ 34-2007) предназначен для высоких температур (от 0 до 3000 °С) и размещен во ВНИИ метрологии. В этот комплекс, во-первых, входят три платиновых термометра сопротивления для диапазона от 0 до 660,323 °С и три – для диапазона 419,527÷961,78 °С. Во-вторых, установки для воспроизведения различных температур: тройной точки воды, плавления галлия, затвердевания индия, олова, цинка, алюминия, серебра. Далее, комплекс аппаратуры для измерения сопротивления термометров, фотоэлектрический

компаратор яркостей тепловых излучателей, излучатель «черное тело» для воспроизведения температур затвердевания серебра, золота и меди, группа из трех температурных ламп и высокотемпературный излучатель «черное тело» для передачи размера единицы температуры.

Как и его низкотемпературный коллега, этот эталон работает на основе метода воспроизведения температур фазовых переходов чистых веществ, позволяющих определить точные значения сопротивлений стабильных платиновых интерполяционных термометров в реперных точках МТШ-90.

В связи с переопределением единицы Кельвина во ВНИИ метрологии создают экспериментальный эталон единицы температуры, который основан на новом определении – через постоянную Больцмана.

2. КОНТАКТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

2.1. Механические термометры (термометры расширения твердых тел)

Если не принимать во внимание специальные методы измерения, основанные на физических явлениях, то можно убедиться, что все обычные методы измерения температуры основываются на двух главных принципах: контактной и бесконтактной термометрии (бесконтактные методы называются также радиационной пирометрией, поскольку температура тела определяется по его радиации – излучению). За исключением фотоэлектрического датчика температуры, все термометры основаны на передаче теплоты чувствительному элементу. В контактных термометрах эта передача обеспечивается теплопроводностью и конвекцией, а в бесконтактных – тепловым излучением. При этом тело, термические характеристики которого известны, приводят в калорическое (температурно-тепловое) равновесие с неизвестным телом и по достижении установившегося состояния делают выводы о температуре исследуемого тела.

В зависимости от реализуемого выходного сигнала термометра различают механические и электрические контактные термометры. Имеются также термометры, которые могли бы быть отнесены к обеим этим категориям одновременно, например, механические контактные термометры, которые образуют единое целое с электрическими контактами или электрическими измерительными преобразователями. Такие термометры рассматриваются здесь в группе механических.

Механические контактные термометры являются наиболее распространенными. Почти все они основаны на тепловом расширении веществ, точнее, на различном расширении двух разных веществ. Эти вещества могут находиться при использовании в качестве датчиков или расширяющихся тел в датчиках во всех трех фазовых состояниях: твердом, жидком и газообразном. Механические контактные термометры обычно характеризуются большой прочностью, малыми затратами на обслуживание, хорошей точностью и низкой стоимостью. Они рассчитаны в основном на повседневное практическое применение, а также для проведения лабораторных и экспериментальных работ.

Показание термометра считывают, как правило, прямо на месте измерения. Однако имеются варианты исполнения, в которых измерительный сигнал может быть передан на некоторое ограниченное расстояние. Их изготавливают в виде температурных реле (выключателей) или передатчиков температуры (выходные сигналы могут быть пневматическими, гидравлическими или электрическими), или даже в виде механических регуляторов температуры прямого действия (без подвода какой-либо вспомогательной энергии).

Дилатометрический термометр. Простейший принцип измерения температуры использует удлинение металлического стержня, рассчитываемое по уравнению:

$$\Delta l = \alpha l \Delta \vartheta \text{ или } l_{\vartheta} = l_0(1 + \alpha \cdot \vartheta), \quad (14)$$

где l , l_0 и l_{ϑ} – длина стержня, м, соответственно в первоначальном состоянии, при температуре 0°C и при температуре ϑ , $^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент линейного температурного расширения материала стержня, м/мК.

Коэффициент α в той или иной степени (в зависимости от материала) зависит от температуры, т.е. непостоянен: $\alpha = f(\theta)$. Обычно в качестве чувствительного элемента dilatометрического термометра используют трубку из металла с возможно более высоким (например, из латуни), внутри которой концентрично располагается стержень из материала с возможно более низким (например, из инвара, фарфора, кварца).

Диапазон измерений составляет примерно $0 \dots 1000^{\circ}\text{C}$. Большая длина чувствительных элементов таких термометров не позволяет определять с их помощью температуру в отдельных точках; они показывают температуру, усредненную по всей длине. При тщательной установке dilatометрических термометров можно добиться точности измерений от ± 1 до $\pm 3\%$ (в зависимости от их исполнения).

Dilatометрические термометры часто используют там, где требуются большие усилия в исполнительном механизме, например в регуляторах температуры прямого действия.

Биметаллические термометры. Значительно чаще dilatометрических применяют биметаллические термометры, в которых для индикации температуры также используют различное температурное расширение двух разнородных материалов. Биметаллические термометры могут иметь малые размеры, в чем и заключается их существенное преимущество перед громоздкими dilatометрическими термометрами. Они просты по конструкции (поскольку у них мало движущихся частей). Их изготавливают в самых разнообразных исполнениях, они просты и имеют низкую стоимость.

Два или несколько слоев различных материалов прокатывают совместно (в пакете), причем в зависимости от назначения они могут иметь различные геометрические формы. На рис. 4 показаны наиболее распространенные конструктивные исполнения чувствительных элементов этих термометров. Варианты *а* и *б* используются главным образом в качестве температурных реле (например, реле максимального тока) и в механических приборах с компенсацией температурного влияния. Варианты *в* и *г* в связи с большим отклонением свободного конца биметаллического элемента могут быть использованы в термометрах с непосредственным отсчетом температуры (рис. 4д).

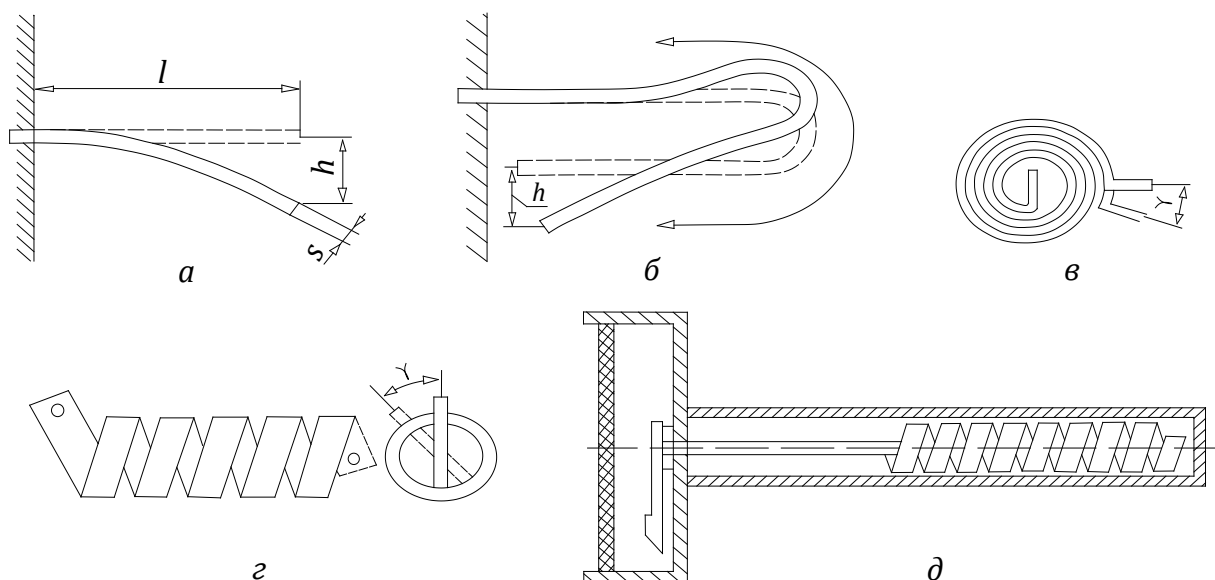


Рисунок 4 – Биметаллические термометры:

a...c – конструктивные формы биметаллических пружин; *д* – схема термометра

Для схем, приведенных на рис. 4*а*, 4*б*, перемещения конца биметаллического элемента Δh определяют соответственно по формулам:

$$\Delta h = \alpha \frac{l^2}{s} \Delta v \quad (15)$$

$$\Delta h = \alpha \frac{l^2}{2s} \Delta v, \quad (16)$$

где α – температурный коэффициент;

l – длина биметаллического элемента;

s – толщина биметаллического элемента;

Δv – изменение температуры.

Для схем, приведенных на рис. 4*в*, 4*г*, угол смещения конца биметаллического элемента γ определяют по формуле (18):

$$\Delta \gamma = \alpha \frac{360}{\pi} \frac{l}{s} \Delta v. \quad (17)$$

Один конец чувствительного элемента всегда закреплен неподвижно, а другой соединен с передаточным редуктором или непосредственно с показывающим устройством. В отличие от dilatометрических, биметаллические термометры могут совершать лишь незначительную работу, поэтому их применяют, как правило, в качестве показывающих приборов, реже – для передачи показаний на расстояние.

Биметаллическими термометрами можно измерять температуру от -50 до +600 °С. Погрешность составляет от ± 1 до ± 3 %.

2.2. Жидкостные термометры

Стеклянные жидкостные термометры. В этих термометрах измеряется относительное расширение жидкости по сравнению с объемом резервуара. Основная часть термометрической жидкости располагается в шарообразном или цилиндрическом резервуаре, который собственно и является чувствительным элементом термометра (рис. 5). Резервуар сообщается с длинным и узким стеклянным капилляром. На верхнем конце капилляра имеется расширительная (переливная) камера, которая используется для сбора термометрической жидкости, если термометр нагревается выше его верхнего предела измерений.

Для заполнения термометров могут быть применены практически любые жидкости. При этом различают смачивающие (например, органические) и несмачивающие (например, ртуть) жидкости. Смачивающие жидкости при измерении снижающейся температуры обуславливают дополнительную погрешность. Органическую жидкость нужно подкрашивать, чтобы она была видна в капилляре (для облегчения отсчета). Из-за малого коэффициента температурного расширения ртути резервуар ртутного термометра должен иметь больший объем, чем при заполнении другими жидкостями.

Расширение рассчитывают по формуле (19):

$$\Delta V = \beta V \Delta \vartheta \text{ или } V_{\vartheta} = V_0(1 + \beta \vartheta), \quad (18)$$

где β – объемный коэффициент температурного расширения (примерно в три раза больше коэффициента линейного температурного расширения α);

V , V_0 и V_{ϑ} – объемы термометрической жидкости, м^3 , соответственно, в первоначальном состоянии, при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при температуре ϑ ($^{\circ}\text{C}$).

Шкалу термометра можно нанести на стеклянную пластину молочного цвета, помещенную сзади капилляра и вместе с ним расположенную в защитной стеклянной трубке. Это так называемые термометры с вложенной шкалой (рис. 5). У стержневых термометров (рис. 5а) шкалу наносят непосредственно на наружной поверхности толстостенной капиллярной трубки.

В зависимости от диапазона измерений и требуемой точности, цена деления шкалы обычных термометров может быть равна 0,1; 0,2; 0,5 или 1К или кратна этим значениям. Если термометр при измерении должен частично погружаться в контролируемую среду, то на нем дополнительно должна быть сделана отметка – до какой глубины его можно погружать.

Диапазон измерения стеклянных жидкостных термометров зависит от свойств термометрической жидкости. Для некоторых наиболее распространенных жидкостей он характеризуется следующими температурами, $^{\circ}\text{C}$:

- Изопентан: -195...+35;
- Нормальный пентан: -130...+35;
- Этиловый спирт: -110...+210;
- Толуол: -90... + 110;
- Ртуть – таллий: -60...+30;

Ртуть в вакууме: $-30...+150$;
 Ртуть под давлением: $-30...+630$;
 Ртуть – в кварцевом стекле: $-30...+1000$.

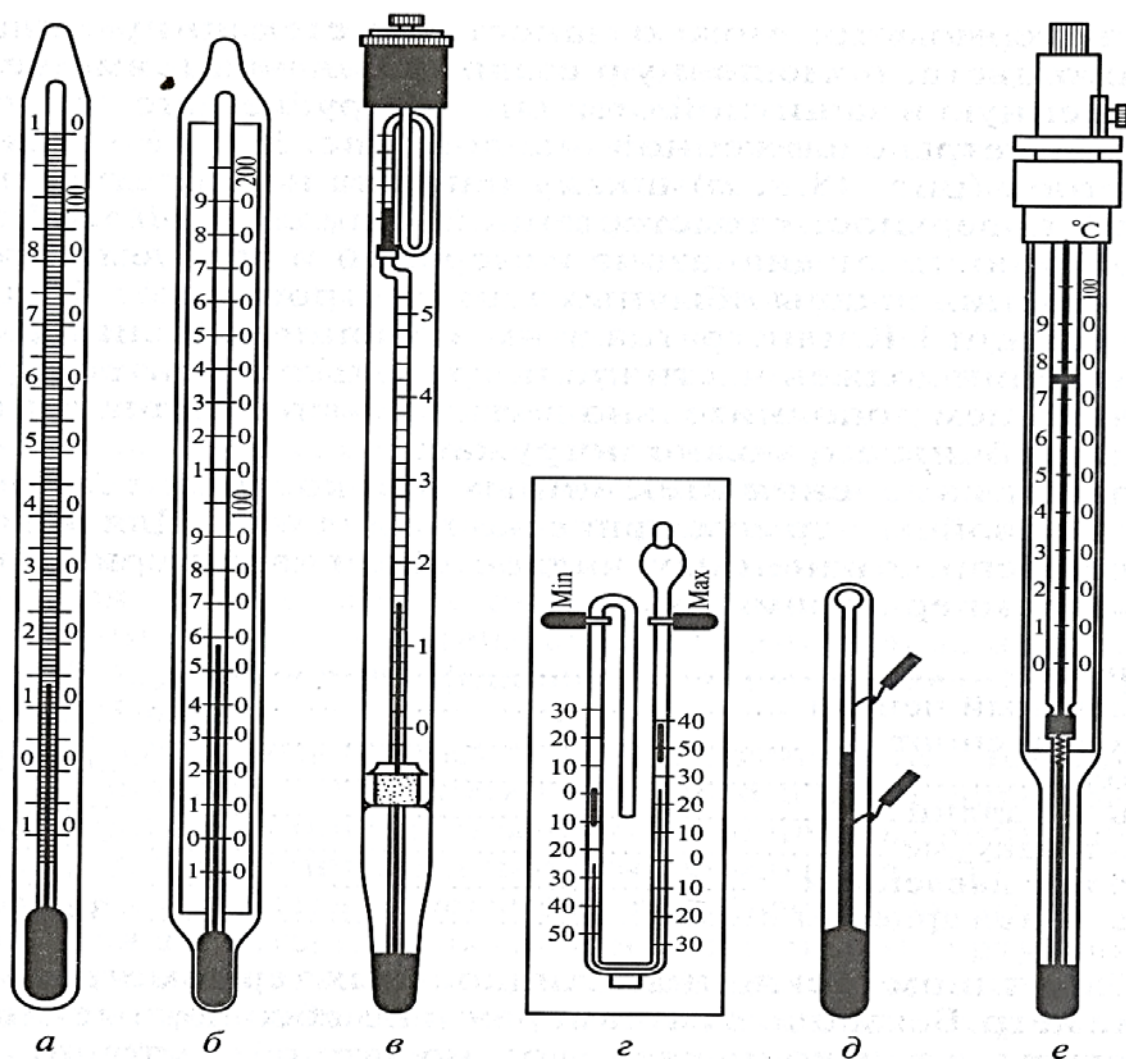


Рисунок 5 – Стекланные жидкостные термометры:

а – палочный (стержневой); *б* – с вложенной шкалой; *в* – термометр Бекмана;
г – максимально-минимальный; *д* – электроконтактный;
е – электроконтактный с переменной уставкой

Особым типом стекланных жидкостных термометров является термометр Бекмана. Им измеряют не абсолютные значения температуры, а только их разности, но зато очень точно. Поэтому область применения таких термометров ограничена. Их применяют главным образом при calorиметрических измерениях. Цена деления шкалы равна $0,01$ К, причем расстояние между соседними штрихами настолько велико, что можно оценить даже разности температур $0,001$ К. Собственно диапазон измерения составляет 5 К. К концу измерительного капилляра подсоединен уравнивательный резервуар большего размера (рис. 5в), в который можно перелить часть ртути легким постукиванием. Таким образом можно смещать диапазон измерений от -10 до $+100$ °С.

Вспомогательная шкала на верхнем резервуаре облегчает настройку начальной температуры измерительного диапазона.

Экстремальные термометры применяют в тех случаях, когда необходимо зафиксировать максимальное или минимальное значение температуры, достигавшееся в каком-либо опыте или процессе за определенный отрезок времени, не проводя непрерывного наблюдения за этой температурой. Простейшим экстремальным термометром является максимальный, в капилляре которого над уровнем ртути помещен стальной указатель, который обычно остается на месте благодаря трению, но который можно перемещать при помощи внешнего магнита.

Если требуется зафиксировать также минимальную наблюдавшуюся температуру, то применяют максимально-минимальные термометры (рис. 5г). В этих термометрах основная термометрическая жидкость – этиловый спирт – смещает вверх или вниз тонкий столбик ртути в капилляре. Экстремальные значения здесь определяют также при помощи стержневых указателей из стали. В этом случае на термометр нужно нанести две шкалы.

Стеклянные контактные термометры позволяют передавать на расстояние один дискретный сигнал температуры, регулировать температуру в термостате и сигнализировать об опасных рабочих режимах (состояниях). Столбик ртути является одним контактом, а проволока в капилляре – другим контактом электрического выключателя. В простейшей конструкции такого термометра (рис. 5д) в капилляр впаяны (вплавлены) контактные штифты. При этом точка переключения фиксируется и не может быть изменена впоследствии.

Переменную точку переключения получают при помощи контактной проволоки, легко перемещаемой в капилляре (рис. 5е). Проволока закреплена на микрометрическом винте, который можно вращать при помощи наружного магнита. При этом конец проволоки может быть перемещен в любую точку диапазона измерений. Для защиты контактов пространство над ртутью заполняют защитным газом. Максимальный коммутационный ток через контакты при напряжении 220 В переменного тока не должен превышать 50 мА. Гистерезис переключения зависит от диапазона измерений термометра, а также от величины электрической нагрузки на контакты и может изменяться от 0,001 до 1 К.

Манометрические жидкостные термометры. В этих термометрах, как и в стеклянных, в качестве измеряемой величины, определяющей температуру, использовано изменение объема термометрической жидкости, однако к чувствительному элементу должен быть подключен прибор, механически показывающий изменение объема.

Манометрические жидкостные термометры просты по конструкции, прочны, надежны и практически не нуждаются ни в каком обслуживании. Они позволяют передавать показание на ограниченное расстояние, а развиваемое ими усилие настолько велико, что к ним могут быть подключены не только показывающие приборы, но и передающие преобразователи или механические регуляторы прямого действия.

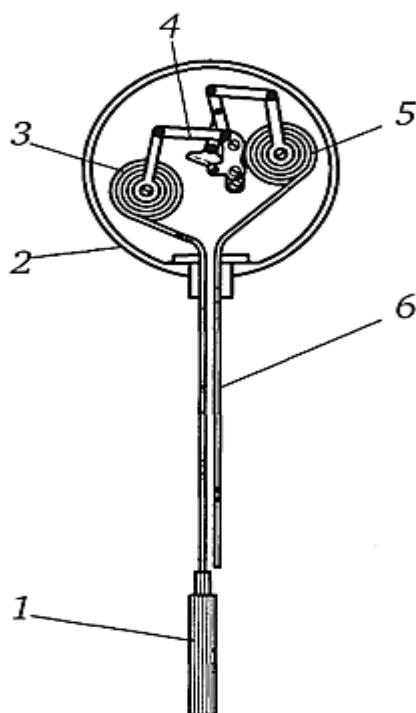


Рисунок 6 – Манометрический жидкостный термометр с компенсационным капилляром:

- 1 – баллон с жидкостью; 2 – корпус; 3 – спираль основного капилляра;
 4 – передаточный механизм; 5 – спираль компенсационного капилляра;
 6 – компенсационный капилляр

Манометрический жидкостный термометр (рис. 6) состоит из чувствительного элемента – стального баллона, в котором находится основная часть термометрической жидкости, подключенного к нему капилляра внутренним диаметром 0,1... 0,2 мм и указателя с манометрической пружиной (трубкой Бурдона) или спиральной трубкой. Пружинная трубка преобразует расширение объема жидкости во вращательное движение (или в возвратно-поступательное). Показание указателя является в основном линейной функцией температуры. Жидкостные термометры работают в интервале температур от -150 до 300 °С. Внутри системы создается начальное давление 1 – 3 МПа, чтобы поднять точку кипения жидкости и расширить диапазон.

В качестве термометрической жидкости применяют ртуть (под давлением 10...15 МПа при комнатной температуре) или же органическое вещество толуол (под давлением 0,5...5,0 МПа). При этом могут быть получены диапазоны измерения соответственно от -30 до +600 или от -90 до +260 °С. Для более точных измерений при большой длине капилляра нужно обеспечить полную компенсацию погрешности.

Для этой цели используют второй (компенсационный) измерительный капилляр без баллона, подключенный ко второй манометрической пружине. Разность перемещений обеих систем с помощью рычажного устройства передается на устройство отображения. Это устраняет влияние температуры на капилляр и манометрическую пружину, поскольку окружающая среда действует на оба капилляра.

2.3. Манометрические газовые и конденсационные термометры

Газовые термометры

Принцип действия основан на зависимости давления среды, находящейся в замкнутом объеме, от температуры этой среды (рис. 7).

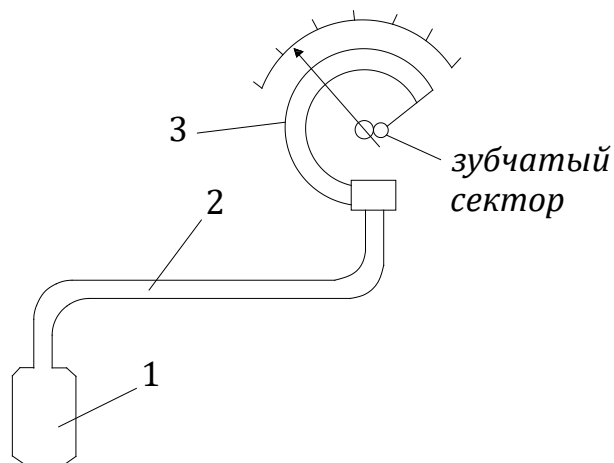


Рисунок 7 – Газовый термометр:
1 – термобаллон; 2 – капилляр; 3 – манометр

Термобаллон обычно выполняется в виде трубки из нержавеющей стали, диаметром 20мм и длиной 400-500 мм. Капилляр имеет внутренний диаметр 0,2-0,5 мм и длину 0,6...60 м, и выполняется из меди или из стали. Для защиты капилляр помещают внутри гибкого металлического рукава.

Газовые манометры заполняют газами (азот, гелий). Давление газа, в зависимости от температуры, характеризуется законом Шарля:

$$P_t = P_0(1 + \beta t), \quad (19)$$

где P_0 – начальное давление (при 0 °С);

β – коэффициент теплового объемного расширения газов.

При 0 °С создают начальное давление: $P_0 = 1 + 3$ МПа.

Приращение давления по формуле:

$$\Delta P_t = P_t - P_0 = P_0 \beta t. \quad (20)$$

Эти термометры могут работать от -160 до 600 °С.

Обычно для заполнения используют азот, реже аргон.

Погрешность определяется изменением температуры окружающей среды, действующей на манометр и капилляр (22):

$$\Delta t = \frac{V_K \Delta t_K + V_M \Delta t_M}{V_B + V_M + V_K}, \quad (21)$$

где Δt_M – изменение температуры манометра;

Δt_K – изменение температуры капилляра;

V_B, V_M, V_K – объемы баллона, манометра, капилляра.

Конденсационные термометры. В них термобаллон лишь частично заполнен низкокипящей жидкостью, а сверху находится насыщенный пар этой жидкости. При изменении температуры изменяется давление насыщенного пара. Это изменение подается в манометр.

Достоинство: показания не зависят от температуры окружающей среды, так как давление насыщенного пара над жидкостью определяется лишь температурой этой жидкости, находящейся в баллоне.

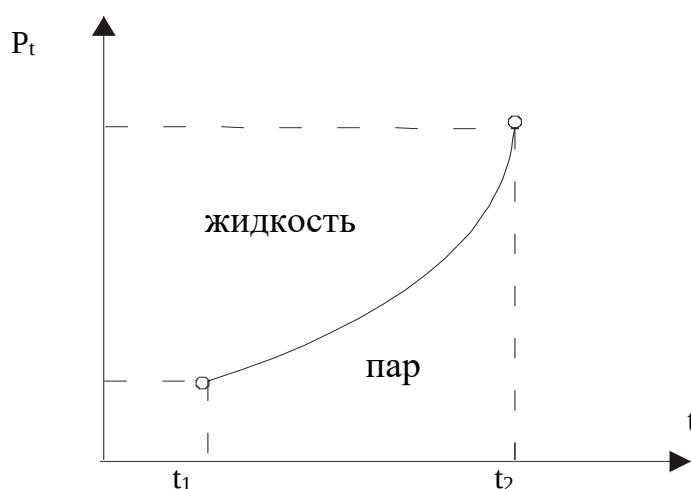


Рисунок 8 – Зависимость давления от температуры

Диапазон измерений от -60 до 300 °С.

В качестве рабочей жидкости используют этиловый спирт, ацетон.

2.4. Электрические контактные термометры

2.4.1. Термометры сопротивления

Механические контактные термометры несмотря на малые затраты на измерение, надежность и простоту обслуживания имеют один существенный недостаток – их сигналы не могут быть переданы на значительные расстояния и объединены с другими сигналами в информацию, пригодную для дальнейшей переработки. Поэтому в промышленной практике температуру измеряют в основном термометрами, действие которых основано на изменении электрических свойств различных веществ с изменением температуры.

Основным методом, позволяющим решить практически все проблемы измерения температуры, является определение положительного или отрицательного изменения сопротивления металлов или полупроводников

(термометров сопротивления), а также термоэлектродвижущей силы, возникающей при контакте пары, составленной из двух различных металлов или из металла и сплава (термоэлектрических термометров, термопар). Электрические контактные термометры, как правило, имеют более высокую точность, лучшие динамические свойства и более широкий диапазон измерения.

Электрическое сопротивление большинства материалов существенно изменяется с температурой. Этот эффект, в других областях воспринимаемый как помеха, здесь используется как принцип измерения температуры. Температурная зависимость электрического сопротивления металлических проводников обусловлена наличием свободных электронов связи в кристаллической решетке металла: при понижении температуры электрическое сопротивление уменьшается. В полупроводниках обычно наблюдается недостаток электронов проводимости; они высвобождаются только при подводе тепловой энергии (повышении температуры). В этом случае с повышением температуры электрическое сопротивление снижается.

В отличие от термоэлектрических термометров (термопар), с помощью которых можно измерять только разность температур по отношению к некоторому известному уровню, термометры сопротивления позволяют измерять и абсолютные значения температуры. Для них необходим вспомогательный источник напряжения, тогда как для термоэлектрических термометров он обычно не требуется. Диапазон измерений термометрами сопротивления ограничен, в первую очередь, высокими температурами; нелинейность температурной характеристики в зависимости от материала чувствительного элемента иногда может быть значительной.

Металлические элементы термометров сопротивления. Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры может быть с высокой точностью описана уравнениями третьей степени. Однако при обычных требованиях к точности ограничиваются квадратичной или даже линейной функцией (22):

$$\Delta R = \alpha R \Delta \vartheta, \quad (22)$$

или функцией (23):

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha \vartheta), \quad (23)$$

где α – линейный температурный коэффициент сопротивления, К;

R , R_0 , R_{ϑ} – сопротивление, Ом, проводника соответственно в исходном состоянии, при 0 °С и при температуре ϑ °С.

Так как для большинства материалов линейное уравнение недостаточно точно выражает фактическую зависимость сопротивления от температуры, и, следовательно, коэффициент α не является постоянной величиной, регламентируют среднее относительное изменение сопротивления в диапазоне от 0 до 100 °С по формуле:

$$\alpha_{0;100} = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta \vartheta} = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100}, \quad (24)$$

где R_{100} , R_0 – сопротивления, определяемые в точке кипения и в точке замерзания воды.

В качестве материала для термометров сопротивления используют металлы с хорошей электрической проводимостью, например, платину, никель и медь. Средний температурный коэффициент сопротивления этих металлов имеет следующие значения, К: платина – $3,85 \cdot 10^{-3}$; никель – $6,17 \cdot 10^{-3}$; медь – $4,27 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 9 приведены основные параметры температурных характеристик сопротивления платины и никеля, а также допустимые отклонения от них. При этом установлено, что номинальное значение сопротивления при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ должно точно составлять $R_0 = 100\text{ Ом}$.

Используют медные термометры типа ТСМ для измерения температур от -50 до 180°C .

Зависимость сопротивления меди от температуры можно использовать для оценки средней степени нагрева обмоток электрических машин (генераторов, электродвигателей, трансформаторов) по величине их сопротивления. При этом датчиком температуры служит сама обмотка из медного провода. Измеряя ее сопротивление в холодном и нагретом (рабочем) состояниях, можно рассчитать рабочую температуру. Таким образом можно оценивать температуры от -50 до $+150^\circ\text{C}$.

Никель используют тоже в узком диапазоне температур от -60 до $+180^\circ\text{C}$, тогда как платину можно применять для измерения температур от -220 до $+750^\circ\text{C}$, а в нейтральной атмосфере – даже до $+1000^\circ\text{C}$. Поэтому платиновые термометры сопротивления наиболее широко распространены в промышленной практике. Если металл для чувствительного элемента очень чист, то может быть достигнута высокая точность измерения. По этой причине платиновые термометры сопротивления используют для воспроизведения международной практической температурной шкалы в интервале температур от $-182,97$ до $+630,50^\circ\text{C}$.

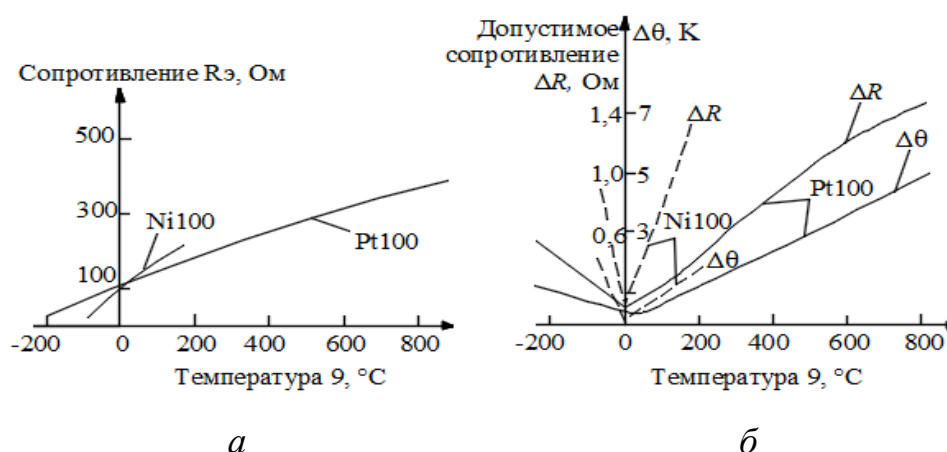


Рисунок 9 – Основные параметры температурных характеристик сопротивления платины и никеля:

a – температурная характеристика сопротивления; b – допустимые отклонения

Полупроводниковые термометры сопротивления. Их называют также терморезисторами или термисторами (термочувствительными резисторами). Имеются два различных типа терморезисторов: с отрицательным (терморезисторы NTC) и положительным (терморезисторы PTC, позисторы) температурным коэффициентом сопротивления. При очень низких температурах все полупроводники являются идеальными изоляторами. Увеличение их электрической проводимости с повышением температуры может быть приблизительно выражено экспоненциальной функцией (25):

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1} e^{b\left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2}\right)}, \quad (25)$$

где R_{θ_2} и R_{θ_1} – значения сопротивления, Ом, чувствительного элемента соответственно при абсолютной температуре θ_2 и эталонной температуре θ_1 (например, при $\theta_1 = 273,15$ K);

b – некоторая постоянная величина, зависящая от материала ($b = 3000 \dots 4000$ K).

Экспоненциальная характеристика, описываемая этой формулой (рис. 10), имеет большой и сильно изменяющийся температурный коэффициент α .

У терморезисторов NTC он изменяется в диапазоне от -1 до -6 K⁻¹. Большая нелинейность нежелательна из-за усложнения схемы подключения терморезистора. Тем не менее терморезисторы получили распространение в лабораторной и производственной практике именно благодаря своему большому температурному коэффициенту сопротивления.

Терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (NTC) состоят главным образом из смесей оксидов металлов, которые при высоких температурах спекаются, образуя маленькие шарики, пластинки и стерженьки. Благодаря их малым размерам обеспечиваются хорошие динамические свойства при измерениях температуры.

Пределы измерения для обычных терморезисторов NTC соответствуют температурам от -100 до +400 °C. При более высоких температурах длительный дрейф становится слишком большим, а сопротивление – слишком малым; при более низких температурах сопротивление становится слишком высоким, из-за чего возникают сложности с изоляцией. Имеются высокотемпературные терморезисторы с диапазоном измерения от 500 до 1000 °C. Погрешность терморезисторов NTC в зависимости от их электрической измерительной схемы может составлять 0,1... 1,0 % максимального значения в соответствующем диапазоне измерения.

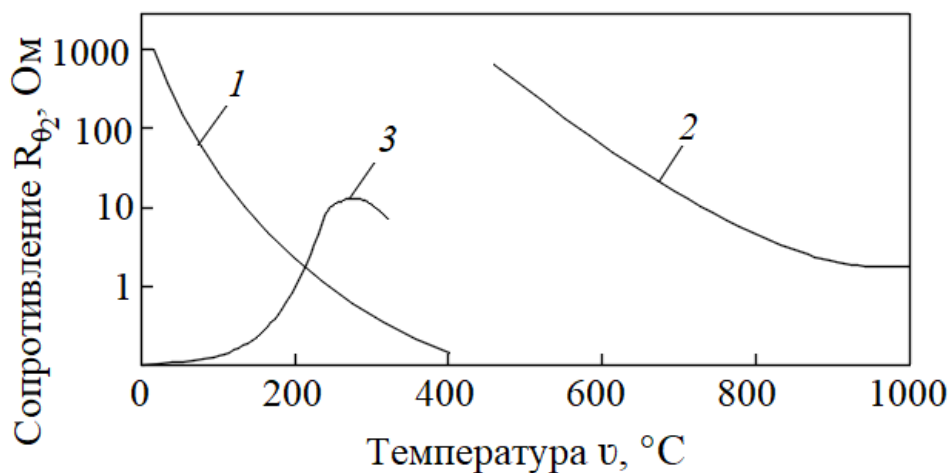


Рисунок 10 – Температурные характеристики полупроводниковых термометров сопротивления:

- 1 – обычный терморезистор NTC; 2 – высокотемпературный терморезистор;
3 – терморезистор с положительным температурным коэффициентом (PTC)

Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (PTC) состоят из сегнетоэлектрических керамических материалов. Положительный температурный коэффициент они сохраняют до определенной температуры. Интервал рабочих температур может составлять от -20 до $+200$ °C, но собственно диапазон измерений в пределах этого интервала обычно составляет всего около 20 К.

Конструктивные формы чувствительных элементов термометров сопротивления. Чувствительные элементы металлического термометра сопротивления представляют собой очень тонкую платиновую или никелевую проволоку, намотанную на каркас (опору обмотки) или свернутую в спираль и вложенную в каналы защитного корпуса (рис. 11).

В зависимости от диапазона измерения несущие каркасы могут быть изготовлены из термостойкой пластмассы, керамики, стекла или слюды. Чувствительные элементы цилиндрической формы могут иметь диаметр 1 ... 6 мм при длине 6... 60 мм. По аналогии с термопарами в чехлах разработаны чувствительные элементы, соединительные провода которых помещены в гибкую защитную оболочку, что позволяет измерять температуру в труднодоступных местах.

В отличие от металлических полупроводниковые чувствительные элементы могут иметь очень малые размеры. Например, они могут быть изготовлены в виде спеченных шариков диаметром 0,2 ... 0,5 мм или в виде пластинок, стерженьков и дисков примерно такого же размера. Полупроводник выдвинут как можно ближе вперед к рабочему концу термометра и защищен оболочкой с хорошей теплопроводностью (лучше всего из серебра). Защитный чехол изготавливают из коррозионностойкой стали с низкой теплопроводностью, изоляция во внутренней полости трубки выполнена из

кварцевого песка (рис. 12). Этим обеспечивается малая погрешность, связанная с теплопроводностью.

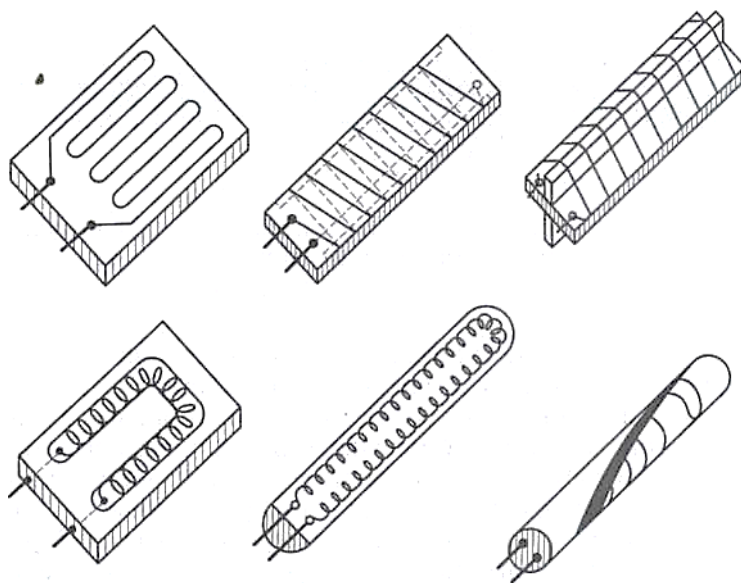


Рисунок 11 – Конструктивные исполнения чувствительных элементов металлических термометров сопротивления

Электрическая схема для термометров сопротивления. Для измерения сопротивления используют преимущественно схемы в виде мостов или логометров для определения отношения, питаемые постоянным, а иногда и переменным током.

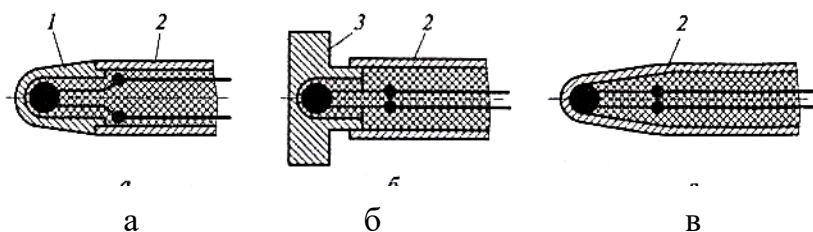


Рисунок 12 – Конструкции (а, б, в) чувствительных элементов полупроводниковых термометров сопротивления (термисторов):
1 – стекло; 2 – сталь; 3 – серебро

При использовании чувствительных элементов с малым номинальным сопротивлением R_0 (что наблюдается практически у всех металлических термометров сопротивления) и приборов с непосредственным отсчетом показаний, проградуированных в значениях температуры $\vartheta(^{\circ}\text{C})$ (например, измерительных приборов со скрещенными рамками), необходимо учитывать также собственное сопротивление измерительных проводов и клеммных контактов. Это делают при градуировке, причем с помощью подгоночного резистора R_a добиваются того, что дополнительное сопротивление контура в сумме с измеряемым сопротивлением всегда будет составлять 10 Ом (рис. 13).

Собственный нагрев термометров сопротивления. Под собственным

нагревом чувствительных элементов сопротивления понимают повышение температуры чувствительного элемента над измеряемой температурой окружающей среды вследствие выделения в них джоулевой теплоты при прохождении измерительного тока. Это превышение температуры является дополнительной измерительной погрешностью, зависящей не только от тока, но и от количества теплоты, которое может быть отведено в окружающую среду.

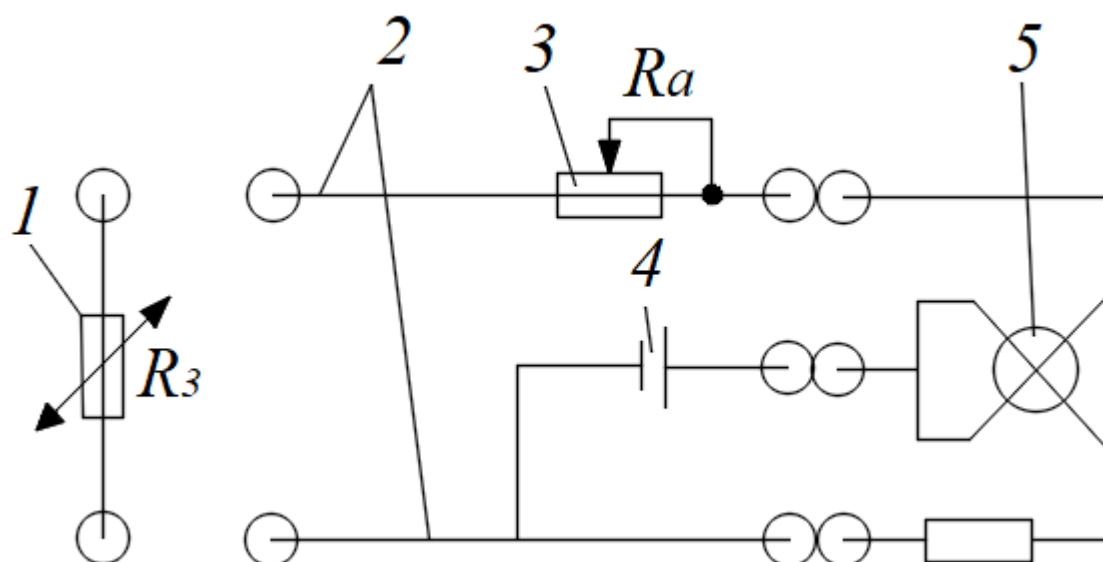


Рисунок 13 – Подгонка сопротивления соединительных проводов термометров сопротивления:

1 – чувствительный элемент; 2 – соединительные провода; 3 – подгоночное сопротивление R_a ; 4 – источник напряжения; 5 – измерительная система со скрещенными рамками

Теплоотдача определяется материалом и размерами чувствительного элемента, а также состоянием и термодинамическими свойствами окружающей среды. Фирмы, изготавливающие чувствительные элементы термометров, обычно указывают для каждого типа элемента максимально допустимые значения проходящего через него тока и падения напряжения на нем в виде диаграммы (рис. 14).

Чувствительный элемент может быть использован только в левой восходящей ветви характеристики, чтобы при определенных краевых условиях не возникло помех от его нагрева измерительным током. Например, платиновый чувствительный элемент (Pt 100) на керамическом каркасе в металлической трубке при прохождении через него тока 3 мА нагревается в неподвижной воде примерно на 0,01 ... 0,02 К, а в неподвижном воздухе – на 0,1 К; максимальный ток не должен превышать 10 мА. У малых терморезисторов NTC максимальный ток может составлять всего несколько микроампер.

Принцип действия основан на зависимости активного сопротивления проводников и полупроводников от температуры:

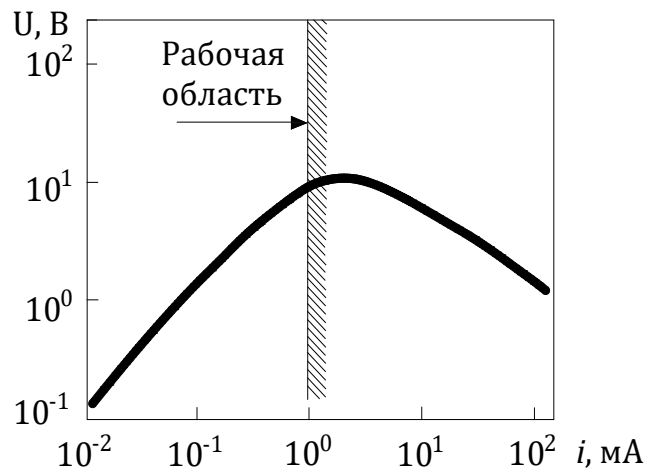


Рисунок 14 – Допустимые значения тока через термометр сопротивления и падение напряжения U на нем: (пример: температура окружающей среды считается постоянной)

$$R_t = R_0 e^{\alpha(t-t_0)}, \quad (26)$$

где R_0 – начальное сопротивление при 0°C ;

α – температурный коэффициент сопротивления

У проводников $\alpha > 0$, у полупроводников, как правило, $\alpha < 0$.

У проводников при изменении температуры на 10°C , сопротивление меняется на 4 %. Это связано с увеличением хаотического движения.

$$\alpha \approx 4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

$\alpha_{\text{манганина}} = 6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – т. е. можно считать, что он практически не меняет сопротивления от температуры.

Промышленные термометры изготавливают из платины, меди и никеля.

Платина – наиболее отвечает всем требованиям.

Она жаростойка ($-200 - 1100^\circ\text{C}$).

Статическая характеристика имеет вид:

1) для положительной температуры (27):

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2) \quad (27)$$

2) для отрицательной температуры (28):

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2 + c(t - 100)t^3), \quad (28)$$

где параметры a, b, c определяют по реперным точкам.

На основе платиновых термометров изготавливают образцовые (эталонные).

Медь – дешевая, легко получить в чистом виде, но легко окисляется, поэтому диапазон температур от -200 до $+200^\circ\text{C}$, зато можно пользоваться линейной формулой (29):

$$R_t = R_0(1 + \alpha t). \quad (29)$$

У меди высокий $\alpha = 4,28 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – положительное качество.

Недостаток – низкое удельное сопротивление, так как $\Delta R_t = R_t - R_0 = R_0 \alpha t$.

Но медь дешевая, поэтому получила распространение.

Никель – имеет высокий α , но его трудно получить в чистом виде. Наличие примесей искажает характеристики.

Промышленные термопреобразователи сопротивления представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Промышленные термопреобразователи сопротивления

Тип термометра	Начальное сопротивление, Ом	Обозначение	Диапазон температур, °C
ТСП – Термометры Сопротивления Платиновые	10	10П (Гр20)	-200 ÷ 1000
	(46)	(Гр21)	-260 ÷ 1000
	50	50П	-260 ÷ 1000
	100	100П (Гр22)	-260 ÷ 1000
ТСМ – Термометры Сопротивления Медные	10	10М	-50 ÷ 200
	50	50М	-50 ÷ 200
	(53)	(Гр23)	-50 ÷ 180
	100	100М (Гр24)	-200 ÷ 200

В скобках – старая градуировка.

ТС бывают пяти классов точности.

В ТСП используется платиновая проволока диаметром 0,07 мм внутри металлического каркаса.

В ТСМ медная проволока намотана на катушку бифилярно (провод сложен пополам, чтобы токи шли навстречу друг другу). Катушки диаметром 5 мм и длиной 20 мм.

По конструкции ТС бывают одинарные, двойные, многозонные.

По инерционности:

- малой инерционности (постоянная времени < 1 мин.);
- средней инерционности (постоянная времени = 1 мин.);
- большой инерционности (постоянная времени > 1 мин.).

2.4.2. Средства измерений, работающие в комплекте с термопреобразователями сопротивления

В практике технологических измерений температуры с использованием термопреобразователей сопротивления широкое применение нашли мосты (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и нормирующие преобразователи.

Для точных измерений температуры и метрологической аттестации термопреобразователей сопротивления, проводимых обычно в лабораторных условиях, получили применение потенциометры постоянного тока.

Уравновешенные мосты. Уравновешенные мосты (рис. 15) подразделяют на неавтоматические и автоматические. В них используется нулевой метод измерения. С помощью неавтоматических мостов, используемых в лабораторных условиях, измеряют сопротивление от 0,5 до 10^7 Ом, в частности, производят градуировку термопреобразователей сопротивления и измеряют температуру.

Схема уравновешенного моста показана на рис. 15. Диагональ питания моста ab содержит источник тока, а диагональ измерения dc нуль-индикатор, в частности, нуль-гальванометр. Между точками подключения разноименных диагоналей располагаются плечи моста, состоящие в данном случае из постоянных резисторов R_1 и R_2 и регулируемого R_3 , а плечо cb содержит измеряемое сопротивление R_t и два соединительных провода каждый сопротивлением $R_{вн}$. Если мост уравновешен, то ток $I_{ни}$ в диагонали cd равен нулю, а токи в соответствующих плечах равны, т. е. $I_2 = I_3$ и $I_1 = I_t$, и как следствие, имеем $-I_2 R_2 = I_1 R_1$ и $I_3 R_3 = I_t (R_t + 2R_{вн})$. Разделив два последних равенства друг на друга, с учетом равенства соответствующих токов получаем формулу:

$$R_2(R_t + 2R_{вн}) = R_1 R_3. \quad (30)$$

Полученное выражение, выведенное из условия $I_{ни} = 0$, предопределяет условие равновесия моста: чтобы мост находился в равновесии, необходимо соблюсти равенство произведений сопротивлений противоположных его плеч. Это достигается путем регулирования сопротивления резистора R_3 до тех пор, пока нуль-индикатор не покажет нуль.

Таким образом, при равновесии моста имеет место равенство (31):

$$R_t = \frac{R_1}{R_2} R_3 - 2R_{вн}. \quad (31)$$

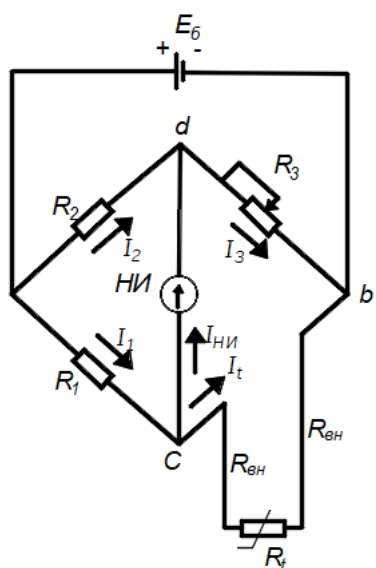


Рисунок 15 – Схема
уравновешенного
моста

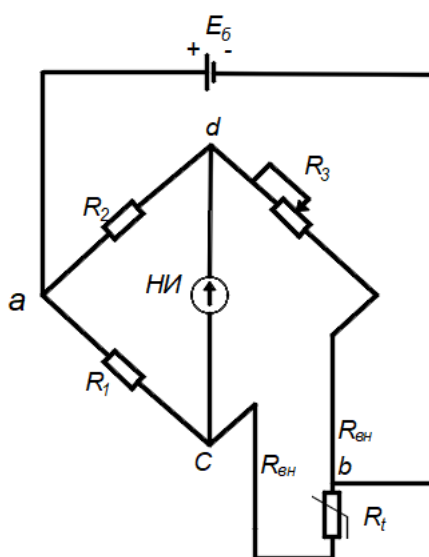


Рисунок 16 – Трехпроводная схема
соединения термопреобразователя
сопротивления с мостом

Из них следует, что неизвестное сопротивление R_t может быть определено по значению R_3 при постоянном отношении плеч R_2/R_1 , а также при неизменном значении $R_{вн}$. В то же время $R_{вн}$ изменяется с изменением температуры окружающей среды, что приводит к искажению результата измерения R_t и в тем большей степени, чем меньше значение R_t . Указанный недостаток может быть устранен путем трехпроводного соединения термопреобразователя сопротивления с мостом (рис. 16). При таком соединении питающая диагональ моста доводится (точка b) до термопреобразователя сопротивления. В результате этого соединительные провода оказываются разнесенными к двум плечам моста: одно из сопротивлений $R_{вн}$ – в плече вместе с сопротивлением R_3 , а другое $R_{вн}$ – в смежном плече вместе с R_t .

Тогда условие равновесия моста:

$$R_1(R_3 + R_{вн}) = R_2(R_t + R_{вн}), \quad (32)$$

откуда:

$$R_t = (R_1 / R_2)(R_3 + R_{вн}) - R_{вн}. \quad (33)$$

Если сделать мост симметричным ($R_1 = R_2$), то $R_t = R_3$, т. е. результат измерения R_t в этом случае не зависит от сопротивления соединительных проводов $R_{вн}$.

Недостатком уравновешенных мостов, собранных по указанным схемам (см. рис. 15 и рис. 16), является неопределенность в измерении, которую вносит переходное сопротивление контакта в регулируемом плече R_3 . Для устранения

этого недостатка подвижный контакт располагают в измерительной диагонали, при этом регулируемое сопротивление оказывается размещенным в двух плечах. Таким образом при уравнивании моста путем перемещения контакта изменяется сопротивление сразу обоих плеч, а переходное сопротивление контакта, располагаемое теперь в измерительной диагонали, из-за отсутствия тока в момент уравнивания не сказывается на результате измерения.

Достоинством уравновешенных мостов является независимость их от напряжения питания, минимально допустимое значение которого определяется чувствительностью нуль-индикатора.

Автоматический уравновешенный мост, собранный по схеме с переменным сопротивлением плеч и трехпроводным соединением термопреобразователя сопротивления с мостом, показан на рис. 17. Переменное сопротивление здесь содержит три параллельно соединенных резистора: R_p – собственно реохорд, выполняющий измерительные функции; $R_{ш}$ – шунт реохорда; $R_{п}$ – резистор для подгонки заданного значения параллельного соединения сопротивлений всей реохордной группы; $R_{пр}$, R_1 , R_2 , R_3 – резисторы мостовой схемы; R_d – добавочный резистор для подгонки тока из условия минимального самонагрева термопреобразователя сопротивления; R_6 – резистор балластный в цепи питания для ограничения тока; R_t – термопреобразователь сопротивления; R_d – резистор для подготовки сопротивления соединительной линии; m – положение движка реохорда правее точки d в долях от $R_{пр}$; n – положение движка реохорда левее точки d в долях от $R_{пр}$.

Для получения линейной зависимости положения движка реохорда от изменения сопротивления резистора R_t последний включается в плечо, прилежащее к реохорду.

В качестве нуль-индикатора *НИ* в автоматических мостах используется электронный усилитель ЭУ. Автоматические мосты питаются как переменным, так и постоянным током. В последнем случае на входе ЭУ устанавливается модулятор, подобно тому, как это делается в автоматических потенциометрах. При изменении температуры изменяется сопротивление R_t , и мост выходит из равновесия, т. е. в измерительной диагонали cd появляется напряжение дебаланса ΔU , которое усиливается усилителем ЭУ до значений, достаточных для вращения ротора.

Реверсивного двигателя *РД* в соответствующую сторону, в зависимости от знака дебаланса. Вал *РД*, связанный с движком реохорда, перемещает его до тех пор, пока дебаланс ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком перемещается каретка с пером и стрелкой, указывающей по шкале положение m движка или, что-то же, значение измеряемой температуры. При изменении температуры от минимального до максимального значения движок перемещается из одного крайнего положения в другое (для схемы, показанной на рис. 17, соответственно справа налево). Пусть при температуре, соответствующей начальному значению шкалы прибора, измеряемое сопротивление R_t равно $R_{tнач}$, а при изменении температуры $R_t = R_{tнач} + \Delta R_t$. Условия равновесия для двух этих случаев представляются в виде:

$$(R_{t_{нач}} + R_{л} + R_{д} + R_{пр})R_2 = (R_1 + R_{л})R_3 \quad (34)$$

И

$$(R_{t_{нач}} + R_{л} + R_{д} + R_{пр} - mR_{пр})R_2 = (R_1 + R_{л})(R_3 + mR_{пр}) \quad (35)$$

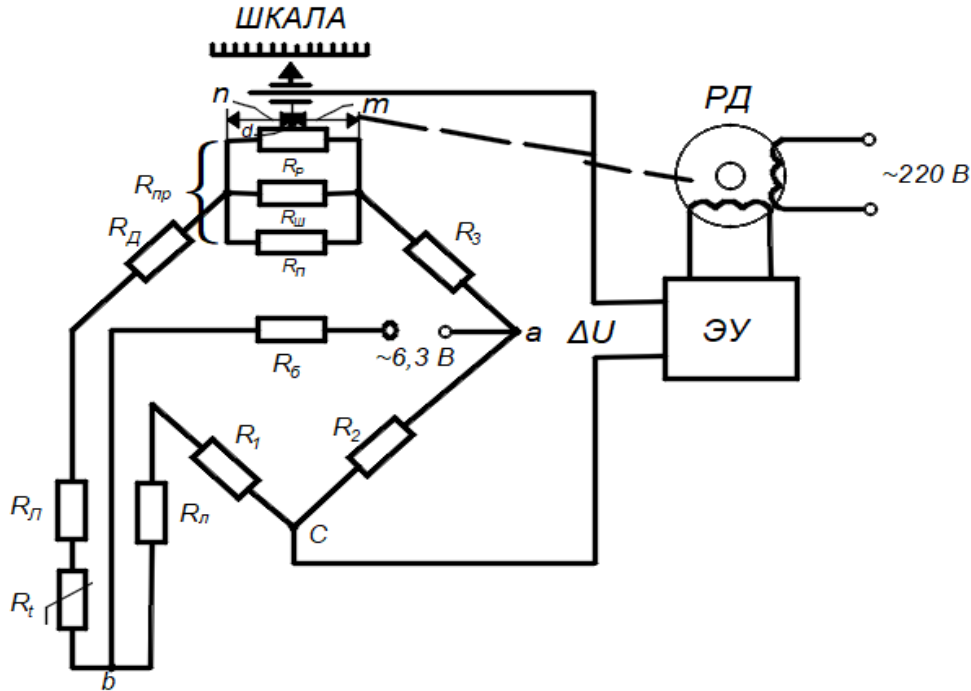


Рисунок 17 – Схема автоматического уравновешенного моста

Вычитывая из второго равенства первое и решая относительно m , получим:

$$m = \Delta R_t \frac{R_2}{R_{пр}(R_1 + R_{л} + R_2)}. \quad (36)$$

Отсюда видно, что m – линейная функция ΔR_t . Кроме того, из выражения (36) следует, что, несмотря на трехпроводную схему соединения термопреобразователя сопротивления с мостом, показания последнего зависят от изменения сопротивления соединительных проводов. Однако эта зависимость, как показывают расчеты [3], незначительна, и при изменении температуры окружающей среды до $t = 40^\circ\text{C}$ изменение сопротивления проводов $R_{л}$ приводит к изменению показаний прибора в пределах $(0,05-0,1)\%$ от нормирующего значения измеряемой величины для различных диапазонов измерения. Полностью отсутствует влияние сопротивления соединительных проводов при симметричном мосте, т. е. когда $R_1 = R_t + R_{д} + R_{пр} - mR_{пр}$. Так как это условие может быть реализовано лишь при одной измеряемой температуре, то обычно его выполняют для температуры $t_{сред}$, соответствующей середине диапазона шкалы. При этом:

$$R_1 \approx R_{t\text{сред}} + R_d + R_{\text{пр}}/2. \quad (37)$$

Назначение, устройство и принцип работы основных узлов автоматического моста – модулятора (при питании моста постоянным током), электронного усилителя, реверсивного двигателя, реохорда, записывающего устройства, привода диаграммы, переключателя (в многоточечных приборах) – такие же, как и в автоматических потенциометрах.

Выпускаемые в настоящее время автоматические мосты отличаются друг от друга назначением, конструкцией, размерами, точностью измерения и другими техническими характеристиками, например, мосты одноточечные и многоточечные, самопишущие и показывающие с ленточной, а также с дисковой диаграммой: полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные с шириной диаграммной ленты соответственно 250, 160 и 100 мм. Измерительная схема всех этих мостов незначительно отличается от схемы, приведенной на рис. 17. Классы точности автоматических мостов равны 0,25; 0,5 и 1, а время пробега стрелки всей шкалы 1; 2,5 и 10 с. В автоматические мосты встраиваются электрические и пневматические регулирующие устройства, а также устройства сигнализации; для дистанционной передачи показаний – преобразователи пневматические, токовые, частотные и др.

Неуравновешенные мосты. Неуравновешенные мосты не требуют уравнивания тока, проходящего в его измерительной диагонали. Значение этого тока является мерой подсоединенного к мосту измеряемого сопротивления. Это основное преимущество неуравновешенных мостов.

Неуравновешенные мосты относительно редко используются для измерения температуры. Они широко применяются в различных газоанализаторах, где в качестве чувствительного элемента используются нагреваемые электрическим током металлические или чаще полупроводниковые резисторы. В неуравновешенном мосте (рис. 18) сопротивления трех плеч R_1 , R_2 , R_3 – постоянны, R_6 – реостат в диагонали питания, Π – переключатель, с помощью которого к четвертому плечу моста подключается измеряемое сопротивление R_t (положение Π) или контрольное сопротивление R_k (положение K). Значение тока I_d , проходящего через миллиамперметр mA , определяется выражением (38):

$$I_d = U_{ab} \frac{R_2 R_t - R_1 R_3}{M}, \quad (38)$$

где $M = f(R_1, R_2, R_3, R_t)$.

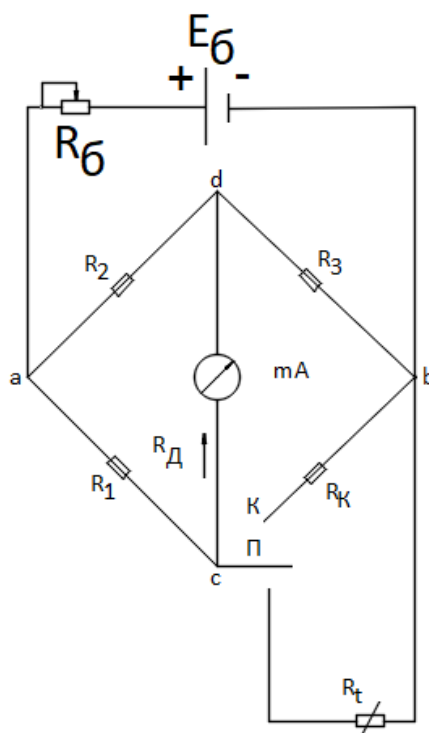


Рисунок 18 – Схема неуравновешенного моста

Несмотря на то, что M зависит также от изменяющегося сопротивления R_t , при его малых изменениях значение M можно считать постоянным. Тогда из (38) следует, что если напряжение в диагонали ab питания моста U_{ab} постоянно, то ток в измерительной диагонали cd линейно зависит от R_t . Для контроля постоянства значения U_{ab} переключатель из положения И время от времени устанавливают в положение К. Если значение напряжения U_{ab} равно значению, принятому при градуировке прибора, то в положении К значение тока I_d должно быть вполне определенным и стрелка миллиамперметра должна устанавливаться на контрольном значении шкалы, отмеченном цветной линией. В противном случае указанное достигается путем изменения сопротивления реостата R_6 . В последнее время применение стабилизированных источников питания (ИПС) вместо батарей постоянного тока исключает необходимость контрольных процедур проверки постоянства напряжения питания моста. Если в качестве измеряемого сопротивления R_t используются не полупроводниковые резисторы, то с целью исключения погрешности от влияния изменения сопротивления соединительных проводов при изменении их температуры применяют трехпроводную схему соединения R_t с мостом. Для этого точку b диагонали питания ab смещают до термопреобразователя сопротивления.

В приборах автоматического аналитического контроля часто бывает необходимо получить информацию о разности двух сопротивлений R_{t1} и R_{t2} . Для этого указанные сопротивления включают в прилегающие плечи неуравновешенного моста, сигнал которого в данном случае представится в виде $I_d = k(R_{t1} - R_{t2})$, где k – коэффициент преобразования.

Логометры. Логометры магнитоэлектрической системы используются в комплекте с термопреобразователями сопротивления для измерения температуры.

Логометр со скрещенными рамками (рис. 19) состоит из двух жестко закрепленных между собой рамок 1 и 2, изготовленных из медных изолированных проволок сопротивлением R_1 и R_2 . На общей оси рамок насажена стрелка прибора 3. В кольцевом воздушном зазоре между цилиндрическим сердечником из мягкой стали 4 и полюсными наконечниками вращаются активные стороны рамок. В отличие от милливольтметра, воздушный зазор между сердечником и полюсными наконечниками неравномерен, и потому магнитное поле здесь распределяется неравномерно.

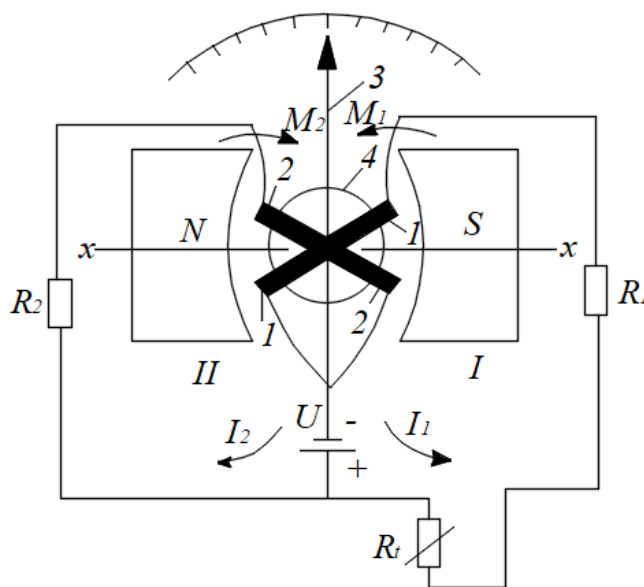


Рисунок 19 – Схема магнитоэлектрического логометра

Так, воздушный зазор на оси x – x минимален и увеличивается по обе стороны от этой оси. В соответствии с этим магнитная индукция в центре максимальна и уменьшается примерно по квадратичному закону по мере удаления от центра к краям полюсных наконечников. Таким образом, магнитная индукция B , пронизывающая активные стороны рамок, является функцией угла поворота рамок φ , т. е. $B = f(\varphi)$. Токи I_1 и I_2 , проходящие соответственно в рамках 1 и 2, направлены так, что возникающие в них моменты M_1 и M_2 направлены навстречу друг другу. Значение каждого из моментов может быть выражено зависимостями $M_1 = cI_1B_1$ и $M_2 = cI_2B_2$, где c – постоянный коэффициент, зависящий от геометрии рамок; B_1 и B_2 – магнитная индукция, пронизывающая рамки 1 и 2 соответственно.

Отличием логометра от милливольтметра является то, что здесь нет противодействующих повороту рамок пружин, а уравнивание момента, действующего в одной из рамок, происходит за счет момента другой рамки. С целью исключения погрешности измерения токоподводы рамок выполняют

безмоментным, например, из тонкой золотой ленты, или маломоментными – из бронзовой проволоки малого диаметра.

Рассмотрим работу логометра. Пусть например, при изменении сопротивления R_t увеличится ток I_1 , что приведет к увеличению момента M_1 , который начнет поворачивать подвижную систему против движения часовой стрелки. При этом окажется, что активные стороны рамки 1 будут перемещаться из поля большей магнитной напряженности в поля с меньшей напряженностью. Активные же стороны рамки 2, наоборот, из поля с меньшей магнитной напряженностью – в поле с большей напряженностью. В процессе этого перемещения момент M_1 будет уменьшаться, а M_2 расти вследствие уменьшения B_1 и роста B_2 . При некотором угле поворота подвижной системы φ наступит состояние равновесия:

$$M_1 = M_2 \text{ или } cI_1B_1 = cI_2B_2,$$

откуда:

$$I_2/I_1 = B_1/B_2 = \phi(\varphi) \quad (39)$$

или

$$\varphi = F(I_2/I_1). \quad (40)$$

Из (40) следует, что угол поворота подвижной системы φ , или показание логометра, определяется отношением (по-гречески, логус) двух токов, что объясняет название прибора – логометр.

Выражая каждый из токов I_1 и I_2 через напряжение питания контуров U и соответствующие сопротивления, имеем:

$$\varphi = F\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = F\left[\frac{U/(r_2+R_2)}{U/(R_t+r_1+R_1)}\right] = F\left(\frac{R_t+r_1+R_1}{r_2+R_2}\right). \quad (41)$$

В уравнении (41) величины r_1, R_1, r_2, R_2 – постоянные, поэтому $\varphi = \phi(R_t)$, т. е. в рассматриваемом случае логометр измеряет сопротивление R_t . Ввиду того, что логометр непосредственно измеряет отношение двух токов, генерируемых от одного источника, изменение напряжения его в определенных пределах не влияет на показания прибора. Это его преимущество. Так как рамки 1 и 2 выполнены из меди, то при изменении температуры окружающей среды сопротивления рамок изменяются, что отражается на показаниях прибора. Для уменьшения влияния температуры последовательно с сопротивлениями r_1 и r_2 рамок включаются добавочные резисторы с сопротивлениями R_1 и R_2 , выполненные из манганина. Значения этих сопротивлений много больше, чем r_1 и r_2 . Однако при этом условии вследствие уменьшения токов уменьшается чувствительность логометра. Для увеличения чувствительности логометра и одновременно уменьшения температурного коэффициента прибора используют

схему симметричного неравновесного моста, в диагональ которого включаются рамки логометра (рис. 20).

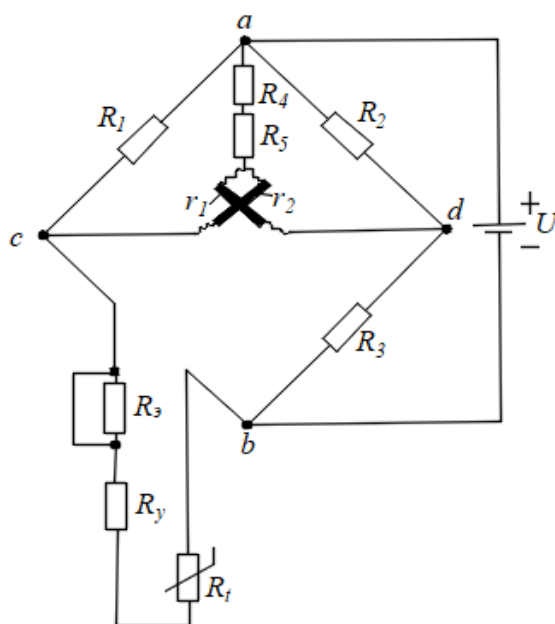


Рисунок 20 – Схема логометра, включенного в мостовую схему

Здесь сопротивления резисторов симметричных плеч попарно равны, т. е. $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_t$ при значении R_t , соответствующем середине диапазона измерения по шкале; R_5 – сопротивление для изменения пределов измерения; R_4 – медное сопротивление для температурной компенсации; R_3 и R_y – соответственно эквивалентное и уравнивающее сопротивления, служащие для подгонки сопротивления соединительной линии. Приведенная схема позволяет для логометров класса точности 1,5 иметь дополнительную погрешность не более $\pm 0,75$ % от значения диапазона измерения на каждые 10°C изменения температуры окружающей среды в пределах от 5 до 50°C . Подключение измеряемого сопротивления R_t к логометру можно осуществлять как по двухпроводной, так и (при необходимости) по трехпроводной схеме.

Логометры бывают показывающими, самопишущими, многоточечными и, кроме того, могут иметь встроенные устройства для сигнализации и регулирования. Классы точности промышленных логометров: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5.

Нормирующие преобразователи. Для введения информации, получаемой с помощью термопреобразователя сопротивления, в ЭВМ или в систему автоматического регулирования используются нормирующие токовые преобразователи, формирующие на своем выходе сигнал постоянного тока $0...5$ мА. Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления, показана на рис. 21. Этот преобразователь по схеме и принципу действия аналогичен нормирующему преобразователю, работающему в комплекте с термоэлектрическим преобразователем. Отличие указанных схем заключается в том, что в преобразователе (рис. 21) вместо корректирующего моста $KМ$ используется

измерительный неравновесный мост $ИМ$, в одно из плеч которого по трехпроводной схеме подсоединен термопреобразователь сопротивления R_t . Остальные сопротивления выполнены из манганина.

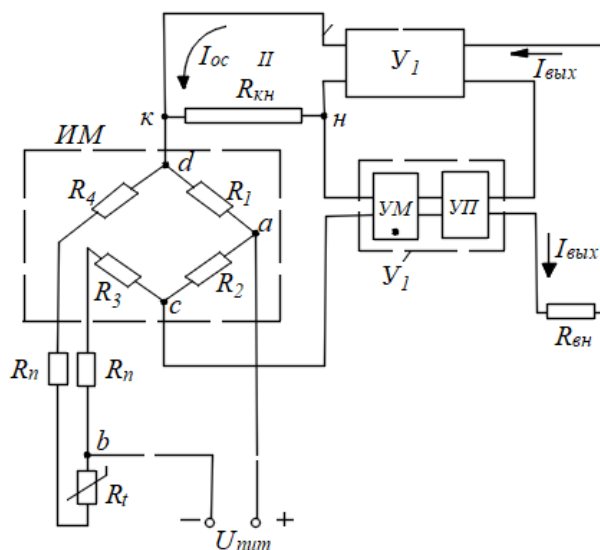


Рисунок 21 – Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления

Сопротивления R_n служат для подгонки сопротивления соединительных проводов к номинальному значению. К диагонали питания моста ab подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Выходной ток преобразователя $I_{\text{вых}}$ пропорционален напряжению U_{cd} в измерительной диагонали моста, и соотношение между ними может быть представлено:

$$I_{\text{вых}} = kU_{cd}. \quad (42)$$

Так как $U_{cd} = k_M R_t$, где k – коэффициент преобразования моста, то:

$$I_{\text{вых}} = kk_M R_t. \quad (43)$$

Таким образом, токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален сопротивлению термопреобразователя сопротивления. Классы точности рассматриваемого преобразователя 0,6-1,5.

2.4.3. Термоэлектрические термометры (термопары)

Термоэлектрический эффект. Зеебек установил, что если электрическая цепь состоит из двух различных металлов или сплавов и точки их соединения (спаи) находятся при различных температурах, то в цепи должен протекать ток (рис. 22). При размыкании цепи на ее концах можно измерить разность потенциалов – так называемую термоэлектродвижущую силу (термоЭДС).

Если же через такую цепь пропускать ток, то в зависимости от направления этого тока в одной точке соединения проводников будет выделяться, а в другой

– поглощаться теплота (эффект Пельтье). Если температура одной точки соединения (спая) $\vartheta >$ известна, то получаемая термоЭДС будет мерой разности между измеряемой температурой и контрольной температурой D_0 (холодного спая). Оба места соединения называют также рабочим (горячим) и свободным (холодным) спаем.

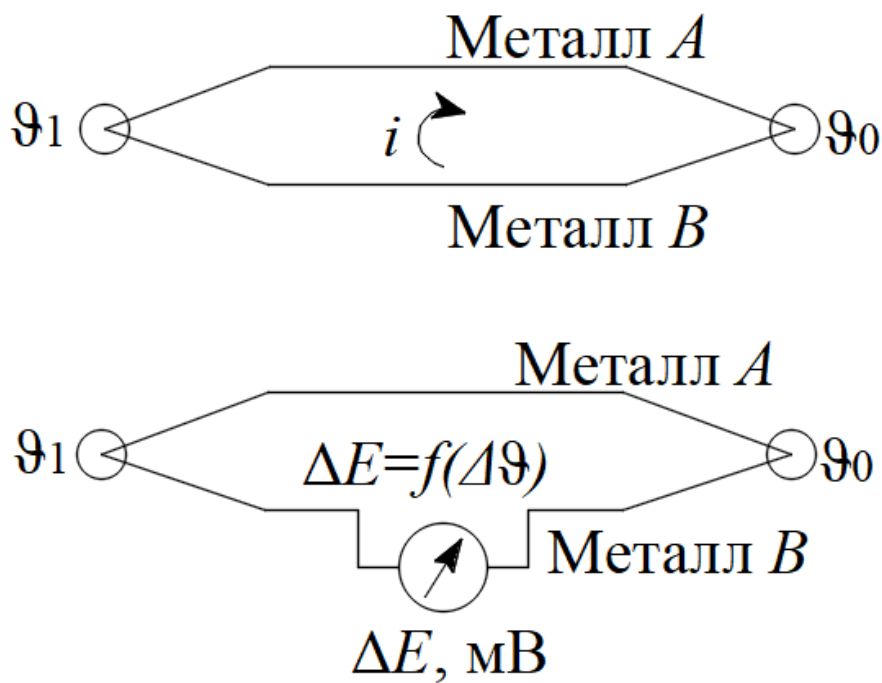


Рисунок 22 – Термоэлектрический эффект Зеебека

Зависимость между термоЭДС и разностью температур в общем случае нелинейна и может быть выражена уравнением третьей степени. Однако в области температур, обычных при промышленных измерениях, обычно достаточно принять квадратичную зависимость (45):

$$\Delta E = a + b\Delta\vartheta + c\Delta\vartheta^2. \quad (44)$$

Постоянные a , b и c зависят, в первую очередь, от природы обоих металлов или сплавов. Их можно определить путем градуировки в реперных точках. При малых изменениях температур характеристики многих термопар могут быть линеаризованы без большого ущерба для точности:

$$\Delta E = k\Delta\vartheta \text{ [мВ]}, \quad (45)$$

где k – коэффициент термоЭДС, зависящий также от уровня температуры, мВ/К.

Используя уравнение (45) для термоЭДС, можно для каждой комбинации материалов термопары построить график зависимости термоЭДС термопары от измеряемой температуры (температуры рабочего спая), полагая, что температура ее свободного спая равна 0°C (рис. 23а). Если контрольная температура не равна 0°C , а поддерживается постоянной (как это часто бывает), равной 20, 50 или

60 °С, или не постоянной (как при измерении разности температур), то в измеренное значение термоЭДС ΔE_m нужно внести поправку ΔE_k , которая соответствует отклонению контрольной температуры ϑ_0 от 0 °С:

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta E_k. \quad (46)$$

Значения термоЭДС в зависимости от измеряемой температуры, а также допустимые отклонения при поставке (рис. 23б) регламентируются для основных комбинаций материалов фирмами-изготовителями и национальными управлениями по стандартизации и указываются в специальных таблицах (при $\vartheta_0 = 0$ °С). Эти допуски считаются гарантированными при поставках, но к погрешностям при последующих измерениях они не относятся.

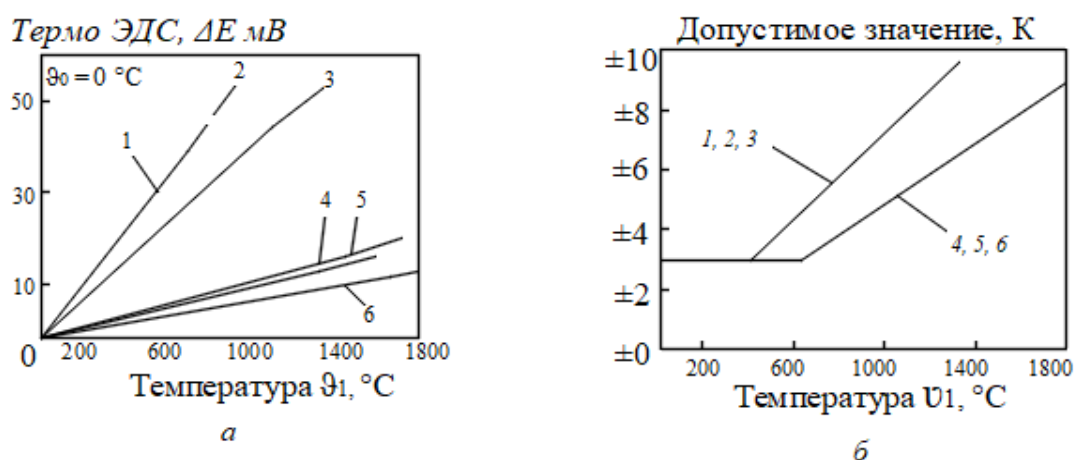


Рисунок 23 – Основные величины термоЭДС в средней области температур:

- а* – зависимости термоЭДС от температуры; *б* – допустимые отклонения;
 1 – медь-константан; 2 – железо-константан; 3 – нихром-никель (хромель-алюмель); 4 – платинородий (13 % родия)-платина;
 5 – платинородий (10 % ВП)-платина; 6 – платинородий (30 % ВВ)-платинородий (6 % родия, PtRh 18)

Материалы термоэлектродов. Выбирать подходящую термопару для измерения определенной температуры следует с учетом различных требований, причем в отношении некоторых требований приходится принимать компромиссные решения. К термоэлектродам предъявляются следующие требования: высокая чувствительность к изменениям температуры (высокий коэффициент термоЭДС), линейность характеристики термоЭДС, благоприятные динамические свойства (малая инерционность), достаточная механическая прочность при высоких и низких температурах, стойкость к коррозии, стабильность термоэлектрических свойств во времени. Все материалы для термопар подразделяются на две группы: термопары из благородных металлов и термопары из неблагородных металлов. *Термопары из благородных металлов*, преимущественно из платины и ее сплава с родием (PtRh-Pt и Pt3Rh-Pt6Rh), обладают высокой точностью и отличаются воспроизводимостью

термоэлектрической характеристики. Поэтому платинородий-платиновая термопара Pt10Rh-Pt используется для воспроизведения Международной практической температурной шкалы в интервале температур от 630,7 до 1064,4 °С. Эти термопары более устойчивы к коррозии и окислению, чем термопары из неблагородных металлов, поэтому они могут быть использованы при более высоких температурах. Так, термопары Pt10Rh-Pt используются для измерения температур от 0 до 1600 °С, а термопары Pt13Rh-Pt6Rh используются для измерения температур от 0 до 1700 °С.

Термопары из неблагородных металлов применяются преимущественно для измерения более низких температур. Они дешевле термопар из благородных металлов, и на их долю приходится абсолютное большинство всех применяемых термопар. К таким термопарам относятся медь-константан, железо-константан и нихром-никель (хромель-алюмель).

Термопары медь-константан (Cu-Konst) особенно пригодны для измерения низких температур от -250 до +400 °С. При более высоких температурах медь не обладает достаточной стойкостью к кислороду воздуха. Эти термопары, наряду с железо-константановыми, имеют наиболее крутую температурную характеристику, но их характеристика недостаточно линейна.

Железо-константановые термопары (Fe-Konst) допускают более широкий диапазон измерения от -250 до +700 °С, если коррозионно-активная среда не препятствует их применению (при некоторых условиях железо сильно ржавеет и покрывается окалиной). Постоянство термоэлектрических свойств во времени тоже надежно не обеспечивается.

Термопары нихром-никель (почти то же, что хромель-алюмель) имеют среди термопар из неблагородных металлов самый высокий температурный диапазон измерения от -200 до +1300 °С. Эти термопары отличаются точностью и устойчивостью, однако их температурный коэффициент термоЭДС меньше, чем термопар медь-константан и железо-константан. Характеристика их в достаточной степени линейна.

На диаграмме (см. рис. 23а) характеристики термопар в области повышенных температур изображены штриховыми линиями. Это означает, что термопары при этих условиях могут быть использованы ограниченно (либо в защитной атмосфере, либо на короткое время).

Устройство термоэлектрических термометров (конструктивные формы). Надежность измерения температуры с помощью термоэлектрических термометров зависит от их конструкции, расположения и возможности их контакта с измеряемой средой. Если физические и химические условия допускают это, то термопара может быть введена в измеряемую среду без защитной оболочки (чехла). В этом случае она имеет преимущество перед другим контактными термопарами, поскольку ее можно разместить в самых труднодоступных местах, а ее размеры могут быть приняты практически сколь угодно малыми, чем обеспечивается благоприятное динамическое поведение (малая инерционность). При высоких температурах или агрессивных средах термопара должна быть помещена в защитную арматуру (чехол).

Схемы подключения термоэлектрических термометров. Длину

термопар в связи с их высоким сопротивлением, а также с учетом их стоимости следует принимать как можно меньшей. Поэтому место подключения так называемого компенсационного, или термоэлектродного провода (кабеля) предусматривают в непосредственной близости от места измерения – обычно в подсоединительной головке защитной трубы. К компенсационным проводам предъявляется меньше требований, поскольку они не подвергаются воздействию неблагоприятных условий окружающей среды. По термоэлектрическим свойствам они идентичны термоэлектродам, так что в местах соединения не может возникнуть разность напряжений.

На рис. 24 представлены схемы подключения термоэлектрических термометров. Наиболее простая схема подключения термопар получается при непосредственном подсоединении термоэлектродных проводов к показывающему прибору (рис. 24а). При этом место сравнительного измерения («холодный спай») переносится к клеммам измерительного прибора, температура которых неизвестна, а обычно также и непостоянна. Вследствие этого такой метод неточен и ненадежен; его следует применять только для ориентировочных измерений.

В правильной схеме (рис. 24б) должно быть предусмотрено отдельное место для свободных концов термопары («холодный спай»), температура которого (сравнительная температура) поддерживается термостатом постоянной, обычно равной 50 °С.

В том же корпусе обычно подключают к прибору провода, которые могут быть медными, если все клеммы имеют одинаковую температуру ϑ .

На рис. 24 в...ж приведены схемы измерения разности температур (встречное включение термопар), увеличения измеряемой термоЭДС (последовательным включением нескольких термопар в виде «термостолбика»), формирования среднего значения (при параллельном включении термопар) и контроля нескольких температур одним из показывающих устройств (переключатель точек измерения, логометр, сканирующий мультиплексор).

При лабораторных измерениях температуру свободного конца термометра (холодного спая ϑ_0) лучше всего поддерживать постоянной, равной 0 °С, используя сосуд Дьюара, заполненный тающим льдом.

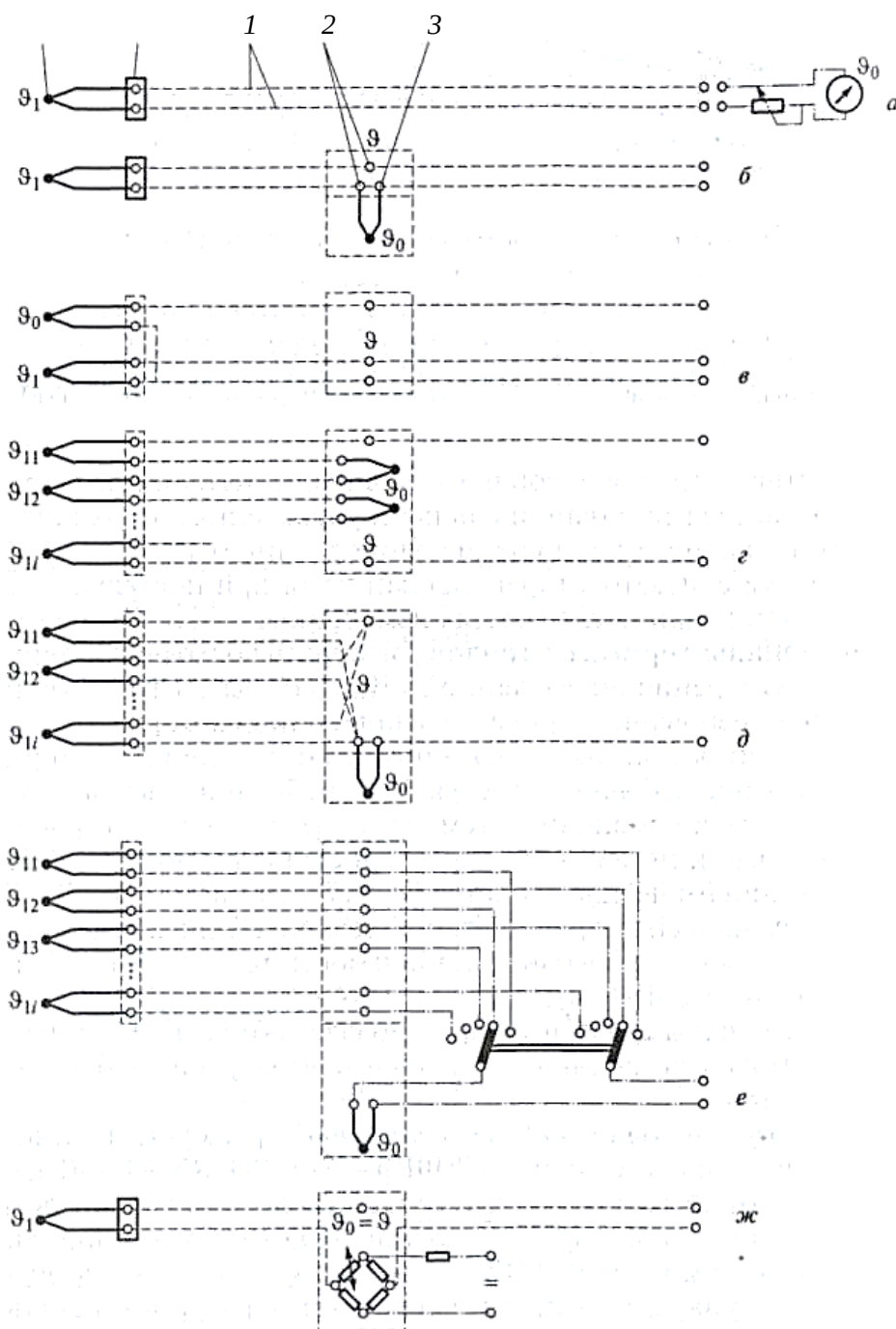


Рисунок 24 – Схема подключения термоэлектрических термометров (термопар):

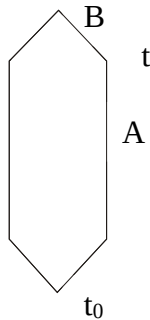
а – схема, требующая минимальных затрат; *б* – обычное подключение; *в* – подключение для измерения разности температур; *г* – последовательное включение нескольких термопар (термобатарея); *д* – параллельное подключение; *е* – схема с переключением точек измерения (логометром); *жс* – автоматическая компенсация температуры свободных концов термопары;

1 – собственно термопара; 2 – место подключения термоэлектродов к термоэлектродным проводам; 3 – термоэлектродные провода; 4 – место свободных концов термопары (холодный спай; все клеммы должны находиться при одной и той же температуре); штрихпунктирной линией обозначены медные провода

Термоэлектрические преобразователи. Принцип действия основан на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух или нескольких разнородных проводников возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения этих проводников имеют различную температуру – эффект Томпсона показан на рис. 25.

Обратный эффект Пельтье: Если пропускать электрический ток через место соединения проводников, то в зависимости от направления тока это место может нагреваться или охлаждаться.

Термопара



Место соединения – спай.

$$E(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0)$$

$$\text{при } t = t_0, E(t, t_0) = 0$$

$$e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$$

$$E(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Рисунок 25 – Спай

Для измерения этой ЭДС термопару необходимо разорвать. Свободные концы термопары соединены проводником, как показано на рис. 26.

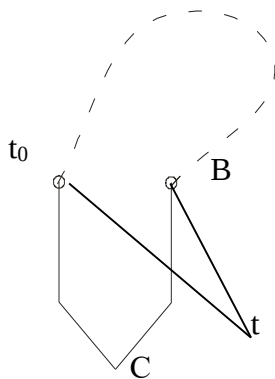


Рисунок 26 – Свободные концы термопары

$$E(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$$

$$\text{при } t = t_0, E(t, t_0) = 0$$

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$$

$$E(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Включение третьего проводника в цепь термопары не изменяет ее ЭДС, если точки подключения этого проводника имеют одинаковые температуры.

Пусть температура свободных концов изменится и станет t'_0 , тогда:

$$E(t, t'_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t'_0),$$

$$\Delta E(t'_0, t_0) = E(t, t_0) - E(t, t'_0),$$

$$\Delta E(t'_0, t_0) = e_{AB}(t'_0) - e_{AB}(t_0) - \text{поправка на}$$

температуру свободных концов термопары.

Для стандартных термопар существуют градуировочные таблицы. По ним выбирают поправки.

Если $t'_0 > t_0$, то поправка со знаком +.

Если $t'_0 < t_0$, то поправка со знаком –.

Чтобы ввести поправку, нужно знать температуру свободных концов.

Для удлинения термопары используют термоэлектродные провода.

Они должны быть термоподобны материалу термопары. Это значит, что, если соединить провода, то в интервале 0...100 °С они должны развивать такую же ЭДС, как и термопара.

ТПП (платинородий-платиновая термопара) – термоэлектродные провода из меди и медно-никелевого сплава.

ТПР (платинородий-платинородиевая) – не требует термоэлектродных проводов. Можно соединять любыми проводами. Не требует внесения поправки на температуру свободных концов.

ТХА (хромель-алюмелевая) – термоэлектродные провода из меди и константана.

ТХК (хромель-копелевая) – наиболее чувствительная термопара. Развивает самую большую ЭДС на 1°. Термоэлектродные провода из того же самого материала (хромель-копель).

ТВР (вольфрамрений-вольфрамрениевая) – термоэлектродные провода из меди и медно-никелевого сплава ТМК (медь-копелевая).

Стандартные термоэлектрические преобразователи представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Стандартные термоэлектрические преобразователи

Тип	Обозначение	Материалы электродов		Диапазон температур, °С
		положительный	отрицательный	
ТПП	ПП (S)	Платинородий (сплав 90 % платины, 10 % родия)	Платина	0 ÷ 1300 (1600)
ТПР	ПР (B)	Платинородий (70 % платины, 30 % родия)	Платинородий (94 % платины, 6 % родия)	300 ÷ 1600 (1800)
ТХА	ХА (K)	Хромель (90,5 % никеля, 9,5 % хрома)	Алюмель (94,5 % никеля, 5,5 % алюминия, марганец, кремний, кобальт)	-200 ÷ 1000 (1300)
ТХК	ХК (L)	Хромель	Копель (56,5 %, медь, 43,5 % никель)	-50 ÷ 600 (800)
ТВР	ВР (A)	Вольфрам-рений (95 % вольфрама, 5 % рения)	Вольфрам-рений (80 % вольфрама, 20 % рения)	0 ÷ 2200 (2500)
ТМК	МК (M)	Медь	Копель	-200 ÷ 100

Температуры в скобках – при кратковременном использовании.

2.4.4. Средства измерений сигналов термоэлектрических термометров

В качестве средств измерений, работающих в комплекте с ТЭП, используются милливольтметры магнитоэлектрической системы, потенциометры и нормирующие преобразователи.

Магнитоэлектрический милливольтметр. Схема его измерительного механизма показана на рис. 27. Механизм состоит из рамки 2, вращающейся в кольцевом зазоре между полюсными наконечниками постоянного магнита NS и цилиндрическим сердечником 1 из мягкой стали. Рамка 2 вместе со стрелкой 7 для отсчета показаний по шкале 6 прибора закреплены на кернах 5, опирающихся на подпятники 3. Установленные на кернах спиральные пружинки 4, создающие противодействующий повороту рамки момент, крепятся одним концом к оси 5,

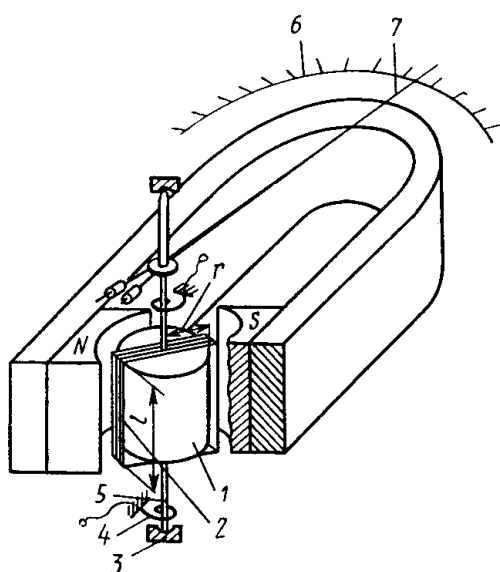


Рисунок 27 – Схема измерительного механизма магнитоэлектрического милливольтметра

а другим – к неподвижной части прибора. Кроме того, эти пружинки являются токоподводящими элементами рамки. Рамка, закрепленная на кернах, изготавливается как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения.

Для обеспечения большей чувствительности милливольтметров, гальванометров и самопишущих милливольтметров их рамка крепится на вертикальных ленточных растяжках из фосфористой бронзы. Эти ленты при повороте рамки, скручиваясь, создают противодействующий момент, и одновременно по ним осуществляется подвод тока в рамку. Рамка представляет собой прямоугольник длиной l и шириной $2r$ и состоит из n витков тонкой медной проволоки, скрепленных между собой лаком. Благодаря

сердечнику 1, расположенному внутри рамки, последняя оказывается под действием равномерного и радиального магнитного поля, в силу чего, независимо от угла поворота рамки, плоскость ее оказывается параллельной вектору магнитной индукции B . Таким образом, при протекании по рамке электрического тока I на подвижную систему действует магнитоэлектрический момент:

$$M_{мэ} = 2rlBI. \quad (47)$$

Противодействующий момент $M_{пр}$, создаваемый спиральной пружиной или подвеской:

$$M_{пр} = W_{\varphi}, \quad (48)$$

где W – удельный противодействующий момент.

При некотором угле поворота φ имеем: $M_{\text{пр}} = M_{\text{мэ}}$, т. е.

$$W_{\varphi} = 2rlBI \text{ или } \varphi = \frac{2rlB}{W}I + S_1I, \quad (49)$$

где $S_1 = 2rlB/W = \varphi/I$ – чувствительность измерительного механизма к току, рад/А.

Для получения зависимости угла поворота рамки от напряжения U , подведенного к зажимам прибора с внутренним сопротивлением R_M , из (50) имеем:

$$\varphi = S_1 \frac{U}{R_M} = S_U U, \quad (50)$$

где $S_U = S_1/R_M = \varphi/U$ – чувствительность прибора к напряжению.

Из (49) следует, что чувствительность прибора к напряжению тем меньше чувствительности к току, чем больше внутреннее сопротивление прибора.

Измерение термоЭДС милливольтметром осуществляется по схеме рис. 28. Генерируемая ТЭП термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ создает в замкнутой цепи ток:

$$I = \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{AB} + R_{FD} + R_C + R_y + R_p + R_d} = \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{\text{вн}} + R_M}, \quad (51)$$

где R_{AB} , R_{FD} , R_C , R_y , R_p , R_d – сопротивления термоэлектродов AB , удлинительных проводов FD , соединительных линий C , уравнивательной катушки, рамки милливольтметра и добавочной катушки соответственно;

$R_{\text{вн}} = (R_{AB} + R_{FD} + R_C + R_y)$ – внешнее по отношению к зажимам ab прибора сопротивление цепи;

$R_M = (R_p + R_d)$ – внутреннее сопротивление милливольтметра.

Представим (51) в виде:

$$U_{ab} = IR_M = E_{AB}(tt_0) - IR_{\text{вн}}. \quad (52)$$

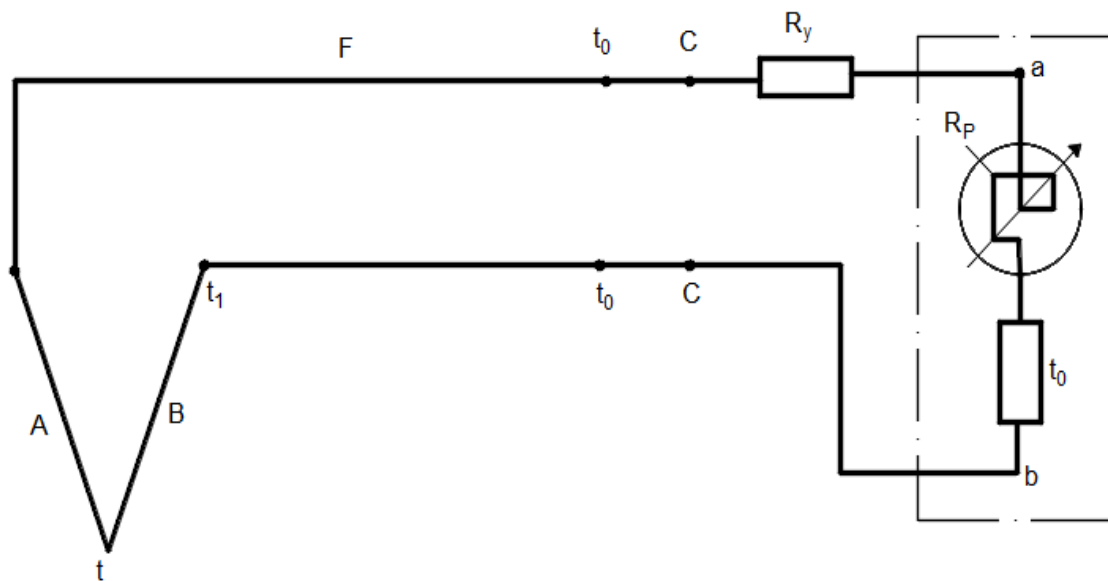


Рисунок 28 – Схема измерения термоЭДС милливольтметром

Из (53) можно заключить, что измеряемое милливольтметром напряжение U_{ab} , подведенное к его зажимам ab , всегда меньше, чем ЭДС в цепи, на значение падения напряжения IR_{BH} во внешней цепи, обусловленного проходящим в контуре током.

В силу того, что сведение к нулю IR_{BH} при использовании милливольтметра невозможно, принципиально невозможно непосредственное измерение ЭДС милливольтметром. В то же время при соблюдении определенных условий измерения с некоторой погрешностью можно принять, что показания милливольтметра однозначно зависят от развиваемой в цепи термоЭДС. Подставляя (51) в (49), имеем:

$$\varphi = S_1 \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{BH} + R_M}. \quad (53)$$

Отсюда следует, что если бы имело место $R_{BH} + R_M = const$, то между показанием φ милливольтметра и измеряемой ЭДС была бы однозначная зависимость и шкалу милливольтметра можно было бы градуировать в градусах, соответствующих термоЭДС для данного преобразователя AB . В то же время, как R_{BH} , так и R_M изменяются в зависимости от температуры окружающей среды, что приводит к погрешности измерения. Покажем, что уменьшение указанной погрешности может быть достигнуто путем уменьшения отношения R_{BH} / R_M и уменьшения R_p / R_M . Преобразуем (51) к виду:

$$U_{ab} = IR_M = \frac{E_{AB}(tt_0)}{1 + R_{BH}/R_M}. \quad (54)$$

Из выражения (54) видно, что чем меньше отношение R_{BH}/R_M по сравнению с единицей, тем в меньшей мере изменение этого отношения, вызванного, например, изменением температуры окружающей среды, сказывается на линейной связи между U_{ab} и $E_{AB}(tt_0)$. Уменьшение отношения R_{BH}/R_M возможно за счет увеличения R_M . Так как рамка милливольтметра выполнена из медного провода с сопротивлением R_p , то R_M увеличивают за счет увеличения последовательно соединенного с рамкой добавочного сопротивления R_d , выполненного в виде манганиновой катушки. Значительное увеличение R_M приводит к уменьшению чувствительности S_U милливольтметра. Обычно $R_M = 100 \div 500$ Ом, а отношение $R_{BH}/R_M \leq 1/3$, что значительно уменьшает температурный коэффициент прибора. Значение R_{BH} стандартизовано в пределах $0,6 \div 25$ Ом и указано на шкале прибора.

Таким образом, использование градусной шкалы милливольтметра возможно, если градуировка ТЭП соответствует градуировке, указанной на шкале. При этом необходимо сопротивление внешней линии подогнать к значению R_{BH} , указанному на шкале прибора, с помощью подгоночного сопротивления R_y . Если милливольтметр имеет милливольттовую шкалу, то она наносится без учета сопротивления внешней линии и показания по шкале соответствуют напряжению на зажимах, т. е. U_{ab} , по которому при известных R_{BH} и R_M определяют из (54) термоЭДС для ТЭП любой градуировки, а затем значение измеряемой температуры по градуировочным таблицам.

Милливольтметры, предназначенные для работы в комплекте с ТЭП, по конструктивному исполнению бывают переносными и стационарными (щитовыми).

Стационарные милливольтметры имеют только градусную шкалу. Промышленностью выпускаются показывающие, самопишущие и регулирующие милливольтметры классов точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

Переносные милливольтметры имеют две шкалы (градусную и милливольттовую) или только одну милливольттовую. Эти приборы выполняют как показывающие и имеют классы точности: 0,2; 0,5; 1,0.

Потенциометры. Принцип действия этих приборов основан на уравнивании (компенсации) неизвестной ЭДС известным падением напряжения, создаваемым током от дополнительного источника. Схема, поясняющая компенсационный метод измерения ЭДС, показана на рис. 29. Замкнутый контур *I* содержит дополнительный источник тока напряжением E_6 и реохорд (компенсационный резистор) R_{ab} . Этот контур называют компенсационным. Контур измерения *II* включает в себя ТЭП, термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ которого измеряется, и высокочувствительный гальванометр, выполняющий функцию нуль-индикатора (НИ), а также часть R_{ac} реохорда от точки *a* до подвижного контакта движка *c*. Функция нуль-индикатора состоит в обнаружении тока в цепи. Измеряемый источник $E_{AB}(tt_0)$ включен навстречу дополнительному источнику E_6 так, что токи от обоих источников на участке R_{ac} идут в одном направлении.

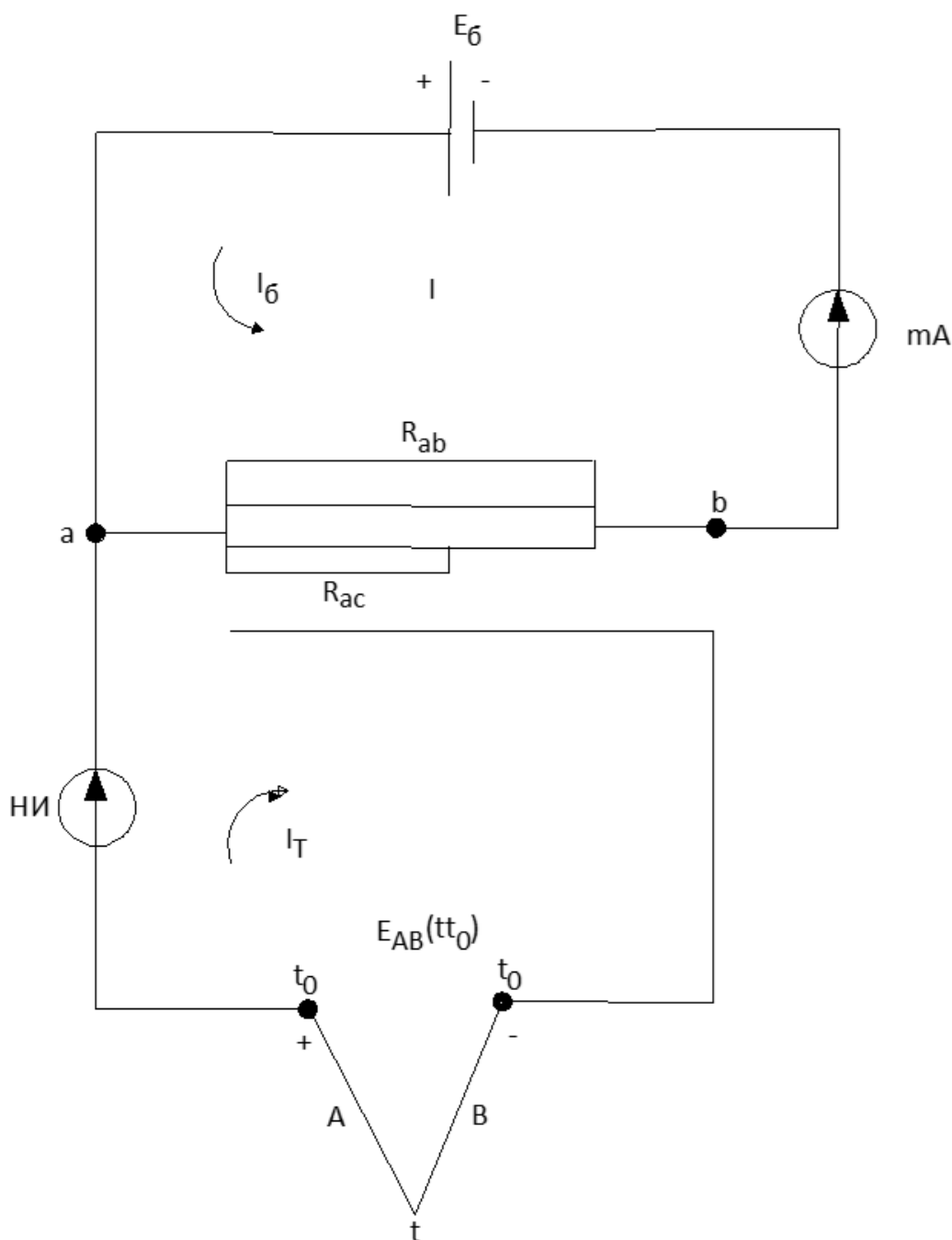


Рисунок 29 – Принципиальная схема потенциометра

Если обозначить ток, проходящий в контуре *I*, через I_6 (рабочий ток), а ток для контура *II* при некотором положении движка *C* через I_T , то на основании закона Кирхгофа для контура *II* справедливо равенство $E_{AB}(tt_0) = I_T R_{BH} + I_T R_{HH} + I_T R_{ac} + I_6 R_{ac}$, где R_{HH} и R_{BH} – сопротивления нуля-индикатора и внешних проводов, включая ТЭП, откуда $I_T = [E_{AB}(tt_0) - I_6 R_{ac}] / (R_{BH} + R_{HH} + R_{ac})$. Перемещая движок *C*, можно добиться того, чтобы I_T стал равным нулю. Это определится показанием нуля-индикатора, и тогда:

$$E_{AB}(tt_0) = I_6 R_{ac}. \quad (55)$$

Полученное равенство указывает на то, что если в контуре, где расположен источник измеряемой ЭДС, ток равен нулю, то падение напряжения на участке R_{ac} служит мерой измеряемой ЭДС. Преимуществом компенсационного метода измерения термоЭДС является отсутствие тока в цепи в момент измерения. Это исключает необходимость учета значений сопротивления внешней цепи и изменения сопротивления этой цепи от температуры.

Компенсирующее напряжение $I_6 R_{ac}$ можно изменять двумя методами:

- 1) поддерживая значение тока I_6 на постоянном уровне, изменять сопротивление R_{ac} ;
- 2) сохраняя сопротивление R_{ac} постоянным, изменять значение рабочего тока I_6 .

Наибольшее распространение получил потенциометр с постоянной силой рабочего тока, показанный на рис. 30.

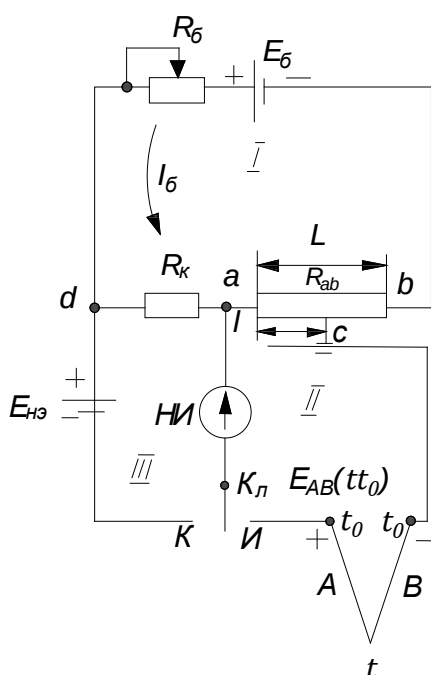


Рисунок 30 – Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока

Для контроля за постоянством тока I_6 предусмотрен дополнительный контур III – контур нормального элемента. Нормальный элемент представляет собой образцовую меру ЭДС, равную $E_{нэ} = 1,0186В$ и сохраняющую это значение при кратковременных и малых нагрузках в течение длительного времени.

При установке ключа $Kл$ в положение K (контроль) проводят сравнение ЭДС нормального элемента $E_{нэ}$ с падением напряжения U_{da} на постоянном резисторе R_k . Если при этом стрелка нуль-индикатора не на нуле, т. е. в контуре III проходит ток, а это означает, что $E_{нэ} \neq U_{da}$, то с помощью реостата R_6 изменяют ток I_6 в контуре I до тех пор, пока стрелка нуль-индикатора не установится на нуле. Тогда $E_{нэ} = U_{da}$. Так как $U_{da} = I_6 R_k$ и $R_k = 509,3 \text{ Ом}$, то $I_6 = E_{нэ} / R_k = 1,0186 / 509,3 = 2 \text{ мА}$. После стандартизации значения тока I_6 ключ $Kл$ переводят в положение $И$ (измерение) и

перемещают движок C реохорда R_{ab} до установления стрелки нуль-индикатора на нуле. При этом:

$$E_{AB}(tt_0) = I_6 R_{ac} = E_{нэ} R_{ac} / R_k. \quad (56)$$

При равномерной намотке реохорда сопротивления его участков пропорциональны соответствующим длинам, т. е. $R_{ac} / R_{ab} = l / L$, и тогда:

$$E_{AB}(tt_0) = I_6 R_{ac} = E_{HЭ} R_{ac} / R_K = (E_{HЭ} / R_K) (R_{ab} / L) l = kl, \quad (57)$$

где

$$k = (E_{HЭ} / R_K) (R_{ab} / L) = const.$$

Таким образом, измерение термоЭДС сводится к измерению длины l участка реохорда, которая проградуирована в единицах напряжения. Потенциометры, работающие по указанной схеме, имеют высокий класс точности, вплоть до 0,0005.

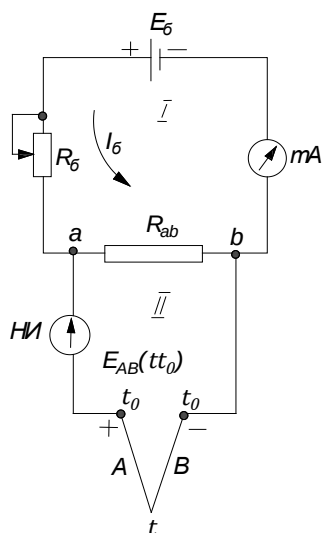


Рисунок 31 – Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока

Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока I_6 показана на рис. 31. Измеряемая термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ компенсируется здесь падением напряжения $I_6 R_{ab}$ на постоянном и известном сопротивлении R_{ab} путем изменения значения тока I_6 компенсационном контуре I с помощью реостата R_6 . Движок последнего перемещается до тех пор, пока нуль-индикатор НИ в контуре II не покажет нуль, при этом отсчитывается значение тока I_6 по шкале миллиамперметра. Ввиду того что измеряемая термоЭДС зависит от точности и стабильности показаний миллиамперметра, рассматриваемый потенциометр уступает по точности потенциометру с постоянной силой рабочего тока.

В то же время схема потенциометра с переменной силой рабочего тока находит применение, в частности, при построении нормирующих токовых преобразователей.

Автоматические потенциометры. Измерительная схема автоматического потенциометра (рис. 32) основана на схеме потенциометра с постоянной силой рабочего тока (см. рис. 30). Однако здесь предусматриваются два контура компенсации напряжения II и III . Контур III , содержащий в цепи резистор R_M из медной проволоки, служит для автоматического введения поправки на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя. Свободные концы термоэлектрического преобразователя AB с помощью удлинительных проводов FD подводятся к резистору R_M и находятся при одной с ним температуре. Остальные резисторы измерительной схемы потенциометра выполняют из манганина.

Для питания контуров II и III в современных автоматических потенциометрах вместо батареи постоянного тока (сухого элемента) используется источник стабилизированного питания $ИПС$, в котором входное напряжение переменного тока 6,3 В выпрямляется и стабилизируется в выходное напряжение постоянного тока 5 В (погрешность стабилизации ± 5 или ± 10 мВ соответственно для классов точности 0,1 и 0,2) при нагрузке 1000 Ом и токе нагрузки I_0 , равном 5 мА.

При работе $ИПС$ в составе потенциометра напряжение между точками d и

к $U_{dk} = 1019$ мВ. Благодаря использованию ИПС в автоматических потенциометрах установка рабочего тока осуществляется через несколько тысяч часов непрерывной работы, кроме того, упростилась кинематика механизма, и повысилась надежность прибора.

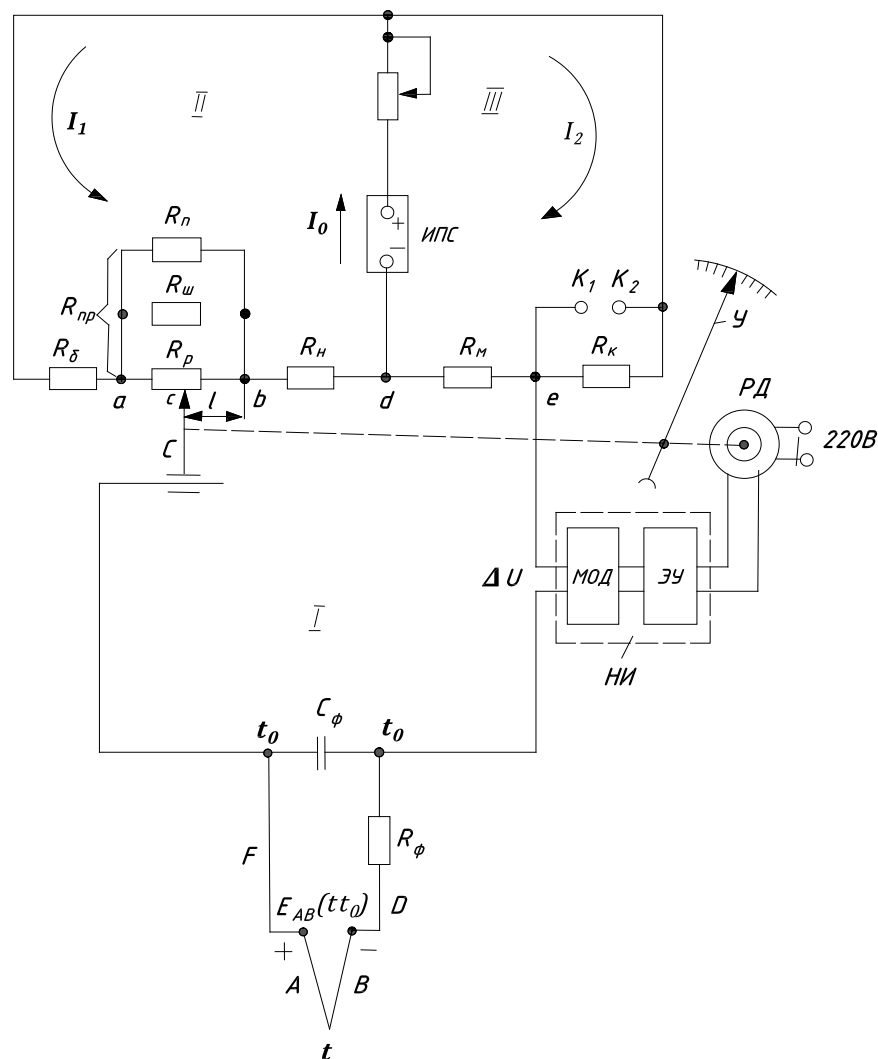


Рисунок 32 – Измерительная схема автоматического потенциометра

Подключение к клеммам K_1 и K_2 нормального элемента $E_{нэ}$ и последовательно соединенного с ним нуль-индикатора осуществляется для контроля рабочего тока I_2 лишь при поверке и градуировке потенциометра. При этом $U_{ke} = I_2 R_K = E_{нэ}$. Обычно $R_K = 509,3$ Ом, тогда $I_2 = 2$ мА; R_y – резистор для установки рабочего тока I_2 ; $R_{пп}$ – значение сопротивления реохордной группы, состоящей из трех параллельно соединяемых резисторов: собственно реохорда R_p , шунта $R_{ш}$ и сопротивления $R_{п}$.

Такое исполнение реохордной группы связано с тем, что реохорд R_p является ответственным узлом, предназначенным для измерения. Поэтому он изготавливается из проволоки специального сплава. При необходимости изменения сопротивления на участке ab , что бывает связано с изменением диапазона измерения, изменяют общее сопротивление $R_{пп}$ этого участка за счет

изменения R_{II} , а иногда и R_{III} , оставляя при этом R_P стандартным.

Резисторы R_H и R_G служат для установления начального значения шкалы прибора и значения тока $I_1 = 3$ мА. В качестве нуль-индикатора *НИ* в автоматических потенциометрах используется электронный усилитель ЭУ, на входе которого установлен модулятор *МОД* для преобразования сигнала небаланса напряжения постоянного тока ΔU в переменное напряжение. Для предохранения усилителя от наводок и помех, возникающих в цепи термоэлектропреобразователя под влиянием электромагнитных полей, предусмотрен фильтр, состоящий из сопротивления R_Φ и конденсатора C_Φ .

Рассмотрим работу автоматического потенциометра. Пусть при некотором значении измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ и некотором положении движка реохорда C ток в контуре измерения II равен нулю, т. е. $E_{AB}(tt_0)$ скомпенсировано падением напряжения U_{ce} на участке $cbde$. Тогда сигнал небаланса $\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{ce}$ равен нулю. При сигнале $\Delta U \neq 0$ на выходе усилителя в соответствии с абсолютным значением и знаком небаланса формируется управляющий сигнал, при котором реверсивный двигатель *РД* перемещает движок реохорда C до тех пор, пока ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком по шкале прибора перемещается указатель $У$. Сведение к нулю небаланса ΔU , т. е. достижение полного равенства компенсирующего напряжения U_{ce} измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$, реализуется благодаря тому, что система автокомпенсации является астатической. Свойство астатичности достигается из-за наличия в системе регулирования небаланса интегрирующего или астатического звена, в качестве которого выступает здесь реверсивный двигатель.

Разберем теперь как осуществляется автоматическое введение поправки на температуру свободных концов термоэлектропреобразователя.

При некоторой температуре t рабочего спая и температуре свободных концов $t_0 = 0$ имеет место равенство:

$$E_{AB}(tt_0) = U_{ce} = U_{cb} + U_{bd} - U_{ed}. \quad (58)$$

Пусть при той же температуре рабочего спая t температура свободных концов изменилась: $t'_0 > t_0$. Тогда термоЭДС ТЭП уменьшится на $E_{AB}(t'_0 t_0)$ и станет равной $E_{AB}(t_0 t'_0) = E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(t'_0 t_0)$. Повышение температуры от t_0 до t'_0 приведет к увеличению значения сопротивления резистора от $(R_M)_{t_0}$ до $(R_M)_{t'_0}$, т. е. на $\Delta R_M = (R_M)_{t_0} - (R_M)_{t'_0}$. Вследствие этого падение напряжения на этом резисторе увеличится на $\Delta U_{ed} = I_2 \Delta R_M$, и тогда:

$$\begin{aligned} E_{AB}(t_0 t'_0) &= E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(t'_0 t_0) = U_{cb} + U_{bd} - (U_{ed} + \Delta U_{ed}) = \\ &= U_{ce} - \Delta U_{ed}. \end{aligned} \quad (59)$$

Таким образом, при неизменной температуре рабочего спая t и любой температуре свободных концов t'_0 для того, чтобы движок C не перемещался и

не изменялось показание прибора, т. е. для того, чтобы небаланс ΔU равнялся нулю, необходимо обеспечить условие:

$$E_{AB}(t_0 t'_0) = \Delta U_{ed} = I_2 \Delta R_M. \quad (60)$$

Значение сопротивления медного резистора $(R_M)_{t_0}$ при $t_0 = 0$ °С определяют, учитывая, что входящее сюда значение ΔR_M равно $\Delta R_M = (R_M)_{t_0} \alpha (t'_0 - t_0)$. Следовательно,

$$(R_M)_{t_0} = \frac{E_{AB}(t'_0 t_0)}{\alpha I_1 (t'_0 - t_0)}, \quad (61)$$

где α – температурный коэффициент электрического сопротивления меди;

$$I_2 = 2 \text{ мА};$$

$$t'_0 - \text{принимает равным } 50 \text{ °С}.$$

Выпускаемые промышленностью автоматические потенциометры, различаясь конструктивным исполнением, имеют практически одну и ту же типовую измерительную схему, подобную приведенной на рис. 32. При решении задач автоматического контроля и регулирования на практике оказывается необходимым с точки зрения увеличения точности измерения температуры конкретного объекта изменить стандартные пределы измерения на заданный диапазон. Значения сопротивления резисторов измерительной схемы для заданного диапазона можно получить из следующих соотношений.

Для заданных начального t_{min} и конечного t_{max} значений температуры по шкале прибора для конкретного ТЭП из таблиц определяют $E_{AB}(t_{max} t_0)$ и $E_{AB}(t_{min} t_0)$. Падение напряжения U_{ab} на сопротивлениях реохордной группы равно диапазону измерения прибора, т. е.

$$U_{ab} = I_1 R_{\Pi P} = E_{AB}(t_{max} t_0) - E_{AB}(t_{min} t_0). \quad (62)$$

Отсюда определяют значение $R_{\Pi P}$, принимая $I_1 = 3 \text{ мА}$. Так как $R_{\Pi P} = \frac{R_3 R_{\Pi}}{R_3 + R_{\Pi}}$, $R_3 = \frac{R_P R_{III}}{R_P + R_{III}}$, $R_P = 130 \text{ Ом}$ и $R_3 = 90$ или 100 Ом , по найденному значению $R_{\Pi P}$ определяют R_{Π} . Значение R_H подбирают из условия:

$$E_{AB}(t_{min} t_0) = U_{bc} = I_1 R_H - I_2 (R_M)_{t_0}. \quad (63)$$

Отсюда

$$R_H = [E_{AB}(t_{min} t_0) + I_2 (R_M)_{t_0}] / I_1. \quad (64)$$

Значение резистора R_6 определяется из условия постоянства тока $I_1 = 3 \text{ мА}$:

$$I_1 (R_6 + R_{\Pi P} + R_H) = U_{dk} = I_2 [R_K + (R_M)_{t_0}], \quad (65)$$

откуда

$$R_6 = \{I_2 R_K - I_1 R_{\text{ПР}} - [I_1 R_H - I_2 (R_M)_{t_0}]\} / I_0$$

или

$$R_6 = [I_2 R_K - I_1 R_{\text{ПР}} - E_{AB}(t_{\min} t_0)] / I_0. \quad (66)$$

Автоматические потенциометры конструктивно, а также по дополнительно выполняемым функциям имеют ряд модификаций. Различают полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные автоматические потенциометры с шириной диаграммной ленты 250, 160 и 100 мм. Автоматические потенциометры выпускают в виде показывающих и самопишущих, одно – и многоточечных. В них могут встраиваться регулирующие и сигнализирующие устройства, а также устройства для передачи показаний на расстояние с помощью токовых, частотных, пневматических и ферродинамических преобразователей.

В зависимости от модификации классы точности прибора равны 0,25; 0,5 и 1,0. Несмотря на различия в конструктивном исполнении приборов и в их габаритных размерах измерительная схема автоматических потенциометров практически не отличается от схемы, приведенной на рис. 32.

Нормирующие преобразователи термоЭДС. Для введения информации от ТЭП в ЭВМ или в систему автоматического регулирования широко применяются нормирующие измерительные токовые преобразователи. Они предназначены для преобразования сигнала ТЭП в унифицированный сигнал постоянного тока 0÷5 мА.

В основу работы нормирующего преобразователя положен компенсационный метод измерения термоЭДС с использованием схемы потенциометра с переменной силой рабочего тока. Схема преобразователя приведена на рис. 33. Здесь I – контур измерения; II – контур компенсации. Контур I содержит корректирующий мост KM , усилитель U_1 с токовым выходом $I_{\text{вых}}$ и резистор $R_{\text{кн}}$. К контуру I с помощью удлинительных проводов F и D подсоединен ТЭП AB . Корректирующий мост предназначен для введения автоматической поправки на изменение температуры свободного конца ТЭП, а также компенсации начальной термоЭДС в преобразователях, нижний предел измерения которых не равен 0 °С. К диагонали ab питания моста подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Резисторы R_1 , R_2 и R_3 – манганиновые, резистор R_M – из медного провода. Усилитель U_1 состоит из двух каскадов: магнитного $УМ$, выполненного по двухтактной двухполупериодной схеме, и полупроводникового усилителя $УП$, работающего в режиме усиления постоянного тока. Усилитель U_1 выполняет функции нуль-индикатора.

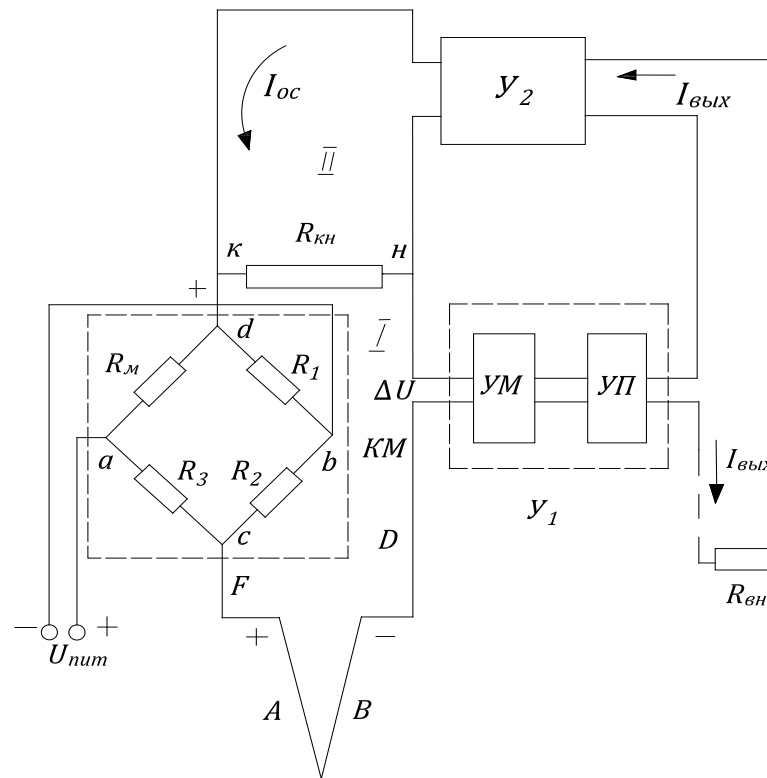


Рисунок 33 – Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термоэлектрическим преобразователем

Контур компенсации Π включает в себя резистор R_{KH} и усилитель обратной связи Y_2 . Этот усилитель аналогичен усилителю Y_1 , но включен с глубокой отрицательной связью по выходному току усилителя. Выходной ток I_{OC} усилителя Y_2 является рабочим током контура Π и при прохождении этого тока по сопротивлению R_{KH} на нем со стороны контура Π создается компенсирующее напряжение $U_{KH} = I_{OC} R_{KH}$. Со стороны контура I к резистору R_{ab} подводится сигнал термоэлектропреобразователя $E_{AB}(t'_0 t_0)$, сложенный с напряжением U_{cd} , создаваемым в измерительной диагонали cd корректирующего моста KM . Это напряжение, как указывалось, равно поправке на температуру свободных концов ТЭП, т. е. $U_{cd} = E_{AB}(t'_0 t_0)$. Таким образом, этот суммарный сигнал, равный $E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt'_0) + U_{cd}$, сравнивается с напряжением U_{KH} . Небаланс, равный $\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{KH}$, подается на усилитель Y_1 , где этот сигнал постоянного тока ΔU преобразуется сперва в магнитном усилителе $УМ$ в сигнал переменного тока, затем усиливается и опять преобразуется в сигнал постоянного тока, который дополнительно усиливается в полупроводниковом усилителе $УП$ постоянного тока. Выходной сигнал усилителя Y_1 создает ток $I_{вых}$, который поступает во внешнюю цепь $R_{вн}$ и далее через делитель – в усилитель обратной связи Y_2 . Выходной ток I_{OC} усилителя Y_2 изменяется и изменяет падение напряжения U_{KH} на резисторе R_{KH} до тех пор, пока небаланс ΔU не достигнет некоторой малой величины δU , называемой статической ошибкой компенсации.

Наличие статической ошибки компенсации приводит к тому, что в контуре

измерения I проходит недокомпенсированный ток. При этом чем больше измеряемая термоЭДС, тем больше этот ток.

Исключить эту ошибку в устройствах, выполненных по статической автокомпенсационной схеме, принципиально невозможно, так как выходной ток преобразователя $I_{\text{вых}}$ и ток контура компенсации $I_{\text{ос}}$ определяются наличием этой ошибки и пропорциональны ей. В то же время статическая ошибка автокомпенсационной схемы может быть значительно уменьшена, если использовать усилитель с большим коэффициентом усиления.

Рассмотрим теперь математическую связь между измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ и выходным током преобразователя $I_{\text{вых}}$. В соответствии с указанным выше:

$$\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{KH}. \quad (67)$$

На выходах усилителей Y_1 и Y_2 формируются сигналы:

$$I_{\text{вых}} = k_1 I_{\text{вх}} = k_1 \frac{\Delta U}{R_{\text{вх}}}, \quad (68)$$

$$I_{\text{ос}} = k_2 I_{\text{вх}}, \quad (69)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты усиления усилителей Y_1 и Y_2 ;

$I_{\text{вх}} = \Delta U / R_{\text{вх}}$ – ток, создаваемый во входной цепи усилителя сигналом ΔU ;

$R_{\text{вх}}$ – сопротивление входной цепи усилителя Y_1 .

Падение напряжения на резисторе R_{KH} с учетом составит:

$$U_{KH} = I_{\text{ос}} R_{KH} = k_2 I_{\text{вых}} R_{KH}. \quad (70)$$

Подставляя в выражение (68) ΔU из (69) и U_{KH} из (71), находим:

$$I_{\text{вых}} = k E_{AB}(tt_0), \quad (71)$$

где $k = \frac{1}{R_{\text{вх}}/k_1 + k_2 R_{KH}}$ – коэффициент преобразования нормирующего преобразователя [при $k \rightarrow \infty$ $k = 1/(k_2 R_{KH})$].

Таким образом, выходной токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален откорректированному по температуре свободного спая сигналу ТЭП.

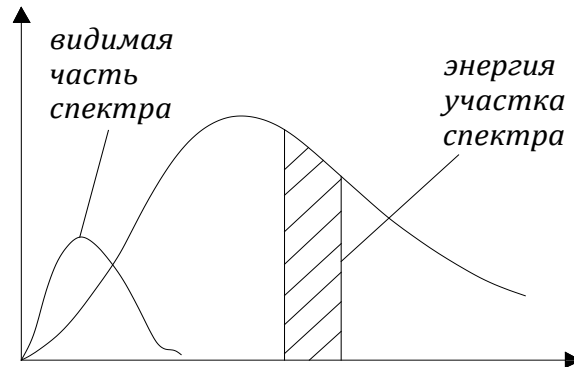
В зависимости от диапазона входного сигнала нормирующие преобразователи, работающие в комплекте с ТЭП, имеют класс точности 0,6–1,5.

3. БЕСКОНТАКТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ (ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ)

Принцип действия основан на измерении лучистой энергии, испускаемой нагретым телом. Это бесконтактные преобразователи.

Пирометры подразделяются на:

1. Пирометры полного излучения (радиационные).
2. Пирометры частичного излучения (оптические).
3. Переносной пирометр.
4. Цветовые пирометры.



Важнейшей характеристикой излучения является спектральная (распределение энергии излучения по различным участкам спектра).

$b(\lambda)$ – спектральная плотность яркости. Вся энергия излучения – площадь под кривой.

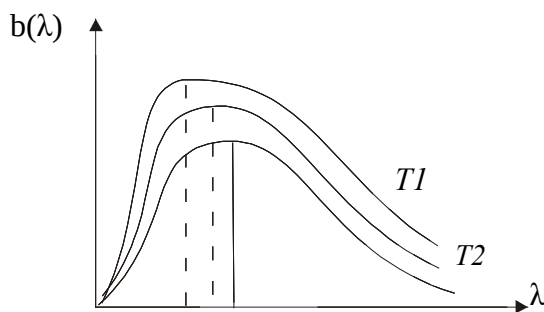
Согласно закону Кирхгофа отношение спектральной плотности яркости, температуры излучателя к его коэффициенту поглощения не зависит от рода излучателя:

$$\frac{b(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = b_0(\lambda, T), \quad (72)$$

где $a(\lambda, T)$ – плотность поглощения (коэффициент поглощения);

$b_0(\lambda, T)$ – спектральная плотность яркости такого излучателя, у которого коэффициент поглощения во всем спектре и при всех температурах равен 1. Такое тело называется абсолютно черным (самое близкое к нему – Солнце).

Выражение для функции $b_0(\lambda, T)$ было установлено Планком в 1900 г.



$$b_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi} \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}. \quad (73)$$

Но за 4 года до Планка было уравнение Вина:

$$b_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T}. \quad (74)$$

Уравнениями Планка можно пользоваться до 4000 К.

Но на измеренном интервале можно пользоваться уравнениями Вина.

Положение максимума кривой спектральной плотности яркости определим, взяв первую производную и приравняв ее к нулю.

$$\lambda_{MAX} T = 2898 \text{ мкмК}.$$

Полная энергия яркости определяется площадью под кривой спектральной плотности яркости.

Стефан и Больцман доказали, что

$$B = \sigma T^4,$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ К}^4} - \text{постоянный коэффициент.}$$

В инженерных расчетах:

$$B = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad [\text{Вт/м}^2], \quad C = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{ К}^4}.$$

Все уравнения (Вина, Планка, Стефана-Больцмана) справедливы для абсолютно черного тела. На практике имеют дело с реальными серыми телами, у которых $\alpha < 1$. Их излучение отличается от АЧТ.

Излучение АЧТ полностью характеризуется его температурой, а излучение реальных тел характеризуется не только температурой, но еще и коэффициентом поглощения. Поэтому вводится понятие псевдотемпературы.

Различают:

1. Радиационной температурой нечерного излучателя, имеющего температуру T , называют такую температуру T_R абсолютно черного тела, при которой энергии яркости обоих тел равны.

$$\alpha(T) \sigma T^4 = \sigma T_R^4, \quad (75)$$

$$T = T_R \sqrt[4]{\frac{1}{\alpha(T)}}, \quad (76)$$

где $\alpha(T)$ – коэффициент поглощения по всему спектру.

Так как у реальных тел $\alpha < 1$, то действительная температура больше радиационной.

2. Яркостной (черной) температурой нечерного излучателя, имеющего температуру T , называют такую температуру T_Y абсолютно черного тела, при которой спектральные плотности яркостей обоих тел при одной и той же длине волны равны.

$$\alpha(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_Y}}, \quad (77)$$

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_Y} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \alpha(\lambda, T)}, \quad (78)$$

так как $\alpha(\lambda, T) < 1$, то $T_{\text{я}} < T$.

3. Цветовой температурой нечерного излучателя, имеющего температуру T , называют такую температуру $T_{\text{ц}}$ абсолютно черного тела, при которой отношение спектральных плотностей яркостей обоих тел при длинах волн λ_1 и λ_2 равны.

$$\frac{b(\lambda_1, T)}{b(\lambda_2, T)} = \frac{b_0(\lambda_1, T_{\text{ц}})}{b_0(\lambda_2, T_{\text{ц}})}, \quad (79)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} - \frac{\ln \frac{\alpha(\lambda_1, T)}{\alpha(\lambda_2, T)}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}. \quad (80)$$

3.1. Пирометры полного излучения (радиационные)

Принцип действия основан на законе Стефана-Больцмана.

Пирометр состоит из датчика (приемника) и вторичного прибора. В зависимости от типа оптической системы датчики подразделяются на рефлекторные (рис. 34) и рефракторные (рис. 35).

Рефлекторные используются для измерения низких температур (используется зеркало). В рефракторных используется линза.

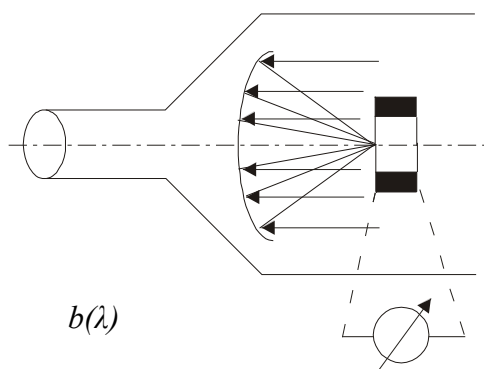


Рисунок 34 – Рефлекторный датчик

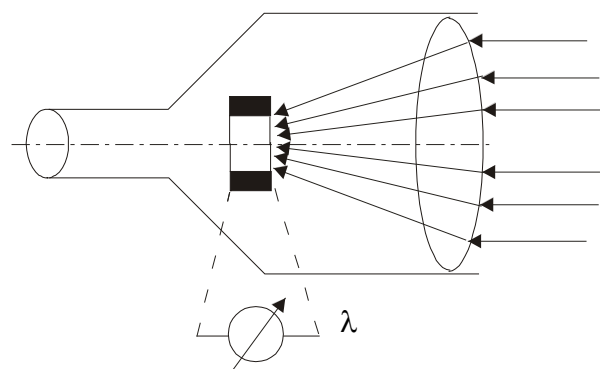


Рисунок 35 – Рефракторный датчик

3.2. Пирометры частичного излучения (оптические)

Основаны на уравнениях Вина и Планка.

Измеряют энергию излучения в узком интервале длин волн, который выделяется с помощью светофильтра (рис. 36).

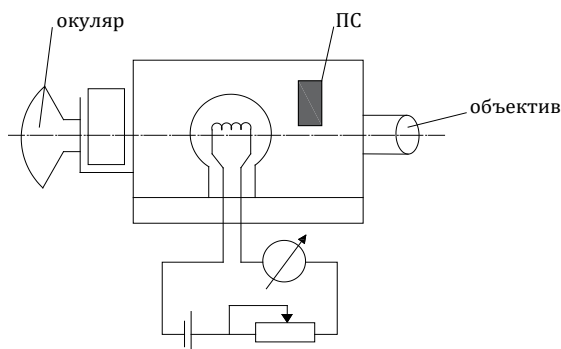


Рисунок 36 – Оптический пирометр

3.3. Пирометр с исчезающей нитью (переносной)

ПС – серое поглощающее стекло.

СФ – красный светофильтр.

Имеется температурная лампа, которая имеет линейную зависимость между током и яркостью.

Пирометр наводится на объект.

Человек смотрит в окуляр и увеличивает силу тока до тех пор, пока нить накаливания лампы не сольется (исчезнет) на фоне объекта. Эта сила тока измеряется в мА, но шкала проградуирована в градусах. Прибор показывает кажущуюся температуру. ПС используется для расширения диапазона измерений (рис. 37).

Диапазон измерений без ПС 800 – 1400 °С

Диапазон измерений с ПС 1400 – 2000 °С

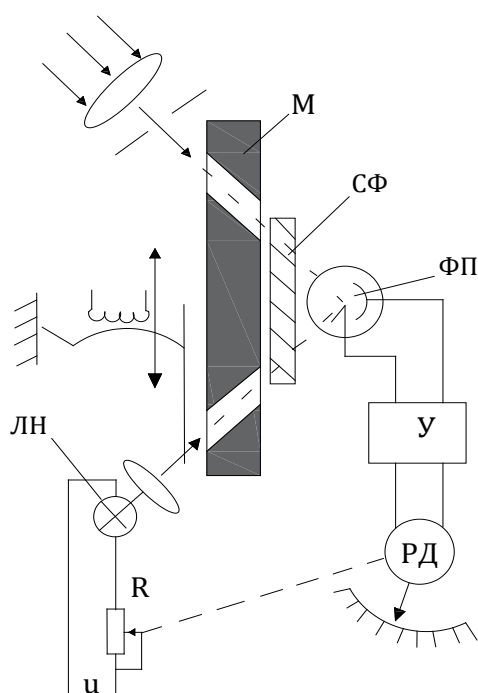


Рисунок 37 – Пирометр с исчезающей нитью

Недостаток – субъективность оценки (ошибка определяется чувствительностью глаза).

Для исключения этого недостатка используются фотоэлектрические пирометры.

М – модулятор.

СФ – светофильтр.

ФП – фотоприемник.

ЛН – лампа накаливания.

Имеется шторка, которая то открывается, то закрывается.

3.4. Цветовые пирометры

Выделяют 2 длины волны при помощи двух светофильтров, установленных на вращающемся диске. Основан на законе смещения Вина.

Используют 2 светофильтра (синий и красный). Одним выделяют λ_1 , а другим λ_2 .

На рис. 38 представлено:

У – запоминающее устройство.

БД – блок деления.

С – синий светофильтр.

К – красный светофильтр.

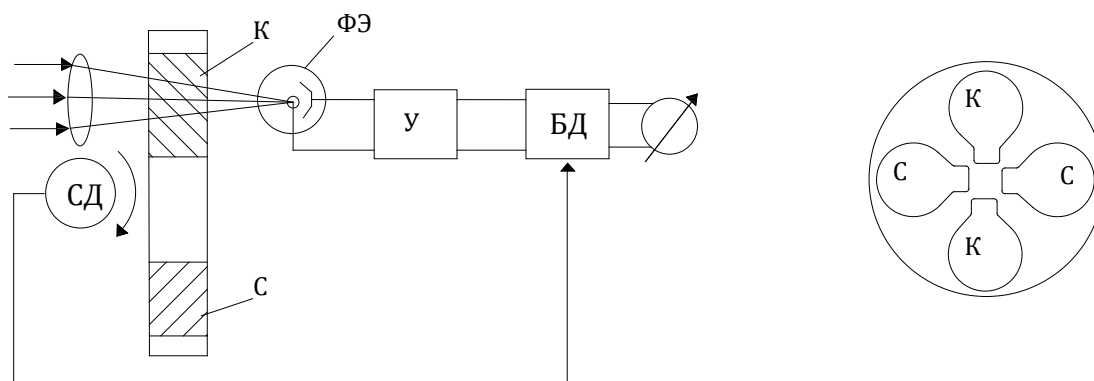


Рисунок 38 – Цветовые пирометры

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фарзани, Н. Г. Технологические измерения и приборы: учебник для вузов / Н. Г. Фарзани, Л. В. Илясов, А. Ю. Азим-Заде. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с. – Текст: непосредственный.
2. Шишмарев, В. Ю. Технические измерения и приборы: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. Ю. Шишмарев. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – 384 с. – Текст: непосредственный.
3. Бирюков, С. В. Метрология: тексты лекций / С. В. Бирюков, А. И. Чередов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. – 110 с. – Текст: непосредственный.
4. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М. В. Кулаков. – М.: Альянс, 2008. – 424 с. – Текст: непосредственный.
5. Сажин, С. Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред: учебное пособие / С. Г. Сажин. – СПб.: Лань, 2012. – 432 с. – Текст: непосредственный.
6. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 460 с. – Текст: непосредственный.

Учебное издание

Бахтин Андрей Владимирович
Слюта Марина Олеговна

Технологические измерения и приборы
Методы и средства измерения температуры

Учебное пособие

2-е издание, дополненное и переработанное

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2024 г., поз. 5150/24

Подписано к печати 02.02.2024.	Формат 60х84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 4,3.	Уч.-изд. л. 4,3.
Тираж 30 экз.	Изд. № 5150/24	Цена «С». Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.