

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба,
П.В. Голиницкий, У.Ю. Антонова,
Ю.Г. Вергазова

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. ПРАКТИКУМ

Учебное пособие



Москва 2021

УДК 681.2.08(075.8)

ББК 30.10я73

Л 47

Рецензенты:

докт. техн. наук, профессор

А.Г. Пастухов;

канд. техн. наук, доцент

С.В. Иншаков

Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др.

Л 47

Методы и средства измерений. Практикум:
Учебное пособие / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба,
П.В. Голиницкий, У.Ю. Антонова, Ю.Г. Верга-
зова. – М.: Издательство «Спутник +», 2021. –
180 с.

ISBN 978-5-9973-6001-6

В учебном пособии рассмотрены основные теоретические сведения и примеры решения задач в области расчета параметров измерительных приборов и преобразователей, наиболее часто используемых в сельском хозяйстве, таких как температура, давление, расход и влажность. Для каждого вида задач приведено 100 вариантов заданий для выполнения лабораторно-практических работ и решения контрольной работы.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология» и 27.03.02 «Управление качеством».

УДК 681.2.08(075.8)

ББК 30.10я73

Отпечатано с готового оригинал-макета.

ISBN 978-5-9973-6001-6

© Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж.,
Голиницкий П.В., Антонова У.Ю.,
Вергазова Ю.Г., 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ	4
1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ	6
1.1. Средства измерения температуры	6
1.2. Жидкостные и манометрические термометры	11
1.3. Термоэлектрические преобразователи	29
1.4. Термопреобразователи сопротивления	36
1.5. Измерение температуры термопарой с милливольтметром	48
1.6. Измерение температуры с помощью термопары,	54
подключенной к потенциометру	54
1.7. Измерение температуры с помощью термосопротивления,	56
включенного в уравновешенный мост	56
1.8. Измерение температуры с помощью термосопротивления,	62
включенного в неуравновешенный мост	62
2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ	68
2.1 Давление как физическая величина	68
2.2 Классификация средств измерения давления	69
2.3. Измерение давления мембранным деформационным манометром	82
2.4. Измерение давления трубчато-пружинным деформационным манометром ..	86
2.5. Измерение давления с помощью пьезоэлектрического преобразователя	90
2.6. Измерение давления с помощью тензодатчика включенного в неуравновешенный мост	93
3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА	96
3.1 Измерение расхода	96
3.2. Измерение расхода с помощью турбинного тахометрического расходомера .	100
3.3. Измерения расхода с помощью индукционного расходомера	105
4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВЕЩЕСТВА	110
4.1. Измерение влажности	110
4.2. Определение влажности психрометрическим методом	117
5. ПАРАМЕТРЫ И ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	121
5.1. Теоретические сведения	121
5.2. Погрешности средств измерения	122
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	149
ПРИЛОЖЕНИЯ	163

ВВЕДЕНИЕ

С различными измерениями человек сталкивается с момента своего рождения всю жизнь, осуществляя их самостоятельно или наблюдая за выполнением измерений. Достаточно вспомнить, как часто приходится использовать стеклянные термометры, линейки, весы и т.п.

Измерения являются одним из самых древних занятий в познавательной деятельности человека. Их возникновение относится к истокам материальной культуры человечества.

На определенном этапе своего развития измерения стали причиной возникновения метрологии, как науки о различных мерах и соотношениях между ними. Слово метрология образовано из двух греческих слов: *μετρον* – мера и *λογος* – учение, что буквально можно перевести как «учение о мерах». В настоящее время метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Управление современным производством и оценки качества технологических процессов трудно осуществить без проведения сложных измерений. Измерения проводят с помощью измерительных устройств – специальных технических средств, различных по сложности и принципам действия.

Управление современным производством и оценки качества технологических процессов трудно осуществить без проведения сложных измерений. Измерения проводят с помощью измерительных устройств – специальных технических средств, различных по сложности и принципам действия.

Дисциплина «Методы и средства измерений» является важным элементом в цикле общетехнической подготовки бакалавра, который должен грамотно оценивать результаты лабораторных, опытных и промышленных измерений.

Место этой дисциплины – изучение принципов действия и причин возникновения погрешностей реальных измерительных приборов, установок и систем. Приведем основные термины, регулярно встречающиеся при изучении данной дисциплины.

Метод измерений – это совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Принцип (от лат. *principium* – начало, основа) **измерений** – это совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Различают два базовых метода измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой. Классификационным признаком в таком разделении методов измерений является наличие или отсутствие при измерениях меры.

Мера – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия с отсчетом показаний по шкале прибора. Характеризуется тем, что лицу, осуществляющему измерение, не требуется каких-либо вычислений, кроме умножения показаний прибора на некоторую постоянную, соответствующую данному прибору.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Средство измерений – это техническое устройство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины.

Погрешность результата измерения – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Неопределенность измерений – параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.

Методика выполнения измерений – установленная совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с гарантированной точностью в соответствии с принятым методом.

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В основе действия приборов, предназначенных для измерения температуры, лежат разные физические явления, связанные с изменением тепловой энергии вещества – изменения электрического сопротивления, объема, давления, излучения, термоэлектрических свойств.

В настоящее время используются различные методы измерения температуры, которые можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные.

В *контактных* методах требуется непосредственный контакт первичного преобразователя с объектом измерений. К ним относятся термометры расширения (стеклянные, манометрические и биметаллические), термометры сопротивления, термоэлектрические термометры, кварцевые преобразователи температуры в частоту.

Бесконтактные методы позволяют измерять температуру на расстоянии от контролируемого объекта или среды. Этот метод используется в пирометрах.

В таблице 1.1 приведены наиболее распространенные средства измерения температуры и примерные пределы их применения.

1.1. Средства измерения температуры

В основе действия приборов, предназначенных для измерения температуры, лежат разные физические явления, связанные с изменением тепловой энергии вещества – изменения электрического сопротивления, объема, давления, излучения, термоэлектрических свойств.

В настоящее время используются различные методы измерения температуры, которые можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные.

Наиболее распространенные средства измерения температуры

Тип средства	Разновидность средства измерения или первичного преобразователя	Предел длительного применения, °С	
		нижний	верхний
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные	-100	+600
	Манометрические	-200	+600
	Биметаллические	-70	+600
Термоэлектрические термометры	Термоэлектрические термопреобразователи (при длительном применении)	-200	+2200
Термометры сопротивления	Металлические (проводниковые) термопреобразователи сопротивления	-260	+1100
	Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления	-100	+300
Кварцевые термометры	Терморезонансные преобразователи	0	+200
Пирометры	Монохроматические	+800	+4000
	Полного и частичного излучения	+30	+2500
	Спектрального отношения	-35	+2800

В *контактных* методах требуется непосредственный контакт первичного преобразователя с объектом измерений. К ним относятся термометры расширения (стеклянные, манометрические и биметаллические), термометры сопротивления, термоэлектрические термометры, кварцевые преобразователи температуры в частоту.

Бесконтактные методы позволяют измерять температуру на расстоянии от контролируемого объекта или среды. Этот метод используется в пирометрах.

Средства измерения, предназначенные для измерения температуры контактным методом, называются *термометрами*, а для измерения температуры бесконтактным методом – *пирометрами*.

Одно из наиболее знакомых средств для измерения температуры – ртутный стеклянный термометр, изображенный на рис. 1.1,а. Шарик с ртутью в нижней части термометра располагают в среде или прижимают к предмету, температуру которого хотят измерить, и в зависимости от того, получает шарик

тепло или отдает, ртуть расширяется или сжимается и ее столбик поднимается или опускается в капилляре.

Если термометр заранее проградуирован и снабжен шкалой, то можно прямо узнать температуру тела.

Другой прибор, действие которого основано на тепловом расширении – биметаллический термометр, рис. 1.1, б. Основной его элемент – спиральная пластинка из двух спаянных металлов с разными коэффициентами теплового

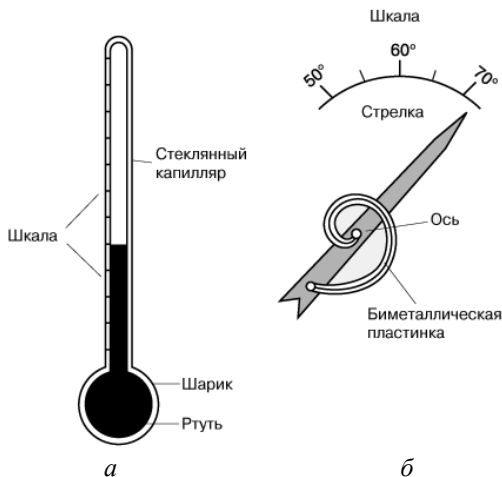


Рис.1.1. Средства измерений температуры, основанные на эффекте теплового расширения:
а – ртутный термометр; б – биметаллический термометр

расширения. При нагревании один из металлов расширяется сильнее другого, спираль закручивается и поворачивает стрелку относительно шкалы. Такие устройства часто используют для измерения температуры воздуха в помещениях и на улице, однако они не подходят для определения локальной температуры.

Локальную температуру измеряют обычно с помощью термопары, представляющей собой две проволоочки из разнородных металлов, спаянные

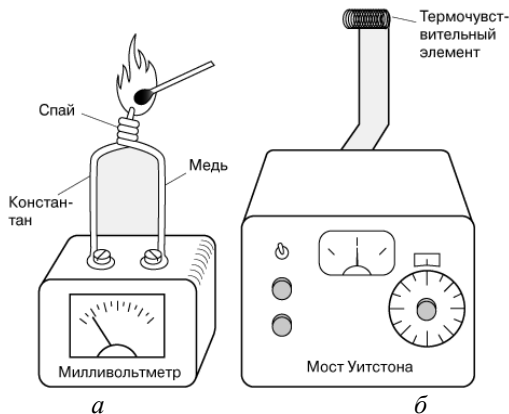


Рис.1.2. Средства измерений температуры, основанные на изменении электрических величин:

а – термопара; б – термосопротивление

с одного конца (рис. 1.2,а). При нагревании такого спая на свободных концах проволочек возникает термо-ЭДС, обычно составляющая несколько милливольт. Известен и другой термоэлектрический эффект – зависимость сопротивления проводящего материала от температуры. Он лежит в основе работы электрических термометров сопротивления, один из которых изображен на рис. 1.2,б. Сопротивление небольшого термочувствительного элемента (термопреобразователя) – обычно катушки из тонкой проволоки – сравнивают с сопротивлением проградуированного переменного резистора, используя мост Уитстона. Выходной прибор может быть проградуирован непосредственно в градусах.

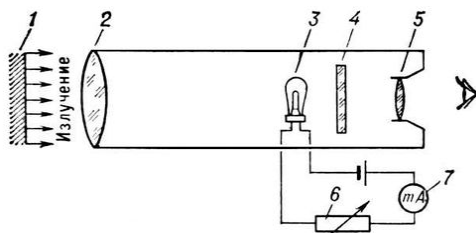


Рис.1.3. Оптический пирометр:

1 – объект измерений; 2, 5 – линзы бинокля; 3 – лампа накаливания; 4 – светофильтр; 6 - переменный резистор; 7- показывающий прибор

Для измерения температуры раскаленных тел, испускающих видимый свет, используют оптические пирометры. В одном из вариантов этого устройства свет, излучаемый телом, сравнивают с излучением нити лампы накаливания, помещенной в фокальную плоскость бинокля, через который смотрят на излучающее тело, рис. 1.3. Электрический ток, нагревающий нить лампы, изменяют до тех пор, пока при визуальном сравнении свечения нити и тела не обнаружится, что между ними установилось тепловое равновесие. Шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в единицах температуры.

Технические достижения последних лет позволили создать новые датчики температуры. Например, в тех случаях, когда нужна особенно высокая чувствительность, используют полупроводниковое устройство – термистор. В качестве термопреобразователей применяют также изменяющие свое фазовое состояние красители и жидкие кристаллы, особенно в тех случаях, когда температура поверхности тела изменяется в широком диапазоне. Наконец, используется инфракрасная термография, в которой получают ИК-изображение объекта в условных цветах, где каждый цвет отвечает определенной температуре. Этот способ измерения температуры находит самое широкое применение – от медицинской диагностики до проверки теплоизоляции помещений

В таблице 1.2 приведены наиболее распространенные средства измерения температуры и примерные пределы их применения.

Наиболее распространенные средства измерения температуры

Тип средства	Разновидность средства измерения или первичного преобразователя	Предел длительного применения, °С	
		нижний	верхний
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные	-100	+600
	Манометрические	-200	+600
	Биметаллические	-70	+600
Термоэлектрические термометры	Термоэлектрические термопреобразователи (при длительном применении)	-200	+2200
Термометры сопротивления	Металлические (проводниковые) термопреобразователи сопротивления	-260	+1100
	Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления	-100	+300
Кварцевые термометры	Терморезонансные преобразователи	0	+200
Пирометры	Монохроматические	+800	+4000
	Полного и частичного излучения	+30	+2500
	Спектрального отношения	-35	+2800

1.2. Жидкостные и манометрические термометры

Термометры стеклянные жидкостные. Термометры стеклянные жидкостные применяют для измерения температуры в пределах от -200 до $+750$ °С, Термометры используют исключительно при контактных измерениях. Благодаря простоте в обращении и высокой точности измерения жидкостные термометры находят широкое применение во всех областях народного хозяйства.

Термометры состоят из резервуара с припаянной к нему капиллярной трубкой. Капилляр снабжен шкалой с делениями в градусах Цельсия по Международной практической температурной шкале. Термометрическая жидкость заполняет резервуар и часть капиллярной трубки.

Действие жидкостных термометров основано на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в резервуаре. Объем жидкости меняется в зависимости от температуры

$$V = V_0(1 + \alpha_v(T - T_0)), \quad (1.1)$$

где V и V_0 – объемы жидкости при температурах T и T_0 , м³; α_v – коэффициент объемного расширения, 1/°К (%/К).

В зависимости от предела измерения температур для заполнения термометров, применяют жидкости, приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Температурные пределы использования жидкостей

Жидкость	Предел измерения температуры, °С	
	от	до
Ртуть	–35	750
Толуол	–90	200
Этиловый спирт	–80	70
Керосин	–60	300
Петролейный эфир	–120	25
Пентан	–200	20

Наибольшее распространение получили *ртутные термометры*, так как ртуть не смачивает стекло (обладает сильным поверхностным натяжением), ее сравнительно легко получить в химически чистом виде (она остается жидкой в широком интервале температур).

Недостаток ртути – малый коэффициент объемного расширения, что определяет необходимость изготовления термометров с тонкими капиллярами. Нижний предел измерения ограничивается температурой затвердевания ртути и равен –35 °С. Верхний предел измерения ртутными термометрами определяется допустимыми температурами для стекла: +600 °С для образцовых термометров и +500 °С для технических. При замене стекла кварцем верхний предел измерения несколько увеличивается.

Предел измерения для ртутных термометров, в которых над ртутью удален воздух, составляет +300 °С, так как при +357 °С ртуть кипит. Для того чтобы повысить температуру кипения ртути, пространство в капилляре над ртутью заполняют инертным газом под давлением, в результате чего верхний предел измерения увеличивается.

Термометры с органическими жидкостями предназначаются в основном для измерения низких температур в пределах от –200 до + 200 °С Основным достоинством их является высокий коэффициент объемного расширения жид-

кости, в среднем почти в 6 раз больший, чем у ртути. Недостаток этих термометров – смачивание органическими жидкостями стекла, в результате чего точность измерения понижается. Поэтому необходимо применение капилляров с относительно большим диаметром.

Достоинства стеклянных жидкостных термометров – простота употребления и достаточно высокая точность измерения.

Недостатки – малая механическая прочность (хрупкие); плохая видимость шкалы, отсутствие автозаписи показаний и передачи их на расстояние; невозможность ремонта; большая инерционность. Поэтому стеклянные жидкостные термометры применяют для местного контроля и лабораторных измерений. Стеклянные жидкостные термометры подразделяют на лабораторные и технические. Технические характеристики некоторых стеклянных термометров приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Технические характеристики некоторых стеклянных термометров

Тип	Наименование	Пределы измерения, °С	Цена деления, °С	Предельная погрешность, °С
Тл-4	Лабораторный	нижний из интервала от – 30 до 240, верхний из интервала от 20 до 310	0,1; 0,2 в зависимости от пределов	±(0,2...1) в зависимости от пределов
ТР-1	Рабочий эталон (образцовый)	нижний из интервала от 0 до 56, верхний от 4 до 60	0,01	±0,05
СП-40	Специальный виброустойчивый	0...100 0...200 0...300 0...400	0,5	±1
ТПК-М	Электроконтактный с регулируемым положением контакта	–35...70	1	±1
		0...100	1	±1
		0...200	2 5	±2
		0...300	2 5	±5
ТТ, ТТМ	Технический прямой или угловой	–35...50	1	±1
		0...100	1	±1
		0...160	2	±2
		0...200	2	±2
		0...350	5	±5 на участке 0...300 ±10 на участке 300...450
		0...450	5	

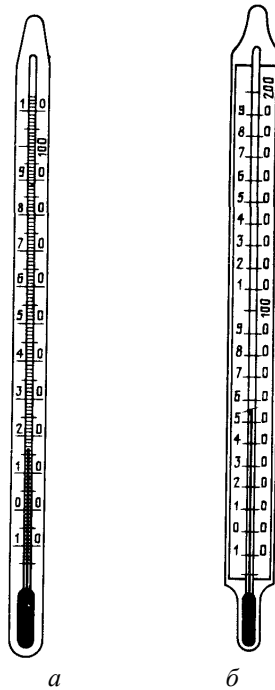


Рис. 1.4. Лабораторные термометры:

а – со шкалой на внешней поверхности; б – с вложенной шкалой

Лабораторные термометры предназначены для измерения температуры в лабораторных условиях. Ртутные стеклянные лабораторные термометры по конструкции делятся на два типа: палочный, состоящий из массивной капиллярной трубки, на внешней поверхности которой нанесена шкала (рис. 1.4а); с вложенной шкальной пластиной, заключенной внутри оболочки термометра (рис. 1.4б).

В зависимости от цены деления и размера термометры делятся на группы 1, 2, 3, 4. Каждому термометру, входящему в одну группу, в зависимости от пределов его измерения, присваивают порядковый номер. Лабораторные термометры в зависимости от типа и диапазона измерения обозначают: ТЛ-2 (с 1-го по 5-й номер группы 1); ТЛ-3 (с 6-го по 8-й номер группы 1); ТЛ4 (с 1-го по

10-й номер группы 4); ТЛ-5 (с 1-го по 4-й номер группы 2); ТЛ-6 (с 1-го по 8-й номер группы 3). При измерении температуры лабораторные термометры погружают на глубину, обозначенную на термометре, если глубина погружения на термометре не указана, то термометр погружают в измеряемую среду до отсчитываемого деления.

Большинство лабораторных термометров изготавливают с безнулевой шкалой, т.е. начинающиеся не с отметки $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, которую наносят внизу на небольшой дополнительной шкале, предназначенной только для поверки прибора, а с более высокой температуры. В промежутке между нулевым делением и началом шкалы капиллярная трубка (капилляр) имеет расширение, в которое входит объем ртути соответствующий изменению температуры от нуля до начального деления шкалы. Иногда расширение капилляра выполняют и выше основной шкалы, что предохраняет капилляр от разрыва в случае нагрева выше верхнего предела температуры.

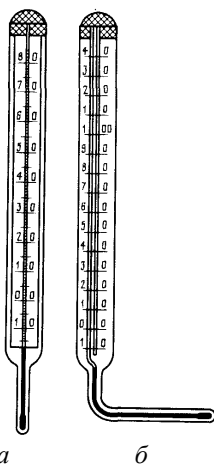


Рис. 1.5. Технические термометры:
а – прямой; б – угловой

Технические термометры (рис. 1.5) предназначены для измерения температуры в промышленных установках и могут быть заполнены ртутью или органическими жидкостями.

Ртутные технические термометры применяют для измерения температуры от -30 до $+600$ °С, а термометры с органическими жидкостями – от -200 до $+200$ °С. В зависимости от формы нижней части технические термометры подразделяют на прямые (П) и угловые (У).

С учетом условий эксплуатации ртутные технические термометры изготавливают для полного погружения, а термометры с органическими жидкостями – для полного и частичного погружения.

Технические электроконтактные термометры применяют для сигнализации и регулирования температуры в интервале от -30 до $+300$ °С. Эти термометры изготавливают с заданной температурой контактирования (ТЗК) или с подвижным контактом (ТПК). Они могут иметь вложенную шкалу и прямую или угловую форму. Технические электроконтактные термометры могут работать в цепях переменного и постоянного тока. Определение действительного значения температуры контактирования и контроль за правильностью сигнализации и регулирования температуры осуществляют по контрольному термометру.

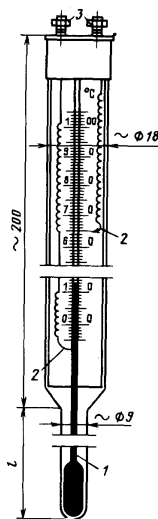


Рис.1.6. Термометры типа ТЗК:
1 – капилляр; 2 – металлические контакты; 3 – зажимы

Замыкание (размыкание) электрической цепи между контактами в контактных термометрах происходит вследствие расширения (сжатия) ртути при нагревании (охлаждении) нижней части термометра.

При применении электроконтактного термометра нижняя часть его должна полностью погружаться в измеряемую среду. Допускаемая погрешность показаний термометра не должна превышать цены наименьшего деления.

Термометры типа ТЗК (рис. 1.6) выпускают с постоянными впаянными в капилляр 7 металлическими контактами 2, к которым припаяны медные провода, присоединенные к зажимам 3. Термометры могут иметь одну, две или три точки контактирования. Контакты впаяют в капилляр термометра в местах, соответствующих определенным значениям температуры контактирования. Минимальные интервалы между двумя соседними контактами обычно составляют не менее 5, 10, 20 и 30 °С для температуры контактирования соответственно до 50, 100, 200 и 300 °С.

Термометр типа ТПК показан на рисунке 1.7. Он имеет один неподвижный контакт 11, соединенный с термометрической жидкостью и один подвижный контакт 10, выполненный из тонкой вольфрамовой проволоки, верхний конец которой соединен с гайкой 9. Нижний конец вольфрамовой проволоки, находящейся в измерительном капилляре, является подвижным контактом термометра. Вверху термометра расположена вспомогательная шкала 4, указателем которой при настройке термометра является гайка 9. Последняя может перемещаться по винту 5 вверх и вниз. Вращение винта 5, а, следовательно, и перемещение гайки 9, осуществляют с помощью подковообразного магнита 3 с ручкой 2. Внизу термометра расположена основная шкала 6. При перемещении гайки 9 по винту 5 на определенную отметку верхней шкалы нижний конец подвижного контакта установится против соответствующей отметки основной шкалы. Неподвижный контакт 11 и подвижный контакт 10 соединены с зажимами 1. При нагревании (охлаждении) нижней части термометра до заданной температуры ртуть в капилляре 7 соединит (разомкнет) неподвижный контакт с

подвижным, в результате чего происходит переключение внешней электрической цепи, соединенной с зажимами 1.

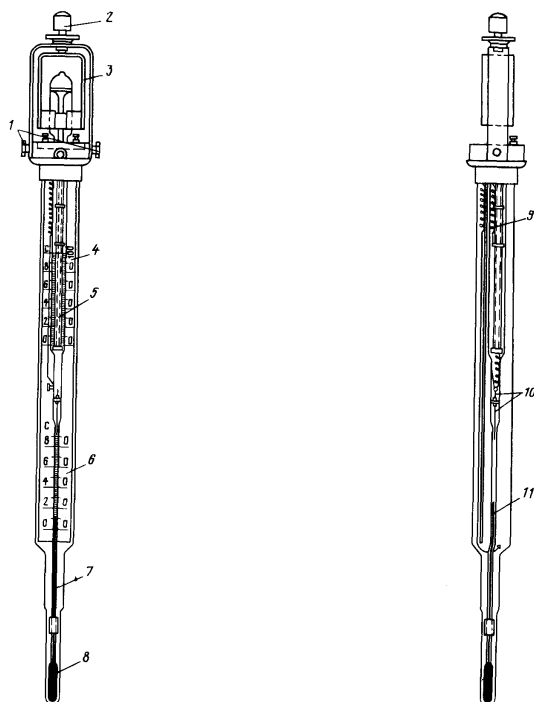


Рис. 1.7. Термометры типа ТПК:

1 – зажимы для подключения; 2 – ручка для вращения магнита; 3 – подковообразный магнит; 4 – вспомогательная шкала; 5 – подвижный винт; 6 – основная шкала; 7 – капилляр; 8 – баллон с ртутью; 9 – гайка; 10 – подвижный контакт; 11 – неподвижный контакт

Термометр тип

Поправки к показаниям и особенности применения стеклянных жидкостных термометров.

При точных измерениях температуры с помощью жидкостных стеклянных термометров к их показаниям вводятся следующие поправки: основная (инструментальная), на температуру выступающего столбика ртути и на сме-

шение нулевой точки. Основная поправка приводится в свидетельстве термометра. Условия, при которых выполняется измерение температуры, часто не совпадают с условиями градуировки термометра: либо изменяется глубина погружения, либо температуры воздуха, окружающая выступающую часть столбика термометрической жидкости, не соответствует $+ 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, либо не совпадают оба параметра. В этих случаях вводят поправку на температуру выступающего столбика ртути, которая может быть подсчитана по формуле

$$\Delta T = n \cdot k \cdot (t - t_e), \quad (1.2)$$

где n – число градусов в выступающем столбике, $^{\circ}\text{C}$; k – температурный коэффициент видимого расширения, выбираемый по специальной таблице; t – температура, показываемая термометром, $^{\circ}\text{C}$; t_e – средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, $^{\circ}\text{C}$.

Поправка на смещение положения нулевой точки появляется в результате старения термометра за счет структурного изменения в стеклянной оболочке резервуара. Объем резервуара уменьшается, в результате чего показания завышаются. В случае отклонения положения нуля от указанного в свидетельстве эту поправку вычисляют по формуле

$$\Delta T = t_0 - t'_0, \quad (1.3)$$

где t_0 и t'_0 – температуры, соответствующие положению нулевой точки термометра по свидетельству (после нагрева в термостате) и после очередной поверки нуля в эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$. При отсчете показаний термометра невооруженным глазом для исключения явления параллакса необходимо следить за тем, чтобы глаз наблюдателя находился строго на уровне мениска столбика, а термометр имел вертикальное положение.

При малом диаметре канала капилляра за счет поверхностных сил натяжения при измерении температуры термометрическая жидкость реагирует не плавно, а скачком. Величина последнего определяется упругими свойствами резервуара и диаметром канала капилляра. Для уменьшения этого влияния и

связанной с ним ошибки измерения необходимо перед отсчетом показания слегка постучать по термометру.

При эксплуатации термометров допускаются кратковременные перегревы их выше температуры верхнего предела шкалы на $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом температура перегрева не должна превышать верхний температурный предел применения стекла, из которого изготовлен термометр, а также температуру кипения термометрической жидкости. Переохлаждение термометров недопустимо ниже температуры затвердевания термометрической жидкости, которой заполнен термометр.

Манометрические термометры. Манометрические термометры предназначены для измерения температуры жидких и газообразных сред в стационарных условиях в интервале от -150 до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

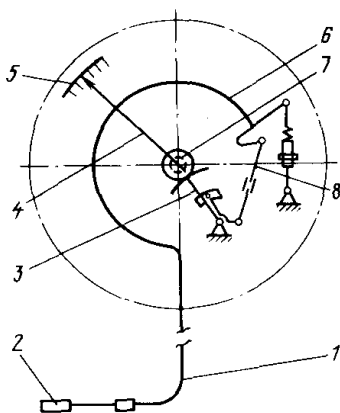


Рис. 1.8. Схема манометрического термометра:

1 – капилляр; 2 – термобаллон; 3 – сектор; 4 – стрелка; 5 – шкала;
6 – манометрическая трубчатая пружина; 7 – трибка; 8 – тяга

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давления заполнителя термосистемы от температуры измеряемой среды. В зависимости от применяемого заполнителя термосистемы манометрические термометры делятся на газовые, жидкостные и конденсационные. Замкнутая си-

стема манометрического термометра, показанная на рисунке 1.8, состоит из термобаллона 2, соединительного капилляра 1 и манометрической пружины 6.

Изменение температуры контролируемой среды воспринимается заполнителем термосистемы через термобаллон 2 и преобразуется в изменение давления, под действием которого манометрическая трубчатая пружина 6 с помощью тяги 8, сектора 3 и трибки 7 перемещает стрелку 4 относительно шкалы 5. Это перемещение через соответствующие устройства передается на сигнальное устройство; у термометров с пневматическим выходным сигналом – на пневматический преобразователь; у термометров с электрическим выходным сигналом – на механоэлектрический преобразователь.

В термометрах с сигнальным устройством (рис. 1.9) изменение измеряемой температуры воспринимается термобаллоном 1 и передается на манометрическую пружину 2, которая несколько распрямляясь, через сектор 3 и трибку 4 приводит в движение стрелку 5, вместе с показывающей стрелкой перемещается ведущий поводок 11 с двумя подвижными поводками 9 и 10.

В качестве датчиков электрического сигнала используют два неподвижных предельных контакта. Один из них 6 выдает сигнал минимального, а другой 13 – максимального значения температуры контролируемой среды. Связь показывающей стрелки и подвижных контактов осуществляется через спиральные волоски. Установка пределов сигнализации осуществляется с помощью указателей пределов сигнализации 8, 12. Когда температура достигает значения, заданного с помощью сигнальных стрелок, соответствующая контактная пара замыкается и выдается электрический сигнал. Внешнюю электрическую цепь подключают к термометру с помощью клеммной колодки 14.

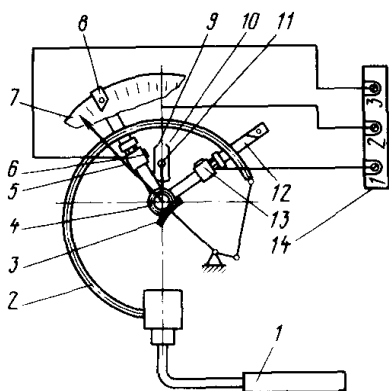


Рис. 1.9. Схема термометра с сигнальным устройством:

1 – термобаллон; 2 – манометрическая пружина; 3 – сектор; 4 – трибка; 5 – стрелка; 6 и 13 – неподвижные предельные контакты датчиков электрического сигнала минимальной и максимальной температуры среды; 7 – пружина механизма обратной связи; 8, 12 – указатели пределов сигнализации; 9 – стрелка; 10 – манометрическая пружина; 11 – ведущий поводок; 14 – клеммные колодки

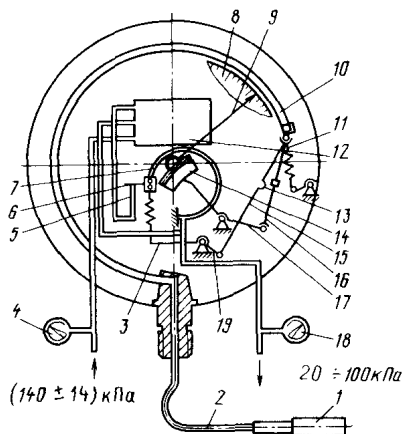


Рис. 1.10. Схема термометра с пневматическим выходным сигналом:

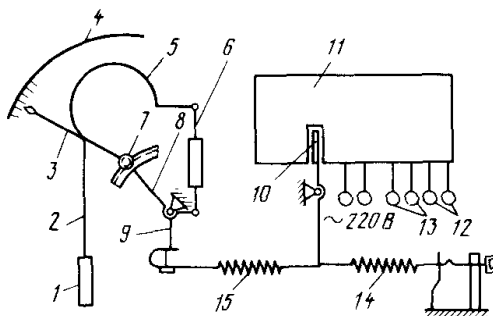
1 – термобаллон; 2 – капилляр; 3 – рычажный механизм; 4, 18 – манометры; 5 – сопло; 6 – заслонка; 7 – пружина обратной связи; 8 – циферблат; 9 – стрелка; 10 – пружина манометрическая; 11 – пружина; 12 – пневмореле; 13 – термобиметалл; 14 – трибосекторный механизм; 15, 16 – тяги; 17, 19 – поводки

В термометрах с пневматически выходным сигналом (рис.1.10) изменение измеряемой температуры воспринимается манометрической пружиной 10, которая, несколько распрямляясь, приводит в движение стрелку 9 через трибосекторный механизм 14. Одновременно это изменение с помощью рычажного механизма 3 передается на свободный конец пружины механизма обратной связи 7, на котором укреплена заслонка 6.

Изменение зазора между соплом 5 и заслонкой 6 вызывает изменение давления питания воздуха в линии сопла, которое с помощью усилительного пневмореле 12 изменяет давление выходного сигнала прибора и в механизме обратной связи. Под действием изменения давления манометрическая пружина 7 механизма обратной связи осуществляет соответствующий поворот, воздей-

ствие которого на заслонку 6 обеспечивает пропорциональность выходного давления ходу заслонки.

Таким образом, величина зазора между соплом и заслонкой и, следовательно, выходное давление прибора, являются мерой измеряемой температуры. Питание пневмодатчика осуществляется воздухом, очищенным воздушным фильтром под давлением, сниженным редуктором до (140 ± 14) кПа. Входное давление питания контролируется манометром 4, а выходное давление – манометром 18.



**Рис. 1.11. Схема термометров
с электрическим выходным сигналом:**

1 – термобаллон; 2 – капилляр; 3 – стрелка; 4 – шкала; 5 – манометрическая пружина; 6 – тяга; 7 – трибка; 8 – сектор; 9 – рычаг; 10 – флажок; 11 – механоэлектрический преобразователь; 12 – контроль 0-100 мВ; 13 – выход 0,5 мА; 14 – пружина корректора нуля; 15 – пружина

В термометрах с электрическим выходным сигналом (рис. 1.11) изменение измеряемой температуры воспринимается манометрической пружиной 5, которая, несколько выпрямляясь, приводит в движение показывающую стрелку 3 через сектор 8 и трибку 7 и механоэлектрический преобразователь 11. На оси сектора закреплен рычаг 9, к которому крепят измерительную пружину 75. Второй конец пружины впаян в рычаг флажка 10 преобразователя 11. Измерительная пружина 15, растягиваясь, передает усилие к свободному концу флажка 10 преобразователя. Перемещение флажка изменяет параметры преобразователя, в результате чего на его выходе появляется сигнал постоянного тока.

Достоинством манометрических термометров являются: возможность дистанционного измерения температуры без использования дополнительной энергии, сравнительная простота конструкции, возможность автоматической записи показаний, взрывобезопасность, нечувствительность к внешним магнитным полям.

К недостаткам относятся: относительно невысокая точность измерения, трудность ремонта при разгерметизации измерительной системы, низкая механическая прочность капилляра, небольшое расстояние дистанционной передачи показаний, значительная инерционность.

Типы и основные параметры манометрических термометров.

По способу выдачи измерительной информации термометры подразделяют на показывающие, самопишущие и комбинированные (показывающие и самопишущие). Показывающие приборы могут иметь дополнительные устройства для сигнализации и для передачи аналогового пневматического или электрического сигнала.

Самопишущие термометры могут изготавливаться с пневматическим пропорционально-интегральным регулирующим устройством.

Термобаллоны манометрических термометров выполняют с хвостовиком и без него. В зависимости от способа соединения термобаллона с корпусом термометры могут быть местные и дистанционные. В зависимости от формы диаграммы и поля записи самопишущие термометры подразделяют на дисковые, ленточные (с одним полем для записи; с двумя или несколькими обособленными полями для записи), карто-граммные. В зависимости от типа механизма для передвижения диаграммных лент или дисков самопишущие термометры изготавливают с часовым (механическим) или электрическим приводом.

В зависимости от вида заполнителя термосистемы область и диапазон измерений термометров приведены в таблице 1.5.

Область и диапазон измерений термометров

Заполнитель термосистемы	Диапазон измерения, °С	Измеряемые значения, °С
Газ	– 200 ... + 600	100; 150; 200; 250; 300; 400; 600
Жидкость	– 150 ... + 300	25; 50; 100; 150; 200; 250
Конденсат	– 50 ... + 300	50; 100; 120; 150

Класс точности термометров с газовым и жидкостным заполнителями термосистемы может быть 1; 1,5; 2,5.

Класс точности термометров с конденсационным заполнителем термосистемы может быть 1,5; 2,5; 4 и установлен для последних 2/3 температурной шкалы, для первой трети шкалы класс точности не должен быть ниже последующего низшего класса точности.

Манометрические газовые термометры применяют для измерения температуры от –150 до +600 °С. В качестве рабочего вещества в газовых термометрах используют обычно азот или гелий. Длина соединительного капилляра этих термометров может быть от 0,6 до 60 м. Точность показаний газовых манометрических термометров в основном зависит от изменения температуры окружающей среды. Для уменьшения погрешности, обусловленной изменением температуры, устанавливают термобиметаллический компенсатор в тягу передаточного механизма (биметаллическая пластина компенсатора рассчитана так, чтобы ее изгиб компенсировал смещение конца пружины, вызванное изменением температуры окружающей среды). Кроме этого, стремятся увеличить размеры термобаллона и уменьшить сечение капилляра. Чем больше длина капилляра, тем значительней должны быть размеры термобаллона. Поэтому газовые термометры имеют ограниченное применение.

Допускаемая дополнительная погрешность газовых термометров при отклонении температуры окружающей среды на 10 °С не должна превышать 0,5 %. Для увеличения рабочего давления термосистему газового термометра заполняют инертным газом под давлением в зависимости от диапазона измерения

температуры, Поэтому колебания атмосферного давления на показания газового термометра не влияют.

Преимущество газовых термометров – незначительная температурная погрешность и наибольшая для манометрических термометров длина капилляра.

Манометрические жидкостные термометры могут быть показывающими и самопишущими с унифицированными электрическими и пневматическими преобразователями. Их применяют для измерения температуры от -150 до $+600$ °С. Термосистемы этих термометров заполняют обычно кремнийорганическими жидкостями. При постоянном объеме термосистемы давление жидкости пропорционально изменению ее температуры, поэтому жидкостные манометрические термометры имеют равномерную шкалу.

На показания жидкостных манометрических термометров оказывают влияние изменения температуры, гидростатического и атмосферного давлений. Температурная погрешность у жидкостных термометров несколько больше, чем у газовых, поэтому длина капилляра у них не превышает 10 м. Для уменьшения температурной погрешности жидкостных термометров стремятся увеличить относительное количество термометрического вещества в термобаллоне по сравнению с находящимся в капилляре манометра, т. е. рабочий объем термобаллона увеличивают, а внутренние размеры рабочего элемента сводят к минимуму. С этой же целью применяют манометрические пружины с новым профилем сечения и термобиметаллический компенсатор.

Гидростатическая погрешность жидкостных манометрических термометров возникает в том случае, когда термобаллон расположен выше или ниже пружины. Последняя в этом случае будет испытывать большее или меньшее давление в зависимости от того, выше или ниже расположен термобаллон относительно пружины. Гидростатическая погрешность в этом случае может быть устранена путем коррекции нуля начального положения конца трубчатой пружины (указательной стрелки). Допустимые расстояния по высоте между термобаллоном и манометром указывают в инструкциях.

Для уменьшения влияния изменения атмосферного давления манометрические жидкостные термометры заполняют рабочей жидкостью при начальном давлении 1,5 – 2,0 МПа. Преимуществом жидкостных термометров являются небольшая инерционность и небольшие размеры термобаллона,

Манометрические конденсационные термометры изготавливают показывающими без встроенных устройств и со встроенными сигнальными устройствами, с пределами измерения от -50 до $+300$ °С. Их работа основана на зависимости давления насыщенного пара низкокипящей жидкости от температуры. В качестве рабочих жидкостей применяют: фреон, хлористый метил и ацетон, В конденсационных термометрах жидкостью заполняют только часть термобаллона (примерно 2/3); а остальную его часть, капилляры и манометрическую пружину – насыщенными парами этой жидкости. Для обеспечения постоянного заполнения капилляра жидкостью, конец его опускают до дна термобаллона. Характерной особенностью конденсационных термометров является значительная неравномерность шкалы (сжатой в первой трети шкалы).

Показания конденсационных термометров зависят от высоты расположения термобаллона по отношению к корпусу прибора, а также от изменения атмосферного давления. Погрешность изменения температуры окружающей среды теоретически отсутствует, так как давление в системе зависит от давления пара в термобаллоне, т. е. от изменяемой температуры. Атмосферное давление в случае его изменения дополнительно нагружает или разгружает манометрическую пружину, вызывая скручивание или ее выпрямление, что и обуславливает изменение показаний прибора.

Преимущество конденсационных манометрических термометров – небольшая температурная погрешность, сравнительно малые размеры термобаллона.

Технические характеристики некоторых манометрических термометров представлены в таблице 1.6.

**Технические характеристики некоторых
манометрических термометров**

Обозначение	Тип	Интервал применения, °С	Класс	Диаметр термобаллона, мм	Длина термобаллона, мм	Глубина погружения термобаллона, мм	Длина капилляра, м
ТГП-100М1	Газовый	-50...600	1 или 1,5	20 или 30	125 250 400	от 160 до 500	от 1,6 до 60
ТКП-100М1	Конденсационный	-25... 300	1 или 1,5	16	78	от 125 до 400	от 1,6 до 25
ТЖП-100	Жидкостной	-50...300	1 или 1,5	10	34 42 56 100	от 80 до 400	от 1,6 до 10

Теоретический расчет погрешностей показаний манометрических термометров.

В манометрических термометрах используется следующая зависимость давления от температуры

$$P = P_0 \cdot (1 + \alpha_v \cdot (T - T_0)), \quad (1.4)$$

где P и P_0 – давление газа или жидкости при температурах T и T_0 ; α_v – коэффициент объемного расширения (для газов $\alpha_v = 1/273$ 1/К)

Избыточный объем газа или жидкости, вытесняемый из термобаллона

$$\Delta V = (\alpha_v - 3 \cdot \alpha_{m\delta}) \cdot (T - T_0) \cdot V_0, \quad (1.5)$$

где $\alpha_{m\delta}$ – коэффициент объемного расширения материала термобаллона, 1/К; V_0 – объем жидкости при температуре T_0 , м³.

Погрешности от нагревания манометрической пружины ΔT_m и капиллярной трубки ΔT_k определяются по формулам:

$$\Delta T_m = \frac{V_m}{V_\delta} \cdot (T_m - T_\delta); \quad (1.6)$$

$$\Delta T_k = \frac{V_k}{V_\delta} \cdot (T_k - T_\delta), \quad (1.7)$$

где V_m , V_{σ} и V_k – объемы манометрической пружины, термобаллона и капилляра, м³; T_m , T_k и T_o – температуры пружины, капилляра и окружающей среды, °С.

Гидроскопическая погрешность

$$\Delta p = \Delta H \cdot \rho_v \cdot g, \quad (1.8)$$

где ΔH – изменение высоты термобаллона относительно пружины, м; ρ_v – плотность рабочего газа или жидкости; g – ускорение свободного падения м/с².

1.3. Термоэлектрические преобразователи

Назначение. Термоэлектрические преобразователи или термопары (ТП) предназначены для измерения температур различных сред, в том числе при испытаниях двигателей внутреннего сгорания (охлаждающей жидкости, смазки, топлива, выхлопных газов, теплового состояния двигателя и др.).

Рабочим органом термопреобразователя (рис. 1.12) является чувствительный элемент, состоящий из двух разнородных термоэлектродов 7, сваренных между собой на конце 9, который составляет горячий спай. Термоэлектроды изолированы по всей длине с помощью изоляторов 1 и помещены в защитную арматуру 8. Свободные концы элемента подключены к контактам термопреобразователя 6, расположенным в головке 3, которая закрывается крышкой 5.

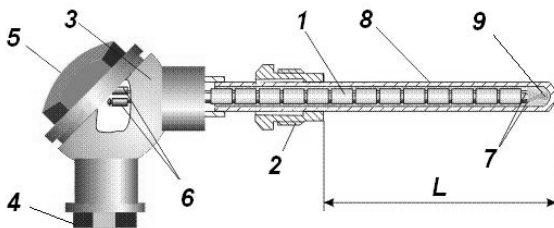


Рис.1.12. Термоэлектрический преобразователь:

1 – керамический изолятор; 2 – штуцер крепления; 3 – головка; 4 – прокладка; 5 – крышка; 6 – контакты; 7 – разнородные термоэлектроды; 8 – защитная арматура; 9 – сваренные на конце термоэлектроды.

Принцип действия. Принцип действия термопреобразователя основан на преобразовании тепловой энергии в термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) элемента при наличии разности температур между его свободными концами и горячим спаем.

Возникновение ТЭДС в термопреобразователе объясняется тем, что при его нагревании возникает поток электронов от горячего спая к холодному – эффекты Зеебека (возникновение ЭДС в месте спая двух разнородных проводников) и Томпсона (возникновение ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах). На холодном спае создается отрицательный потенциал, а на горячем – положительный $E(T)$. Разность этих потенциалов будет определять величину ТЭДС термопреобразователя

$$E(T, T_0) = E(T) - E(T_0). \quad (1.9)$$

Если температуру холодного спая поддерживать постоянной (она принимается равной температуре тройной точке воды – 0°C , когда $E(T_0) = 0$ мВ), то ТЭДС будет зависеть только от степени нагрева горячего спая $E(T)$, что позволяет градуировать измерительный прибор в соответствующих единицах температуры. В случае отклонения температуры холодного спая от 0°C , к показаниям вторичного прибора вводится соответствующая поправка $E(T_0)$.

Поправку вводят тремя способами: по градуировочной таблице; перестановкой стрелки показывающего прибора с нулевого положения на фактическую температуру; автоматическими устройствами.

В ГОСТ Р 8.585–2001 изложены следующие определения:

Термопара (ТП) – два проводника из разнородных материалов, соединенных на одном конце и образующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерений температуры.

Номинальная статическая характеристика термопары (НСХ) – номинально приписываемая термопаре данного типа зависимость ТЭДС от температуры рабочего конца и при постоянно заданной температуре свободных концов, выраженная в милливольтках.

Другими словами, НСХ – это зависимость развиваемой термопреобразователем ТЭДС от температуры рабочего спая t при нулевой температуре свободных концов $t_0 = 0$ °С (т.е. $E(t_0) = 0$ мВ). Она задается в виде таблиц или формул и обозначается условным символом в русском и международном обозначении.

Диапазон преобразований температур термопары – интервал температур термопары, в котором выполняется преобразование температур в ТЭДС;

Допускаемое отклонение от НСХ – максимально возможное отклонение ТЭДС термопары от номинального значения, удовлетворяющее техническим требованиям на термопару.

Градуировка термопары – определение зависимости ТЭДС от температуры рабочего конца при постоянном значении температуры свободных концов (обычно равной нулю).

Типы и основные параметры ТП. Данные о применяемых в настоящее время ТП приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Типы и основные параметры ТП

Тип	Условное обозначение НСХ	Материалы термоэлектродов (+ и -)	Диапазон измеряемых температур, °С	Кратковременный предел, °С
ТВР	ВР 5-1 (А-1) ВР 5-2 (А-2) ВР 5-3 (А-3)	Вольфрамрений (5% рения) – вольфрамрений (20% рения)	0...+2200	+2500
ТПР	ПР (В)	Платинородий (30% родия) – платинородий (60 % родия)	+300...+1600	+1800
ТПП	ПП (S) ПП (R)	Платинородий (10 % родия – S или 13 % родия – R) – платина	0...+1300	+1600
ТХК	ХК (К) ХК (Е)	Хромель – копель	-200...+600	+800
ТХА	ХА (К)	Хромель – алломель	-200...+1000	+1300
ТМК	МК (Т)	Медь – копель	-200...+700	+900
ТЖК	ЖК (J)	Железо – константан	-200...700	+ 900
ТНН	НН (N)	Никросил – нисил	-270...+1300	+1300

В соответствии с ГОСТ Р 8.585–2001 в настоящее время для обозначения НСХ должны использоваться латинские буквы (приведены в скобках) в соответствии с международной классификацией.

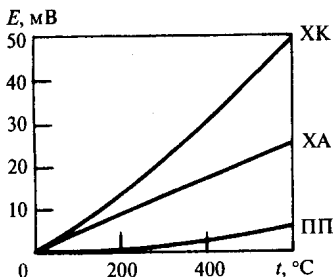


Рис. 1.13. Номинальные статические характеристики ТП

В обозначениях преобразователей первым указывается положительный электрод (например, у преобразователя ТХК положительный электрод – хромелевый, отрицательный – копелевый). На условных графических изображениях положительный электрод обозначается тонкой линией, отрицательный - толстой. При небольших диаметрах электродов верхний предел измерения может быть уменьшен. Зависимости ТЭДС от температуры для термопар нелинейны, поэтому в пределах диапазона применения изменяется их коэффициент преобразования (чувствительность).

На рисунке 1.13 приведены статические характеристики термопар ХА, ХК, ПП. Из графиков видно, что наибольшую ТЭДС развивает термопара ХК, наименьшую (из этих трех) термопара ПП. Поэтому при невысоких температурах целесообразнее использовать термопреобразователи типа ТХК.

Наиболее линейная характеристика у термопар ХА. Наиболее точной из этих трех является термопара ПП. Отклонение реальной градуировочной характеристики от номинальной определяются классом ТП. Классы обозначаются цифрами 1, 2, 3 (в порядке увеличения погрешности), причем внутри класса погрешность может зависеть от измеряемой температуры (табл. 1.10).

Рассмотрим недостатки и преимущества основных типов термопар.

Преимущества платиновых ТП: высокая термоустойчивость, устойчивость к агрессивным средам, постоянство ТЭДС, большой диапазон измерений, высокая точность. Недостаток – малые величины ЭДС.

Преимущества хромель-алюмелевых и хромель-копелевых ТП: большая величина развиваемой ТЭДС, устойчивость к окислительной среде. Недостатки: невысокие пределы измерения и влияние восстановительных сред (водорода окиси углерода).

Длина погружаемой (монтажной) части L в среду, температуру которой измеряют, выполняется различной для каждого конкретного типа термоэлектрического термометра.

Выпускаются *одинарные* (с одним чувствительным элементом) и *двойные* (с двумя чувствительными элементами) термоэлектрические термометры различных типов. Двойные термометры применяются для измерения температуры в одном и том же месте одновременно двумя вторичными приборами, установленными в разных пунктах наблюдения. Они содержат два одинаковых чувствительных элемента, заключенных в общую арматуру.

Абсолютные погрешности ТП приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8

Пределы допускаемых отклонений для температуры t

Подгруппа ТП	Класс точности	Диапазон измеряемых температур, °С	Предел допускаемых отклонений $\pm \Delta t$, °С
ТМК(Г)	3	-200... -66	$0,015 \cdot t $
	2	-66...40	1,0
		-40...135	1,0
		135...400	$0,0075 \cdot t $
		400...125	0,5
1	125...350	$0,004 \cdot t $	
ВР (А)	3	1000...2550	$0,007 \cdot t $
	2	1000...2550	$0,005 \cdot t $
ТПР (В)	3	600... 800	4,0
	2	800... 1800	$0,005 \cdot t $
ТПП (S, R)		2	600... 1800
	0...600		1,5
	1	600... 1600	$0,0025 \cdot t $
		0...1100	1,0
		1100...1600	$1,0 + 0,003 \cdot (-1100)$

Продолжение таблицы 1.8

ТХА (К) ТНН (N)	3	-250...-166,7	$0,015 \cdot t $
	2	-166,7...40	2,5
		-40...333,4	2,5
		333,4...1350	$0,0075 \cdot t $
1	-40...375	0,5	
	375...1350	$0,004 \cdot t $	
ТХК (L)	3	-200...-100	$0,015 \cdot t $
	2	-100...100	2,5
		-40...300	2,5
		300... 800	$0,7 + 0,005 \cdot t $
ТХК (E)	3	-200...-166,7	$0,015 \cdot t $
	2	-166,7...-40	2,5
		-40...333,4	2,5
		333,4...900	$0,0075 \cdot t $
	1	-40...375	1,5
375...800		$0,004 \cdot t $	
ТЖК (J)	2	-40...333,4	2,5
	1	333,4...900	$0,0075 \cdot t $
		-40...375	1,5
		375...750	$0,004 \cdot t $

При прокладке соединительной линии между термоэлектрическим термометром и вторичным прибором свободные концы термометра, находящиеся на зажимах в его головке, будут расположены около нагретых поверхностей, т.е. в зоне переменной температуры. Чтобы отнести эти концы в зону с постоянной и более низкой температурой, применяются так называемые *термоэлектродные удлиняющие провода*, состоящие из двух жил, изготовленных из металлов или сплавов, имеющих одинаковые термоэлектрические свойства с термоэлектродами термометра.

Посредством удлиняющих проводов производится как бы наращивание термоэлектродов термометра, позволяющее отнести свободные концы от места его установки в более благоприятные условия.

Для термометров из благородных металлов удлиняющие провода изготавливаются чаще всего из тех же материалов, что и термоэлектроды, тогда как для термометров из благородных металлов в целях удешевления удлиняющие провода выполняются из материалов, развивающих в паре между собой примерно ту же ТЭДС, что и термометр, для которого они предназначены.

При использовании удлиняющих проводов очень важно соблюдать правило подключения (полярность подключения). Например, нельзя хромелевый электрод удлинять константовым, а алюмелевый медным.

Простейшим стационарным устройством, позволяющим в известной мере стабилизировать температуру свободных концов и измерять ее, является коробка для свободных концов (коробка холодных спаев). Температуру свободных концов в этой коробке измеряют стеклянным жидкостным или другим термометром. Этот способ стабилизации температуры свободных концов хотя и применяется в эксплуатационных условиях, но является далеко несовершенным.

В последнее время для стабилизации температуры свободных концов термоэлектрических термометров широко применяют специальные термостаты с автоматическим поддержанием температуры. В качестве регулятора температуры обычно применяют простейший биметаллический терморегулятор. Подобные термостаты обеспечивают постоянство температуры в пределах $\pm (0,5-0,6)^\circ\text{C}$.

Образцовые ТП подразделяют на платинородий-платиновые, платиновые и вольфрамореневые.

Из-за неполного совпадения градуировочных характеристик термопары и удлиняющих ее проводов возникает дополнительная погрешность (табл. 1.9). Эту погрешность следует учитывать при оценке общей погрешности измерения температуры.

Таблица 1.9

Характеристика удлиняющих проводов

НСХ ТП	Наименование пары жил	Обозначение	Максимальная рабочая температура, $^\circ\text{C}$	Погрешность $^\circ\text{C}$
ХА(К)	медь-константан	М	100	5,5
ХА(К)	медь-титан/ медь-никель	МТ-НМ	300	4,9
ХК(L)	хромель/копель	ХК	100	3,3
ПП(R)	медь/сплав ТП	П	100	2,4
МК(M)	медь/копель	МК	100	3,3
ВР(A)	медь/медь-никель	М-МН	100	4,2

Примечание. Термопреобразователи ПР применяются без удлиняющих проводов.

Необходимость применения удлиняющих проводов отпадает при использовании термопар со встроенным в головку нормирующим преобразователем, в котором вводится поправка на изменение температуры свободных концов термопары и создается на выходе унифицированный токовый или цифровой сигналы. К таким преобразователям относятся ТХАУ, Метран 281 (интеллектуальный), в последнем используется термопара ТХА.

1.4 Термопреобразователи сопротивления

Устройство термопреобразователей. Конструкция технических термометров с металлическим термопреобразователем сопротивления показана на рисунке 1.14.

Чувствительный элемент представляет собой спираль 1 из тонкой проволоки, помещенную в многоканальную фарфоровую трубку 2 с капиллярными отверстиями. С торцов трубка плотно закрыта пробками 3 и 4. Каналы трубки со спиралью дополнительно заполнены керамическим порошком 5, который одновременно изолирует и поддерживает спираль. К концам спирали припаяны выводные провода 6. Чувствительный элемент вставлен в защитный чехол 7 наружным диаметром 10 мм. Выводные провода изолированы фарфоровыми бусами 8. Свободное пространство защитного чехла заполнено окисью алюминия 9. С помощью стальной втулки 10 защитный чехол присоединен к водозащищенной бакелитовой головке 11. В головке выводные провода припаяны к двум винтовым зажимам для подключения внешних проводов. ТС имеет штуцер 12 для крепления на оборудовании.

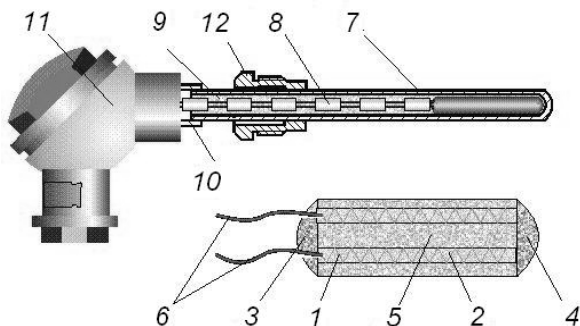


Рис.1.14. Конструкция термопреобразователя сопротивления:

1 – спираль; 2 – фарфоровая трубка; 3, 4 – пробки; 5 – керамический порошок; 6 – выводные провода; 7 – защитный чехол; 8 – фарфоровые бусы; 9 – окись алюминия; 10 – стальная втулка; 11 – бакелитовая головка; 12 – штуцер для крепления.

К достоинствам термопреобразователя сопротивлений можно отнести: высокую точность измерения температуры; возможность осуществления автоматической записи и дистанционной передачи показаний; возможность централизации контроля температуры путем присоединения взаимозаменяемых термопреобразователей через переключатель к одному измерительному прибору.

Недостатками термопреобразователя сопротивлений являются: необходимость индивидуального источника питания; относительно большие размеры чувствительного элемента; значительная инерционность; сложность устройства вторичных приборов.

Термопреобразователи сопротивления бывают проволочные и полупроводниковые.

Основные термины и определения.

Термометр сопротивления (ТС) – средство измерений температуры, состоящее из одного или нескольких термочувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещенных в герметичный защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору.

Чувствительный элемент термометра сопротивления (ЧЭ) – резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки с выводами для крепления соединительных проводов, имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры и предназначенный для использования в термометре сопротивления.

Длина монтажной части термометра сопротивления – для ТС с неподвижным штуцером или фланцем – расстояние от рабочего конца защитного корпуса до опорной плоскости штуцера или фланца, для ТС с подвижным штуцером или фланцем, а также без штуцера или фланца – расстояние от рабочего конца защитной арматуры до головки, а при ее отсутствии – до мест заделки выводов проводников.

Длина погружаемой части термометра сопротивления – максимально возможная глубина погружения ТС в среду при температуре верхнего предела рабочего диапазона без нарушения работоспособности ТС.

Примечание: для ТС с монтажными элементами длина погружаемой части ТС равна длине монтажной части ТС.

Минимальная глубина погружения термометра сопротивления – глубина погружения ТС в среду с однородным распределением температуры, такая, что при дальнейшем погружении показания ТС не изменяются более чем на 1/5 допуска соответствующего класса, сопротивление ТС при этом остается в пределах допуска.

Диапазон измерений термометра сопротивления – диапазон температур, в котором выполняется нормированная в соответствии с настоящим стандартом зависимость сопротивления ТС от температуры в пределах соответствующего класса допуска.

Рабочий диапазон температур термометра сопротивления – диапазон температур, находящийся внутри диапазона измерений или равный ему в пределах которого изготовителем установлены показатели надежности ТС.

Номинальная температура применения термометра сопротивления – температура эксплуатации ТС, для которой нормированы показатели надежности и долговечности.

Примечание: номинальная температура применения ТС может быть установлена равной верхнему пределу рабочего диапазона температур ТС и (или) определена как одно или несколько наиболее вероятных значений внутри рабочего диапазона.

Номинальное сопротивление термометра сопротивления R_0 , Ом – нормированное изготовителем сопротивление ТС при 0°C , округленное до целых единиц, указанное в его маркировке и рекомендуемое для выбора из ряда: 10; 50; 100; 500; 1000 Ом.

Номинальная статическая характеристика НСХ – зависимость сопротивления ТС или ЧЭ от температуры, рассчитанная по формулам, приведенным в разделе 5 для ТС или ЧЭ с конкретным значением R_0 .

Примечание: условное обозначение НСХ состоит из значения номинального сопротивления ТС или ЧЭ R_0 и обозначения типа. Русское обозначение типа приводят за значением номинального сопротивления, латинское обозначение – перед значением номинального сопротивления. Например: 100П означает НСХ для платинового ТС (или ЧЭ) с $a=0,00391^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $R_0=100$ Ом; Pt100 означает НСХ для платинового ТС (или ЧЭ) с $a=0,00385^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $R_0=100$ Ом.

Температурный коэффициент термометра сопротивления α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$ – коэффициент, определяемый по формуле

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100^{\circ}\text{C}}, \quad (1.10)$$

где R_{100} , R_0 – значения сопротивления ТС по НСХ соответственно при 100°C и 0°C , и округленный до пятого знака после запятой.

Допуск – максимально допустимое отклонение от НСХ, выраженное в градусах Цельсия.

Электрическое сопротивление изоляции термометра сопротивления – электрическое сопротивление между внешними выводами ТС и защитным кор-

пусом, а также между цепями ТС с двумя или более ЧЭ при комнатной или другой заданной температуре, измеряемое при заданном испытательном напряжении.

Электрическая прочность изоляции термометра сопротивления – напряжение между выводами и корпусом ТС (или, в случае если термометр имеет несколько чувствительных элементов, также и между цепями ЧЭ), которое ТС может выдержать без повреждения в течение заданного времени.

Самонагрев термометра сопротивления – повышение температуры ТС, вызванное нагревом ЧЭ измерительным током.

Максимальный измерительный ток – измерительный ток, вызывающий самонагрев ТС не превышающий 20 % допуска соответствующего класса и не приводящий к выходу показаний ТС за пределы допуска.

Время термической реакции – время, которое требуется для изменения показаний ТС на определенный процент полного изменения при ступенчатом изменении температуры среды.

Термоэлектрический эффект – эффект возникновения термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) в измерительной цепи ТС в условиях температурных градиентов вследствие использования различных металлов и их неоднородности.

Гистерезис – разность показаний ТС при одной и той же температуре, полученных в температурных циклах при нагреве и охлаждении ТС.

Классификация ТС. Типы ТС и ЧЭ, приведены в таблице 1.10.

Таблица 1.10

**Обозначения типа, температурные коэффициенты
и классы допуска ТС и ЧЭ**

Тип ТС	Обозначение типа ТС	$\alpha, ^\circ\text{C}^{-1}$	Класс допуска		
			для проволочных ЧЭ	для пленочных ЧЭ	для ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W0.1, W0.15, W0.3, W0.6	F0.1, F0.15, F0.3, F0.6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	М	0,00428	A, B, C	-	A, B, C
Никелевый	Н	0.00617	С	-	С

Основные параметры преобразователей и обозначение их НСХ приведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11

Основные параметры ТС

Тип ТС	Номинальное сопротивление при 0 °С, Ом	Условное обозначение НСХ ТС	Диапазон измеряемых температур, °С
ТСП	1	1П	-50 ... +1100
	5	5П	-100 ... +1100
	10	10П	-200 ... +1100
	50	50П	-260 ... +1100
	100	100П	-260 ... +1100
	500	500П	-260 ... +300
ТСМ	10	10М	-50 ... +200
	50	50М	-50 ... +200
	100	100М	-200 ... +200

Преимуществами платиновых термопреобразователей сопротивлений являются: большой температурный коэффициент электрического сопротивления и высокое удельное сопротивление; устойчивость к окислительной (воздушной) среде; способность длительное время сохранять свои характеристики. К недостаткам можно отнести: зависимость сопротивления платиновой проволоки от температуры, распыление платины при температуре близкой к 1000 °С. Поэтому, исходя из экономических соображений и механической прочности чувствительного элемента, выполненного из тонкой платиновой проволоки, верхний предел измерения температуры платиновыми термопреобразователями ограничивают 750 °С.

В зависимости от назначения и применения платиновые термопреобразователи сопротивлений делят на три группы: эталонные; образцовые (1-го и 2-го разрядов); рабочие (повышенной точности и технические).

Эталонные термопреобразователи сопротивлений служат для воспроизведения Международной практической температурной шкалы в интервале температур от -259,34 до +630,74 °С.

Образцовые платиновые термопреобразователи 1-го разряда применяют для проверки образцовых платиновых термопреобразователей 2-го разряда, об-

разцовых ртутных термометров, рабочих жидкостных термометров повышенной точности и для контроля температуры кипения и затвердевания веществ, применяемых для поверки термопреобразователей. Образцовые платиновые термопреобразователи 2-го разряда служат для поверки рабочих средств измерения температуры.

Медь и никель – относительно недорогие металлы. Из них достаточно просто получить тонкую проволоку высокой чистоты со значительным температурным коэффициентом электрического сопротивления.

Недостаток меди и никеля – небольшое удельное сопротивление и интенсивное окисление при невысоких температурах.

Номинальная статическая характеристика и классы допуска. Метрологические характеристики нормируемые в соответствии с ГОСТ Р 8.625–2006, распространяются на ЧЭ и ТС при подключении непосредственно к их выводам и на ТС при подключении к клеммам головки в соответствии с указанной изготовителем схемой. Если на корпусе ТС с двухпроводной схемой указано значение сопротивления внутренних проводов, то оно должно быть вычтено из значения измеренного сопротивления ТС.

Примечание – при подключении двухпроводного ТС к измерительной установке с помощью двух соединительных проводов их сопротивление входит в состав измеренного сопротивления ТС и должно быть вычтено из результата измерения.

НСХ ТС и ЧЭ в пределах диапазона измерений рассчитывают по следующим формулам.

Платиновые ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00385^\circ\text{C}^{-1}$:

для диапазона измерений от минус 200°C до 0°C :

$$R_1 = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ\text{C}^{-1}) \cdot t^3]. \quad (1.11)$$

для диапазона измерений от 0°C до 850°C :

$$R_2 = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \quad (1.12)$$

где R_1 – сопротивление ТС, Ом, при температуре t , $^\circ\text{C}$; R_2 – номинальное сопротивление ТС, Ом, при температуре 0°C .

Значения постоянных коэффициентов следующие:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}; C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}.$$

Платиновые ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$:

для диапазона измерений от минус 200°C до 0°C:

$$R_1 = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \cdot t^3]. \quad (1.13)$$

для диапазона измерений от 0°C до 850°C:

$$R_2 = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2). \quad (1.14)$$

Значения постоянных коэффициентов следующие:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}; C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}.$$

Медные ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00428 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$:

для диапазона измерений от минус 180°C до 0°C:

$$R_1 = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t (t + 6,7 \text{ } ^\circ\text{C}) + C \cdot t^3]. \quad (1.15)$$

для диапазона измерений от 0°C до 200°C:

$$R_1 = R_0 \cdot (1 + A \cdot t), \quad (1.16)$$

Значения постоянных коэффициентов следующие:

$$A = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; B = -6,2032 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}; C = -8,5154 \cdot 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}.$$

Никелевые ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00617 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$:

для диапазона измерений от минус 60°C до плюс 100°C:

$$R_2 = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \quad (1.17)$$

для диапазона измерений от 100°C до 180°C:

$$R_1 = R_0 \cdot [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100 \text{ } ^\circ\text{C}) \cdot t^2]. \quad (1.18)$$

Значения постоянных коэффициентов следующие:

$$A = 5,4963 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; B = 6,7556 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}; C = 9,2004 \cdot 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}.$$

В приложении даны таблицы НСХ, рассчитанные по приведенным выше уравнениям для ТС, имеющих номинальное сопротивление R_0 при 0°C, равное 100 Ом. Для ТС, имеющих номинальное сопротивление R_0 , отличное от 100 Ом, табличные значения НСХ могут быть рассчитаны по формуле

$$R_{\text{НСХ}}(t) = R_{\text{таб}}(t) \cdot R_0 / 100. \quad (1.19)$$

где $R_{\text{нск}}(t)$ – значение сопротивления ТС по НСХ при температуре t , °С; $R_{\text{таб}}$ – значение сопротивления приложения (НСХ для $R_0 = 100$ Ом) при температуре t , °С; R_0 – номинальное сопротивление ТС при температуре 0°С.

С целью повышения точности измерений для ТС может быть выполнена его индивидуальная градуировка с получением индивидуальных коэффициентов зависимости сопротивления от температуры.

Допуски, соответствующие определенным классам ТС по классификации, приведенной в таблице 1.12, и диапазоны измерений для ТС и ЧЭ приведены в таблице 1.13. Данные допуски должны быть выполнены для ТС и ЧЭ с любым номинальным значением сопротивления.

Таблица 1.12

**Классы допуска и диапазоны измерений для термометров
сопротивления и чувствительных элементов**

Класс допуска	Допуск, °С	Диапазон измерений, °С			
		Платиновый ТС, ЧЭ		Медный ТС, ЧЭ	Никелевый ТС, ЧЭ
		проволочный	пленочный		
AA W 0.1 F 0.1	$\pm(0,1+0,0017 \cdot t)$	От –50 до +250	От –50 до +250	–	–
A W 0.15 F 0.15	$\pm(0,15+0,002 \cdot t)$	От –100 до +450	От –50 до +450	От –50 до +120	–
B W 0.3 F 0.3	$\pm(0,3+0,005 \cdot t)$	От –196 до +660	От –50 до +600	От –50 до +200	–
C W 0.6 F 0.6	$\pm(0,6+0,01 \cdot t)$	От –196 до +660	От –50 до +600	От –180 до +200	От –160 до +180

Примечание: $|t|$ – абсолютное значение температуры, °С, без учета знака.

Допуски ТС и ЧЭ для величин сопротивлений при температуре t получают умножением допусков из таблицы 1.12 на коэффициент чувствительности dR/dt , Ом/°С, при температуре t , определенный по интерполяционным уравнениям (1.13)...(1.18). Для примера в таблице 1.13 приведены допуски по сопротивлению платинового ТС номинальным сопротивлением 100 Ом при температуре 0°С и 100°С.

**Допуски по сопротивлению платинового термометра сопротивления
номинальным сопротивлением 100 Ом, $\alpha = 0,00391^\circ\text{C}^{-1}$**

Класс допуска	Допуск, Ом	
	при 0°C	при 100°C
АА	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$
А	$\pm 0,06$	$\pm 0,13$
В	$\pm 0,12$	$\pm 0,31$
С	$\pm 0,24$	$\pm 0,62$

Допуски для платиновых ТС при температурах вне диапазона измерений, указанного в таблице 1.13, должны быть установлены техническими документами на ТС конкретного типа.

Для платиновых ТС, требования к точности которых отличны от требований ГОСТ Р 8.624–2006 и установлены в технических документах на ТС конкретного типа, рекомендуется классы допуска и диапазоны нормировать, опираясь на допуск класса В. Например, «1/5 В, диапазон 0/100» означает допуск $\pm(0,06^\circ\text{C} + 0,001 \cdot |t|)$ в диапазоне температур от 0°C до 100°C.

Маркировка ТС. На корпус ТС или на прикрепленную к нему бирку должна быть нанесена маркировка, включающая в себя следующие данные:

модификацию ТС по номенклатуре изготовителя;

число ЧЭ (при наличии двух или более ЧЭ) и условное обозначение НСХ;

класс допуска;

схему соединения проводов;

рабочий диапазон температур.

Для ТС, подлежащих поверке, указывают также серийный номер.

Пример: ТСПТ 101/2×100П/В/3/–150 ...+200,

где ТСПТ 101 – модификация ТС; 2 – два ЧЭ; 100 П – обозначение НСХ ($R_0=100$ Ом, платиновый ТС с $\alpha=0,00391^\circ\text{C}^{-1}$); В – класс допуска; 3 – трехпроводная схема; –196 ... +200 – рабочий диапазон температур, °С.

Примечание: на платиновые ТС ($\alpha=0,00391^{\circ}\text{C}^{-1}$), изготовленные для продажи на экспорт, обозначение типа «П» должно быть заменено на Pt(391), причем оба обозначения П и Pt(391) эквивалентны на внутреннем рынке.

Схемы включения термопреобразователей сопротивления в измерительную цепь. При измерении температуры с помощью термопреобразователей сопротивления применяют уравновешенные и неуравновешенные мосты постоянного тока.

Схема уравновешенного моста приведена на рисунке 1.15а. В одно из плеч моста включен термочувствительный элемент R_T (ТСМ, ТСП или терморезистор). Питание от источника напряжения GB подключено к одной из диагоналей моста, в другую включен измерительный прибор. Если мост уравновешен, то ток в измерительной диагонали равен нулю, что достигается при соотношении сопротивлений плеч $R_3 = R_T(R_2/R_1)$.

Принцип измерения температуры состоит в том, что при изменении сопротивления R_T с помощью переменного резистора R_3 добиваются равновесия моста. Таким образом, указатель шкалы связан с подвижным контактом переменного резистора R_3 , причем характер шкалы полностью соответствует температурной характеристике термочувствительного элемента. Измерительный прибор PA служит в качестве нуль-индикатора, а шкала переменного резистора отградуирована в $^{\circ}\text{C}$.

Поскольку R_T включает в себя и сопротивление соединительных проводов, изменяющих свое сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды и вносящих систематическую погрешность в результате измерения, то используют трехпроводную схему включения (см. пунктирную линию к точке e' рисунок 1.15а). В результате чего происходит компенсация, т.к. по закону Кирхгофа сохранится равенство $R_2R_T = R_1R_3$.

К преимуществам уравновешенной схемы относится независимость точности измерения от колебаний напряжения источника, что важно при использовании батарей или аккумуляторов.

Недостаток схемы – необходимость ручной настройки шкалы при измерении.

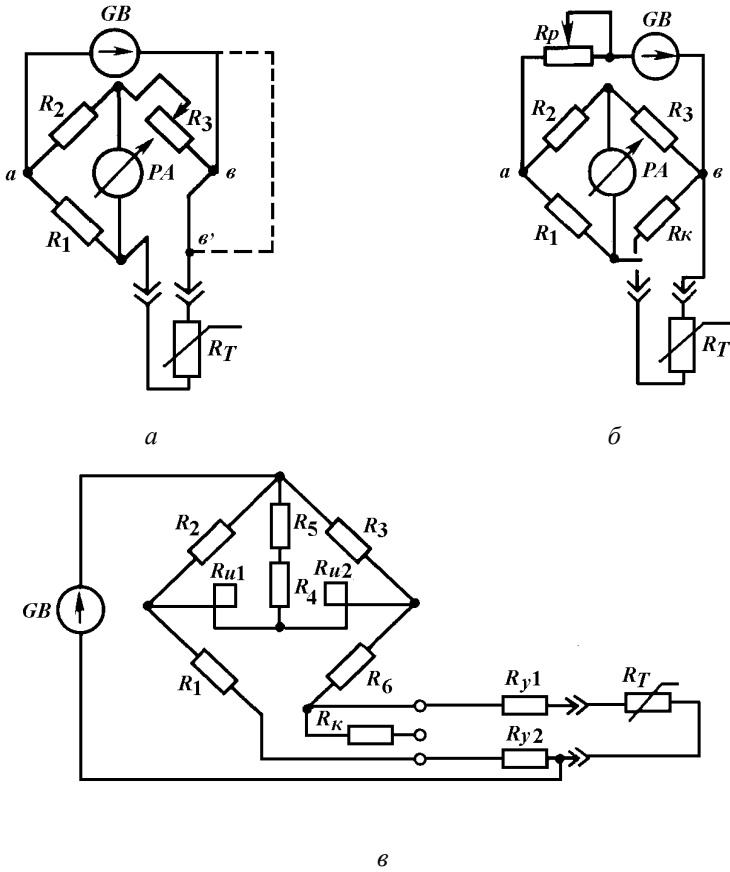


Рис. 1.15. Измерение сопротивления способом:
 а – уравновешенного моста; б – неуравновешенного моста;
 в – с помощью логометра

Схема неуравновешенного моста приведена на рисунке 1.15б. Равновесие моста обеспечивается при настройке в одной точке температурного диапазона измерения (обычно в его начале), а при разбалансе моста определяют ток в измерительной диагонали сопротивление

$$I = \frac{U_{ав} (R_1 R_3 - R_2 R_T)}{R_2 R_3 (R_1 + R_T)}. \quad (1.20)$$

В этом случае шкала измерительного прибора PA отградуирована в $^{\circ}C$, но она нелинейно связана с температурной характеристикой термочувствительного элемента, так как величина R_T входит в числитель и знаменатель выражения (1.20). Шкала приблизительно линейна при небольших изменениях температуры и более сжата к концу температурного диапазона. Кроме того, точность измерения существенно зависит от напряжения $U_{ав}$. Чтобы обеспечить его постоянство, используется переменный резистор R_p , который настраивают после переключения измерительной цепи на контрольный резистор R_k . Сопротивление R_k соответствует значению сопротивления R_T при некоторой температуре, которая на шкале отмечена красным. При переключении на сопротивление R_k указатель PA должен устанавливаться на этой метке. Таким образом, при использовании уравновешенной схемы измерения необходимо обеспечить стабильность напряжения моста.

Схема измерения сопротивления с использованием логометров лишена этого недостатка (рис. 1.15в). Указатель прибора перемещается пропорционально отношению токов в двух измерительных катушках, которые подключаются в измерительную диагональ моста. Для измерения угла полного отклонения подвижной системы при настройке используется резистор R_4 , а для температурной компенсации измерительных катушек – резистор R_5 .

1.5. Измерение температуры термопарой с милливольтметром

Термоэлектрические преобразователи или термопары (ТП) предназначены для измерения температур различных сред, в том числе при испытаниях двигателей внутреннего сгорания (охлаждающей жидкости, смазки, топлива, выхлопных газов, теплового состояния двигателя и др.).

Термопара – два проводника из разнородных материалов, соединенных на одном конце и образующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерений температуры.

Обозначение типа термопары зависит от состава. В таблице 1.14 представлены условные обозначение термопреобразователей по ГОСТ Р. 8.585–2001 и принятые в промышленности.

Таблица 1.14

Условное обозначение типов термопреобразователей

Обозначение типа термопары по ГОСТ Р. 8.585–2001	Обозначение промышленного термопреобразователя
R	ТПП (Платина - 13 % родий/платина)
S	ТПП (Платина - 10 % родий/платина)
B	ТПР (Платина - 30 % родий/платина - 6 % родий)
J	ТЖК [Железо/медь - никель (железо/константан)]
T	ТМК [Медь/медь - никель (медь/константан)]
E	ТХКн [Никель - хром/медь - никель (хромель/константан)]
K	ТХА [Никель - хром/никель - алюминий (хромель/алюмель)]
N	ТНН [Никель - хром - кремний/никель - кремний (нихро-сил/нисил)]
A (A-1, A-2, A-3)	ТВР (Вольфрам - рений/вольфрам - рений)
L	ТХК (Хромель/копель)
M	ТМК (Медь/копель)

Принцип действия термопреобразователя основан на преобразовании тепловой энергии в термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) элемента при наличии разности температур между его свободными концами и горячим спаем.

ТЭДС измеряют с помощью милливольтметров и потенциометров.

Рассмотрим методику решения задач на примере. Термопара, имеющая сопротивление $R_{\text{вы}}$, подключена к милливольтметру с внутренним сопротивлением $R_{\text{в}}$, измерения проводятся в диапазоне *ДИ*.

Требуется:

1. Изобразить схему подключения термопары к милливольтметру.
2. Определить диапазон изменения напряжения на выводах милливольтметра при температуре свободных концов термопары, если $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3. Определить систематическую погрешность, если $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

4. Определить систематическую погрешность, если сопротивление подключаемых проводов будет по 5 Ом.

Исходные данные сводим в таблицу 1.15.

Таблица 1.15

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Сопротивление измерительной цепи	$R_{\text{вн}}$	215 Ом
2. Внутреннее сопротивление вольтметра	R_v	20 Ом
3. Диапазон измерений	$ДИ$	$-50\dots+100\text{ }^\circ\text{C}$
4. Тип термопары	$ТХА(K)$	–

1.5.1. Схема подключения термопары к милливольтметру

Схема подключения термопары к милливольтметру приведена на рисунке 1.16.

1.5.2. Определяем диапазон изменения напряжения на выводах милливольтметра

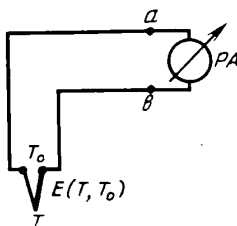


Рис. 1.16. Схема измерения ТЭДС милливольтметром

Определяем диапазон изменения напряжения на выводах милливольтметра при температуре свободных концов термопары, если $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$, по формуле:

$$U_{\text{ав}} = E(T, T_0)/(1+R_{\text{вн}}/R_v), \quad (1.21)$$

где $E(T, T_0)$ – ТЭДС термопары, мВ, при температуре T горячих спаев (измерительных спаев) и T_0 – холодных спаев, $^\circ\text{C}$; R_v – внутреннее сопротивление вольтметра, Ом; $R_{\text{вн}}$ – сопротивление измерительной цепи, в которое входит сопротивление термопары, соединительных проводов, контактов и т.п., Ом.

По таблице ПЗ (приложения) определяем значения ТЭДС термопары ТХА (К) при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$E(-50, 0) = -1,889\text{ мВ.}$$

$$E(+100, 0) = +4,096\text{ мВ.}$$

Полученные значения подставляем в формулу (1.21)

$$U_{\text{ав}(-50^{\circ}\text{C})} = -1,889/(1+215/20) = -0,1608\text{ мВ}$$

$$U_{\text{ав}(+100^{\circ}\text{C})} = +4,096/(1+215/20) = +0,3486\text{ мВ.}$$

1.5.3. Определяем диапазон изменения напряжения на выводах милливольтметра и систематическую погрешность, если $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

По таблице ПЗ (приложения) определяем значения ТЭДС термопары ТХА(К) при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, если $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$E(-50, 20) = -1,889 - 0,798 = -2,687\text{ мВ.}$$

$$E(+100, 20) = +4,096 - 0,798 = 3,298\text{ мВ.}$$

Полученные значения подставляем в формулу (1.1)

$$U_{\text{ав}(-50^{\circ}\text{C}; +20\text{ }^{\circ}\text{C})} = -2,687/(1+215/20) = -0,2287\text{ мВ}$$

$$U_{\text{ав}(+100^{\circ}\text{C}; +20\text{ }^{\circ}\text{C})} = +3,298/(1+215/20) = +0,2807\text{ мВ.}$$

$$\Delta U_{\text{ав}} = U_{\text{ав}(-50^{\circ}\text{C}; +20\text{ }^{\circ}\text{C})} - U_{\text{ав}(+100^{\circ}\text{C}; +20\text{ }^{\circ}\text{C})} = -0,2287 - (+0,2807) = -0,5094\text{ мВ.}$$

Таким образом, в показании милливольтметра будет присутствовать аддитивная систематическая погрешность $\Delta U_{\text{ав}} = -0,5094\text{ мВ}$, которую необходимо учитывать. В виде приведенной погрешности это значение составит

$$\gamma = \frac{\Delta U_{\text{ав}}}{X_N} 100\%, \quad (1.22)$$

где X_N – нормирующее значение изменяемой величины.

$$\gamma = |-0,5094/(+0,3486 - (-0,1608)) \cdot 100| = 13,33\%,$$

что достаточно велико.

1.5.4. Определяем систематическую погрешность, если сопротивление подключаемых проводов будет по 5 Ом

При наличии двух соединительных проводов с сопротивлением по 5 Ом каждый сопротивление измерительной цепи увеличится на 10 Ом и составит

$$R'_{\text{вн}} = 215 + 10 = 225 \text{ Ом.}$$

Полученное значение подставляем в формулу (1.21)

$$U'_{\text{ав}(-50^{\circ}\text{C})} = -1,889/(1+225/20) = -0,1542 \text{ мВ}$$

$$U'_{\text{ав}(+100^{\circ}\text{C})} = +4,096/(1+225/20) = +0,3344 \text{ мВ.}$$

$$\Delta U'_{\text{ав}} = U'_{\text{ав}(-50^{\circ}\text{C})} - U_{\text{ав}(-50^{\circ}\text{C})} = -0,1542 - (-0,1608) = 0,0066 \text{ мВ.}$$

$$\Delta U'_{\text{ав}} = U'_{\text{ав}(+100^{\circ}\text{C})} - U_{\text{ав}(+100^{\circ}\text{C})} = +0,3344 - 0,3486 = -0,0142 \text{ мВ.}$$

Таким образом, в показании милливольтметра будет присутствовать мультипликативная систематическая погрешность, изменяющаяся в зависимости от показаний прибора следующим образом, табл. 1.16, которую необходимо учитывать при измерениях.

В виде приведенной погрешности это значение составит

$$\gamma = |0,0066/(+0,3486 - (-0,1608)) \cdot 100| = 1.3 \%;$$

$$\gamma = |-0,0142/(+0,3486 - (-0,1608)) \cdot 100| = 2.8 \%,$$

что достаточно велико.

Таблица 1.16

**Динамика мультипликативной систематической погрешности
от наличия неучтенного сопротивления проводов**

Измеряемое значение температуры	Показания прибора, мВ		Значение погрешности, мВ
	истинное	реальное	
- 50 °С	- 0,1608	- 0,1542	0,0066
0 °С	0	0	0
+ 50 °С	+ 0,1722	+ 0,1651	- 0,0071
+ 100 °С	+ 0,3486	+ 0,3344	- 0,0142

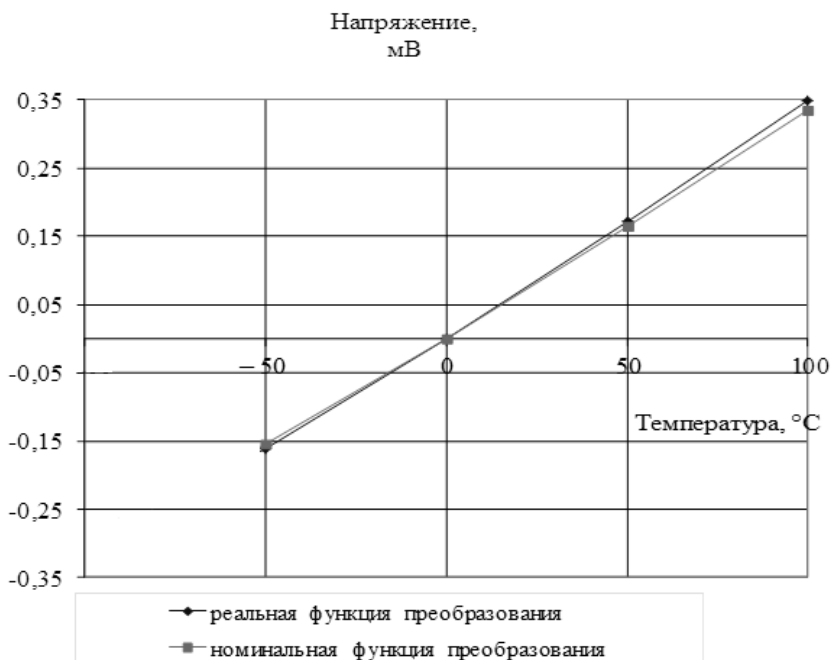


Рис. 1.17. Динамика мультипликативной систематической погрешности от наличия неучтенного сопротивления проводов

Варианты заданий для работы по теме 1.5

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 1.7 и 1.8

Таблица 1.17

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_v , Ом	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Тип термпары	ТПП (R)	ТХК (L)	ТХА (K)	ТПП (S)	ТХК (L)	ТХА (K)	ТПП (R)	ТХК (L)	ТХА (K)	ТПП (S)

Таблица 1.18

Параметр	<i>Вторая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{вн}$, Ом	10	15	18	13	14	17	16	12	11	19
ДИ, °C	-50...+150		±50		0...+160		-30...+180		-20...+250	

1.6. Измерение температуры с помощью термопары, подключенной к потенциометру

Рассмотрим методику решения задач на примере. ТЭДС измеряется с помощью потенциометра, в котором используется нормальный элемент с ЭДС $E_{нэ} = 1,01183$ В, который имеет сопротивление $R_{нэ}$.

Требуется:

1. Изобразить принципиальную схему потенциометра.
2. Определить значения ТЭДС для заданной термопары, если уравнивание произошло при сопротивлениях R_{p1} и R_{p2} .
3. Определить погрешность потенциометра при падении ЭДС нормального элемента на величину $\Delta E_{нэ}$

Исходные данные сводим в таблице 1.19.

Таблица 1.19

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. ЭДС нормального элемента	$E_{нэ}$	1,01183 В
2. Падение ЭДС	$\Delta E_{нэ}$	1,83 мВ
3. Сопротивление нормального элемента	$R_{нэ}$	205 Ом
4. Сопротивления, при которых произошло уравнивание	R_{p1} R_{p2}	0,41 Ом 0,18 Ом
5. Тип термопары	ТТТТ(S)	–

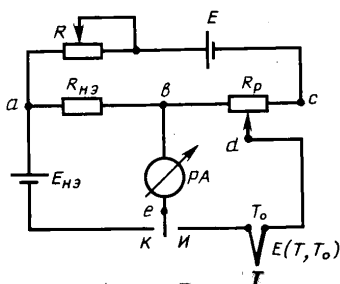


Рис. 1.18. Схема измерения ТЭДС потенциометром

1.6.1. Схема подключения термопары к потенциометру

Схема подключения термопары к потенциометру приведена на рисунке 1.18.

1.6.2. Определяем значения ТЭДС для заданной термопары

Значения ТЭДС, если уравновешивание произошло при сопротивлениях R_{p1} и R_{p2} , определяем по формуле:

$$E(T, T_0) = I \cdot R_{bd} = E_{нз} \cdot R_{bd} / R_{нз}, \quad (1.23)$$

где $I = E_{нз} / R_{нз}$ – ток в измерительной цепи ac , А; $E_{нз}$ – ЭДС нормального (образцового) элемента питания, В; $R_{нз}$ – сопротивление нормального элемента питания, Ом; R_{bd} – часть сопротивления R_p , при котором произошло уравновешивание, Ом.

$$E(T, T_0)_1 = 1,01183 \cdot 0,41 / 205 = 0,002024 \text{ В} = 2,024 \text{ мВ.}$$

$$E(T, T_0)_2 = 1,01183 \cdot 0,18 / 205 = 0,0008884 \text{ В} = 0,8884 \text{ мВ.}$$

Для термопары ТПП (S) по таблице П2 (приложения) определяем значения температуры

$$E(+267) = 2,025 \text{ мВ.}$$

$$E(+132) = 0,888 \text{ мВ.}$$

1.6.3. Определяем погрешность потенциометра при падении ЭДС нормального элемента

Определяем ТЭДС при падении ЭДС нормального элемента на величину $\Delta E_{нз} = 1,83 \text{ мВ}$ по формуле (1.23)

$$E(T, T_0)_1 = (1,01183 - 0,00183) \cdot 0,41 / 205 = 0,00202 \text{ В} = 2,02 \text{ мВ.}$$

$$E(T, T_0)_2 = (1,01183 - 0,00183) \cdot 0,18 / 205 = 0,00088683 \text{ В} = 0,8868 \text{ мВ.}$$

Определяем погрешность измерения ТЭДС

$$\Delta E(T, T_0)_1 = E(T, T_0)_1 - E(T, T_0)_1;$$

$$\Delta E(T, T_0)_1 = 2,02 - 2,024 = -0,004 \text{ мВ.}$$

$$\Delta E(T, T_0)_2 = E(T, T_0)_2 - E(T, T_0)_2;$$

$$\Delta E(T, T_0)_2 = 0,8868 - 0,8884 = -0,0016 \text{ мВ.}$$

Погрешность является систематической мультипликативной, в относительном виде она равна:

$$\delta_1 = \Delta E(T, T_0)_1 / E(T, T_0)_1 \cdot 100 \%;$$

$$\delta_1 = |(-0,004/2,024) \cdot 100 \%| = 0,2 \%$$

$$\delta_2 = \Delta E(T, T_0)_2 / E(T, T_0)_1 \cdot 100 \%;$$

$$\delta_2 = |(-0,0016/0,8884) \cdot 100 \%| = 0,18 \%$$

Варианты заданий для работы по теме .1.6

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 1.20 и 1.21

Таблица 1.20

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_{нз}$, Ом	250	260	270	280	190	200	210	220	230	240
$\Delta E_{нз}$, мВ	1,83	0,83	1,13	0,33	1,33	1,73	1,43	0,43	1,63	0,63

Таблица 1.21

Параметр	<i>Вторая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип термопары	ТХА (К)	ТПП (S)	ТХК (L)	ТХА (К)	ТПП (R)	ТХК (L)	ТПП (R)	ТХК (L)	ТХА (К)	ТПП (S)
R_{p1} , Ом	2,10	0,52	2,40	1,70	0,42	3,10	0,26	3,44	1,50	0,34
R_{p2} , Ом	1,05	0,26	1,20	0,85	0,21	1,55	0,13	1,72	0,75	0,17

1.7. Измерение температуры с помощью термосопротивления, включенного в уравновешенный мост

Термометр сопротивления (ТС) – средство измерений температуры, состоящее из одного или нескольких термочувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещенных в герметичный защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору.

К достоинствам ТС можно отнести: высокую точность измерения температуры; возможность осуществления автоматической записи и дистанционной передачи показаний; возможность централизации контроля температуры путем присоединения взаимозаменяемых термопреобразователей через переключатель к одному измерительному прибору.

Недостатками ТС являются: необходимость индивидуального источника питания; относительно большие размеры чувствительного элемента; значительная инерционность; сложность устройства вторичных приборов.

Термопреобразователи сопротивления бывают проволочные и полупроводниковые.

При измерении температуры с помощью термопреобразователей сопротивления применяют уравновешенные и неуравновешенные мосты постоянного тока.

Рассмотрим методику решения задач на примере. При измерении термосопротивления заданного класса допуска с помощью уравновешенного моста известны сопротивления плеч R_1 и R_2 , тип термосопротивления и диапазон измерения.

Требуется:

1. Изобразить принципиальную схему уравновешенного моста.
2. Определить полное сопротивление переменного резистора R_3 и цену деления шкалы ($^{\circ}\text{C}/\text{Ом}$).
3. Оценить погрешность измерения температуры в верхнем пределе измерений, для заданного класса допуска ТС.
4. Определить погрешность прибора, если резисторы R_1 и R_2 имеют допуски $\pm 0,5\%$.
5. Определить погрешность измерения при наличии сопротивления проводов $0,5\text{ Ом}$.

Исходные данные сводим в таблице 1.22.

Таблица 1.22

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Диапазон измерений	<i>ДИ</i>	$\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. Сопротивления	R_1	0,75 кОм
	R_2	6,3 кОм
3. Тип термосопротивления	<i>ТСП 100</i>	100 Ом при 0°C
4. Класс допуска	–	В

1.7.1. Схема подключения термосопротивления к уравновешенному мосту

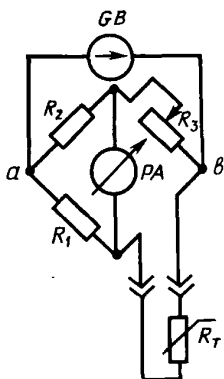


Рис. 1.19. Схема измерения термосопротивления с помощью уравновешенного моста

Откуда

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1}$$

При 0 °С получим

$$R_{3-0^{\circ}\text{C}} = \frac{6300 \cdot 100}{750} = 840 \text{ Ом}$$

Значения сопротивления от температуры определяем по формуле:

Платиновые в диапазоне от 0 до 600 °С

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T + \alpha_B T^2), \quad (1.25)$$

в диапазоне от – 200 до 0 °С

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T + \alpha_B T^2 + \alpha_C (T - 100)T^3), \quad (1.26)$$

где $\alpha_T = 3,9692 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^{\circ}\text{K}$, $\alpha_B = 5,8290 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^{\circ}\text{K}^2$ и $\alpha_C = 4,3303 \cdot 10^{-12} \text{ 1/}^{\circ}\text{K}^3$ – температурные коэффициенты сопротивления.

Медные в диапазоне от – 10 до + 200 °С

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T), \quad (1.27)$$

Схема подключения термосопротивления к уравновешенному мосту приведена на рис. 1.4.

1.7.2. Определение полного сопротивления переменного резистора R_3 и цену деления шкалы (°С/Ом)

Полное сопротивление переменного резистора R_3 определяем по закону Кирхгофа

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4, \quad (1.24)$$

в диапазоне от -100 до -10 °C

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T + \alpha_B (t - 10)), \quad (1.28)$$

где $\alpha_T = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{K}$ и $\alpha_B = 5,4136 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{K}^2$.

При -50 °C получим

$$R_{T-50} = 100 \cdot (1 + 3,9692 \cdot 10^{-3} \cdot (-50) + 5,8290 \cdot 10^{-7} \cdot (-50)^2 + 4,3303 \cdot 10^{-12} \cdot (-50 - 100) \cdot (-50)^3) = 80 \text{ Ом}$$

$$R_{3-0^\circ\text{C}} = \frac{6300 \cdot 80}{750} = 637 \text{ Ом}$$

При $+50$ °C получим

$$R_{T50} = 100 \cdot (1 + 3,9692 \cdot 10^{-3} \cdot (50) + 5,8290 \cdot 10^{-7} \cdot (50)^2) = 119,99 = 120 \text{ Ом}$$

$$R_{3-0^\circ\text{C}} = \frac{6300 \cdot 120}{750} = 1008 \text{ Ом}$$

Диапазон изменения сопротивлений переменного резистора

$R_3 = 637 \dots 1008$ Ом при измерении температуры от -50 до $+50$ °C.

Цена деления шкалы составит:

$$\text{ЦД} = \frac{(50 - (-50))}{1008 - 637} = 0,269 \text{ }^\circ\text{C/Ом.}$$

1.3.3. Определяем погрешность измерения температуры в верхнем пределе измерений, для заданного класса допуска ТС

Допускаемые отклонения сопротивлений от номинального значения ТСП, ТСМ, ТСН при 0°C для классов А/В/С: $\pm 0,05/\pm 0,1/\pm 0,2$ %.

В нашем случае используется ТСП 100 класса допуска В из чего следует $100,1\%$ от R_0 равен $100,1$, а $99,9\%$ от R_0 равно $99,9$

$$R_{T100,1} = 100,1 \cdot (1 + 3,9692 \cdot 10^{-3} \cdot (50) + 5,8290 \cdot 10^{-7} \cdot (50)^2) = 120,11 \text{ Ом.}$$

$$R_{T99,9} = 99,9 \cdot (1 + 3,9692 \cdot 10^{-3} \cdot (50) + 5,8290 \cdot 10^{-7} \cdot (50)^2) = 119,87 \text{ Ом.}$$

Размах показаний прибора в верхнем пределе диапазона измерений ($+50^\circ\text{C}$) составит:

$$R_{T100,1} - R_{T99,9} = 120,11 - 119,87 = 0,24 \text{ Ом.}$$

Таким образом, абсолютная погрешность измерения температуры составит $\Delta T = T_{100,1} - T_{99,1} = 1^\circ\text{C}$.

Погрешность будет иметь как аддитивный, так и мультипликативный характер.

1.7.4. Определяем погрешность прибора, если резисторы R_1 и R_2 имеют допуски $\pm 0,5\%$

Из анализа формулы (1.24) видно, что

$$R_4 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$

Поэтому, при $T = 0^\circ\text{C}$:

$$R_{4max} = \frac{R_{1max} \cdot R_3}{R_{2min}},$$

$$R_{4min} = \frac{R_{1min} \cdot R_3}{R_{2max}}.$$

При переводе 0,5 процентов в десятичную дробь получаем:

$$R_{max} = R_{(1,2)} \cdot (1,005), \text{ а } R_{min} = R_{(1,2)} \cdot (0,995).$$

$$R_{4max} = \frac{750 \cdot 1,005 \cdot 840}{6300 \cdot 0,995} = 101 \text{ Ом.}$$

$$R_{4min} = \frac{750 \cdot 0,995 \cdot 840}{6300 \cdot 1,005} = 99 \text{ Ом.}$$

По формуле приведения

$$T = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (R - R_1)}{(R_2 - R_1)}, \quad (1.29)$$

где R_2 и R_1 – наибольшее и наименьшее значения интервала сопротивлений, в который входит известное значение R ; T_1 и T_2 – наименьшее и наибольшее значения интервала температуры в который входит искомое значение T .

В градуировочной таблице (см. приложение) рассчитанные по формуле (1.29) значения сопротивления попадают в интервал температур от $+2$ $+3^\circ\text{C}$ и от -2 -3°C , поэтому

$$T = 2 + \frac{(3-2) \cdot (101-100,78)}{(101,17-100,78)} = 2,39^\circ\text{C},$$

$$T = (-2) + \frac{(-3 - (-2)) \cdot (99 - 98,833)}{(99,222 - 98,833)} = -2,59 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

где T_{\max} и T_{\min} температура при максимальном и минимальном сопротивлении, соответственно.

Таким образом погрешность измерений составит:

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2},$$

$$\Delta T = \frac{2,39 - (-2,59)}{2} = 2,4 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

1.7.5. Определяем погрешность измерения при наличии сопротивления проводов 0,5 Ом

Соединительные провода (2 шт.) подключены к термосопротивлению, поэтому при $T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ истинное сопротивление будет равно

$$R_4 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} - 2 \cdot R_{II} = 100 - 0,5 - 0,5 = 99 \text{ Ом} .$$

Поэтому систематическая аддитивная погрешность составит

$$T = -2 + \frac{(-3 - (-2)) \cdot (99 - 98,833)}{(99,222 - 98,833)} = -2,59 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Варианты заданий для работы по теме 1.7

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 1.23 и 1.24

Таблица 1.23

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_2 , кОм	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Тип ТС	ТСМ 50		ТСМ 100		ТСП 50		ТСП 100		ТСМ 100	

Таблица 1.24

Параметр	<i>Вторая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1 , кОм	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Класс допуска	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A
ΔT , $^\circ\text{C}$	0...+200		-50...+200		-50...+100		-100...+200		-50...+150	

1.8. Измерение температуры с помощью термосопротивления, включенного в неуравновешенный мост

Рассмотрим методику решения задач на примере. В неуравновешенный мост включено термосопротивление, напряжение питания моста U_{ab} , известны также сопротивления плеч моста R_2 и R_3 .

Требуется:

1. Изобразить принципиальную схему неуравновешенного моста.
 2. Определить сопротивление R_1 , если $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$.
 3. Построить график $I = f(T)$, в пределах диапазона измерений и определить цену деления шкалы (мА/ $^\circ\text{C}$).
 4. Определить погрешность измерения, связанную с нелинейностью функции преобразования.
 5. Определить погрешность измерений при наличии допуска на номинальное сопротивление терморезистора $\pm 0,1$ Ом.
 6. Определить погрешность измерений при падении напряжения на 0,2 В.
- Исходные данные сводим в таблицу 1.25.

Таблица 1.25

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Диапазон измерений	$ДИ$	0...100 $^\circ\text{C}$
2. Сопротивления	R_2 R_3	300 Ом 40 Ом
3. Тип термосопротивления	$TSM\ 50$	50 Ом при 0 $^\circ\text{C}$
4. Напряжение питания	U_{ab}	5 В

1.8.1. Схема подключения термосопротивления к неуравновешенному мосту

Схема подключения термосопротивления к неуравновешенному мосту приведена на рисунке 1.20.

1.8.2. Определяем сопротивление R_1 при условии $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$

Сопротивление резистора R_1 определяем по закону Кирхгофа (1.8)

$$R_1 = R_2 \cdot R_4 / R_3, \quad (1.12)$$

$$R_1 = 300 \cdot 50 / 40 = 375 \text{ Ом.}$$

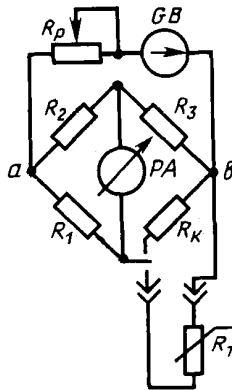


Рис. 1.20. Схема измерения термосопротивления с помощью неуравновешенного моста

1.8.3. Строим график $I = f(T)$ в пределах диапазона измерений и определяем цену деления шкалы ($\text{мА}/^\circ\text{C}$)

Зависимость силы тока от изменения сопротивления для неуравновешенного моста определяется по формуле

$$I = U_{ac} \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_T}{R_2 \cdot R_3 \cdot (R_1 + R_T)}, \quad (1.29)$$

$$I = 5 \cdot \frac{375 \cdot 40 - 300 \cdot R_T}{300 \cdot 40 \cdot (375 + R_T)},$$

после преобразований получим:

$$I = 0,01667 \cdot \frac{375 - 7,5 \cdot R_T}{375 + R_T}.$$

Для удобства перейдем в миллиамперы:

$$I = 16,67 \cdot \frac{375 - 7,5 \cdot R_T}{375 + R_T}. \quad (1.30)$$

На основании зависимости (1.30) можно построить таблицу и график изменения силы тока в диагонали измерительного моста в зависимости от изменения сопротивления термопреобразователя и температуры в пределах заданного диапазона измерений.

Таблица 1.26

**Зависимость силы тока от величины термосопротивления
и температуры**

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление термопреобразо- вателя $R_T, \text{ Ом}$	Сила тока $I,$ мА	Значения линейной функции $I_n, \text{ мА}$	Цена деления, мА/ $^\circ\text{C}$
0	50,000	0	0	–
10	52,130	– 0,6235	– 0,6235	– 0,06235
20	54,260	– 1,2408	– 1,2470	– 0,06204
30	56,390	– 1,8519	– 1,8705	– 0,06173
40	58,525	– 2,4585	– 2,4940	– 0,06146
50	60,655	– 3,0578	– 3,1175	– 0,06116
60	62,785	– 3,6512	– 3,7410	– 0,06085
70	64,915	– 4,2389	– 4,3645	– 0,06056
80	67,045	– 4,8209	– 4,9880	– 0,06026
90	69,175	– 5,3973	– 5,6115	– 0,05997
100	71,310	– 5,9696	– 6,2350	– 0,05970

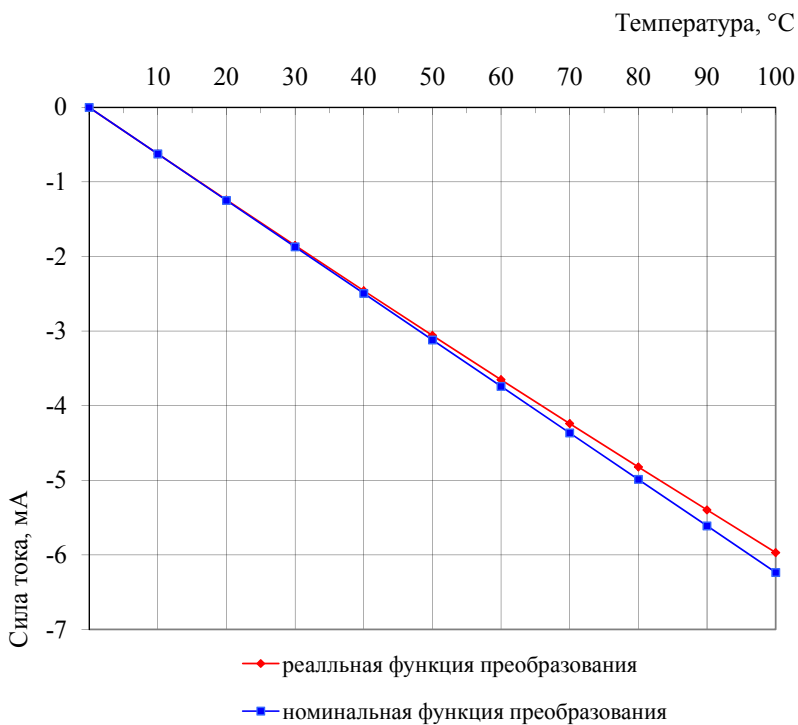


Рис. 1.21. Зависимость силы тока от температуры

1.8.4. Определяем погрешность измерения, связанную с нелинейностью функции преобразования

Наибольшая величина погрешности от нелинейности функции преобразования в пределах диапазона измерений составит

$$\Delta_{\text{л}} = I - I_{\text{л}} = -5,9696 - (-6,2350) = 0,2654 \text{ mA.}$$

В относительном виде

$$\delta_{\text{л}} = \Delta_{\text{л}} / I_{\text{max}} \cdot 100 \% = |(0,2654 / (-5,9696)) \cdot 100 \%| = 4,44 \%.$$

где: I_{max} – сила тока при максимальной температуре.

1.8.5. Определяем погрешность измерений при наличии допуска на номинальное сопротивление терморезистора $\pm 0,1$ Ом

Подставим в формулу (1.30) значения $50 \pm 0,1$ Ом, получим

$$I = 16,67 \cdot \frac{375 - 7,5 \cdot 49,9}{375 + 49,9} = 0,0294 \text{ мА.}$$

$$I = 16,67 \cdot \frac{375 - 7,5 \cdot 50,1}{375 + 50,1} = -0,0294 \text{ мА.}$$

Погрешность измерений при наличии допуска на номинальное сопротивление терморезистора $\pm 0,1$ Ом составит $\Delta_R = \pm 0,0294$ мА.

В приведенном виде

$$\gamma = \Delta_R / (I_{\max} - I_{\min}) \cdot 100 \% = \pm 0,0294 / (-5,9696 - 0) \cdot 100 \% = \pm 0,4925 \%$$

1.8.6. Определить погрешность измерений при падении напряжения

Подставим в формулу (1.29) значение напряжения $U_{\text{ав}} = 5 - 0,2 = 4,8$ В, при максимальной температуре получим

$$I'_{\max} = 4,8 \cdot \frac{375 \cdot 40 - 300 \cdot R_T}{300 \cdot 40 \cdot (375 + R_T)},$$

После преобразования получим:

$$I'_{\max} = 16,00 \cdot \frac{375 - 7,5 \cdot 71,310}{375 + 71,310} = -5,7296 \text{ мА.}$$

Наибольшая величина погрешности от падения напряжения питания составит

$$\Delta_u = I'_{\max} - I_{\max} = -5,7296 - (-5,9696) = 0,2400 \text{ мА.}$$

В относительном виде

$$\delta_u = |\Delta_u / I'_{\max}| \cdot 100 \% = |(0,2400 / (-5,9696)) \cdot 100 \%| = 4,02 \%$$

Выводы:

1. Шкала измерительного прибора, отградуированная в градусах Цельсия, будет иметь погрешность нелинейности, увеличивающуюся к концу диапазона измерений и равную $\delta_n = 4,44 \%$, это связано с тем, что величина $R_d = R_T$ входит в числитель и знаменатель выражения (1.13), являющимся теоретическим выражением функции преобразования для неуравновешенного моста.

2. Погрешность измерений при наличии допуска на номинальное сопротивление терморезистора $\pm 0,1$ Ом в приведенном виде равна $\gamma = \pm 0,4927 \%$, она будет оказывать незначительное влияние на погрешность измерений.

3. Погрешность измерений из-за падения напряжения питания на $0,2$ В в относительном виде равна $\delta_u = -4,02 \%$, поэтому падение напряжения при применении неуравновешенного моста будет оказывать существенное влияние на результат измерений.

Варианты заданий для работы по теме 1.8

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 1.27 и 1.28

Таблица 1.27

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип ТС	ТСП 50	ТСП 100	ТСМ 100	ТСМ 50	ТСП 10	ТСМ 10	ТСП 50	ТСП 100	ТСМ 100	ТСМ 50
Диа, °С	± 50	± 60	± 80	± 100	± 70	± 80	0...150	0...120	0...50	0...200

Таблица 1.28

Параметр	<i>Вторая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_2 , Ом	320	400	440	480	520	300	450	500	280	240
R_3 , Ом	40	25	80	60	65	25	75	100	35	30

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

2.1 Давление как физическая величина

Давлением называют отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. *Давление* – одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние веществ. Давлением во многом определяется ход технологического процесса, состояние технологических аппаратов и режимы их функционирования. С контролем давления приходится сталкиваться при измерениях некоторых технологических параметров, например расхода газа или пара, при изменяющихся термодинамических параметрах, уровня жидкости, и др.

Различают следующие виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум (разрежение).

Атмосферное (барометрическое) давление – давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы.

Абсолютное давление – давление, отсчитанное от абсолютного нуля. За начало отсчета абсолютного давления принимают давление внутри сосуда, из которого полностью откачан воздух:

$$P_{абс} = P_{атм} + P_{изб} \quad (2.1)$$

Избыточное давление – разность между абсолютным и барометрическим давлениями:

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{атм} \quad (2.2)$$

Вакуум (разрежение) – разность между барометрическим и абсолютным давлениями:

$$P_{раз} = P_{абс} - P_{атм} \quad (2.3)$$

В Международной системе единиц (СИ) за единицу давления принят паскаль (Па) – давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 и направленной нормально к ней.

Разнообразие видов измеряемых давлений, а также областей их применения в технологии и научных исследованиях обусловило использование наряду с системной единицей давления и внесистемных единиц. К их числу относятся бар, миллиметр ртутного столба, килограмм-сила на квадратный сантиметр, килограмм-сила на квадратный метр, миллиметр водного столба. Соотношения единиц давления, допущенных к применению, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Соотношения единиц давления

Единицы	Па	кг·с/м ²	ат(кгс/см ²)	мм вод.ст.	мм рт. ст.
1 Па	1	0,10197	$0,10197 \cdot 10^{-4}$	0,10197	$7,5006 \cdot 10^{-3}$
1 кг·с/м ²	9,80665	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-3}$
1 кг·с/см ²	9,80665	104	1	104	735,56
1 мм вод. ст.	9,80665	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-4}$
1 мм рт. ст.	133,322	13,595	$13,595 \cdot 10^{-4}$	13,595	1

2.2 Классификация средств измерения давления

Средства измерений давления классифицируют по виду измеряемого давления и принципу действия.

По виду измеряемого давления средства измерений подразделяют на:

манометры избыточного давления – для измерения избыточного давления;

манометры абсолютного давления – для измерения давления, отсчитанного от абсолютного нуля;

барометры – для измерения атмосферного давления;

вакуумметры – для измерения вакуума (разрежения);

мановакуумметры – для измерения избыточного давления и вакуума (разрежения).

Кроме перечисленных средств измерений в практике измерений получили распространение:

напорометры – манометры малых избыточных давлений (до 40кПа);

тягимеры – вакуумметры с верхним пределом измерения не более – 40 кПа;

тягинапоромеры – мановакуумметры с диапазоном измерений +20 ... –20 кПа;

вакуумметры остаточного давления – вакуумметры, предназначенные для измерения глубокого вакуума или остаточного давления, т. е. абсолютных давлений менее 200 Па;

дифференциальные манометры – средства измерений разности давлений.

По принципу действия средства измерений давления подразделяют на: жидкостные, поршневые, деформационные (пружинные), ионизационные, тепловые, электрические. Такое подразделение не является исчерпывающим и может быть дополнено средствами измерений, основанными на иных физических явлениях.

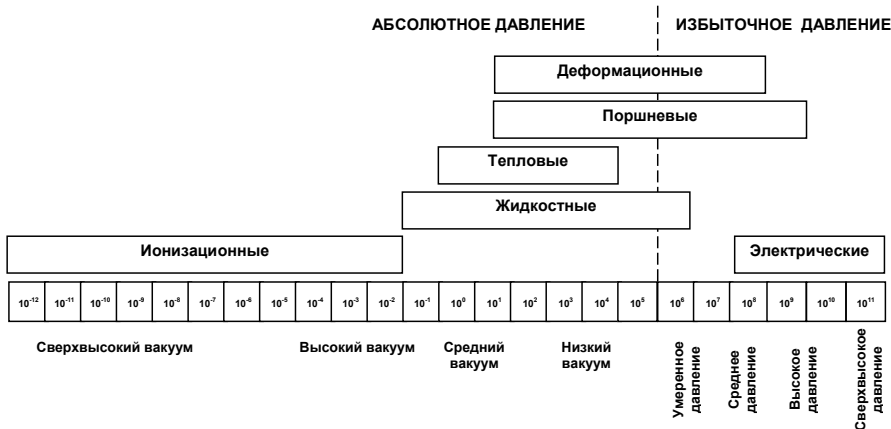


Рис. 2.1. Диапазон давлений (в Па), охватываемый существующими средствами измерений давления

В настоящее время существует большой парк средств измерений давления, позволяющий осуществить измерение давления в диапазоне $10^{-12} \dots 10^{11}$ Па (рисунок 2.1).

Приборы для контроля и регулирования давления.

Приборы для измерения $P_{атм}$ называются барометрами, для измерения положительного избыточного давления ($P_{абс} > P_{атм}$) – манометрами, а для измерения отрицательного избыточного давления ($P_{абс} < P_{атм}$) – вакуумметрами.

Приборы для измерения абсолютного и избыточного давлений, а также разности давлений делятся на следующие группы: жидкостные деформационные; электрические; тепловые.

Жидкостные манометры – наиболее простые по устройству приборы для измерения давления. Действие их основано на уравнивании измеряемого давления силой тяжести столба жидкости. Устройство жидкостных манометров с непосредственным отсчетом показаний показано на рисунке 2.2. В них используется принцип сообщающихся сосудов.

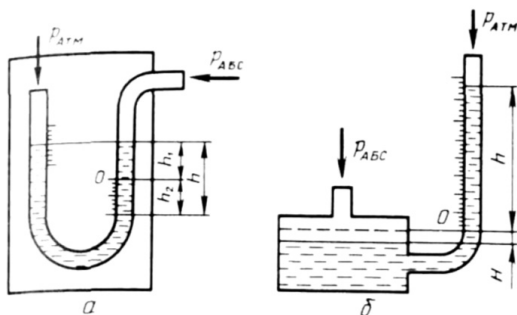


Рис. 2.2. Жидкостные манометры:

а - U-образный двухтрубный; б - чашечный однотрубный

Для U-образного двухтрубного манометра (рис. 2.2, а) давление определяется по разности уровней жидкости в трубках, в которые подаются атмосферное и абсолютное давления (или разность двух давлений).

$$P_{изб} = h p_V g \quad \text{или} \quad \Delta p = p_1 - p_2 = h p_V g, \quad (2.4)$$

где P_V – плотность заполняющей трубки жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

Для чашечного однотрубного манометра (рис. 2.2, б) давление определяется по уровню жидкости в одной трубке

$$p_{изб} = (h + H)p_V g = hp_V g(1 + S\sqrt{S_2}), \quad (2.5)$$

где S_1 и S_2 равны площади сечения соответственно трубки и сосуда, m^2 .

Поплавковые дифманометры используются для преобразования высоты столба жидкости в перемещение указателя шкалы, а также регистрации и передачи измерительной информации. Перемещение поплавка (рис. 2.3) и поворот указателя пропорциональны разности давлений в минусовом p_2 и плюсовом p_2 сосудах ($p_1 > p_2$)

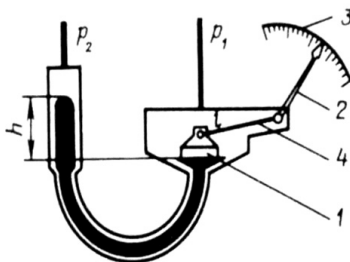


Рис 2.3. Поплавковый дифманометр:
1 - поплавок; 2 - указатель; 3 - шкала; 4 - рычаг однотрубный.

$$\Delta p = h \left[1 + \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right] \cdot (p_V - p_{Vc}) g, \quad (2.6)$$

где d и D – диаметры соответственно плюсового и минусового сосудов, м;

p_V и p_{Vc} – плотности жидкости и среды над ней, $кг/м^3$.

Уравновешенные жидкостные дифманометры используют для измерения разности давлений, а также небольших давлений и разрежений (рис. 2.4).

В колокольных дифманометрах измеряемая разность давлений связана с перемещением колокола

$$\Delta p S_k = m_k g - G(L - H), \quad (2.7)$$

где S_k и m_k – внутренняя площадь, m^2 , и масса колокола, кг; G – жесткость пружины Н/м; L – начальная глубина погружения, м.

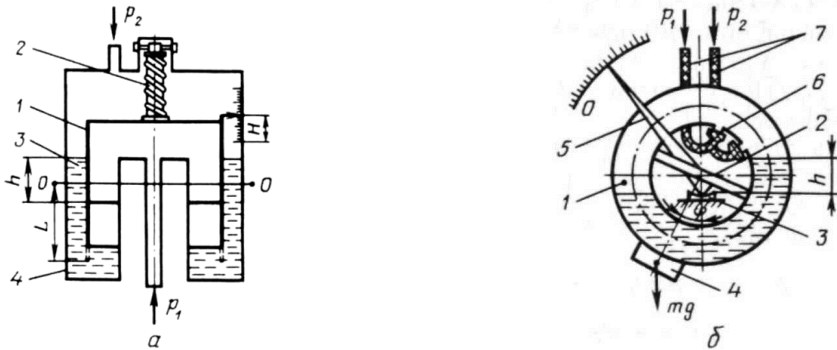


Рис. 2.4. Уравновешенные дифманометры:

а – колокольный: 1 – колокол; 2 – пружина 3 – разделительная емкость; 4 – сосуд; б – кольцевой: 1 – полое кольцо; 2 – траверса призмы; 3 – опора; 4 – рабочий груз; 5 – указатель шкалы; 6 – перегородка; 7 – соединительные трубки

Действие кольцевого дифманометра основано на изменении угла поворота а кольцевых весов с двумя камерами в зависимости от разности давлений в них

$$\sin \varphi = \Delta p D_{cp} S / mg 2l_0, \quad (2.8)$$

где D_{cp} – средний диаметр кольца, м; S – площадь его сечения, m^2 ; m – масса груза, кг; L_0 – расстояние от центра тяжести рабочего груза до точки опоры, м.

К недостаткам жидкостных манометров относятся достаточно большие габариты и масса, необходимость использования измерительные жидкостей, ограниченность диапазона измерения давления.

Деформационные манометры действуют по принципу преобразования давления в перемещение упругого элемента. Основные типы упругих элементов и расчетные соотношения для них приведены в приложении. В зависимости от типа применяемых элементов различают пружинные (мембранные), сильфонные и трубчато-пружинные манометры; их простейшие кинематические схемы приведены на рисунке 2.5.

Деформационные манометры бывают с прямым отсчетом давления или дистанционными системами передачи сигнала и его регистрацией на самопи-

пущих приборах. К их преимуществам относятся широкий диапазон измерения давления, возможности настройки и регулировки характеристик.

Электрические преобразователи действуют по принципу непосредственного преобразования давления в электрический сигнал. К таким преобразователям относятся пьезоэлектрические, тензометрические и емкостные.

В пьезоэлектрических преобразователях (рис. 2.6, а) используется явление возникновения напряжения U на гранях кристаллов при воздействии на них механического усилия или давления P

$$U = \frac{10^{12} k_{0,p} S}{(C_{ex} / n_n) + C_0}, \quad (2.9)$$

где k_0 – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н; S – площадь поверхности грани кристалла, м²; C_{ex} – емкость измерительной цепи, пФ; n_n – число пластинок; C_0 – емкость кристалла, пФ.

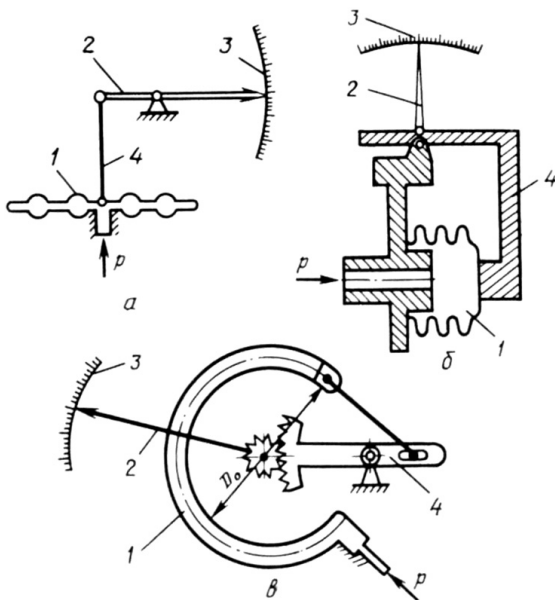


Рис. 2.5. Деформационные манометры:

а – пружинный; б – сильфонный; в – трубчато-пружинный; 1 – измерительный элемент; 2 – указатель; 3 – шкала; 4 – рычаг

Емкость C_0 (пФ) пьезокристалла определяется по соотношению

$$C_0 = 8,9 \cdot e \cdot S / h, \quad (2.10)$$

где e – относительная диэлектрическая проницаемость; h – толщина кристалла, м; S – площадь пластины, м².

Для наиболее распространенного пьезоэлектрического материала – кварца $C_0 = 2,2 \cdot 10^{12}$ Кл/Н и $e = 4,5$.

В тензометрических преобразователях используется явление изменения сопротивления проволочных и полупроводниковых резисторов при их деформации. Относительное изменение сопротивления ΔR линейно зависит от изменения длины Δl

$$\frac{\Delta R}{R} = k_\sigma \cdot \frac{\Delta l}{l} = k_\sigma \cdot \frac{P}{S \cdot E_G}$$

где k_σ – коэффициент тензочувствительности (0,5...2,5); P – приложенное к площади S деформационное усилие, кН; E_G – модуль упругости, ГПа.

Тензометрические датчики наклеивают на упругие элементы пружинных манометров и включают в мостовые измерительные схемы (рис. 2,6, б).

В емкостных преобразователях (рис. 2.6, в) использовано явление изменения емкости плоского конденсатора при изменении расстояния между его обкладками под действием давления.

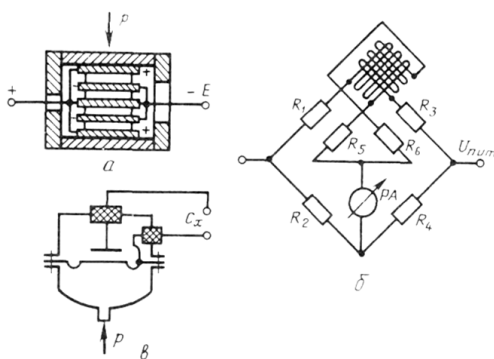


Рис 2.6. Электрические преобразователи давления:
а - пьезоэлектрические; б - тензометрические; в - емкостные

Тепловые вакуумметры используют для измерения небольших давлений и глубокого вакуума (от 10 до 100 Па). Действие их, как и тепловых расходомеров, основано на изменении температуры рабочего тела терморезистора в зависимости от давления. При этом используется зависимость, в которой коэффициент рассеивания зависит от давления среды. Для измерения давления можно использовать режимы постоянного тока и постоянной температуры.

2.2.1. Технические манометры

Устройство манометра с трубчатой пружиной.

Чувствительным органом манометра является трубчатая пружина 5 (рис. 2.7), представляющая собой эллиптического или овального сечения пружинную трубку, согнутую по кругу. Нижний конец этой трубки впаян в держатель 12, а верхний конец трубки впаян наконечник 7. Нижний конец держателя имеет ниппель 14 с резьбой для подсоединения манометра к объекту измерения и шестигранник 13 под ключ.

Ход стрелки от начальной отметки до конечного значения шкалы манометра составляет 180-270°.

Устройство и работа манометра МЭД. Чувствительный элемент 1 (рис. 2.8) манометра МЭД соединяется со стальным сердечником 2, который при измерении давления перемещается внутри катушки 3 индукционного датчика. Катушка имеет одну первичную обмотку 3 и две вторичные 4. Вторичные обмотки включены встречно, поэтому наведенные в них Э.Д.С. будут сдвинуты по фазе на 180°, Перемещение сердечника в определенном направлении вызывает увеличение напряжения в одной из вторичных обмоток и уменьшение в другой.

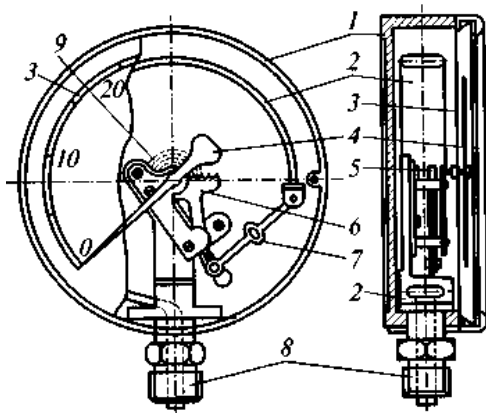


Рис. 2.7. Показывающий манометр с одновитковой трубчатой пружиной:

1 – стрелка; 2 – шестеренка-трибка; 3 – спиральная пружина; 4 – зубчатый сектор; 5 – трубчатая пружина; 6 – наконечник; 7 – ушко; 8 – поводок; 9 – хвостовик зубчатого сектора; 10 – прорезь; 11 – ось зубчатого сектора; 12 – держатель; 13 – шестигранник под ключ; 14 – ниппель; 15 – канал

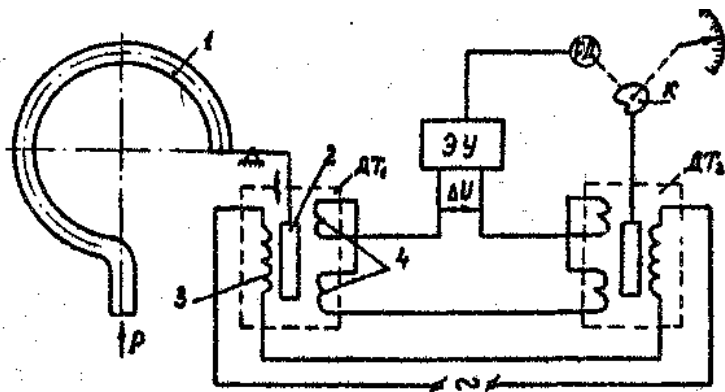


Рис. 2.8. Схема работы манометра типа МЭД:

1 – трубчатая пружина; 2 – сердечник; 3 – первичная обмотка датчика; 4 – вторичные обмотки; Э.У. – электронный усилитель; Р.Д. – электродвигатель; К – кулачок; ДТ₁ и ДТ₂ – индукционные катушки

В схему дистанционной передачи входят две одинаковые катушки ДТ₁ (установлена в датчике) и ДТ₂ (установлена на вторичном приборе ЭПВД), электронный усилитель ЭУ и электродвигатель РД, приводящий в движение сердечник катушки ДТ₂. С электродвигателем связано отсчетное устройство.

При измерении давления сердечник 2 смещается от среднего положения, что приводит к разбалансу напряжения во вторичных обмотках датчика.

$$\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2 \quad (2.11)$$

Возникшее напряжение разбаланса ΔU усиливается усилителем ЭУ и поступает на обмотку управления электродвигателя РД. Последний, вращаясь кулачком К, перемещает сердечник катушки ДТ₂ вторичного прибора до тех пор, пока индуктируемые напряжения в обмотках вторичных катушек ΔU_1 и ΔU_2 уравниваются.

Устройство и работа тензометрических датчиков давления. При испытании сельскохозяйственной техники для измерения давления жидкости в гидравлических системах и давления газа в пневматических системах применяются тензометрические датчики давления типа ТДД, ТДДМ, ДДВ, ИС и др. в комплекте с усилительной и регистрирующей аппаратурой.

Действие датчика основано на преобразовании приложенного давления в изменение сопротивления тензопреобразователя, которое пропорционально величине измеряемого давления.

$$\Delta R = K \cdot R \cdot P \quad (2.12)$$

где K – постоянная, характеризующая свойства материала тензопреобразователя; R – сопротивление тензорезистора; P – действующее давление.

В тензорезисторных датчиках типа ТДД, выпускаемых для измерения давлений до 400 кгс/см^2 , чувствительным элементом служит упругий цилиндр 4 (рис. 2.9), на который наклеены два рабочих проволочных тензорезистора 3 и два компенсационных тензорезистора 5 для компенсации температурных погрешностей. Сопротивление изоляции тензодатчиков должно быть не менее 50 МОм.

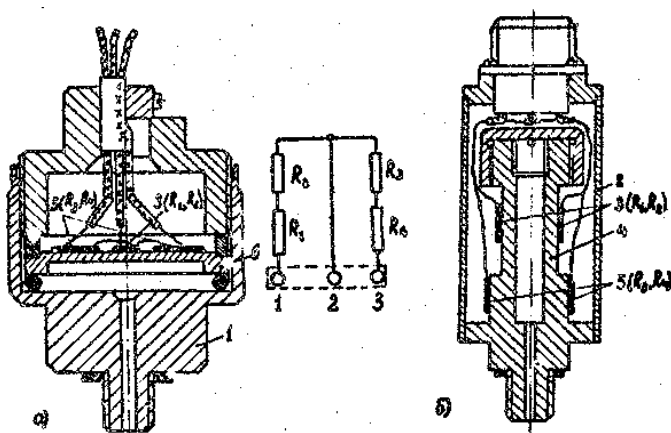


Рис. 2.9. Тензометрические датчики давления:

а) «ТДДИ» и б) «ТДД» и схема их измерительного полумоста:

1 – корпус датчика; 2 – стакан; 3 – рабочие тензорезисторы; R_1 и R_2 ; 4 – упругий цилиндр; 5 – компенсационные тензорезисторы R_3 и R_4 ; 6 – мембрана

Наклеенные тензосопротивления собираются в полумостовую (или мостовую) схему и возникающий в измерительной диагонали моста при измерении давления сигнал подается для усиления на усилитель и регистрируется осциллографом или электрическим прибором. В данной лабораторной работе регистрация сигнала производится контрольным миллиамперметром класса 0,5.

Устройство и работа грузопоршневого манометра. Настоящей лабораторной работой предусмотрена проверка рабочих манометров при помощи грузопоршневого манометра. Несмотря на некоторые конструктивные различия, все грузопоршневые манометры типа МП устроены одинаково. Они имеют грузовую и прессовую части и работают на принципе уравнивания измеряемого давления весом грузов, действующих на поршень определенного сечения.

Образцовые приборы, применяемые для поверки технических манометров (ГОСТ 15614-70)

Наименование и верхние пределы измерения поверяемого прибора, кгс/см ²	Наименование образцовых приборов, применяемых для поверки
от 10 до 60	Грузопоршневой манометр МП-60 кл. 0,05 и 0,2 Пружинные манометры кл. 0,2 и 0,35
от 100 до 600	Грузопоршневой манометр МП-600 кл. 0,05 и 0,2 Пружинные манометры кл. 0,2 и 0,35
от 1600 до 2500	Грузопоршневой манометр МП-2500 кл. 0,05 и 0,2
свыше 2500	Установка для поверки приборов высокого давления до 10000 кгс/см ²

Грузопоршневой манометр состоит (рис. 2.10) из грузовой колонки 8 с точно обработанным отверстием, в котором расположен поршень 7. Поршень входит в отверстие колонки с зазором около 5 мкм. Такой зазор обеспечивает необходимое уплотнение и вместе с тем не препятствует перемещению поршня в колонке. На верхнем конце поршня имеется грузоприемная тарелка 6 для размещения калиброванных грузов. На основании прибора, кроме грузовой колонки, имеются еще две рабочие колонки со штуцерами 3 и 9 для установки манометров. Внутренние полости цилиндра грузовой колонки и рабочих колонок соединяются между собой при помощи канала 13. С этим же каналом сообщается прессовая часть манометра, представляющая собой цилиндр с поршнем, шток которого выполнен в виде винта, снабженного штурвалом 14.

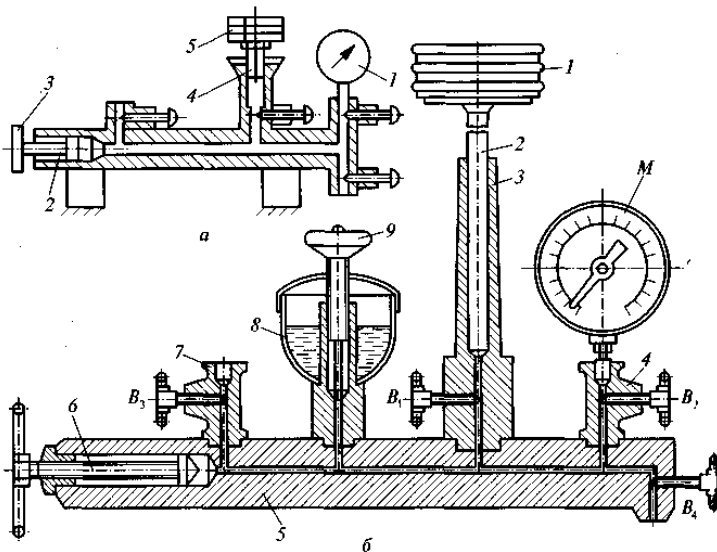


Рис. 2.10. Образцовый грузопоршневой манометр типа МП:

а – конструкция манометра (1 – поверяемый манометр; 2 – штурвал; 3 – вспомогательный поршень; 4 – поршень; 5 – калиброванные грузы); б – конструкции установки для поверки манометров (1 – тарелка для установки грузов; 2 – поршень; 3 – измерительная колонка; 4 и 7 – штуцер; 5 – корпус; 6 – насос; 7 – воронка; 9 – игольчатый клапан)

Вся гидравлическая система прибора заполняется маслом. Заполнение системы маслом осуществляется через воронку 5. Отключение колонки, штуцеров и воронки от гидравлического пресса производится посредством игольчатых вентилей 2, 4, 10 и 12.

Под действием массы поршня и грузов в системе создается давление, величина которого может быть определена из равенства

$$P = G/S \quad (2.13)$$

где G – сила тяжести грузов и поршня, кгс; S – эффективная площадь поршня, см².

Обычно площадь поршня для манометра МП-60 равна 1 см², а предельное количество грузов ограничивается давлением 60 кгс/см².

2.3. Измерение давления мембранным деформационным манометром

Рассмотрим методику решения задач на примере. Допустимое напряжение пружинной мембраны манометра диаметром D , толщиной h и модулем упругости E_G не должно превышать σ_{\max} .

Требуется:

1. Изобразить схему мембраны деформационного манометра.
2. Определить диапазон измеряемых давлений, если начальное напряжение равно σ_0 .
3. Определить результат измерения давления при перемещении центра мембраны δ_1 .
4. Определить погрешность результата измерения при заданном классе точности.
5. Определить погрешность измерений, если толщина пружины h выполнена с допуском $\pm 0,01$ мм.

Исходные данные сводим в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Толщина, мм	h	0,82 мм
2. Диаметр, мм	D	68 мм
3. Модуль упругости	E_G	202 ГПа
4. Допустимое напряжение мембраны	σ_{\max}	450 МПа
5. Начальное напряжение мембраны	σ_0	50 МПа
6. Класс точности	–	1,5
7. Перемещение центра мембраны	δ_1	0,5 мм.

2.3.1. Схема мембраны деформационного манометра

Схема мембраны деформационного манометра приведена на рисунке 2.11.

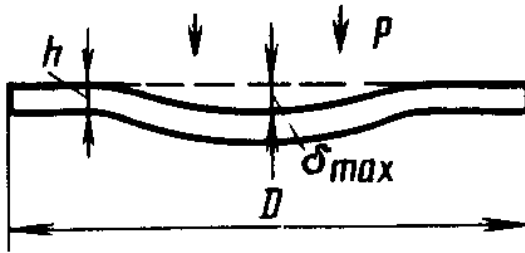


Рис.2.11. Схема мембраны деформационного манометра

2.3.2. Определение диапазона измеряемых давлений

Механическое напряжение на мембране определяется по формуле

$$\sigma = 0,75 \frac{pD^2}{4h^2}, \quad (2.14)$$

где p – давление, Па; D – диаметр мембраны, мм; h – толщина мембраны, мм.

Из формулы (2.14) определяем диапазон измерения давлений при заданных значениях напряжения мембраны:

нижний предел измерений

$$p_{\min} = \frac{4\sigma_0 h^2}{0,75D^2}, \quad (2.15)$$

$$p_{\min} = \frac{4 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 0,82^2}{0,75 \cdot 68^2} = 38777,39 \text{ Па.}$$

верхний предел измерений

$$p_{\max} = \frac{4\sigma_{\max} h^2}{0,75D^2}, \quad (2.16)$$

$$p_{\max} = \frac{4 \cdot 450 \cdot 10^6 \cdot 0,82^2}{0,75 \cdot 68^2} = 348996,5 \text{ Па.}$$

2.3.3. Определение результата измерения давления при перемещении центра мембраны δ_1

Деформация мембраны связана с давлением, следующим соотношением

$$\delta = 0,17 \frac{pD^4}{16E_G h^3}, \quad (2.17)$$

где E_G – модуль упругости, Па.

Выразим из формулы (2.4) давление

$$p = \frac{16 \cdot \delta \cdot E_G \cdot h^3}{0,17 \cdot D^4}. \quad (2.18)$$

Таким образом, при перемещении мембраны $\delta_1 = 0,5$ мм давление составит

$$p_1 = \frac{16 \cdot 0,5 \cdot 150 \cdot 10^9 \cdot 0,82^3}{0,17 \cdot 68^4} = 182028 \text{ Па.}$$

2.3.4. Определение погрешности результата измерения по классу точности манометра

При заданном классе точности 1,5 нормируемое значение абсолютной погрешности измерений будет равно

$$\Delta = \frac{\gamma \cdot X_N}{100 \%}, \quad (2.19)$$

где γ – приведенная погрешность манометра, %; X_N – нормирующее значение, Па: в нашем случае, т.к. $p_{\max} = 348996,5$ Па принимаем, что верхний предел измерения манометра 350 кПа, т.е. $X_N = 350000$ Па.

$$\Delta = \frac{1,5 \cdot 350000}{100} = 5250 \text{ Па}$$

Запишем результат измерения

$$P = (1820284 \pm 5250) \text{ Па.}$$

2.3.5. Определяем погрешность измерений, если толщина пружины h выполнена с допуском $\pm 0,01$ мм

Подставим в зависимость (2.3) значения наибольшего давления и величину h с наибольшим и наименьшим размерами

$$p_{\max}^{\max} = \frac{4 \cdot 450 \cdot 10^6 \cdot 0,83^2}{0,75 \cdot 68^2} = 357560,6 \text{ Па}$$

$$p_{\max}^{\min} = \frac{4 \cdot 450 \cdot 10^6 \cdot 0,81^2}{0,75 \cdot 68^2} = 340536,3 \text{ Па}$$

Наибольшую абсолютную погрешность определим по выражению

$$\Delta_{\max} = p_{\max}^{\max} - p_{\max}^{\min}, \quad (2.20)$$

$$\Delta_{\max} = 357560,6 - 340536,3 = 17024,3 \text{ Па}$$

Подставим в зависимость (2.3) значения минимального давления и величину h с наибольшим и наименьшим размерами

$$p_{\min}^{\max} = \frac{4 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 0,83^2}{0,75 \cdot 68^2} = 39778,95 \text{ Па}$$

$$p_{\min}^{\min} = \frac{4 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 0,81^2}{0,75 \cdot 68^2} = 37867,37 \text{ Па}$$

Минимальную абсолютную погрешность определим по выражению

$$\Delta_{\min} = p_{\min}^{\max} - p_{\min}^{\min}, \quad (2.21)$$

$$\Delta_{\min} = 39778,95 - 37867,37 = 1941,58 \text{ Па}$$

Таким образом, видно, что погрешность от допуска на изготовления толщины мембраны зависит от измеряемого давления, т.е. является мультипликативной.

Варианты заданий для по теме 2.3.

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 2.4 и 2.5

Таблица 2.4

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Толщина h , мм	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	0,7	0,65	0,6	1,05
Допустимое напряжение мембраны σ_{\max} , МПа	550	600	650	700	750	580	670	730	640	720
Класс точности	1,5	1,6	2,0	2,5	1,0	1,5	1,6	2,0	2,5	1,0

Таблица 2.5

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр D , мм	70	72	74	76	78	80	82	84	86	90
Модуль упругости E_G , ГПа	200	103	85	205	95	195	90	82	92	210
Начальное напряжение мембраны σ_0 , МПа	50	55	60	65	70	75	40	60	55	70
Перемещение центра мембраны δ_1 , мм.	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,35	0,45	0,55

2.4. Измерение давления трубчато-пружинным деформационным манометром

Рассмотрим методику решения задач на примере. В трубчато-пружинном манометре однотрубная пружина радиусом R_0 с первоначальным углом закручивания $\alpha = 270^\circ$ и параметрами поперечного сечения a и b , выполнена из материала с модулем упругости E_G .

Требуется:

1. Изобразить схему пружинно-трубчатого манометра.
2. Выбрать класс точности трубчато-пружинного манометра для контролируемого параметра p .
3. Определить изменения угла закручивания конца пружины при наибольшем давлении p_{\max} .
4. Определить абсолютную погрешность измерений, если диаметр трубки D_0 выполнен с допуском $\pm 1,0$ мм.

Исходные данные сводим в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Параметр	Обозначение	Значение
1. Радиус	R_0	50 мм
2. Параметры поперечного сечения	a b	27 мм 9 мм
3. Контролируемый параметр	p	$9^{+0,8}_{+0,2}$ МПа
4. Модуль упругости материала	E_G	205 МПа

2.4.1. Схема пружинно-трубчатого манометра

Схема пружинно-трубчатого манометра приведена на рисунке 2.11.

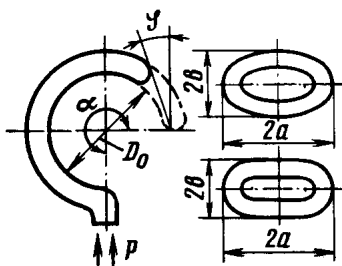


Рис. 2.11. Схема пружинно-трубчатого манометра

2.4.2. Выбор класса точности трубчато-пружинного манометра для контроля параметра p .

Определяем допуск контролируемого параметра

$$T = p_{\max} - p_{\min}, \quad (2.22)$$

где p_{\max} – наибольшее значение контролируемого параметра, Па; p_{\min} – минимальное значение контролируемого параметра, МПа.

Для контролируемого параметра $9^{+0,8}_{+0,2}$ МПа:

наибольшее давление $p_{\max} = 9,8$ МПа;

минимальное давление $p_{\min} = 9,2$ МПа.

$$T = 9,8 - 9,2 = 0,6 \text{ МПа.}$$

Допускаемая погрешность измерения контролируемого параметра определяем по формуле

$$\delta_{\text{изм}} = 0,33T; \quad (2.23)$$

$$\delta_{\text{изм}} = 0,33 \cdot 0,6 = 0,198 \text{ МПа.}$$

Пределы измерения манометра определяем по формулам
нижний предел измерения

$$H_{\text{ни}} \leq p_{\min} - \delta_{\text{изм}}; \quad (2.24)$$

$$H_{\text{ни}} \leq 9,2 - 0,198 = 9,002 \text{ МПа}$$

верхний предел измерения

$$B_{\text{ни}} \leq p_{\max} + \delta_{\text{изм}}; \quad (2.25)$$

$$B_{\text{ни}} \leq 9,8 + 0,198 = 9,998 \text{ МПа}$$

В соответствии с определенными значениями $H_{\text{дн}}$ и $B_{\text{дн}}$ выбираем манометр с верхним пределом измерений 10 МПа.

Приведенную погрешность манометра определяем по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100, \quad (2.26)$$

$$\gamma = \frac{0,198}{10} \cdot 100 = 1,98 \text{ МПа.}$$

При присвоении прибору класса точности он выбирается из ряда $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $(1,6 \cdot 10^n)$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $(3 \cdot 10^n)$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$; (где $n = 1, 0, -1, -2$, и т. д.).

По найденному значению основной приведенной погрешности выбираем манометр класса точности 2.

2.4.3. Определение изменения угла закручивания конца пружины при наибольшем давлении

Угол закручивания связан с давлением соотношением

$$\alpha_p = \alpha_0 + \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \frac{3 \cdot p \cdot D_0^2}{E_G \cdot b^2}, \quad (2.27)$$

$$\alpha_p = 270 + \left[1 - \left(\frac{9 \cdot 10^{-3}}{27 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right] \frac{3 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2}{205 \cdot 10^6 \cdot (9 \cdot 10^{-3})^2} = 286^\circ.$$

Изменение угла закручивания определяем по формуле

$$\Delta_\alpha = \alpha_p - \alpha_0, \quad (2.28)$$

$$\Delta_\alpha = 286 - 270 = 16^\circ.$$

2.2.4. Определение погрешности измерения, если диаметр трубки D_0 выполнен с допуском $\pm 1,0$ мм.

Из формулы (2.14) выразим давление

$$p = \frac{(\alpha_p - \alpha_0) E_G \cdot b^2}{\left[1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2\right] 3D_0^2}; \quad (2.29)$$

Подставим в зависимость (12.28) величину D_0 с наибольшим и наименьшим размерами

При минимальном диаметре:

$$p_{\max}^{\min} = \frac{(286 - 270) \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot (9 \cdot 10^{-3})^2}{\left[1 - \left(\frac{9 \cdot 10^{-3}}{27 \cdot 10^{-3}}\right)^2\right] 3 \cdot (99 \cdot 10^{-3})^2} = 10163733 \text{ Па} = 10,2 \text{ МПа}$$

При максимальном диаметре:

$$p_{\max}^{\max} = \frac{(286 - 270) \cdot 205 \cdot 10^6 \cdot (9 \cdot 10^{-3})^2}{\left[1 - \left(\frac{9 \cdot 10^{-3}}{27 \cdot 10^{-3}}\right)^2\right] 3 \cdot (101 \cdot 10^{-3})^2} = 9764057 \text{ Па} = 9,8 \text{ МПа}$$

Максимальную абсолютную погрешность определим по выражению

$$\Delta_{\max} = p_{\max}^{\min} - p_{\max}^{\max}, \quad (2.30)$$

$$\Delta_{\max} = 10,2 - 9,8 = 0,4 \text{ МПа}$$

Погрешность является мультипликативной, т.к. зависит от измеряемого параметра.

Варианты заданий для работы по теме 2.4

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 2.7 и 2.8.

Таблица 2.7

Параметр		Первая цифра варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Радиус R_0 , мм		30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
Параметры поперечного сечения	a , мм	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	b , мм	7	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8

Таблица 2.8

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеряемый параметр p , МПа	5 ^{+0,6} _{+0,1}	3 ^{+0,5} _{-0,1}	6 ^{+0,4} _{-0,2}	4 ^{+0,8} _{+0,2}	2 ^{+0,6} _{-0,3}	8 ^{+0,8} _{+0,2}	3 ^{-0,2} _{-0,8}	5 ^{+0,8} _{-0,2}	7 ^{+0,9} _{+0,4}	4 ^{+0,6} _{-0,5}
Модуль упругости E_G , МПа	160	170	180	190	200	165	175	185	195	155

2.5. Измерение давления с помощью пьезоэлектрического преобразователя

Рассмотрим методику решения задач на примере. Напряжение на пьезокристалле кварца преобразователя давления меняется от U_{\min} до U_{\max} , причем используется n пластин толщиной h и размером $a \times b$. Емкость измерительной цепи $C_{\text{ex}} = 10$ пФ. Пьезоэлектрическая постоянная для кварца $k_0 = 2,2 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н и относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4,5$.

Требуется:

1. Изобразить схему пьезокристалла с заданным количеством пластин.
2. Определить диапазон измерения давления для заданных напряжений
3. Определить систематическую погрешность от влияния внешних физических величин, в результате чего емкость измерительной цепи C_{ex} увеличится на 5 %.

Исходные данные сводим в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Число пластин n	n	5
2. Размеры пластины	a	12 мм
	b	20 мм
3. Толщина пластины	h	1,15 мм
4. Наименьшее напряжение	U_{\min}	2 В
5. Наибольшее напряжение	U_{\max}	50 В

2.5.1. Схема пьезокристалла

Схема пьезокристалла приведена на рисунке 2.12.

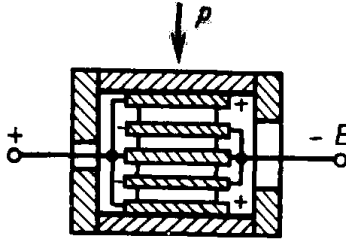


Рис. 2.12. Схема пьезокристалла

2.5.2. Определяем диапазон измерения давления для заданных напряжений

Значения давлений определяем по формуле:

$$p = \frac{U \cdot \left(\left(\frac{C_{ex}}{n} \right) + C_0 \right)}{k_0 \cdot S \cdot 1 \cdot 10^{12}}, \quad (2.31)$$

где S – площадь поверхности грани кристалла, m^2 ; C_{ex} – емкость измерительной цепи, пФ; C_0 – емкость кристалла, пФ; n – число пластинок.

Емкость пьезокристалла определяем по соотношению

$$C_0 = 8,9 \cdot \varepsilon \cdot S / h,$$

где h – толщина кристалла, м; $\varepsilon = 4,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость.

$$C_0 = 8,9 \cdot 4,5 \cdot (0,020 \times 0,015) / 1,15 \cdot 10^{-3} = 0,01045 \cdot 10^{-3} \text{ пФ.}$$

$$p_{min} = \frac{2 \cdot \left(\left(\frac{10}{5} \right) + 0,01045 \cdot 10^{-3} \right)}{2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (0,020 \times 0,015) \cdot 1 \cdot 10^{12}} = 6060,60 \text{ Па.}$$

$$p_{max} = \frac{50 \cdot \left(\left(\frac{10}{5} \right) + 0,01045 \cdot 10^{-3} \right)}{2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (0,020 \times 0,015) \cdot 1 \cdot 10^{12}} = 151515,15 \text{ Па.}$$

2.5.3. Определяем систематическую погрешность от влияния внешних физических величин, в результате чего емкость измерительной цепи C_{ex} увеличится на 5 %.

$$p'_{\min} = \frac{2 \cdot \left(\left(\frac{10,5}{5} \right) + 0,01045 \cdot 10^{-3} \right)}{2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (0,020 \times 0,015) \cdot 1 \cdot 10^{12}} = 6090,90 \text{ Па.}$$

$$p'_{\max} = \frac{50 \cdot \left(\left(\frac{10,5}{5} \right) + 0,01045 \cdot 10^{-3} \right)}{2,2 \cdot 10^{-12} \cdot (0,020 \times 0,015) \cdot 1 \cdot 10^{12}} = 152272,72 \text{ Па.}$$

$$\Delta p_{\min} = p'_{\min} - p_{\min} = 6090,90 - 6060,60 = 30,30 \text{ Па.}$$

$$\Delta p_{\max} = p'_{\max} - p_{\max} = 152272,72 - 151515,15 = 757,57 \text{ Па.}$$

Таким образом, увеличение емкости измерительной цепи C_{ex} на 5 % приведет к возникновению мультипликативной систематической погрешности.

Варианты заданий для работы по теме 2.5

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 2.10 и 2.11

Таблица 2.10

Параметр		<i>Первая цифра варианта</i>									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число пластин n		8	4	5	6	7	8	4	5	6	7
Размеры пластин	a , мм	20	15	25	16	15	17	18	19	24	22
	b , мм	10	15	8,0	12	18	14	13	12	9,0	10

Таблица 2.11

Параметр		<i>Вторая цифра варианта</i>									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Толщина h , мм		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	1,2	1,1	0,95	0,85
Напряжение U_{\min} , В		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Напряжение U_{\max} , В		50	52	54	56	48	40	42	44	46	45

2.6. Измерение давления с помощью тензодатчика включенного в неуравновешенный мост

Рассмотрим методику решения задач на примере. Тензодатчик с начальным сопротивлением R_4 и длиной l с коэффициентом тензочувствительности k_0 включен в схему неуравновешенного моста с сопротивлениями $R_1 = R_3$ и R_2 к которому приложено напряжение питания U . При увеличении давления от 0 до p_{\max} тензодатчик удлинился на величину Δl . Тензодатчик наклеен на мембрану.

Требуется:

1. Определить ток в измерительной диагонали моста.
2. Определить цену деления прибора.
3. Определить погрешность прибора, если резисторы R_1, R_2, R_3 имеют допуски $\pm 0,5\%$.

Исходные данные сводим в таблице 2.12.

Таблица 2.12

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Начальное сопротивление тензодатчика	R_4	65 Ом
2. Сопротивления	$R_1 = R_3$ R_2	650 Ом 65 Ом
3. Длина тензодатчика	l	65 мм
4. Коэффициент тензочувствительности	k_0	1,7
5. Напряжение питания	U	12 В
6. Величина удлинения	Δl	2,4 мм

2.6.1. Определяем ток в измерительной диагонали моста

Вначале определяем изменение сопротивления тензодатчика в результате приложенного давления

$$\frac{\Delta R}{R} = k_{\delta} \cdot \frac{\Delta l}{l} = k_{\delta} \cdot \frac{P}{S \cdot E_G}, \quad (2.32)$$

откуда

$$\Delta R = k_{\delta} \cdot \frac{R \cdot \Delta l}{l},$$

$$\Delta R = 1,7 \cdot \frac{65 \cdot 2,4}{65} = 4,8 \text{ Ом.}$$

Сопротивление тензодатчика в результате приложения нагрузки равно

$$R'_T = R_T + \Delta R = 65 + 4,8 = 69,8 \text{ Ом.}$$

Ток в измерительной диагонали моста определяем по формуле:

$$I = U_{ав} \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R'_T}{R_2 \cdot R_3 \cdot (R_1 + R'_T)}, \quad (2.33)$$

$$I = 12 \cdot \frac{650 \cdot 650 - 65 \cdot 69,8}{65 \cdot 650 \cdot (650 + 69,8)} = 0,164 \text{ А} = 164 \text{ мА.}$$

2.6.2. Определяем цену деления прибора

По формуле (2.32), используя характеристики мембраны приведенной в табл. 2.12 (Данные S, E_G табл. 2.3), получим величину приложенного к площади деформационного усилия

$$P = \frac{\Delta R S E_G}{R k_{\delta}};$$

$$P = \frac{4,8 \cdot 3,14 \cdot 0,0068^2 \cdot 202 \cdot 10^9}{65 \cdot 1,7 \cdot 4} = 31850614 \text{ Н.}$$

Исходя из определения давления и размерности в системе СИ (см. начало 2 раздела), приложенное усилие 31850614Н соответствует наибольшему давлению $p_{\max} = 8774 \text{ МПа}$. Таким образом, зная наибольшее давление и показания миллиамперметра можно определить цену деления прибора

$$C = \frac{8774}{164} = 53,6 \text{ МПа/мА.}$$

2.6.3. Определяем погрешность прибора, если резисторы R_1, R_2, R_3 имеют допуски $\pm 0,5\%$.

Наибольшая погрешность показаний прибора составит

$$I_{\max} = 12 \cdot \frac{682,5 \cdot 685,5 - 68,25 \cdot 73,29}{68,25 \cdot 682,5 \cdot (682,5 + 73,29)} = 0,157 \text{ А};$$

$$I_{\min} = 12 \cdot \frac{617,5 \cdot 617,5 - 61,75 \cdot 66,31}{61,75 \cdot 617,5 \cdot (617,5 + 66,31)} = 0,175 \text{ А}.$$

$$\Delta I = 0,175 - 0,157 = 0,018 \text{ А} = 18 \text{ мА}.$$

Учитывая цену деления прибора, абсолютная погрешность измерения давления составит

$$\Delta p = 18 \cdot 53,6 = 964,8 \text{ МПа}.$$

В относительном виде при измерении наибольшего давления погрешность измерения составит

$$\delta = \frac{964,8}{8774} \cdot 100 = 11\%, \text{ что достаточно велико.}$$

Варианты заданий для работы по теме 2.6.

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 2.13 и 2.14

Таблица 2.13

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сопrotивления $R_2 = R_4$, Ом	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Сопrotивления $R_1 = R_3$, Ом	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Длина тензодатчика l , мм	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140

Таблица 2.14

Параметра	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кoэффициент тензочувствительности k_0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	0,8	1,2	1,6	1,8	2,2
Напряжение питания U , В	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Величина Δl , мм	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0

3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА

Расход вещества – это масса или объем вещества, проходящего через известное сечение в единицу времени. Объемный расход выражается в м³/с, массовый – кг/с. Расход жидких и газообразных веществ измеряют как при контроле технологических процессов и управлении ими, так и в учетных операциях. Делают это с помощью расходомеров, которые по своему принципу действия делятся на устройства: переменного перепада давления; постоянного перепада давления; переменного уровня; тахометрического действия (тахометры); электромагнитные (индукционные); тепловые (термоанометры).

3.1 Измерение расхода

Для измерения расхода применяют расходомеры переменного перепада давления (дифманометры-расходомеры), ротаметры, крыльчатотахометрические турбинные расходомеры и счетчики объемного типа.

Как основное общепромышленное средство измерения расхода однофазных сред - жидкостей, газов и паров - наибольшее распространение получили дифманометры -расходомеры, работающие по принципу измерения перепада давления, создаваемого в зависимости от расхода жидкости, газа или пара с помощью сужающего устройства, трубного сопротивления, напорного устройства или напорного усилителя. В качестве измерительного прибора используется дифманометр, градуированный в единицах расхода.

Для измерения расхода различных агрессивных сред применяют ротаметр, являющийся основным представителем обширного класса расходомеров системы обтекания. Конструктивно он состоит из расширяющейся конической трубки и заключенной в ней поплавка. С изменением расхода потока поплавков перемещается, что служит мерой величины расхода, которая измеряется с помощью магнитного или индуктивного преобразователя положения поплавка и электрический сигнал.

Среди множества типов измерителей расхода жидкостей и газов наиболее полно отвечают современным требованиям эксплуатации скоростные турбинные расходомеры и измерители количества (счетчики), имеющие существенные преимущества перед другими приборами аналогичного назначения.

В турбинных расходомерах в качестве чувствительного элемента первичного преобразователя расхода применяют крыльчатки аксиального или тангенциального типа.

Конструктивная схема турбинного расходомера следующая. В корпусе по пути движения потока измеряемой среды последовательно расположены передний струевыпрямляющий аппарат, крыльчатка (винтовая или прямолопастная) и задний (выходной) выпрямляющий аппарат. На корпусе с внешней стороны устанавливается тахометрический индукционный (индуктивный) преобразователь оборотов крыльчатки в электрический импульсный сигнал.

Принцип действия прибора заключается в том, что при взаимодействии проходящего через прибор потока с крыльчаткой последняя вращается со скоростью, пропорциональной скорости (объемному расходу) протекающего вещества.

Измерение количества жидкости осуществляют прямым и косвенным методами. К средствам прямого измерения относят приборы, основанные на методах непосредственного сравнения прошедшего через прибор количества жидкости с объемом мерного устройства этого прибора.

К средствам косвенного измерения относят приборы, основанные на методах измерения косвенных величин, связанных с измеряемым количеством веществ известной функциональной зависимостью.

В диапазоне расходов от $0,003 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$) до $320 \text{ м}^3/\text{ч}$ наибольшее распространение на практике автоматического контроля протекшего количества вещества получили объемные счетчики с кольцевым поршнем, овальношестеренные и лопастные.

Принцип действия различных типов объемных счетчиков идентичен и заключается в том, что определенная доза поступившей в измерительную камеру

жидкости отсекается чувствительным элементом прибора и выталкивается им в выходную часть прибора. Число доз суммируется.

Счетчики конструктивно состоят из следующих функциональных узлов: первичного измерительного преобразователя объемного количества (расхода), чувствительного элемента и механизма счетного указателя, связанного с чувствительным элементом измерителя с помощью жесткого или магнитного вала.

В лопастных счетчиках в качестве чувствительного элемента используют обычно четыре лопасти, вращающиеся вокруг кулачка со специальным профилем за счет действия на лопасть перепада давления до и после прибора. При вращении лопасти поочередно захватывают во входной полости измерительной камеры калиброванные объемы и перемещают их в выходную; при этом в соответствии с профилем кулачка лопасти выдвигаются или вдвигаются в направляющие пазы.

Наиболее многочисленную группу среди объемных счетчиков составляют счетчики с овальными шестернями, в которых в качестве чувствительного элемента используется пара овальных шестерен, постоянно находящихся в зацеплении в вращающихся под действием на них разности давлений.

К приборам, принцип действия которых основан на новых физических методах, следует отнести электромагнитные, ультразвуковые, ядерно-магнитные, лазерные, вихревые, корреляционные расходомеры и др.

С помощью электромагнитных расходомеров измеряют расход щелочей, кислот, растворов солей, различных клейких веществ, суспензий, пульп, бумажной массы, цементных шламов и т. д.

Измерение объемного расхода жидкости электромагнитными расходомерами осуществляется путем прямого преобразования скорости потока в электрический сигнал. В электропроводящей жидкости, пересекающей магнитное поле преобразователя расхода, индуцируется ЭДС – величина которой не зависит от параметров контролируемой жидкости (вязкости, температуры, химического состава, плотности) при весьма широких пределах их измерения и пропорциональна средней скорости жидкости или расходу. ЭДС вызывает на вве-

денных в трубу преобразователя электродах напряжение, являющееся мерой расхода жидкости.

В большинстве электромагнитных расходомеров для намерения ионных жидкостей применяют переменное магнитное поле. Электромагнитные расходомеры могут использоваться в очень большом диапазоне скоростей измеряемой среды – от 1 см/с до десятков метров в секунду. Они широко применяются в атомной промышленности для измерения расхода теплоносителей атомных реакторов и, кроме того, в химической и металлургической промышленности.

Среди многочисленных типов измерителей расхода и количества газов скоростные турбинные расходомеры и объемные ротационные счетчики находят наибольшее применение.

Принцип действия турбинного расходомера состоит в преобразовании и датчике расхода скорости газа в скорость вращения чувствительного элемента (крыльчатки, турбинные) с последующим преобразованием частоты его оборотов в частоту следования электрических импульсов, суммирования (для счетчика) или преобразовании их в аналоговый сигнал (для расходомера).

Основными достоинствами турбинных расходомеров являются высокая точность измерения (до $\pm 0,5$ % и выше) и повторяемость показаний (0,1 – 0,2 %), широкий диапазон измерения (1:10 и более), возможность измерения практически при любых давлениях различных по агрессивности газов.

Газовые турбинные расходомеры могут измерять расходы 10 – 420 000 м³/ч с диаметрами условного прохода 10– 300 мм и с погрешностью не более ± 1 %.

Вихревые расходомеры развиваются по двум направлениям: используется процессия вихрей, возникающих при закручивании потока, когда движете вихрей по винтообразной траектории с постоянным шагом контролируется подогреваемым термоэлементом, генерирующим один импульс при проходе каждого вихря; принцип действия вихревых расходомеров, получивших наибольшее распространение, основан на контроле частоты следования вихрей, возникающих с двух сторон тела, помещенного в поток.

В зависимости от способа формирования вихрей и измеряемых параметров вихревые расходомеры делят на три группы: с образованием поступательно-вращательного потока и измерением его параметров; с обтеканием потока неподвижного тела и измерением при этом частоты пульсации давления потока за этими телами; с образованием колеблющейся струн и измерением при этом частоты пульсации вихрей.

Приборы первой группы применяют для измерения средних величин расходов; второй – для больших расходов газов и в трубах больших диаметров, а также для измерения скоростей потоков в точке обтекания; третьей – для жидкостей и газов в области малых расходов.

В вихревых расходомерах с телом обтекания для образования вихрей в поток устанавливаются плохообтекаемые тела различных форм: цилиндр, призмы треугольного, трапециoidalного и Т-образного сечения, кольцо, пластина, струна.

Тепловые расходомеры основаны на принципе нагрева потока газа или жидкости посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и расхода тепла в нагревателе.

3.2. Измерение расхода с помощью турбинного тахометрического расходомера

Рассмотрим методику решения задач на примере. Турбинный тахометрический расходомер с диаметром турбины d , постоянным коэффициентом эффективности k , наружным диаметром трубопровода D , количеством лопастей N , подключен к усилителю со встроенным вольтметром и имеет частоту вращения турбины от n_{\min} до n_{\max} , что соответствует изменению напряжения от U_{\min} до U_{\max} .

Требуется:

1. Изобразить схему турбинного тахометрического расходомера.
2. Определить диапазон измерения расхода жидкости.

3. Определить частоту вращения и расход при показании вольтметра U .
4. Определить абсолютную погрешность измерения расхода по классу точности вольтметра.
5. Определить погрешность измерения расхода при допуске изготовления наружного диаметра трубопровода $D^{+0,2}$ мм.
6. Определить суммарную погрешность измерения расхода при показании вольтметра U . Записать результат измерения.

Исходные данные сводим в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Диаметр турбины	d	60 мм
2. Диаметр трубопровода	D	80 мм
3. Коэффициент эффективности	k	0,75
4. Количество лопастей	N	8
5. Диапазон изменения частота вращения турбины	n_{\min} n_{\max}	450 мин ⁻¹ 2900 мин ⁻¹
6. Наименьшее значение напряжение	U_{\min}	25 В
7. Показания вольтметра	U	68 В
8. Класс точности вольтметра	–	1,5

3.2.1. Схема турбинного тахометрического расходомера

Схема турбинного тахометрического расходомера приведена на рисунке 3.1.

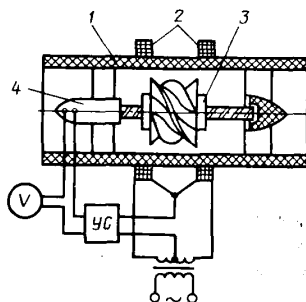


Рис. 3.1. Схема турбинного тахометрического расходомера:

4 – устройство коррекции;
УС – усилитель

3.2.2. Определение диапазона измерения расхода жидкости.

В турбинном расходомере расход жидкости определяют по формуле

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l \cdot n}{4 \cdot k}, \quad (3.1)$$

где l – шаг лопастей турбины, м.

Шаг лопастей определяем по формуле:

$$l = \frac{\pi \cdot d}{N}, \quad (3.2)$$

$$l = \frac{3,14 \cdot 0,06}{8} = 0,0235 \text{ м}$$

Нижний предел измерения расхода жидкости определяем по формуле

$$Q_{\min} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l \cdot n_{\min}}{4 \cdot k}, \quad (3.3)$$

$$Q_{\min} = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 \cdot 0,0235 \cdot 450}{4 \cdot 0,75} = 0,04 \text{ м}^3/\text{мин} = 2,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Верхний предел измерения расхода жидкости определяем по формуле

$$Q_{\max} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l \cdot n_{\max}}{4 \cdot k}, \quad (3.4)$$

$$Q_{\max} = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 \cdot 0,0235 \cdot 2900}{4 \cdot 0,75} = 0,257 \text{ м}^3/\text{мин} = 15,44 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3.2.3. Определение частоты вращения и расхода по показанию вольтметра

Расход, соответствующий показанию вольтметра можно определить по формуле

$$Q = CU, \quad (3.5)$$

где C – цена деления вольтметра, $\text{м}^3/(\text{В} \cdot \text{ч})$.

$$C = \frac{2,4}{25} = 0,096 \text{ м}^3/(\text{В}\cdot\text{ч}).$$

При показании вольтметра $U = 68\text{В}$ расход будет равен

$$Q = 0,096 \cdot 68 = 6,528 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Частоту вращения, соответствующую показанию вольтметра можно определить по формуле

$$n = n_{\min} + \frac{n_{\max} - n_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} (U - U_{\min}), \quad (3.6)$$

где U_{\max} – показание вольтметра, соответствующее наибольшему расходу, В: при $Q_{\max} = 15,44 \text{ м}^3/\text{ч}$ из формулы (3.5) $U_{\max} = 160,8 \text{ В}$.

$$n = 450 + \frac{2900 - 450}{160,8 - 25} (68 - 25) = 1225,8 \text{ мин}^{-1}.$$

3.2.4. Определение абсолютной погрешности измерения расхода по классу точности вольтметра

Абсолютная погрешность вольтметра класса точности 1,5 определяем по формуле

$$\Delta = \frac{\gamma \cdot X_N}{100}, \quad (3.7)$$

где γ – приведенная погрешность вольтметра, %; X_N – нормирующее значение, В: в нашем случае, т.к. $U_{\max} = 160,8 \text{ В}$ принимаем, что верхний предел измерения вольтметра 170В, т.е. $X_N = 170\text{В}$

$$\Delta_v = \frac{1,5 \cdot 170}{100} = 2,55\text{В}$$

Абсолютная погрешность измерения расхода, с учетом цены деления вольтметра

$$\Delta_Q = 2,55 \cdot 0,096 = 0,245 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3.2.5. Определение погрешности измерения расхода при допуске изготовления наружного диаметра трубопровода $D^{+0,2}$ мм.

Расход на верхнем пределе измерений с увеличенным диаметром определяем по формуле (12.37)

$$Q'_{\min} = \frac{3,14 \cdot 0,0802^2 \cdot 0,0235 \cdot 2900}{4 \cdot 0,75} = 0,259 \text{ м}^3/\text{мин} = 15,52 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Погрешность измерений составит

$$\Delta_D = Q'_{\max} - Q_{\max}; \quad (3.8)$$

$$\Delta_D = 15,52 - 15,44 = 0,08 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3.1.6. Определение суммарную погрешность измерения расхода

Суммарная погрешность измерения, с учетом погрешности вольтметра и изготовления наружного диаметра трубопровода определяем по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (3.9)$$

где k – поправочный коэффициент, зависящий от числа слагаемых n , их соотношения и доверительной вероятности P_0 : в нашем случае при $n = 2$, $P_0 = 0,95$ принимаем $k = 1,1$ [5].

$$\Delta_{\Sigma} = 1,1 \sqrt{0,245^2 + 0,08^2} = 0,26 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тогда, результат измерения при показаниях вольтметра $U = 68\text{В}$, запишем так:

$$Q = (6,53 \pm 0,26) \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Варианты заданий для работы по теме 3.2.

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 3.2 и 3.3.

Таблица 3.2

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота вращения турбины, n_{\min} , мин ⁻¹	300	350	400	450	500	250	550	650	300	400
Частота вращения турбины, n_{\max} , мин ⁻¹	1500	1800	2200	2500	3000	1900	2000	2400	2500	2100
Наименьшее измеряемое напряжение, U_{\min} , В	10	14	16	18	20	22	24	26	28	20
Показания вольтметра, U , В	26	32	43	49	68	39	54	47	42	37

Таблица 3.3

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр трубопровода D , мм	50	80	100	150	200	250	300	50	80	100
Диаметр турбины d , мм	30	70	80	140	180	230	280	40	60	90
Класс точности вольтметра	0,5	1	1,5	2	2,5	0,5	1	1,5	2	2,5
Коэффициент эффективности k	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,67	0,68	0,69	0,70	0,76
Количество лопастей N	10	9	8	7	6	5	10	9	8	7

3.3. Измерения расхода с помощью индукционного расходомера

В основе индукционного расходомера лежит эффект возникновения электрического тока в проводнике, перемещающемся в магнитном поле.

Единицей измерения индукции магнитного поля является тесла. Тесла равна индукции такого однородного магнитного поля, в котором на 1 метр длины прямого проводника, перпендикулярного вектору магнитной индукции, с током силой 1 ампер действует сила 1 ньютон.

Через единицы СИ тесла выражается следующим образом:

$$\text{кГ} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{А}^{-1}}{\text{м}^{-1}}$$

Рассмотрим методику решения задач на примере. Индукционный расходомер установлен на трубопроводе внутренним диаметром d , наружным диаметром D , при его градуировке верхнему пределу измерений расхода Q_{\max} соответствует ЭДС E_{\max} . Для измерения ЭДС используется вольтметр с верхним пределом измерения 10 В, класса точности KT и внутренним сопротивлением R_v .

Требуется:

1. Изобразить схему индукционного расходомера.
2. Определить расход при показании вольтметра U .
3. Определить абсолютную погрешность измерения расхода по классу точности вольтметра
4. Определить погрешность измерения расхода U , если сопротивление жидкости между электродами R .
5. Записать результат измерения расхода U .

Исходные данные сводим в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
Внешний диаметр трубопровода, мм	D	15
Внутренний диаметр трубопровода, мм	d	13
Верхний предел измерения, м ³ /ч	Q_{\max}	6
Наибольшее ЭДС, В	E_{\max}	4
Класс точности вольтметра	–	0,2
Внутреннее сопротивление вольтметра, кОм	R_v	2
Сопротивление жидкости между электродами, Ом	R	10
Показания вольтметра, В	U	1,6

3.3.1. Схема индукционного расходомера

Схема индукционного расходомера приведена на рисунке 3.2.

3.3.2. Определение расхода по показанию вольтметра

Расход, соответствующий показанию вольтметра можно определить по формуле

$$Q = CU, \quad (3.10)$$

где C – цена деления вольтметра, $\text{м}^3/(\text{В}\cdot\text{ч})$.

$$C = \frac{6}{4} = 1,5 \text{ м}^3/(\text{В}\cdot\text{ч}).$$

При показании вольтметра $U = 1,6$ В расход будет равен

$$Q = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3.3.3. Определение абсолютной погрешности измерения расхода по классу точности вольтметра

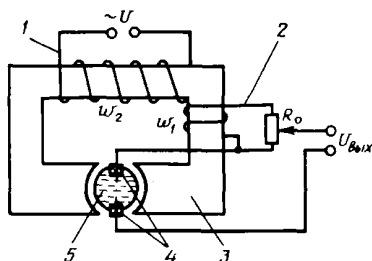


Рис. 3.2. Схема

индукционного расходомера:

- 1 – обмотка электромагнита;
- 2 – измерительная обмотка; 3 –
- магнитопровод; 4 – электроды; 5 –
- трубопровод

Абсолютная погрешность вольтметра класса точности 0,2 определяем по формуле

$$\Delta = \frac{\gamma \cdot X_N}{100}, \quad (3.11)$$

где γ – приведенная погрешность вольтметра, %; X_N – нормирующее значение, В.

$$\Delta_v = \frac{0,2 \cdot 10}{100} = 0,02 \text{ В}$$

Абсолютная погрешность измерения расхода, с учетом цены деления вольтметра

$$\Delta_Q = 0,02 \cdot 1,5 = 0,03 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При расходе топлива $Q = 2,4$ В относительная погрешность измерения составит

$$\delta = \frac{0,03}{2,4} 100 = 1,25 \%$$

3.3.4. Определение погрешности измерения расхода от сопротивления жидкости между электродами

Так как вольтметр подключается параллельно измерительной цепи расходомера, то

$$E = U \frac{R_v}{R_v + R}. \quad (3.12)$$

Поэтому при показании вольтметра $U = 1,6$ В значение ЭДС в измерительной обмотке

$$E = 1,6 \frac{2000}{2000 + 10} = 1,61 \text{ В}$$

Расход топлива, соответствующий $E = 1,61$ В, определяем по эмпирической формуле:

$$Q = \frac{ES}{DB}, \quad (3.13)$$

где B – магнитная индукция между полюсами магнита, Тл; S – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

Создаваемая цепью магнитная индукция величина постоянная ее можно определить при наибольших показаниях расходомера

$$B = \frac{E_{\max} S}{DQ_{\max}}; \quad (3.14)$$

Подставив значения и переведа в теслы получим:

$$B = \frac{4 \cdot 0,00013}{0,015 \cdot 6} = 21,23 \text{ Тл}.$$

Подставив полученное значение магнитной индукции в формулу (3.13), определим реальный расход топлива с учетом сопротивления жидкости между электродами

$$Q' = \frac{1,61 \cdot 0,00013}{0,015 \cdot 21,23} = 2,418 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Абсолютная погрешность измерения расхода составит

$$\Delta_R = Q - Q'; \quad (3.15)$$

$$\Delta_R = 2,4 - 2,41 = 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Результат измерения с учетом сопротивления жидкости между электродами и погрешность вольтметра запишем так:

$$Q = (2,41 \pm 0,03) \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Варианты заданий для работы по теме 3.3.

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Класс точности вольтметра, КТ	0,5	0,1	0,15	0,2	0,25	0,5	0,1	0,15	0,2	0,25
Внутреннее сопротивление вольтметра, R_V , кОм	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Сопротивление жидкости между электродами R , Ом	0,8	1,2	1,4	1,6	0,1	0,2	1,5	0,6	1,8	2

Таблица 3.6

Параметр	<i>Вторая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Внешний диаметр трубопровода D , мм	20	25	32	40	50	65	80	100	150	200
Внутренний диаметр трубопровода d , мм	15	20	25	35	45	60	75	95	145	195
Верхний предел измерения Q_{\max} , м ³ /ч	25	50	100	200	300	400	500	600	750	900
Наибольшее ЭДС, E_{\max} , В	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Показания вольтметра, U В	3	4	2	3	5	4,5	6	3	5	6

4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВЕЩЕСТВА

4.1. Измерение влажности

Влажность веществ является одним из важных диагностических показателей качества, поскольку стоимость, технологические и физические свойства веществ и материалов, способность их к хранению, производительность оборудования в большой степени зависят от влажности сырья и полуфабрикатов.

Многочисленные методы определения влажности жидких и твердых материалов подразделяют на прямые, в основе которых лежит разделение исследуемого вещества или материала на влагу и сухой остаток, и косвенные, когда влажность вещества или материала измеряют по физическим свойствам или параметрам, функционально с ней связанным.

Среди прямых методов измерения влажности наиболее распространенными в различных отраслях промышленности является термогравиметрический метод - воздушно-тепловое высушивание пробы исследуемого вещества или материала до постоянной массы. Точность его довольно высока, поэтому он используется для метрологического обеспечения новых разработок влагомеров.

В последнее время широкое распространение получили полуавтоматические и автоматические сушильные шкафы.

К прямым методам определения содержания влаги относят также дистилляционные методы. В основу их положено нагревание образца исследуемого вещества или материала в сосуде с жидкостью, которая не разлагается при нагревании и не смешивается с влагой образца. В качестве таких жидкостей используют обычно бензол, толуол, минеральные масла. Пары воды, выделяющиеся при нагревании, подвергаются отгонке и, проходя через холодильник, конденсируются в измерительном сосуде, где затем измеряется объем или масса влаги в образце.

Экстракционные методы основаны на использовании реагентов, взаимодействующих с влагой, содержащейся в образце исследуемого вещества или материала. В качестве реагентов применяются водопоглощающие жидкости типа спирта или диоксана. После экстрагирования влаги образца определяют характеристики жидкого экстракта, зависящие от влагосодержания: диэлектрическую проницаемость (тангенс угла диэлектрических потерь), плотность, температуру кипения и т. п.

При химических методах измерения влажности образец исследуемого вещества обрабатывается реактивом, вступающим в химическую реакцию только с влагой, которая содержится в образцах. Количество влаги определяется по количеству жидкого и газообразного продукта реакции. На практике для предварительного (грубого) определения содержания влаги в веществе или материале используют карбид кальция. Давление газа, выделившегося в результате реакции материала образца и карбида кальция, измеряют манометром, проградуированным в процентах влажности. Погрешность измерения содержания влаги манометрическими карбидными влагомерами составляет около ± 1 %.

Для точных (лабораторных) измерений применяют метод Фишера, в основу которого положена реакция реактива Фишера (раствор металлического йода, безводного пиридина и сухого сернистого ангидрида) с влагой образца исследуемого вещества или материала.

Все прямые методы определения содержания влаги требуют длительного времени измерения и достаточно громоздкого и сложного оборудования, однако эти методы обладают малой погрешностью измерения, что обуславливает их применение в качестве лабораторных и образцовых влагомерных методов.

Известно, что содержание влаги в веществе определяет его физические свойства — тепловые, оптические, механические, электрофизические и т. д. Функциональная связь этих свойств с содержанием влаги служит основой построения различных типов влагомерных устройств, работающих по принципу косвенного определения влажности материалов и веществ.

Наиболее простыми из косвенных методов измерения влажности являются механические, основанные на изменении механических свойств исследуемых веществ и материалов, коэффициента трения, сопротивления резанию, сжатию, уплотнению, вдавливанию штампа и т. д. в зависимости от содержания влаги.

Пикнометрический метод определения влажности основан на зависимости плотности исследуемого вещества или материала от содержания влаги. Подобные влагомерные устройства работают по принципу непрерывного взвешивания вещества постоянного объема. Характерной их особенностью является постоянное сечение трубопровода первичного преобразователя, по которому с высокой скоростью движется исследуемое жидкое вещество или продукт. Пьезометрические влагомеры также используют зависимость между плотностью контролируемого вещества и его влажностью. Измерение производится путем сравнения гидростатических давлений исследуемого материала и воды.

В основе теплофизических методов лежит зависимость таких параметров, как теплопроводность, удельная теплоемкость, температуропроводность, от содержания влаги в исследуемых капиллярно-пористых веществах и материалах. Указанные параметры с увеличением содержания влаги монотонно и нелинейно увеличиваются, поэтому большинство теплофизических влагомеров используют зависимость динамических характеристик охлаждения или нагревания тел малой теплоемкости (например, плоской хромель-копелевой спирали) от содержания влаги исследуемого вещества или материала, находящегося в тепловом контакте с данным телом.

Калориметрический метод применяется для измерения малых содержаний влаги (до 6%). Сущность его состоит в определении изменения температуры пробы исследуемого сыпучего вещества в процессе десорбции влаги в вакууме. Десорбция приводит к резкому понижению температуры вещества, причем градиент температуры, как показывают эксперименты, пропорционален начальному влагосодержанию.

Калориметрический метод позволяет определять содержание влаги в многокомпонентных жидких системах по температурному скачку, имеющему место при кристаллизации компонентов смеси. Понижение температуры смеси достигается за счет тепловых эффектов десорбции в вакууме.

Высокая чувствительность термовакuumного метода объясняется тем, что процессы фазового перехода веществ сопровождаются значительным выделением или поглощением тепла. Удельное количество теплоты испарения воды, например, составляет около 2400 кДж/кг.

Термографический метод определения содержания влаги движущихся сыпучих материалов основан на измерении количества теплоты, затраченного на испарение влаги из контролируемого вещества. Поток тепла, передаваемый веществу нагревателем, стабилизирован. Уменьшение влажности вызывает меньший расход энергии на испарение и больший — на нагревание сухого материала.

Электрические методы измерения влажности основаны на зависимости электрофизических свойств исследуемых материалов и веществ — диэлектрической проницаемости, удельной электрической проводимости, тангенса угла диэлектрических потерь и т. д. — от содержания в них влаги. Среди известных электрических методов наибольшее распространение получили в настоящее время кондуктометрический, диэлькометрический, емкостный и метод полной проводимости.

В кондуктометрическом методе оценка влагосодержания производится по результатам измерения электрического сопротивления (объемного или поверхностного) или проводимости влажного материала на постоянном токе или токе промышленной частоты. Как правило, кондуктометрический метод применяют для определения влажности от 2 до 30 %.

Диэлькометрический метод измерения влажности предполагает оценку влагосодержания по диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь влажных материалов и веществ в широком диапазоне частот от звуковых до СВЧ.

Наиболее перспективными считают следующие схемы емкостных влагомеров: резонансные, дифференциальные. с модуляцией параметров измерительного контура, на базе мостов с тесной индуктивной связью, двух- и много-частотные.

СВЧ методы определения влагосодержания отличаются большой чувствительностью и точностью. Основные модификации этих методов — волноводный, резонаторный и метод измерений в свободном пространстве. В качестве информативного параметра используется амплитуда, фаза или угол поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной плоской электромагнитной волны.

Физической основой нейтронных методов является замедление ядрами водорода, содержащегося во влажном исследуемом веществе или материале, быстрых нейтронов, которые при этом теряют часть своей энергии и превращаются в медленные или тепловые со значительно меньшей энергией. В качестве источников быстрых нейтронов используют изотопные источники.

К преимуществам нейтронного метода следует отнести возможность измерения влажности в широком диапазоне (до 100 %), нечувствительность к распределению влаги, минералогическому составу и плотности.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) в настоящее время является одним из эффективных методов анализа состава веществ животного и растительного происхождения. Основу метода ЯМР составляет резонансное поглощение радиочастотной энергии ядрами водорода воды при внесении влажного вещества или материала в постоянное магнитное поле. Контролируемое вещество или материал помещают в цилиндрическую катушку, ось которой перпендикулярна к направлению поля, и пропускают по катушке переменный ток высокой частоты. Катушка находится между полюсами постоянного магнита. Резонанс достигается двумя способами: изменением частоты высокочастотного поля при постоянной напряженности постоянного поля или изменением напряженности постоянного поля при постоянной частоте высокочастотного поля.

При резонансе имеет место максимальное поглощение радиочастотной энергии.

Действие оптических влагомеров, работающих в видимой области спектра, основано на способности некоторых веществ изменять свою окраску и коэффициент отражения в зависимости от содержания влаги.

Среди оптических приборов для измерения влажности наибольший интерес представляют инфракрасные фотометрические влагомеры, в основу действия которых положено измерение избирательного поглощения влагой инфракрасного излучения определенной длины волны, либо отраженного поверхностью исследуемого вещества или материала, либо проходящего через вещество. ПК спектральные методы влагометрии применимы для широкого класса анализируемых веществ и материалов. Диапазон влажностей, измеряемых ИК влагомерами, от 10^{-4} до 100 %.

Если при прямых методах измеряется непосредственно Проба контролируемого вещества или материала, то при использовании комбинированных (косвенных) методов ИК влагометрии влага из анализируемого вещества тем или иным способом переводится в другую среду — жидкую или газообразную. Перевод в жидкую среду осуществляется с помощью экстракции воды из вещества или его растворения, перевод в газообразную фазу — путем термического испарения влаги или другим известным методом.

Ультразвуковые методы измерения влажности используют зависимость характеристик ультразвуковых колебаний от свойств и состава среды, а именно зависимость скорости (поперечной или продольной) распространения ультразвуковых колебаний от содержания влаги в исследуемом материале.

Основная область применения ультразвуковых влагомерных устройств — определение содержания влаги в агрессивных средах и керамических массах.

Определение количества водяного пара в газе или воздухе носит название гигрометрии, а приборы или устройства, предназначенные для подобных измерений, называются гигрометрами. Для количественной оценки влажности газов используются следующие характеристики:

абсолютная влажность, определяемая массой водяного пара, содержащегося в единице объема газа (имеет тот же физический смысл, что и плотность водяного пара);

упругость или парциальное давление водяного пара и газовой смеси, выраженная в Паскалях;

влажностное содержание -- отношение массы водяного пара к массе сухого газа в том же объеме (иногда используют удельную влажность, характеризующуюся отношением массы водяного пара к массе влажного газа); объемное влажностное содержание отношение объема водяного пара к объему газа (как и влажностное содержание, используется для характеристики микро- и макрокonzентраций водяного пара); температура точки росы, т. е. температура, выраженная в градусах Цельсия, при которой данное количество водяного пара становится насыщающим; относительная влажность — отношение абсолютной влажности к массе насыщающих газ паров при данной температуре.

Среди методов гигрометрии самыми распространенными являются адсорбционные и хроматографические методы. Адсорбционные методы основаны на переносе влаги из газа в различные пористые тела с последующим определением параметров этих тел в зависимости от содержания влаги или же на измерении теплового эффекта сорбции влаги с поверхности твердого адсорбента.

Адсорбционный кулонометрический метод измеряет количество электричества, израсходованного в процессе электролиза воды, перенесенной из исследуемого газа в сильнодействующий химический поглотитель влаги фосфорный ангидрид P_2O_5 .

Адсорбционно-частотный принцип действия основан на измерении частоты кварцевого резонатора, покрытого тонким слоем гигроскопического вещества, при изменении влажности контролируемой газовой смеси. Прибор сравнивает частоты двух кварцевых резонаторов, и результирующая разность этих частот дает информацию о влажности газа.

В основе электросорбционного метода лежит принцип измерения поверхностной проводимости пленки оксида алюминия при адсорбции на ней паров воды.

Гигрометры с датчиками подогревного типа используют зависимость максимальной упругости водяного пара над поверхностью насыщенного раствора гигроскопической соли от температуры. Состояние равновесия с окружающей средой достигается изменением температуры (нагревом) чувствительного элемента, характеризующей влажность анализируемой газовой среды.

Метод точки росы является одним из основных конденсационных методов контроля влажности воздуха и газовых смесей. Он основан на экспериментальном определении температуры, соответствующей полному насыщению газа парами воды и появлению жидкой фазы. Момент насыщения определяют визуально или фотоэлектрически по изменению интенсивности отраженного от поверхности конденсации светового потока в момент выпадения капель росы.

Перспективным методом является хроматографический метод, позволяющий с высокой точностью определять влажность газов, содержащих множество других мешающих компонентов.

4.2. Определение влажности психрометрическим методом

Рассмотрим методику решения задач на примере. Для определения влажности воздуха используется мостовая схема с термосопротивлениями, измеряющими температуру сухого и влажного воздуха. При температуре сухого термометра T_c равновесие моста происходит при добавлении переменного сопротивления R_x .

Требуется:

1. Изобразить схему мостового психрометра.
2. Определить относительную влажность воздуха.
3. Определить погрешность измерения влажности при наличии погрешности измерения термосопротивления в пределах заданного класса.

Исходные данные сводим в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение
1. Температура сухого термометра T_c ,	T_c	25 °С
2. Класс допуска ТС	В	–
3. Величина переменного сопротивления R_x ,	R_x	1 Ом
4. Тип термосопротивления	ТСМ 100	–

4.2.1. Схема мостового психрометра

Схема мостового психрометра приведена на рис. 4.1.

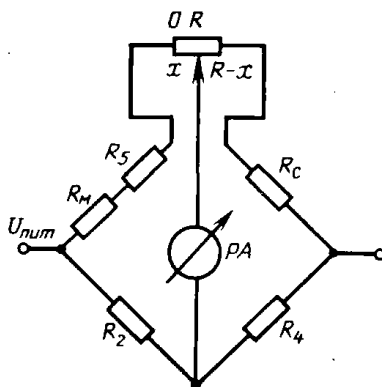


Рис. 4.1. Схема мостового психрометра

4.2.2. Определяем относительную влажность воздуха

Величина переменного сопротивления определяется по формуле:

$$R_x = \frac{R_c - R_m}{2}, \quad (4.1)$$

где R_c , R_m – сопротивление сухого и мокрого термосопротивлений.

Из формулы (4.1) получим

$$R_m = R_c - 2 \cdot R_x. \quad (4.2)$$

При температуре $T_c = 25$ °С термометр ТСМ 100 будет иметь сопротивление

$$R_c = 110,7 \text{ Ом, тогда}$$

$R_m = 110,65 - 2 \cdot 1 = 108,65$ Ом, по формуле (1.29) определяем температуру, которая соответствует температуре

$$T_m = 20,5 \text{ °С.}$$

Пользуясь психрометрической таблицей (приложение, табл. П11), получим значение относительной влажности $\varphi = 65$ %.

4.3. Определяем погрешность измерения влажности при наличии погрешности измерения термосопротивления в пределах заданного класса

Для класса допуска «А» ТСМ, ТСП имеет величину погрешности

$$\Delta = \pm (0,15 + 0,002 \cdot T), \% \quad (4.3)$$

Для класса допуска «В» ТСМ, ТСП имеет величину погрешности

$$\Delta = \pm (0,3 + 0,005 \cdot T), \% \quad (4.4)$$

Для класса допуска «С» ТСМ, ТСП имеет величину погрешности

$$\Delta = \pm (0,6 + 0,01 \cdot T), \% \quad (4.5)$$

В нашем случае

$$\Delta_c = \pm (0,3 + 0,005 \cdot 25) = 0,425 \%,$$

$$\Delta_m = \pm (0,3 + 0,005 \cdot 20,5) = 0,4025\%.$$

Подставим величины сопротивлений в зависимость (4.1) для получения наибольшей разности

$$R'_x = \frac{110,7 \cdot (1 + 0,00475) - 106,65(1 - 0,004025)}{2} = 2,5 \text{ Ом.}$$

$$R_m = 110,7 - 2 \cdot 2,5 = 105,7 \text{ Ом.}$$

Следовательно, температура с учетом погрешности термосопротивления составит $T_m = 13,5$ °С. Таким образом абсолютная погрешность измерения температуры мокрым термометром составит

$$\Delta_m = 20,5 - 13,5 = 7^\circ\text{С.}$$

Полученное значение свидетельствует о том, что в данном случае, погрешность, обусловленная классом точности применяемых термосопротивлений, не будет влиять на точность определения относительной влажности вещества.

Варианты заданий для работы по теме 4.

Исходные данные для расчета представлены в таблицах 4.2 и 4.3

Таблица 4.2

Параметр	<i>Первая цифра варианта</i>									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура сухого термометра T_c , °C	10	14	17	20	24	28	32	36	40	44
Класс точности ТС	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A

Таблица 4.3

Параметр	<i>Вторая цифра варианта</i>										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Величина переменного сопротивления R_x , Ом	0,9	1,6	1,3	1,7	0,2	0,3	1,2	1,1	1,5	1,4	
Тип термосопротивления	ТСП 100	ТСП 100	ТСМ 100	ТСМ 100	ТСП 100	ТСМ 100	ТСП 100	ТСП 100	ТСМ 100	ТСМ 100	

5. ПАРАМЕТРЫ И ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Теоретические сведения

Средство измерений (СИ) представляет собой техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики.

Шкала средства измерений – шкала часть средства измерений, представляющая собой упорядоченный набор меток вместе со значениями соответствующей величины.

Диапазон измерений (рабочий диапазон) – множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений или с указанными показателями точности при определенных условиях.

Пределы измерений – наибольшее и наименьшее значение диапазона измерений. Для мер – это номинальное значение воспроизводимой величины.

Когда нижний предел измерения равен нулю, диапазон измерения указывают в виде записи, например, 0 – 100 А, 0 – 100 Ом и т. п. В тех случаях, когда нижний предел измерения не равен нулю, тогда диапазон измерения обозначается так: 25 – 50 мм, 0 – 100 Ом и т. п.

Во многих измерительных приборах имеются специальные устройства, позволяющие изменить диапазон измерения иногда в очень широких пределах. В этих случаях следует говорить об общем диапазоне измерения, охватываемом измерительным прибором, и об отдельных диапазонах, которые часто называют неудачно «поддиапазоны». Например, общий диапазон измерения 0 – 100 делится на диапазоны 0 – 0,1; 0 – 1; 0 – 10; 0 – 100 или общий диапазон 0 – 5 делится на диапазоны 0 – 1; 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 5.

Коэффициент шкалы ($K_{ш}$) – это отношение предельных значений двух диапазонов измерений: используемого и исходного, для которого проградуирована шкала.

Коэффициент шкалы в однопредельных приборах всегда равен единице, а в многопредельных – имеет свое значение для каждого предела измерения.

Диапазон показаний – область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значением шкалы.

Начальное (конечное) значение шкалы – минимальное (максимальное) значение измеряемой величины, указанное на шкале.

Отметка шкалы – знак на шкале, соответствующий некоторому значению измеряемой величины.

Деление шкалы – промежуток между двумя соседними отметками шкалы.

Длина (интервал) деления шкалы – расстояние между осями (или центрами) двух соседних отметок шкалы, измерено вдоль воображаемой линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы.

Цена деления шкалы – разность значений соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Приборы с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления, а с неравномерной – переменную. В этом случае нормируется минимальная цена деления.

Приборы с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления, а с неравномерной – переменную. В этом случае нормируется минимальная цена деления.

Чувствительность (средства измерений) – отношение изменения показаний средства измерения к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Чувствительность многопредельного прибора определяется для самого малого его предела измерения.

Внутреннее сопротивление прибора (амперметра, вольтметра) обычно указывается в паспорте и прямо или косвенно на лицевой панели. Для амперметров характерно малое внутреннее сопротивление – r_A , а для вольтметров большое – r_V .

5.2. Погрешности средств измерения

В результате воздействия большого числа различных факторов, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации средств измерений, номинальные значения мер и показания приборов отличаются от истинных значений из-

меряемых ими величин. Эти отклонения характеризуют погрешности средств измерений.

От характера проявления при повторных применениях прибора погрешности СИ подразделяются на систематические и случайные.

Систематическая погрешность СИ – это составляющая общей погрешности, которая остается постоянной или закономерно изменяется при многократных измерениях одной и той же величины.

Случайной погрешностью СИ называют составляющую, изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины случайным образом.

Присутствие погрешностей приводит к тому, что характеристики СИ оказываются неоднозначными. При экспериментальном их определении, т. е. градуировке СИ, получают лишь ряд точек. По этой полосе точек проводят на графике некоторую плавную среднюю кривую, которую и принимают за характеристику СИ.

Хотя некоторые экспериментальные точки от нее и отклоняются. Для наименования этих отклонений используется ряд терминов. Систематически наблюдающиеся отклонения от выбранной в качестве характеристики плавной кривой в общем случае называются *погрешностью адекватности* выбранной функциональной зависимости (прямой линии, параболы, экспоненты и т. д.) фактической характеристике СИ.

В связи с этим различают:

Номинальную (или идеальную) функцию преобразования – функция, которая приписана измерительному устройству данного типа и указана в его паспорте и используется при выполнении с его помощью измерений.

Реальную функцию преобразования, которой обладает конкретный экземпляр измерительного устройства.

Если в качестве номинальной функции преобразования выбрана прямая, то погрешность ее адекватности называют *погрешностью линейности* СИ (рис.5.1,д).

Если погрешность адекватности меняет свой знак в зависимости от направления предшествующего отсчету изменения входной величины, то такую погрешность прибора или преобразователя называют погрешностью от *гистерезиса* (от греч. *hysteresis* – запаздывание) или *вариацией* СИ (рис 3.1,е). Причиной гистерезиса являются: люфт и сухое трение в механических передающих элементах, гистерезисный эффект в ферромагнитных материалах, внутреннее трение в материалах пружин, явление упругого последействия в упругих чувствительных элементах, явление поляризации в электрических, пьезоэлектрических и электрохимических элементах и др. Существенным при этом является тот факт, что форма получаемой петли реальной функции преобразования зависит от предыстории, а именно от значения измеряемой величины, при котором после постепенного увеличения последней начинается ее уменьшение (на рис. 5.1,е это показано пунктирными линиями).

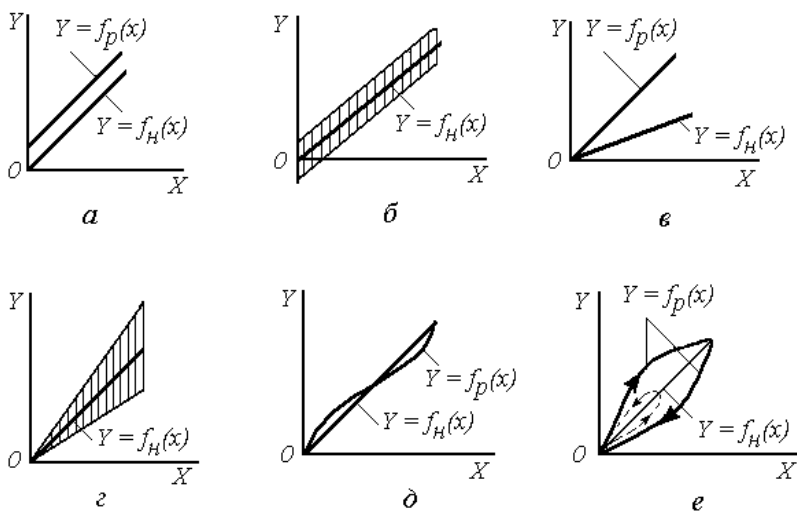


Рис. 5.1. Реальные функции преобразования измерительных устройств

Значение вариации определяется по формуле

$$H = X_b - X_y, \quad (5.1)$$

где X_b , X_y – значения измерений образцовыми СИ при возрастании и убывании величины X .

В зависимости от внешних условий все погрешности СИ делятся на основные и дополнительные.

Основная погрешность – это погрешность СИ при нормальных условиях эксплуатации. (Нормальные условия: температур $293 \pm 5\text{К}$ или $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $65 \pm 15\%$ при 20°C , напряжение в сети питания $220\text{В} \pm 10\%$ с частотой $50\text{Гц} \pm 1\%$, атмосферное давление от $91,4\text{кПа}$ до 104кПа , отсутствие электрических и магнитных полей (наводок). В рабочих условиях, зачастую отличающихся от нормальных более широки диапазонном влияющих величин, при необходимости нормируется *дополнительная погрешность* СИ.

В общем виде, суммарная абсолютная погрешность СИ при валяющих факторах

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_0 + \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (5.2)$$

где Δ_0 – основная погрешность СИ; Δ_i – дополнительная погрешность, вызванная изменением i -го влияющего фактора.

Вследствие сложности разделения дополнительных и основных погрешностей поверку СИ выполняют только при нормальных условиях (т.е. дополнительные погрешности исключены).

В соответствии с ГОСТ 8.401-80 [2] для пределов допускаемой основной (и дополнительной) погрешностей предусмотрены различные способы выражения в виде абсолютной, относительной и приведенной погрешности.

Абсолютная погрешность – разность между показанием X СИ и действительным значением X_0 измеряемой величины

$$\Delta = X - X_0. \quad (5.3)$$

В качестве X_0 выступает либо номинальное значение (например, меры), либо значение величины, измеренной более точно (не менее чем на порядок, в 10 раз) СИ.

Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой физической величины и может быть задана:

либо одним числом (линия 1, рис.5.2): $\Delta = \pm a$;

либо в виде линейной зависимости (линии 2 и 3, рис.5.2): $\Delta = \pm bx$,
 $\Delta = \pm (a + bx)$;

в виде функции $\Delta = f(x)$ или графика, таблицы (таб.5.7).

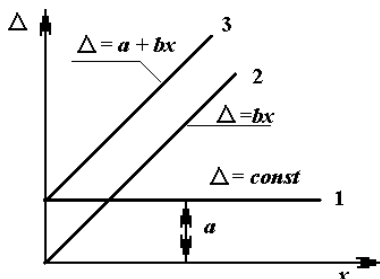


Рис. 5.2. Формы выражения абсолютной погрешности

Таблица 5.1

Пределы допускаемой абсолютной погрешности вольтметра М-366

Показания СИ, В	0	10	20	30	40	50	60	70	75
Погрешность Δ, В	-0,20	-0,10	0	0,10	0,20	0,35	0,45	0,55	0,70

Поскольку абсолютная погрешность выражается в абсолютных единицах физической величины, то это не дает возможность сравнивать СИ и измеряющие разные физические величины. Для этой цели можно использовать относительные погрешности δ как отношение абсолютной погрешности к действительному X_0 значению, выраженные в процентах

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\%. \quad (5.4)$$

Эта формула показывает, что для одного и того же СИ δ уменьшается с ростом X_0 приближается к $X_0 \rightarrow 0$. То есть при измерении на начальном участке шкалы с начальной нулевой отметкой погрешности измерения могут быть сколь угодно велики. Поэтому в метрологии существует принцип запрета измерений на таких участках шкалы СИ.

Указание только абсолютной погрешности не позволяет сравнивать между собой по точности СИ с разным пределом измерений, а указание относи-

тельной погрешности также ограничено из-за непостоянства величины δ . Поэтому получило большое распространение нормирование приведенной погрешности как отношение Δ к нормируемому значению X_N .

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%. \quad (5.5)$$

Нормирующее значение измеряемой величины X_N выбирают в зависимости от вида и характера шкалы прибора. Стандарт 8.401-80 определяет для приборов с равномерной или степенной шкалой, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы, нормирующее значение X_N равным верхнему пределу диапазона измерений. Если же нулевая отметка находится посередине шкалы, то X_N равно протяженности диапазона измерений (например, для амперметра со шкалой от -20 А до $+40$ А значение $X_N = 40 - (-20) = 60$ А).

В зависимости от режима применения различают динамическую и статическую погрешности.

Статическая погрешность СИ – погрешность, возникающая при использовании прибора для измерения постоянной величины.

Динамическая погрешность СИ – погрешность, возникающая при использовании его для измерения переменной во времени величины.

В зависимости от влияния измеряемой величины принято различать мультипликативные и аддитивные погрешности.

Аддитивной (получаемой путем сложения), или погрешностью нуля называют погрешность, которая остается постоянной при всех значениях измеряемой величины (рис. 5.1,*a*).

На рисунке 5.1,*a* показано, что реальная функция преобразования $Y = f_p(X)$ несколько смещена относительно номинальной $Y = f_n(X)$, т.е. выходной сигнал измерительного устройства при всех значениях измеряемой величины X будет больше (или меньше) на одну и ту же величину, чем он должен быть, в соответствии с номинальной функцией.

Если аддитивная погрешность является систематической, то обычно она устраняется корректированием нулевого значения выходного сигнала. Если ад-

дитивная погрешность является случайной, то ее исключить нельзя, и образуется некоторая полоса ширина которой остается постоянной при всех значениях измеряемой величины (рис.5.1,б). Аддитивная погрешность вызвана обычно трением в опорах, контактными сопротивлениями, дрейфом нуля (когда сигнал равен нулю, а показания меняются), шумом (случайные колебания в выходном сигнале) и фоном (периодические колебания в выходном сигнале, часто возникающие из-за наличия электромагнитной или электростатической связи с общегородской сетью).

Мультипликативной (получаемой путем умножения), или погрешностью чувствительности называют погрешность, которая линейно возрастает (или убывает) с увеличением измеряемой величины.

Графически появление мультипликативной погрешности интерпретируется поворотом реальной функции преобразования относительно номинальной (рис. 5.1,в). Если эта погрешность случайная, то она представляется полосой (рис. 5.1,г). Причина возникновения мультипликативной погрешности обычно является изменение коэффициентов преобразования отдельных элементов и узлов СИ.

Классы точности средств измерений. Согласно ГОСТ 8.401–80 [2], *класс точности* – это обобщенная характеристика средств измерений, определяемая пределами допускаемой основной и дополнительной погрешности, а также рядом других свойств, влияющих на точность осуществляемых с их помощью измерений.

В связи с большим разнообразием средств измерений ГОСТ 8.401-80 устанавливает несколько способов назначения классов точности. При этом в основу заложены следующие положения:

в качестве норм служат пределы допускаемых погрешностей, включающие систематические и случайные составляющие;

основная и все виды дополнительных погрешностей нормируются по-разному.

Определяя класс точности, нормируют, прежде всего, пределы допускаемой основной погрешности. Пределы допускаемой дополнительной погрешности устанавливают в виде дольного (кратного) значения.

Классы точности присваивают СИ при их разработке по результатам государственных приемочных испытаний. Если СИ предназначены для измерения одной и той же физической величины, но в разных диапазонах, или для измерения разных физических величин, то этим СИ могут присваиваться разные классы точности как по диапазонам, так и по измеряемым физическим величинам.

Пределы допускаемых основной и относительной погрешностей выражают в форме абсолютной, относительной или приведенной погрешностей. Способ выражения погрешностей зависит от характера изменения погрешности по диапазону измерения, назначения и условий применения СИ.

Если погрешность результатов измерений в данной области измерений принято выражать в единицах измерений величины или делениях шкалы, то принимается форма абсолютных погрешностей (меры, мажорины номинальных физических величин). Если границы абсолютных погрешностей в пределах диапазона измерений практически постоянны, то принимается форма приведенной погрешности, а если эти границы нельзя считать постоянными, то форма относительной погрешности.

Поэтому ГОСТ 8.401-80 [2] в качестве основных устанавливает три вида классов точности СИ:

1. Для пределов допускаемой абсолютной погрешности в единицах измеряемой величины или делениях шкалы.

В этом случае классы точности СИ, обозначают прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. При этом, чем дальше буква от начала алфавита, тем больше значения допускаемой абсолютной погрешности.

Например, СИ класса *C* более точен, чем СИ класса *M*, т. е. это число – условное обозначение и не определяет значение погрешности.

2. Для пределов допускаемой относительной погрешности. Класс точности таких приборов назначается двумя способами.

Если погрешность СИ имеет в основном мультипликативную составляющую, то пределы допускаемой основной относительной погрешности устанавливаются по формуле

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \% = A \cdot 10^n = \pm q, \quad (5.6)$$

где $A = 1; 1,5; (1,6); 2; 2,5; (3); 4; 5$ и 6 ; значения $1,6$ и 3 – допускаемые, но не рекомендуемые; $n = 1; 0; -1; -2; \dots$.

Так обозначают классы точности мостов переменного тока, счетчиков электроэнергии, делителей напряжения, измерительных трансформаторов и др.

Если СИ имеют как мультипликативную, так и аддитивную составляющие, то класс точности обозначается двумя цифрами, соответствующими значениям c и d формулы:

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right]. \quad (5.7)$$

Здесь c и d выражаются также через ряд (3.6). Причем, как правило, $c > d$.

Например, класс точности $0,02/0,01$ означает, что $c = 0,02$, а $d = 0,01$.

3. Для пределов допускаемой приведенной погрешности в виде ряда чисел

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100 \% = \pm A \cdot 10^n. \quad (5.8)$$

Условное обозначение класса точности в этом случае зависит от нормирующего значения x_N т. е. от шкалы СИ.

Если x_N представляется в единицах измеряемой величины, то класс точности обозначается числом, совпадающим с пределом допускаемой приведенной погрешности. Например, класс $1,5$ означает, что $\gamma = 1,5 \%$.

Если x_N – длина шкалы (например, у амперметров), то класс $1,5$ означает, что $\gamma = 1,5 \%$ длины шкалы.

Обозначения классов точности средств измерений, которые используются при указании в нормативных документах, паспортах, технических условиях и на приборах приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Обозначения классов точности в документах и на приборах

Вид погрешности	Формула по тексту	Примеры пределов допускаемой погрешности	Обозначение класса точности	
			в НТД	на СИ
Абсолютная	$\Delta = \pm a$ $\Delta = \pm(a + bx)$	$\Delta = \pm 0,2 \text{ A}$	Класс точности N или класс точности III	N III
Относительная	5.6	$\delta = \pm 1,0 \%$	Класс точности 1,0	①
	53.7	$\delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{x_0}{x} - 1 \right) \right] \%$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01
Приведенная	5.8	при $x_N = x_k$ $\gamma = 1,5 \%$.	Класс точности 1,5	1,5
		x_N – длина шкалы или ее части, мм $\gamma = 1,5 \%$.	Класс точности 0,5	$\surd 0,5$

Задания для самостоятельной работы

Задание 5.1. Определить значение измеряемого параметра для данных, представленных в таблице 5.3 и 5.4. Лицевые панели приборов изображены на рисунках 5.3, 5.4.

Таблица 5.3

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Положение стрелки	20	10	12	16	22	24	18	28	8	14

Исходные данные

	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мультиметр	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340
Положение переключателя, ~V	3	2,5	6	10	15	50	30	250	60	500
Положение переключателя, ~mA	0,6	0,25	3	1	1500	5	60	25	300	0,25
Мультиметр	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353
Положение переключателя, –mA	0,05	1500	0,25	0,6	1	3	5	15	2,5	60
Положение переключателя, – V	1000	150	2,5	300	10	600	50	1,5	250	15

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Мультиметр Ц4353

Положение переключателя пределов..... 150 V

Нажатая кнопка..... «↔»

Положение стрелки..... 22

Решение:

Рассчитаем коэффициент шкалы по формуле:

$$K_{ш} = \frac{ДИ_{\max}}{ДП_{\max}}, \quad (5.9)$$

где $ДИ_{\max}$ – наибольшее значение, выбранного диапазона измерения, определяемое по переключателю пределов; $ДП_{\max}$ – верхнее значение диапазона показания прибора.

$$K_{ш} = \frac{150}{30} = 5;$$

Определяем цену деления шкалы прибора для выбранного диапазона показаний.

$$C = C_n \cdot K_{и}, \quad (5.10)$$

где C_n – номинальная цена деления, определяемая по шкале прибора.

У мультиметра Ц4353 номинальная цена деления при измерении напряжения 1 В/дел, таким образом, на диапазоне 150 В, цена деления составит:

$$C_{150В} = 1 \cdot 5 = 5 \text{ В/дел.};$$

Результат измерения определим по формуле:

$$U = N \cdot C, \quad (5.11)$$

где N – количество делений, соответствующее положению стрелки.

Положение стрелки «22» соответствует 22 делению. Результат измерения получим, умножив количество делений на коэффициент шкалы:

$$U = 22 \cdot 5 = 110 \text{ В.}$$

Ответ: $U = 110 \text{ В.}$

Задание 5.2. Определить цену деления и чувствительность прибора (таб.5.5) при измерении значений представленных в таблице 5.6. Лицевые панели приборов изображены на рисунках 5.3, 5.4.

Таблица 5.5

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мультиметр	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353

Таблица 5.6

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеряемое значение, ~В	2,0	12	16	24	85	42	64	55	250	150
Измеряемое значение, –мА	800	500	400	250	100	50	15	30	45	60
Измеряемое значение, – В	0,5	2,5	350	35	46	320	140	400	4,0	18
Измеряемое значение, ~мА	0,2	0,5	1,5	3,5	4,5	0,15	0,1	0,4	0,8	2,0

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Мультиметр Ц4353

Измеряемое значение: $\sim V = 1,2 \text{ В}$.

Решение:

Определяем диапазон измерения для заданного значения 1,2 В. Диапазон измерения должен быть больше измеряемого значения, в нашем случае, у мультиметра Ц4353 подходит диапазон измерения до 1,5 В.

Для выбранного диапазона измерения по формуле (3.9) определяем коэффициент шкалы

$$K_u = \frac{1,5}{30} = 0,05, \text{ тогда}$$

Определяем цену деления шкалы прибора для выбранного диапазона показаний по формуле (5.10). У мультиметра Ц4353 номинальная цена деления при измерении напряжения 1 В/дел, таким образом, на диапазоне 1,5 В, цена деления составит:

$$C_{1,5B} = 1 \cdot 0,05 = 0,05 \text{ В/дел.};$$

Чувствительность определяем по формуле:

$$S = \frac{1}{C}; \quad (5.12)$$

$$S_{1,5B} = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ дел./В.}$$

Ответ: $C_{1,5B} = 0,05 \text{ В/дел.}; S_{1,5B} = 20 \text{ дел./В}$.

Задание 5.3. Для измерения напряжения U_1 и U_2 (табл. 5.8), с частотой 100 Гц и 150 кГц, использовали вольтметр В3–38.

Определить абсолютную и относительную погрешности этих измерений, если в паспорте вольтметра указаны следующие технические характеристики:

а) диапазон измеряемых напряжений от 100 мВ до 300 В покрывается следующими пределами:

мВ	1	3	10	30	100	300
В	1	3	10	30	100	300

б) в нормальной области частот от 45 Гц до 20 МГц основная погрешность, выраженная в процентах от конечного значения установленного предела измерения, не превышает $\pm\gamma_1$ % в диапазоне 1 ... 300 мВ и $\pm\gamma_2$ % в диапазоне 1 ... 300 В.

Таблица 5.7

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Основная погрешность $\pm\gamma_1$, %	1	1,5	1,6	2	2,5	1	1,5	1,6	2	2,5
Основная погрешность $\pm\gamma_2$, %	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4

Таблица 5.8

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеряемое напряжение U_1	5 В	20 мВ	35 В	120 мВ	220 В	140 мВ	25 В	110 мВ	12 В	60 мВ
Измеряемое напряжение U_2	10 мВ	25 В	20 мВ	120 В	40 мВ	45 В	210 мВ	24 В	40 мВ	220 В

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Измеряемое напряжение: $\sim U = 5$ мВ.

Основная погрешность: $\pm\gamma_1 = 2$ %; $\pm\gamma_2 = 0,2$ %.

Решение:

Для заданного измеряемого напряжения выбираем диапазон измерения, который должен быть больше измеряемого параметра. В нашем случае, для $\sim U = 5$ мВ подходит диапазон измерения до 10 мВ.

В выбранном диапазоне (10 мВ) основная приведенная погрешность измерения вольтметра, в соответствии с паспортными данными, составляет $\pm\gamma_1 = 2$ %.

Зная приведенную погрешность, можно рассчитать абсолютную погрешность по формуле:

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{\gamma \cdot X_N}{100} \right). \quad (5.13)$$

Тогда предельное значение абсолютной погрешности составит

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{2 \cdot 10}{100} \right) = \pm 0,2 \text{ мВ.}$$

Относительную погрешность рассчитываем по формуле (5.4):

$$\pm \delta = \pm \left(\frac{0,2}{5} \right) \cdot 100 = \pm 4,0 \text{ \%}.$$

Ответ: $\pm \Delta = \pm 0,2 \text{ мВ}$; $\pm \delta = \pm 4,0 \text{ \%}$.

Задание 5.4. Определить аддитивную и наибольшую мультипликативную погрешность средства измерений, если номинальная функция преобразования Y_n , а реальная Y_p (табл. 5.10), верхний предел диапазона измерений X_{\max} (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Верхний предел измерения средства измерения X_{\max}	40	50	60	70	80	90	100	110	200	250

Таблица 5.10

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Реальная функция преобразования Y_p	0,01+3,02x	-0,02+2,04x	0,03+2,98x	0,05+1,95x	0,12+4,05x	-0,05+3,98x	0,08+3,06x	-0,02+2,01x	0,04+3,03x	-0,01+2,97x
Номинальная функция преобразования Y_n	3,0x	2,0x	3,0x	2,0x	4,0x	4,0x	3,0x	2,0x	3,0x	3,0x

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Реальная функция преобразования $Y_p = -2,773 + 2,077 \cdot X$

Номинальная функция преобразования $Y_n = 2,0 \cdot X$

Верхний предел измерения средства измерения $X_{\max} = 50$.

Решение: Согласно сравнению номинальной и реальной функции преобразования аддитивная погрешность $\Delta_a = -2,773$ ед.

Мультипликативная погрешность Δ_m имеет следующие значения:

$$\Delta_{m\max} = 2,077 \cdot X - 2 \cdot X = 0,077 \cdot 50 = 3,85 \text{ ед.}$$

Ответ: $\Delta_a = -2,773$ ед.; $\Delta_{m\max} = 3,85$ ед.

Задание 5.5. При пяти измерениях одного и того же напряжения датчика с помощью вольтметра получены следующие результаты $U_1 \dots U_5$. Считая среднее арифметическое значение приведенных напряжений истинным, определить границы абсолютной и относительной погрешностей.

Таблица 5.11

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Показания вольтметра, В	3,02	3,02	3,01	3,06	3,0	2,99	2,98	2,97	3,05	3,04
Показания вольтметра U_2 , В	3,01	3,06	3,03	2,99	2,98	2,97	3,05	3,04	3,02	2,98

Таблица 5.12

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Показания вольтметра U_3 , В	3,0	2,99	2,98	2,97	3,05	3,04	3,01	3,06	3,0	2,99
Показания вольтметра U_4 , В	3,06	3,08	3,02	3,0	2,99	2,98	2,97	3,05	3,04	3,05
Показания вольтметра U_5 , В	2,97	2,95	3,04	3,2	3,0	2,99	2,98	2,97	3,05	3,04

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

$$U_1 = 3,02 \text{ В}; U_2 = 3,01 \text{ В}; U_3 = 3,00 \text{ В}; U_4 = 3,06 \text{ В}; U_5 = 2,97 \text{ В};$$

Решение:

Определим среднее арифметическое значение приведенных напряжений по формуле:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (5.14)$$

где n – количество результатов наблюдений.

$$\bar{U} = \frac{3,02 + 3,01 + 3,00 + 3,06 + 2,97}{5} = 3,012 \text{ В}.$$

Принимая полученное значение за действительное, по формуле (5.3) определяем границы абсолютной погрешности, т.к. по условию нужно определить предельное значение абсолютной погрешности в формулу будем подставлять наименьшее и наибольшее значение, полученное при измерениях:

$$\pm \Delta_1 = \pm |2,97 - 3,012| = \pm 0,042 \text{ В},$$

$$\pm \Delta_2 = \pm |3,06 - 3,012| = \pm 0,048 \text{ В}.$$

Наибольшее из полученных значений принимаем за абсолютную погрешность результатов измерений, т.е. $\Delta = \pm 0,048 \text{ В}$.

Относительную погрешность определяем по формуле (5.4)

$$\delta = \pm \left(\frac{0,048}{3,012} \cdot 100 \right) = \pm 1,59 \text{ \%}.$$

Ответ: $\pm \Delta = \pm 0,05 \text{ В}; \pm \delta = \pm 1,59 \text{ \%}$

Задание 5.6. Для прибора (табл. 5.13) в выбранном диапазоне определить абсолютную, относительную и приведенную погрешность измерения заданных параметров (табл. 5.14). Лицевые панели приборов изображены на рисунках 5.3, 5.4.

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мультиметр	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353	Ц4340	Ц4353

Таблица 5.14

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеряемое значение, мА	-2	~1,5	-0,2	~1,4	-0,2	~0,4	-0,8	~1,6	-0,1	~0,1
Измеряемое значение, В	~12	-1,1	~50	-7,5	~2,5	-5	~30	-1,5	~4,5	-4,6

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Мультиметр Ц4340

Измеряемое значение: $\sim I = 8 \text{ мА}$.

Решение:

На лицевой панели прибора Ц4340 (рис. 5.2) находятся условные обозначения классов точности мультиметра при измерении разных физических величин. При измерении переменного тока класс точности мультиметра Ц4340 – 2,5. Так как класс точности прибора задан одним числом, то это число обозначает предельное значение основной приведенной погрешности измерения, т.е. $\pm \gamma = \pm 2,5 \%$.

Зная приведенную погрешность, можно рассчитать абсолютную погрешность по формуле (5.13). Нормирующее значение определяем по диапазону измерения. По рисунку 5.4, для заданного измеряемого значения $\sim I = 8 \text{ мА}$, выбираем диапазон до 25 мА, следовательно $X_N = 25 \text{ мА}$. Тогда предельное значение абсолютной погрешности составит:

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{2,5 \cdot 25}{100} \right) = \pm 0,625 \text{ мА}.$$

Относительную погрешность рассчитываем по формуле (5.4):

$$\pm \delta = \pm \left(\frac{0,625}{8} \right) \cdot 100 = \pm 7,8 \%$$

Ответ: $\pm \Delta = \pm 0,6$ мА; $\pm \delta = \pm 7,8 \%$.

Задание 5.7. Вольтметр имеет заданный класс точности (таб. 5.15) и следующие пределы измерений: 7,5; 15; 75; 150 В.

Определите величину предельной абсолютной и приведенной погрешности измерения напряжения U_1 и U_2 (таб. 5.16) и запишите результат измерения.

Таблица 5.15

Параметр	Исходные данные									
	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Класс точности вольтметра	0,2	0,4	0,6	0,15	0,5	0,25	0,4	0,3	0,1	0,2

Таблица 5.16

Параметр	Исходные данные									
	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеренное напряжение U_1 , В	5,5	35,2	64,2	5,8	65,4	25,6	87,4	95,4	4,2	87,6
Измеренное напряжение U_2 , В	95,5	85,2	84,2	105	10,4	96,6	5,4	25,4	21,2	7,6

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Измеряемое значение, $U = 6,253$ В.

Класс точности вольтметра (0,2)

Решение:

Так как класс точности задан числом в кружочке, то это число обозначает предельное значение основной относительной погрешности измерения прибора, т.е. $\pm \delta = \pm 0,2 \%$.

Зная относительную погрешность, можно рассчитать абсолютную погрешность по формуле:

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{\delta \cdot X}{100} \right). \quad (5.15)$$

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{0,2 \cdot 6,253}{100} \right) = \pm 0,0125 \text{ В.}$$

Приведенную погрешность измерения рассчитываем по формуле (5.5). Нормирующее значение определяем по диапазону измерения. Для заданного измеряемого значения $U = 6 \text{ В}$, выбираем диапазон до $7,5 \text{ В}$, следовательно $X_N = 7,5 \text{ В}$. Тогда предельное значение абсолютной погрешности составит

$$\pm \gamma = \pm \left(\frac{0,0125}{7,5} \right) \cdot 100 = \pm 0,17 \%$$

Ответ: $\pm \Delta = \pm 0,0125 \text{ В}$; $\pm \gamma = \pm 0,17 \%$.

Результат измерения:

$$U = (6,253 \pm 0,012) \text{ В.}$$

Задание 5.8. Цифровой вольтметр класса точности c/d (таб. 5.18) имеет пределы измерения: 6; 15; 30; 60; 150; 300 В.

Определите:

а) предельную погрешность измерения и запишите результат измерения напряжения U ;

б) значения аддитивной и мультипликативной составляющих погрешностей результата измерения напряжения U .

Таблица 5.17

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеренное напряжение U , В	5,5	20	35	75	110	160	220	4,5	45	85

Исходные данные

Параметр		Вторая цифра варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Класс точности	<i>c</i>	0,02	0,04	0,06	0,15	0,06	0,04	0,025	0,02	0,04	0,06
	<i>d</i>	0,01	0,015	0,02	0,06	0,04	0,025	0,016	0,01	0,02	0,04

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Измеряемое значение, $U = 16,531$ В.

Класс точности вольтметра 0,02/0,01

Решение:

а) Класс точности вольтметра задан 0,02/0,01 (*c/d*), следовательно, у прибора нормированы пределы допускаемой основной относительной погрешности по формуле (5.7). Конечное значение шкалы (x_k) определяем по диапазону измерения. Для заданного измеряемого значения $U = 16,531$ В, выбираем диапазон до 30 В, следовательно $x_k = 30$ В. Тогда предельное значение относительной погрешности для измеряемого напряжения составит

$$\pm \delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\left| \frac{30}{16,531} \right| - 1 \right) \right] = \pm 0,028 \%$$

Зная относительную погрешность, можно рассчитать абсолютную погрешность по формуле (3.15):

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{0,028 \cdot 16,531}{100} \right) = \pm 0,00465 \text{ В.}$$

Запишем результат измерения:

$$U = (16,531 \pm 0,005) \text{ В.}$$

б) Значения аддитивной (Δ_a) и мультипликативной (Δ_m) составляющих погрешностей результата измерения напряжения U можно определить из значений *c* и *d*.

Значение *d* определяют по формуле:

$$d = \frac{\Delta_a}{x_k} \cdot 100, \quad (5.16)$$

из этой формулы можно выразить аддитивную погрешность

$$\Delta_a = \frac{d \cdot x_k}{100}, \quad (5.17)$$

$$\Delta_a = \frac{0,01 \cdot 30}{100} = 0,003 \text{ В.}$$

Мультипликативную погрешность рассчитываем по формуле:

$$\Delta_m = \frac{b \cdot x}{100}, \quad (5.18)$$

значение $b = c - d$, таким образом, мультипликативная погрешность

$$\Delta_m = \frac{0,01 \cdot 16,531}{100} = 0,00165 \text{ В.}$$

Ответ: $\Delta_a = 0,003 \text{ В}$; $\Delta_m = 0,00165 \text{ В}$.

Задание 5.9. Определить абсолютную, относительную и приведенную погрешность измерения напряжения переменного тока U_1 с частотой T_1 и тока U_2 с частотой T_2 (табл.5.20, 5.21).

Для измерения используют 4,5-разрядный цифровой мультиметр U3401A. Разрешающая способность при измерении постоянной и переменной составляющих напряжения переменного тока, отсчет полной шкалы и погрешность заданы по формуле

$$\pm \Delta = \pm (\% \text{ от отсчета} + n \text{ е.м.р.})$$

и представлены в таблице 5.19.

Таблица 5.19

Метрологические характеристики мультиметра U3401A

Предел измерения	Разрешающая способность	Макс. значение отсчета	Погрешность		
			от 50 Гц до 10 кГц	от 10 кГц до 30 кГц	от 30 кГц до 100 кГц
500,00 мВ	10 мкВ	510,00	0,5% + 50	2% + 70	3% + 60
5,0000 В	100 мкВ	5,1000	0,5% + 25	1% + 30	3% + 40
50,000 В	1 мВ	51,000	0,5% + 15	1% + 20	3% + 30

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота T_1	20 кГц	50 кГц	5 кГц	25 кГц	70 кГц	90 Гц	15 кГц	35 кГц	80 Гц	20 кГц
Частота T_2 ,	60 Гц	15 кГц	35 кГц	80 Гц	20 кГц	50 кГц	5 кГц	25 кГц	70 кГц	90 Гц

Таблица 5.21

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеряемое напряжение U_1 , В	5,365	42,14	0,87	27,4	0,54	10,36	22,34	0,231	40,14	15,54
Измеряемое напряжение U_2 , В	0,248	2,348	12,23	0,147	25,54	3,54	0,365	32,14	1,87	0,451

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

Измеряемое значение, $U = 16,531$ В.

Частота $T = 5$ кГц.

Решение:

В общем виде пределы основной абсолютной погрешности измерения вольтметра заданы формулой:

$$\pm \Delta_0 = \pm \Delta = \pm (\% \text{ от отсчета} + n \text{ е.м.р.}).$$

Для определения процентов в этой формуле и количества единиц младшего разряда необходимо выбрать диапазон измерения по напряжению и частоте. В нашем случае, выбираем диапазон измерения по частоте до 50 В, по частоте от 50 Гц до 10 кГц.

Для допускаемых пределов основной абсолютной погрешности искомые значения составят (0,5 % + 15). Подставим эти значения в формулу и получим

$$\pm \Delta = \pm (0,5 \% \text{ от } U + 15 \cdot \text{ед. мл. разряда}).$$

У вольтметра в диапазоне измерения до 50 В единица младшего разряда составляет 0,001 В.

Таким образом, основная абсолютная погрешность измерения составит

$$\pm \Delta = \pm \left(\frac{16,531}{100} \cdot 0,5 + 15 \cdot 0,001 \right) = \pm 0,0977 \text{ В.}$$

Относительную погрешность рассчитываем по формуле (5.4)

$$\pm \delta = \pm \left(\frac{0,0977}{16,531} \right) \cdot 100 = \pm 0,591 \text{ \%}.$$

Приведенную погрешность измерения рассчитываем по формуле (5.5)

$$\pm \gamma = \pm \left(\frac{0,0977}{50} \right) \cdot 100 = \pm 19,54 \text{ \%}.$$

Ответ: $\pm \Delta = \pm 0,0977 \text{ В}$; $\pm \delta = \pm 0,591 \text{ \%}$; $\pm \gamma = \pm 19,54 \text{ \%}$.

Задание 5.10. При поверке миллиамперметра на диапазоне измерения от 0 А до I_{\max} образцовым прибором получены значения абсолютной погрешности $\Delta_1 \dots \Delta_5$. Определить приведенную погрешность и назначить класс точности миллиамперметра.

Таблица 5.22

Исходные данные

Параметр	Первая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Абсолютная погрешность Δ_1 , мА	0,02	-0,01	0,03	-0,04	0,05	-0,02	0,01	-0,05	0,02	-0,03
Абсолютная погрешность Δ_2 , мА	0,05	0,02	-0,01	0,03	-0,04	0,05	0,05	-0,02	0,01	0,02

Таблица 5.23

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Абсолютная погрешность Δ_3 , мА	-0,04	0,05	0,03	-0,04	0,05	0,01	-0,05	0,02	-0,03	-0,03
Абсолютная погрешность Δ_4 , мА	-0,05	0,02	-0,03	0,02	-0,01	0,03	-0,04	0,05	0,02	-0,01
Абсолютная погрешность Δ_5 , мА	-0,02	0,01	-0,05	-0,03	0,02	-0,01	0,03	0,05	0,03	-0,04

Исходные данные

Параметр	Вторая цифра варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Верхний предел диапазона измерения силы тока I_{\max} , мА	30	10	50	15	2,5	25	5	2,5	15	6

Рассмотрим методику решения задачи на примере.

Исходные данные для расчетов:

$$\Delta_1 = -0,01 \text{ мА}; \Delta_2 = +0,03 \text{ мА}; \Delta_3 = -0,03 \text{ мА}; \Delta_4 = -0,04 \text{ мА}; \Delta_5 = +0,02 \text{ мА}.$$

Верхний предел диапазона измерения силы тока $I_{\max} = 15 \text{ мА}$.

Решение:

Для каждого значения абсолютной погрешности рассчитаем приведенную погрешность по формуле (5.5). Полученные результаты сведем в таблицу 5.25.

Таблица 5.25

Результаты расчета

Абсолютная погрешность Δ , мА	-0,01	+0,03	-0,03	-0,04	+0,02
Приведенная погрешность γ , %	0,067	0,2	0,2	0,27	0,13

Для определения класса точности из таблицы берем наибольшее значение приведенной погрешности $\gamma = 0,27 \%$ и округляем его в большую сторону до стандартного значения. Таким образом, класс точности поверяемого прибора 0,4.

Ответ: класс точности 0,4.

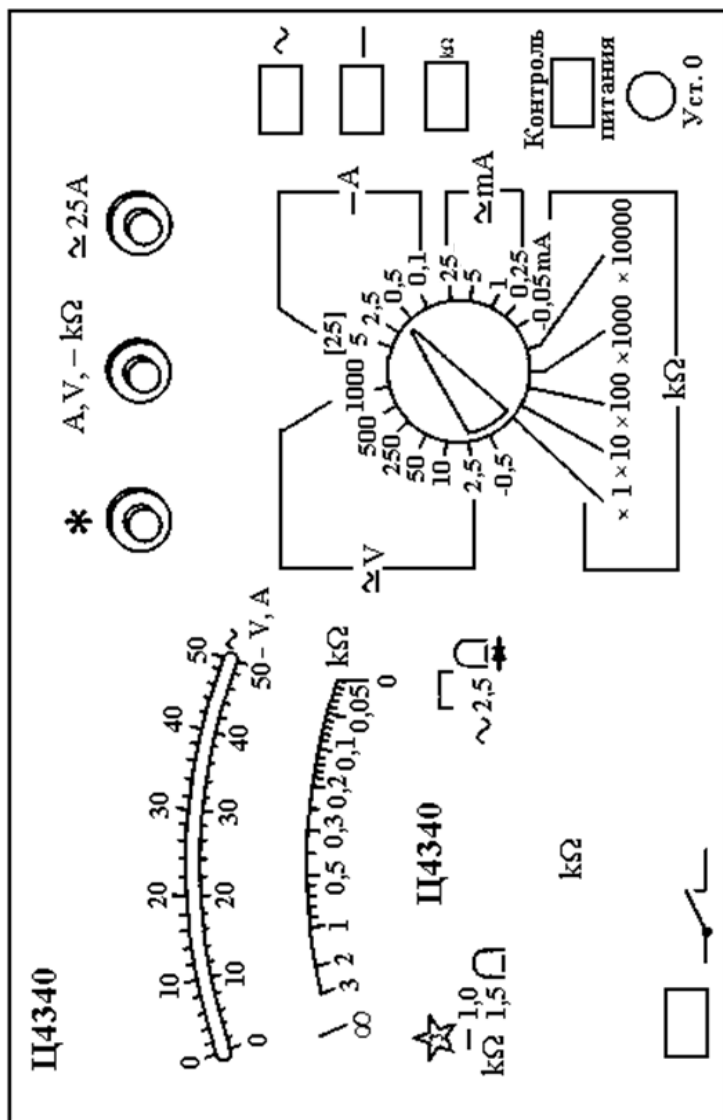


Рис. 5.4. Изображение лицевой панели мультиметра Ц4340

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Erokhin, M.N. Assessing the relative interchangeability in joints with preload / Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Z., Kataev Y.V., Vergazova Y.G. // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. № 6. P. 469-472.
2. Erokhin, M.N. Tightness and leakage in applying reinforced rubber sleeves to shafts // M.N., Erokhin, O.A. Leonov, Yu.V. Kataev., O.M. Melnikov // Russian Engineering Research. 2019. 39(6). P. 459-462.
3. Leonov O.A. Influence of tightening fitting accuracy for resource connection / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall., Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021. P. 12022.
4. Leonov, O.A. A parametric failure model for the calculation of the fit tolerance of joints with clearance / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. // Journal of Friction and Wear. 2019. 40(4). P. 332-336.
5. Leonov, O.A. Determining the tolerances in fitting for joints with interference / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G. // Russian Engineering Research. 2019. 39(7). P. 544-547.
6. Leonov, O.A. Development of the management system for metrological assurance of measurements / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. / JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 32010.
7. Leonov, O.A. Improving the selection methodology rational ways to restore parts when repairing machines / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Golinitzkiy P.V. // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 42057.
8. Leonov, O.A. Influence of measurement error for the results of defection of parts hole-type / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. // Journal of Physics: Confer-

ence Leonov, O.A. Influence of measurement error for the results of deflection of parts hole-type / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. // Journal of Physics: Conference

9. Leonov, O.A. Measurement risk management method at machine-building enterprises / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Kataev Yu.V. // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 52060.

10. Leonov, O.A. Method for calculating savings from using a more accurate measuring instruments / Leonov O.A., Tamasova G.N., Shkaruba N.Zh., Kataev Yu.V., Antonova U.Yu. // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 32022.

11. Leonov, O.A. Methodology for assessing external losses of repair enterprises of the agro-industrial complex when implementing a quality management system / Leonov O.A., Tamasova G.N., Malykha E.F. // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 52059.

12. Leonov, O.A. Quality assessment of temperature measurements in incoming inspection of raw meat / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Cherkasova E.I., Odintsova A.A. // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 32030.

13. Leonov, O.A. Quality Control in the Machining of Cylinder Liners at Repair Enterprises / O.A. Leonov, N.Z. Shkaruba, Y.G. Vergazova, P.V. Golinitkiy, U.Y. Antonova // Russian Engineering Research. 2020. 40(9). P. 726-731.

14. Leonov, O.A. Theoretical basis of selection of measurement measures in control of linear sizes / Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of

Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 52081.

15. Shkaruba, N. Theoretical foundations of the application of intergroup interchangeability of the «piston - cylinder liner» connections in the overhaul of engines / Shkaruba N., Leonov O., Terasova G., Golinskiy P., Antonova U. // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 52065.

16. Белов, В. М. Задания и требования к выполнению курсовой работы по метрологии, стандартизации и квалиметрии: методические рекомендации / В. М. Белов, П. А. Карепин, В. В. Карпузов, А. А. Куликов. - Москва: МГАУ, 1997. - 40 с.

17. Белов, В. М. Курсовое проектирование по метрологии, стандартизации и квалиметрии: учебное пособие / В. М. Белов, А. А. Куликов, П. А. Карепин, В. В. Карпузов, О. А. Леонов. - Москва: МГАУ, 2000. - 136 с.

18. Белов, В. М. Метрология, стандартизация, квалиметрия. Стандартизация норм взаимозаменяемости: учебное пособие / В. М. Белов, А. А. Куликов, П. А. Карепин, В. В. Карпузов, О. А. Леонов. - Москва: МГАУ, 1999.- 140 с

19. Белов, В. М. Сборник задач по метрологии, стандартизации и сертификации: учебное пособие / В. М. Белов, А. А. Куликов, П. А. Карепин, В. В. Карпузов, О. А. Леонов. - Москва: МГАУ, 2001. - 140 с.

20. Белов, В.М. Метрология, стандартизация, квалиметрия. Метрология: учебное пособие / В. М. Белов, А. А. Куликов, П. А. Карепин, В. В. Карпузов, О. А. Леонов, Н. Е. Кисенков. - Москва: МГАУ, 1997. - 109 с.

21. Бондарева Г.И. Затраты на контроль при ремонте двигателей / Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Тerasова Г.Н., Вергазова Ю.Г. // Сельский механизатор. 2021. № 3. С. 24-25.

22. Бондарева Г.И. Основы проектирования операций входного контроля на машиностроительных предприятиях: монография / Бондарева Г.И.,

Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Черкасова Э.И., Голицинский П.В., Антонова У.Ю. - Москва, 2020.

23. Бондарева Г.И. Проектирование и анализа качества контрольных процессов на ремонтных предприятиях: монография / Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Черкасова Э.И., Голицинский П.В., Антонова У.Ю. - Москва, 2020.

24. Бондарева, Г. И. Входной контроль и метрологическое обеспечение на предприятиях технического сервиса / О. А. Леонов, Г. И. Бондарева, Н. Ж. Шкаруба // Сельский механизатор. - 2017. - № 4. - С.36-38.

25. Бондарева, Г. И. Влияние погрешности средств измерений на потери при ремонте сельхозтехники / О. А. Леонов, Г. И. Бондарева, Н. Ж. Шкаруба // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2007. - № 11. - С. 27-29

26. Бондарева, Г. И. Метрология: измерение давления в АПК: учебное пособие / Г. И. Бондарева, О. А. Леонов. - Москва, 2016. - 344 с. - 978-5- 9675-1508-8. ISBN: 9785967515088

27. Бондарева, Г. И. Метрология: измерение массы в АПК: учебное пособие / Г. И. Бондарева, О. А. Леонов. - Москва: Российский научноисследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2014. - 344 с. - 978-5-7367-1025-6. ISBN: 9785736710256

28. Бондарева, Г. И. Применение технико-экономических критериев при выборе средств измерений в ремонтном производстве / О. А. Леонов, Г. И. Бондарева, Н. Ж. Шкаруба // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. - 2008. - № 1. - С. 53-55.

29. Бондарева, Г.И. Оценка внешних потерь на предприятиях технического сервиса в АПК / Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г. // Сельский механизатор. 2020. № 9. С. 34-35.

30. Бондарева, Г.И. Построение современной системы качества на предприятиях технического сервиса / Бондарева Г.И., Леонов О.А. // Сельский механизатор. 2017. № 8. С. 34-35.

31. Бондарева, Г.И. Теоретические основы выбора рациональных способов восстановления деталей / Бондарева Г.И., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. // Сельский механизатор. 2019. № 5. С. 38-39.
32. Ерохин М.Н. Научные основы организации системы менеджмента качества на предприятиях тс в АПК: монография / Ерохин М.Н., Леонов О.А., Карпузов В.В., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Самордин А.Н. - Ставрополь, 2020.
33. Ерохин М.Н. Управление затратами на качество продукции и услуг предприятий ремонтного профиля: монография /Ерохин М.Н., Леонов О.А., Темасова Г.Н., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. - Ставрополь, 2020.
34. Ерохин, М.Н. Процентная взаимозаменяемость посадок с натягом / Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Катаев Ю.В., Вергазова Ю.Г. // Вестник машиностроения. 2020. № 3. С. 41-44.
35. Карпузов, В.В. Выбор средств измерений для входного контроля качества поршней в условиях ремонтного производства / Карпузов В.В., Шкаруба Н.Ж., Сапожников И.И., Антонова У.Ю. // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 4. С. 83-89.
36. Леонов О. А. Методы и средства измерений температуры: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба. - Москва: ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. - 124 с.
37. Леонов О. А. Оценка качества измерительных процессов при производстве полуфабрикатов мяса птиц / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, А. А. Одинцова // Международный технико-экономический журнал. - 2019. - № 2. - С. 33-40.
38. Леонов О.А. Восстановление подшипников скольжения из цветных сплавов комбинированным методом: монография / Леонов О.А., Голиницкий П.В., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Антонова У.Ю. - Ставрополь, 2020.
39. Леонов О.А. Методика оценки качества процессов предприятий технического сервиса / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г. //Компетентность. 2021. № 2. С. 32-38.

40. Леонов О.А. Метрология и технические измерения: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба. - Москва: РГАУ-МСХА, 2015. - 239 с. - 978-5-9675-1317-6. ISBN: 9785967513176
41. Леонов О.А. Статистические методы и инструменты контроля качества: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н. - Санкт-Петербург, 2021.
42. Леонов, О. А. Выбор универсальных средств измерений для контроля гильз цилиндров двигателя при селективной сборке/ О. А. Леонов, У. Ю. Антонова // Тракторы и сельхозмашины. - 2017. - № 6. - С. 52-57.
43. Леонов, О. А. Курсовое проектирование по метрологии, стандартизации и сертификации: учебное пособие / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Г.Н. Темасова. - Москва: МГАУ, 2011. - 120 с.
44. Леонов, О. А. Методика расчета экономии от использования более точного средства измерений при изготовлении и ремонте машин / О. А. Леонов, У. Ю. Антонова // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. - 2018. - № 4 (86). - С. 42-46.
45. Леонов, О. А. Методология оценки издержек на контроль при ремонте машин / О. А. Леонов, Г. Н. Темасова // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. - 2019. - № 3 (23). - С. 37-43.
46. Леонов, О. А. Методы и средства измерений: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба. - Москва: МГАУ, 2014. - 256 с.
47. Леонов, О. А. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. - 2018. - № 6. - С. 104-109
48. Леонов, О. А. Метрология и технические измерения: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба. - Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. - 239 с.
49. Леонов, О. А. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие / О. А. Леонов, В. В. Карпузов, Н. Е. Кисенков, Н.Ж. Шкаруба. -

Москва: Издательство КолосС, 2009. - 568 с. - 978-5-9532-0632-7. ISBN: 9785953206327

50. Леонов, О. А. Общая теория измерений: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба. - Москва: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2017. - 160 с.

51. Леонов, О. А. Стандартизация: учебное пособие / О. А. Леонов, В. В. Карпузов, Г.Н. Темасова. - Москва: МГАУ, 2008. - 158 с.

52. Леонов, О. А. Статистические методы управления качеством: учебное пособие / О. А. Леонов, Г.Н. Темасова. - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2019 - 144 с. - 978-5-8114-3666-8. ISBN: 9785811436668

53. Леонов, О. А. Техничко-экономические основы метрологии, стандартизации и управления качеством: учебное пособие / О. А. Леонов, Г. Н. Темасова, Н. Ж. Шкаруба. - Москва: ФГОУ ВПО МГАУ, 2004. - 235 с.

54. Леонов, О. А. Управление качеством: учебное пособие / О. А. Леонов, Г.Н. Темасова, Ю. Г. Вергазова. - Санкт-Петербург: Изд-во Лань, 2018. - 180 с.

55. Леонов, О. А. Физические основы измерений: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова. - Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. - 162 с.

56. Леонов, О. А. Физические основы измерений: учебное пособие / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова. - Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. - 162 с.

57. Леонов, О.А. Внедрение интегрированной системы менеджмента на предприятиях мелиоративного профиля / Леонов О.А., Карпузов В.В., Шкаруба Н.Ж. // Сельский механизатор. 2019. № 10. С. 18-19.

58. Леонов, О.А. Исследование затрат и потерь при контроле шеек колнчатого вала в условиях ремонтного производства / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального Государственного образовательного учреждения ВПО "Московский Государственный Агроинженерный университет им. В.П. Горячкина". - 2013. - №2(58), с. 71-74.

59. Леонов, О.А. Методика выбора средств измерений для мелкосерийного машиностроительного и ремонтного производства АПК: методические рекомендации / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2018.
60. Леонов, О.А. Методика расчета эффективности функционирования системы менеджмента качества / Леонов О.А., Темасова Г.Н., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. // Компетентность. 2020. № 3. С. 26-31.
61. Леонов, О.А. Методология оценки издержек на контроль при ремонте машин / Леонов О.А., Темасова Г.Н. // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. № 3 (23). С. 37-43.
62. Леонов, О.А. Методы и средства измерений: учебник / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю. - Москва, 2020.
63. Леонов, О.А. Методы и средства измерений: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю. - Москва, 2018.
64. Леонов, О.А. Методы и средства измерений сил, деформаций, напряжений: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2009.
65. Леонов, О.А. Методы и средства измерений температуры: методические рекомендации / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2008.
66. Леонов, О.А. Методы и средства измерений угловой скорости вращения / Леонов О.А., Темасова Г.Н. - Москва, 2009.
67. Леонов, О.А. Методы и средства измерений электрических и тепловых величин: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2015.
68. Леонов, О.А. Методы и средства контроля качества обработки гильз цилиндров на ремонтных машиностроительных предприятиях / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Голиницкий П.В., Антонова У.Ю. // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С. 40-45.
69. Леонов, О.А. Метрологическое обеспечение и обработка результатов измерений электрических величин. методические рекомендации / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2008.
70. Леонов, О.А. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Анто-

нова У.Ю. // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2018. № 6. С. 104-109.

71. Леонов, О.А. Метрология: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2019.

72. Леонов, О.А. Модель параметрического отказа для расчета точностных параметров соединения с зазором / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 4. С. 424-430.

73. Леонов, О.А. Обеспечение качества ремонта унифицированных соединений сельскохозяйственной техники методами расчета точностных параметров: дис. ... доктора техн. наук. - М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2004. - 324 с.

74. Леонов, О.А. Оценка качества измерительных процессов в ремонтном производстве / Леонов О.А., Бондарева Г.И., Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 2 (58). С. 36-38.

75. Леонов, О.А. Оценка качества сельскохозяйственной техники технико-экономическим методом / Леонов О.А., Темасова Г.Н. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2004. № 1 (6). С. 57-59.

76. Леонов, О.А. Построение системы управления метрологическим обеспечением измерений на ремонтных и машиностроительных предприятиях / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 6. С. 69-76.

77. Леонов, О.А. Разработка формы контрольного листка для оценки внутренних потерь при ремонте сельскохозяйственной техники / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Антонова У.Ю., Боголюбова Д.А. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2019. № 1 (89). С. 45-48.

78. Леонов, О.А. Расчет допуска посадки по модели параметрического отказа соединения / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 14-20.

79. Леонов, О.А. Расчет допуска посадки с натягом по модели параметрического отказа / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г. // Вестник машиностроения. 2019. № 4. С. 23-26.

80. Леонов, О.А. Результаты экономической оптимизации выбора средств измерений при контроле качества технологических процессов в ремонтном производстве / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2007. № 5 (25). С. 109- 112.

81. Леонов, О.А. Совершенствование методики проведения микрометража и дефектации шеек коленчатых валов / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2007. № 3-1 (23). С. 81- 85.

82. Леонов, О.А. Стандартизация: учебное пособие / Леонов О.А., Карпузов В.В., Темасова Г.Н. - Москва, 2015.

83. Леонов, О.А. Статистические методы управления качеством: учебник / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н. - Санкт-Петербург, 2019.

84. Леонов, О.А. Теория и практика оценки погрешностей средств измерений мощности и расхода топлива при ремонте двигателей внутреннего сгорания / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2004. № 1 (6). С. 95-97.

85. Леонов, О.А. Управление качеством: учебник / Леонов О.А., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г. - Санкт-Петербург, 2019.

86. Леонов, О.А. Управление качеством производственных процессов и систем: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Голиницкий П.В. - Москва, 2018.
87. Леонов, О.А. Физические основы измерений: учебное пособие / Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Антонова У.Ю. - Москва, 2018.
88. Леонов, О.А. Экономика качества, стандартизации и сертификации: учебник / Леонов О.А., Темасова Г.Н., Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2017.
89. Темасова, Г.Н. Методы оценки конкурентоспособности продукции / Темасова Г.Н. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2005. № 5. С. 85.
90. Темасова, Г.Н. Организация системы контроля затрат на качество на предприятиях технического сервиса АПК: монография / Темасова Г.Н. - Москва, 2010.
91. Черкасова, Э. И. Анализ и синтез процессов обеспечения качества: учебное пособие / Э. И. Черкасова, П. В. Голиницкий, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова. - Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. - 174 с.
92. Шкаруба Н.Ж. Совершенствование методики проведения микрометража и дефектации коленчатых валов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ.- 2007. - № 3. - С. 81-85.
93. Шкаруба Н.Ж. Влияние погрешностей измерения на результаты разбраковки при дефектации деталей машин / Шкаруба Н.Ж. // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 2. С. 41-43.
94. Шкаруба Н.Ж. Метрологическое обеспечение контроля гильз цилиндров при ремонте дизелей / Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. - 2018. - № 6. - С. 104-109.

95. Шкаруба Н.Ж. Метрология: учебное пособие / Н.Ж. Шкаруба. - Москва: ФГОУ ВПО МГАУ, 2007. - 162 с. - 978-5-86785-210-8. ISBN: 9785867852108
96. Шкаруба Н.Ж. Результаты экономической оптимизации выбора средств измерений при контроле качества технологических процессов в ремонтном производстве / Н. Ж. Шкаруба // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. - 2007. - № 5 (25). - С. 109-112.
97. Шкаруба Н.Ж. Совершенствование QFD-анализа для оценки качества специальной техники: монография / Шкаруба Н.Ж., Леонов О.А., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Черкасова Э.И., Голицинский П.В., Антонова У.Ю. - Москва, 2020.
98. Шкаруба Н.Ж. Техничко-экономические критерии выбора универсальных средств измерений при ремонте сельскохозяйственной техники: монография / Н. Ж. Шкаруба. - Москва: ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. - 118 с. - 978-5-86785-244-3. ISBN: 9785867852443
99. Шкаруба, Н. Ж. Расчет затрат на контроль технологических процессов ремонтного производства / Н. Ж. Шкаруба // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. - 2004. - № 5. - С. 75-77.
100. Шкаруба, Н. Ж. Обоснование допускаемой погрешности измерений при контроле отклонений формы и расположения поверхностей деталей / Шкаруба Н. Ж., Леонов О. А. // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 42-45.
101. Шкаруба, Н.Ж. Аккредитация калибровочных и испытательных лабораторий: учебное пособие / Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2020.
102. Шкаруба, Н.Ж. Анализ качества измерительных и контрольных процессов: учебное пособие / Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2020.
103. Шкаруба, Н.Ж. Анализ основных элементов системы менеджмента измерений / Шкаруба Н.Ж., Левщанова Е.А. // Международный технико-экономический журнал. - 2014. - №5, с. 41-46.

104. Шкаруба, Н.Ж. Анализ системы технологии контроля качества ремонтного производства / Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Рутько И.И. // Сельский механизатор. 2020. № 4. С. 38-39.
105. Шкаруба, Н.Ж. Место и роль метрологической службы в системе менеджмента измерений / Шкаруба Н.Ж., Левщанова Е.А. // Международный научный журнал. 2014. № 6. С. 56-61.
106. Шкаруба, Н.Ж. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие / Шкаруба Н.Ж. Москва, 2017.
107. Шкаруба, Н.Ж. Оценка сходимости и воспроизводимости измерительного процесса при дефектации диаметров шеек коленчатого вала / Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2015. № 1 (65). С. 42-46.
108. Шкаруба, Н.Ж. Разработка комплексной методики выбора средств измерений линейных размеров при ремонте сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. наук. - М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006.
109. Шкаруба, Н.Ж. Разработка комплексной методики выбора средств измерений линейных размеров при ремонте сельскохозяйственной техники: автореферат дис. ... канд. техн. наук. - М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006.
110. Шкаруба, Н.Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства агропромышленного комплекса: дис. ... доктора техн. наук. - М.: Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2019.
111. Шкаруба, Н.Ж. Совершенствование метрологического обеспечения ремонтного производства агропромышленного комплекса: автореферат дис. ... доктора техн. наук. - М.: Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2019.
112. Шкаруба, Н.Ж. Современные организационные подходы к метрологическому обеспечению ремонтного производства / Шкаруба Н.Ж. // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего про-

фессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2013. № 3 (59). С. 41-44.

113. Шкаруба, Н.Ж. Теоретическая метрология / Шкаруба Н.Ж. - Москва, 2016.

114. Шкаруба, Н.Ж. Управление рисками измерительных процессов в ремонтном производстве / Шкаруба Н.Ж. // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 6. С. 77-82.

115. Шкаруба Н.Ж. Эффективность метрологических работ: учебное пособие /Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г. - Москва, 2020.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа должна включать: титульный лист установленного образца (приложение 4), аннотацию, оглавление (наименование разделов с указанием страниц), введение, разделы, заключение, библиографический список.

В аннотации необходимо привести краткое содержание работы с указанием количества страниц, иллюстраций, таблиц и библиографических источников.

Во введении автор работы излагает значение стандартизации, взаимозаменяемости, метрологии, сертификации и управления качеством продукции и услуг в обеспечении качества эксплуатации и ремонта сельскохозяйственных машин, обосновывает цель и задачи работы.

Текстовая часть выполняется в печатном виде (14 кегль) либо от руки чернилами (пастой) на одной стороне писчей бумаги формата А4. Каждый лист должен иметь рамку с расстояниями от края: слева 20 мм и по 5 мм с трех остальных сторон, а также основную надпись по форме 2а (высотой 15 мм) ГОСТ 2.104–68, где проставляется номер страницы. Каждый новый раздел (задание) должен начинаться с листа, имеющего основную надпись по форме 2 ГОСТ 2.104–68 высотой 40 мм. Текст должен быть написан аккуратно, без помарок, с высотой букв не менее 2,5 мм. Средняя плотность записи – 30...35 строк и в каждой строке 35...40 знаков. Расстояние от текста до боковых рамок – 3...5 мм, до верхней и нижней рамки – 10...15 мм.

Изложение текста должно быть кратким, четким, исключая возможность двоякого толкования и должно идти от первого лица множественного числа. Терминология и определения должны быть едиными и соответствовать установленным стандартам. Нумерация листов пояснительной записки – сквоз-

ная (с учетом титульного листа). Номер страницы проставляют в штампе в правом нижнем углу листа. На титульном листе номер страницы не ставят.

В начале каждого раздела излагается задание с указанием конкретных значений параметров в соответствии с вариантом и перечнем вопросов.

Разделы должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами в пределах всей записки. Подразделы должны иметь порядковые номера в пределах всего раздела. Номера подразделов состоят из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой; номера пунктов – из номеров раздела, подраздела и пункта, разделенных точкой. В конце номера точка не ставится.

Каждый раздел следует начинать с нового листа (страницы). Разделы, подразделы и пункты должны иметь расстояние 10...15 мм от конца предыдущего и начала последующего текста.

Наименования разделов должны быть краткими и записываться в виде заголовков прописными буквами (с абзаца или по центру). Переносы слов не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят.

Наименования подразделов и пунктов должны быть краткими и записываться в виде заголовков (с абзаца) строчными буквами, кроме первой прописной. Переносы слов не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят.

Наименования «СОДЕРЖАНИЕ», «ВВЕДЕНИЕ», «ЗАКЛЮЧЕНИЕ», «БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК» оформляются как заголовки разделов, но без нумерации (кавычки не ставят).

Иллюстрации нумеруются в пределах записки или раздела арабскими цифрами, например: «Рисунок 1.2 – Схема расположения полей допусков посадки Н8/ƒ7». Слово «Рисунок» и наименование помещают под рисунком. Схемы расположения полей допусков выполняют в масштабе, с использованием линейки, на миллиметровой бумаге, кальке, с последующим вклеиванием в записку или непосредственно на листах записки.

Цифровой материал лучше представлять в виде таблиц согласно ГОСТ 2.105–95. Каждая таблица должна иметь порядковый номер (в левом углу) и заголовок, который помещают через тире после слова «Таблица». Таблицы ну-

меруются в пределах записки или раздела арабскими цифрами, например: «Таблица 2.1 – Исходные данные», кавычки не ставят.

Все расчетные формулы должны иметь буквенные обозначения, установленные стандартами. Под формулой приводят расшифровку параметров с указанием их размерностей и числовых коэффициентов. После расшифровки выражения обязательно делают подстановку числовых значений параметров и записывают результат с указанием размерности. Промежуточные вычисления не приводят.

Все формулы нумеруют арабскими цифрами в пределах записки или раздела. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках. Номера формул должны располагаться в крайнем правом положении на строке на одной вертикальной линии. Допускается нумерация формул в пределах всей записки. Ссылки в тексте на порядковый номер формулы даются в скобках, например: «... в формуле (2.5)...».

При написании и формул, особенно справочных, необходимо дать ссылку на библиографический источник, из которого они заимствованы, в соответствии с ГОСТ 7.1–84. При ссылке в тексте на источники следует приводить порядковый номер по библиографическому списку, заключенный в квадратные скобки; при необходимости указываются страницы или таблицы книги, в которых помещены заимствованные сведения или формулы, например: «[4]», «[2], таблица 4».

В библиографический список помещают все использованные источники, включая методические указания.

Пример оформления титульного листа и раздела курсовой работы приведен в приложении 2.

ОБРАЗЕЦ ВЫПОЛНЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт Механики и энергетики им. В.П. Горячкина

Кафедра «Метрология, стандартизация и управление качеством»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Выполнил(а):
студент(ка) ____ курса ____ группы

(Фамилия, И.О.)

(подпись)

Дата регистрации отчёта на кафедре
« ____ » _____ 20 __ года

Допущен (на) к защите _____

(Дата)

Руководитель:

(учёная степень, учёное звание, ФИО)
(подпись)

Члены комиссии:

(учёная степень, учёное звание, ФИО)

(подпись)

(учёная степень, учёное звание, ФИО)

(подпись)

(учёная степень, учёное звание, ФИО)

(подпись)

Оценка _____

Дата защиты « ____ » _____ 20 __ г.

**ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ЧАСТИ РАЗДЕЛА
КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

**2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ПО КЛАССУ ТОЧНОСТИ ПРИБОРА**

Известен класс точности прибора, пределы измерения равномерной шкалы, количество делений шкалы и измеренное значение.

Исходные данные представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Класс точности	Диапазон измерений	Количество делений	Измеренное значение X_d	Единица измерения
0,3	-25...25	25	16	°C
2,0				
6/1,0				

Требуется:

определить структурные элементы и параметры шкалы прибора;

определить абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерения при различном нормировании класса точности прибора;

оценить динамику измерения абсолютной погрешности в зависимости от показаний прибора при различном нормировании класса точности прибора.

					<i>КР. 87.18.-35.03.07. ПЗ</i>						
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ Докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>			
<i>Разраб.</i>	<i>Петров А.А.</i>					<i>У</i>		<i>7</i>	<i>8</i>		
<i>Провер.</i>	<i>Леонов О.А.</i>				<i>Определение погрешности измерений по классу точности прибора</i>	<i>РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева</i>					
<i>НКонтр.</i>						<i>45 МС</i>					
<i>Утв.</i>	<i>Леонов О.А.</i>										

2.1 Определение структурных элементов и параметров шкалы прибора

Структурные элементы и параметры шкалы прибора сведем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Структурные элементы и параметры шкалы прибора

Термин	Значение
Пределы измерений	От -25 до $+25$ °C
Начальное (конечное) значение шкалы	Начальное $X_H = -25$ °C, конечное $X_K = +25$ °C
Цена деления шкалы	$C_{шк} = 50/25 = 2$ °C/дел
Чувствительность	$S = 25/50 = 0,5$ дел/°C
Нормирующее значение	$X_N = 50$ °C
Количество делений	25

2.1.1 Определение погрешности измерения

при различном нормировании класса точности прибора

Для прибора класса точности $\textcircled{0,3}$

Относительная погрешность измерения $\delta = \pm 0,3$ %.

Определяем абсолютную погрешность измерения по формуле

$$\Delta = \pm \frac{\delta X_D}{100}; \quad (2.1)$$

$$\Delta = \pm \frac{0,3 \cdot 16}{100} = \pm 0,048 \text{ °C (округляем } \Delta \text{ до значения } \pm 0,05 \text{ °C).}$$

Определяем приведенную погрешность по формуле

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100; \quad (2.2)$$

$$\gamma = \pm \frac{0,05}{50} \cdot 100 = \pm 0,083 \text{ % (округляем } \gamma \text{ до значения } \pm 0,08 \text{ %).}$$

Запишем результат измерений:

$$X = X_D \pm \Delta.$$

					<i>КР. 87.18.-35.03.07. ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Да-		

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица П 1

Значения ТЭДС для термопары ТПП типа R

ТЭДС в мВ при температуре свободного конца 0 °С											
Температура рабочего кон- ца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,226										
-40	-0,188	-0,192	-0,196	-0,200	-0,204	-0,208	-0,211	-0,215	-0,219	-0,223	-0,226
-30	-0,145	-0,150	-0,154	-0,158	-0,163	-0,167	-0,171	-0,175	-0,180	-0,184	-0,188
-20	-0,100	-0,105	-0,109	-0,114	-0,119	-0,123	-0,128	-0,132	-0,137	-0,141	-0,145
-10	-0,051	-0,056	-0,061	-0,066	-0,071	-0,076	-0,081	-0,086	-0,091	-0,095	-0,100
0	0,000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,026	-0,031	-0,036	-0,041	-0,046	-0,051
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,021	0,027	0,032	0,038	0,043	0,049	0,054
10	0,054	0,060	0,065	0,071	0,077	0,082	0,088	0,094	0,100	0,105	0,111
20	0,111	0,117	0,123	0,129	0,135	0,141	0,147	0,153	0,159	0,165	0,171
30	0,171	0,177	0,183	0,189	0,195	0,201	0,207	0,214	0,220	0,226	0,232
40	0,232	0,239	0,245	0,251	0,258	0,264	0,271	0,277	0,284	0,290	0,296
50	0,296	0,303	0,310	0,316	0,323	0,329	0,336	0,343	0,349	0,356	0,363
60	0,363	0,369	0,376	0,383	0,390	0,397	0,403	0,410	0,417	0,424	0,431
70	0,431	0,438	0,445	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,487	0,494	0,501
80	0,501	0,508	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,552	0,559	0,566	0,573
90	0,573	0,581	0,588	0,595	0,603	0,610	0,618	0,625	0,632	0,640	0,647
100	0,647	0,655	0,662	0,670	0,677	0,685	0,693	0,700	0,708	0,715	0,723
110	0,723	0,731	0,738	0,746	0,754	0,761	0,769	0,777	0,785	0,792	0,800
120	0,800	0,808	0,816	0,824	0,832	0,839	0,847	0,855	0,863	0,871	0,879
130	0,879	0,887	0,895	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,943	0,951	0,959
140	0,959	0,967	0,976	0,984	0,992	1,000	1,008	1,016	1,025	1,033	1,041
150	1,041	1,049	1,058	1,066	1,074	1,082	1,091	1,099	1,107	1,116	1,124
160	1,124	1,132	1,141	1,149	1,158	1,166	1,175	1,183	1,191	1,200	1,208
170	1,208	1,217	1,225	1,234	1,242	1,251	1,260	1,268	1,277	1,285	1,294
180	1,294	1,303	1,311	1,320	1,329	1,337	1,346	1,355	1,363	1,372	1,381
190	1,381	1,389	1,398	1,407	1,416	1,424	1,433	1,442	1,451	1,460	1,469
200	1,469	1,477	1,486	1,495	1,504	1,513	1,522	1,531	1,540	1,549	1,558
210	1,558	1,567	1,575	1,584	1,593	1,602	1,611	1,620	1,629	1,639	1,648
220	1,648	1,657	1,666	1,675	1,684	1,693	1,702	1,711	1,720	1,729	1,739
230	1,739	1,748	1,757	1,766	1,775	1,784	1,794	1,803	1,812	1,821	1,831
240	1,831	1,840	1,849	1,858	1,868	1,877	1,886	1,895	1,905	1,914	1,923
250	1,923	1,933	1,942	1,951	1,961	1,970	1,980	1,989	1,998	2,008	2,017
260	2,017	2,027	2,036	2,046	2,055	2,064	2,074	2,083	2,093	2,102	2,112
270	2,112	2,121	2,131	2,140	2,150	2,159	2,169	2,179	2,188	2,198	2,207
280	2,207	2,217	2,226	2,236	2,246	2,255	2,265	2,275	2,284	2,294	2,304
290	2,304	2,313	2,323	2,333	2,342	2,352	2,362	2,371	2,381	2,391	2,401
300	2,401	2,410	2,420	2,430	2,440	2,449	2,459	2,469	2,479	2,488	2,498

Таблица П 2

Значения ТЭДС для термопары ТПП типа S

ТЭДС в мВ при температуре свободного конца 0 °С											
Температура рабочего кон- ца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,236										
-40	-0,194	-0,199	-0,203	-0,207	-0,211	-0,215	-0,219	-0,224	-0,228	-0,232	-0,236
-30	-0,150	-0,155	-0,159	-0,164	-0,168	-0,173	-0,177	-0,181	-0,186	-0,190	-0,194
-20	-0,103	-0,108	-0,113	-0,117	-0,122	-0,127	-0,132	-0,136	-0,141	-0,146	-0,150
-10	-0,053	-0,058	-0,063	-0,068	-0,073	-0,078	-0,083	-0,088	-0,093	-0,098	-0,103
0	0,000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,027	-0,032	-0,037	-0,042	-0,048	-0,053
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,050	0,055
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,095	0,101	0,107	0,113
20	0,113	0,119	0,125	0,131	0,137	0,143	0,149	0,155	0,161	0,167	0,173
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,204	0,210	0,216	0,222	0,229	0,235
40	0,235	0,241	0,248	0,254	0,260	0,267	0,273	0,280	0,286	0,292	0,299
50	0,299	0,305	0,312	0,319	0,325	0,332	0,338	0,345	0,352	0,358	0,365
60	0,365	0,372	0,378	0,385	0,392	0,399	0,405	0,412	0,419	0,426	0,433
70	0,433	0,440	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495	0,502
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,538	0,545	0,552	0,559	0,566	0,573
90	0,573	0,580	0,588	0,595	0,602	0,609	0,617	0,624	0,631	0,639	0,646
100	0,646	0,653	0,661	0,668	0,675	0,683	0,690	0,698	0,705	0,713	0,720
110	0,720	0,727	0,735	0,743	0,750	0,758	0,765	0,773	0,780	0,788	0,795
120	0,795	0,803	0,811	0,818	0,826	0,834	0,841	0,849	0,857	0,865	0,872
130	0,872	0,880	0,888	0,896	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,942	0,950
140	0,950	0,958	0,966	0,974	0,982	0,990	0,998	1,006	1,013	1,021	1,029
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,094	1,102	1,110
160	1,110	1,118	1,126	1,134	1,142	1,150	1,158	1,167	1,175	1,183	1,191
170	1,191	1,199	1,207	1,216	1,224	1,232	1,240	1,249	1,257	1,265	1,273
180	1,273	1,282	1,290	1,298	1,307	1,315	1,323	1,332	1,340	1,348	1,357
190	1,357	1,365	1,373	1,382	1,390	1,399	1,407	1,415	1,424	1,432	1,441
200	1,441	1,449	1,458	1,466	1,475	1,483	1,492	1,500	1,509	1,517	1,526
210	1,526	1,534	1,543	1,551	1,560	1,569	1,577	1,586	1,594	1,603	1,612
220	1,612	1,620	1,629	1,638	1,646	1,655	1,663	1,672	1,681	1,690	1,698
230	1,698	1,707	1,716	1,724	1,733	1,742	1,751	1,759	1,768	1,777	1,786
240	1,786	1,794	1,803	1,812	1,821	1,829	1,838	1,847	1,856	1,865	1,874
250	1,874	1,882	1,891	1,900	1,909	1,918	1,927	1,936	1,944	1,953	1,962
260	1,962	1,971	1,980	1,989	1,998	2,007	2,016	2,025	2,034	2,043	2,052
270	2,052	2,061	2,070	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132	2,141
280	2,141	2,151	2,160	2,169	2,178	2,187	2,196	2,205	2,214	2,223	2,232
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,287	2,296	2,305	2,314	2,323
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,360	2,369	2,378	2,387	2,396	2,405	2,415

Значения ТЭДС для термопары ТХА типа К

ТЭДС в мВ при температуре свободного конца 0 °С											
Температура рабочего конца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,103	-2,138	-2,173	-2,208	-2,243
-40	-1,527	-1,564	-1,600	-1,637	-1,673	-1,709	-1,745	-1,782	-1,818	-1,854	-1,889
-30	-1,156	-1,194	-1,231	-1,268	-1,305	-1,343	-1,380	-1,417	-1,453	-1,490	-1,527
-20	-0,778	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,006	-1,043	-1,081	-1,119	-1,156
-10	-0,392	-0,431	-0,470	-0,508	-0,547	-0,586	-0,624	-0,663	-0,701	-0,739	-0,778
0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353	-0,392
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163	1,203
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571	1,612
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982	2,023
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395	2,436
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810	2,851
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225	3,267
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640	3,682
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055	4,096
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468	4,509
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879	4,920
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288	5,328
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694	5,735
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098	6,138
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500	6,540
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901	6,941
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300	7,340
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699	7,739
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099	8,138
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499	8,539
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900	8,940
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302	9,343
230	9,343	9,383	9,423	9,464	9,504	9,545	9,585	9,626	9,666	9,707	9,747
240	9,747	9,788	9,828	9,869	9,909	9,950	9,991	10,031	10,072	10,113	10,153
250	10,153	10,194	10,235	10,276	10,316	10,357	10,398	10,439	10,480	10,520	10,561
260	10,561	10,602	10,643	10,684	10,725	10,766	10,807	10,848	10,889	10,930	10,971
270	10,971	11,012	11,053	11,094	11,135	11,176	11,217	11,259	11,300	11,341	11,382
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753	11,795
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167	12,209
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582	12,624

Значения ТЭДС для термопары ТХК типа L

ТЭДС в мВ при температуре свободного конца 0 °С											
Температура рабочего конца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-3,005	-3,061	-3,118	-3,174	-3,230	-3,286	-3,342	-3,398	-3,453	-3,509	-3,564
-40	-2,431	-2,489	-2,547	-2,605	-2,662	-2,720	-2,777	-2,834	-2,891	-2,948	-3,005
-30	-1,843	-1,902	-1,962	-2,021	-2,080	-2,139	-2,197	-2,256	-2,314	-2,373	-2,431
-20	-1,242	-1,302	-1,363	-1,423	-1,484	-1,544	-1,604	-1,664	-1,724	-1,783	-1,843
-10	-0,627	-0,689	-0,751	-0,813	-0,874	-0,936	-0,997	-1,059	-1,120	-1,181	-1,242
0	0,000	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,378	-0,440	-0,503	-0,565	-0,627
0	0,000	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,382	0,446	0,510	0,575	0,639
10	0,639	0,704	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,159	1,224	1,290
20	1,290	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,752	1,818	1,885	1,951
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,354	2,421	2,488	2,556	2,624
40	2,624	2,692	2,759	2,828	2,896	2,964	3,032	3,101	3,169	3,238	3,306
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,652	3,721	3,790	3,860	3,929	3,999
60	3,999	4,069	4,139	4,209	4,279	4,349	4,419	4,490	4,560	4,631	4,701
70	4,701	4,772	4,843	4,914	4,985	5,056	5,127	5,198	5,270	5,341	5,413
80	5,413	5,484	5,556	5,628	5,700	5,772	5,844	5,916	5,988	6,060	6,133
90	6,133	6,205	6,278	6,351	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788	6,862
100	6,862	6,935	7,008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525	7,599
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,970	8,045	8,119	8,194	8,269	8,344
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,870	8,945	9,021	9,096
130	9,096	9,172	9,248	9,324	9,400	9,476	9,552	9,628	9,704	9,780	9,857
140	9,857	9,933	10,010	10,086	10,163	10,239	10,316	10,393	10,470	10,547	10,624
150	10,624	10,701	10,778	10,856	10,933	11,010	11,088	11,165	11,243	11,321	11,398
160	11,398	11,476	11,554	11,632	11,710	11,788	11,866	11,944	12,023	12,101	12,179
170	12,179	12,258	12,336	12,415	12,494	12,572	12,651	12,730	12,809	12,888	12,967
180	12,967	13,046	13,125	13,204	13,284	13,363	13,442	13,522	13,601	13,681	13,761
190	13,761	13,840	13,920	14,000	14,080	14,160	14,240	14,320	14,400	14,480	14,560
200	14,560	14,641	14,721	14,802	14,882	14,963	15,043	15,124	15,204	15,285	15,366
210	15,366	15,447	15,528	15,609	15,690	15,771	15,852	15,933	16,015	16,096	16,177
220	16,177	16,259	16,340	16,422	16,503	16,585	16,667	16,748	16,830	16,912	16,994
230	16,994	17,076	17,158	17,240	17,322	17,404	17,486	17,569	17,651	17,733	17,816
240	17,816	17,898	17,981	18,063	18,146	18,228	18,311	18,394	18,477	18,559	18,642
250	18,642	18,725	18,808	18,891	18,974	19,057	19,141	19,224	19,307	19,390	19,474
260	19,474	19,557	19,641	19,724	19,808	19,891	19,975	20,059	20,142	20,226	20,310
270	20,310	20,394	20,478	20,561	20,645	20,729	20,813	20,898	20,982	21,066	21,150
280	21,150	21,234	21,319	21,403	21,487	21,572	21,656	21,741	21,825	21,910	21,995
290	21,995	22,079	22,164	22,249	22,333	22,418	22,503	22,588	22,673	22,758	22,843
300	22,843	22,928	23,013	23,098	23,183	23,268	23,354	23,439	23,524	23,609	23,695

Номинальная статическая характеристика для платиновых термометров сопротивления и чувствительных элементов $R_0 = 100 \text{ Ом}$,

$t, ^\circ\text{C}$	Сопротивление ТС при температуре t , Ом, $\alpha = -0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$									
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-200	18,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-190	22,83	22,40	21,97	21,54	21,11	20,68	20,25	19,82	19,38	18,95
-180	27,10	26,67	26,24	25,82	25,39	24,97	24,54	24,11	23,68	23,25
-170	31,34	30,91	30,49	30,07	29,64	29,22	28,80	28,37	27,95	27,52
-160	35,54	35,12	34,70	34,28	33,86	33,44	33,02	32,60	32,18	31,76
-150	39,72	39,31	38,89	38,47	38,05	37,64	37,22	36,80	36,38	35,96
-140	43,88	43,46	43,05	42,63	42,22	41,80	41,39	40,97	40,56	40,14
-130	48,00	47,59	47,18	46,77	46,36	45,94	45,53	45,12	44,70	44,29
-120	52,11	51,70	51,29	50,88	50,47	50,06	49,65	49,24	48,83	48,42
-110	56,19	55,79	55,38	54,97	54,56	54,15	53,75	53,34	52,93	52,52
-100	60,26	59,85	59,44	59,04	58,63	58,23	57,82	57,41	57,01	56,60
-90	64,30	63,90	63,49	63,09	62,68	62,28	61,88	61,47	61,07	60,66
-80	68,33	67,92	67,52	67,12	66,72	66,31	65,91	65,51	65,11	64,70
-70	72,33	71,93	71,53	71,13	70,73	70,33	69,93	69,53	69,13	68,73
-60	76,33	75,93	75,53	75,13	74,73	74,33	73,93	73,53	73,13	72,73
-50	80,31	79,91	79,51	79,11	78,72	78,32	77,92	77,52	77,12	76,73
-40	84,27	83,87	83,48	83,08	82,69	82,29	81,89	81,50	81,10	80,70
-30	88,22	87,83	87,43	87,04	86,64	86,25	85,85	85,46	85,06	84,67
-20	92,16	91,77	91,37	90,98	90,59	90,19	89,80	89,40	89,01	88,62
-10	96,09	95,69	95,30	94,91	94,52	94,12	93,73	93,34	92,95	92,55
0	100,00	99,61	99,22	98,83	98,44	98,04	97,65	97,26	96,87	96,48
$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,40	140,78	141,16	141,54	141,91
110	142,29	142,67	143,05	143,43	143,80	144,18	144,56	144,94	145,31	145,69
120	146,07	146,44	146,82	147,20	147,57	147,95	148,33	148,70	149,08	149,46
130	149,83	150,21	150,58	150,96	151,33	151,71	152,08	152,46	152,83	153,21
140	153,58	153,96	154,33	154,71	155,08	155,46	155,83	156,20	156,58	156,95
150	157,33	157,70	158,07	158,45	158,82	159,19	159,56	159,94	160,31	160,68
160	161,05	161,43	161,80	162,17	162,54	162,91	163,29	163,66	164,03	164,40
170	164,77	165,14	165,51	165,89	166,26	166,63	167,00	167,37	167,74	168,11
180	168,48	168,85	169,22	169,59	169,96	170,33	170,70	171,07	171,43	171,80
190	172,17	172,54	172,91	173,28	173,65	174,02	174,38	174,75	175,12	175,49
200	175,86	176,22	176,59	176,96	177,33	177,69	178,06	178,43	178,79	179,16

Номинальная статическая характеристика для платиновых термометров сопротивления и чувствительных элементов $R_0 = 50 \text{ Ом}$

$t, ^\circ\text{C}$	Сопротивление ТС при температуре t , Ом, $\alpha = -0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$									
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-200	9,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-190	11,415	11,2	10,985	10,77	10,555	10,34	10,125	9,91	9,69	9,475
-180	13,55	13,335	13,12	12,91	12,695	12,485	12,27	12,055	11,84	11,625
-170	15,67	15,455	15,245	15,035	14,82	14,61	14,4	14,185	13,975	13,76
-160	17,77	17,56	17,35	17,14	16,93	16,72	16,51	16,3	16,09	15,88
-150	19,86	19,655	19,445	19,235	19,025	18,82	18,61	18,4	18,19	17,98
-140	21,94	21,73	21,525	21,315	21,11	20,9	20,695	20,485	20,28	20,07
-130	24	23,795	23,59	23,385	23,18	22,97	22,765	22,56	22,35	22,145
-120	26,055	25,85	25,645	25,44	25,235	25,03	24,825	24,62	24,415	24,21
-110	28,095	27,895	27,69	27,485	27,28	27,075	26,875	26,67	26,465	26,26
-100	30,13	29,925	29,72	29,52	29,315	29,115	28,91	28,705	28,505	28,3
-90	32,15	31,95	31,745	31,545	31,34	31,14	30,94	30,735	30,535	30,33
-80	34,165	33,96	33,76	33,56	33,36	33,155	32,955	32,755	32,555	32,35
-70	36,165	35,965	35,765	35,565	35,365	35,165	34,965	34,765	34,565	34,365
-60	38,165	37,965	37,765	37,565	37,365	37,165	36,965	36,765	36,565	36,365
-50	40,155	39,955	39,755	39,555	39,36	39,16	38,96	38,76	38,56	38,365
-40	42,135	41,935	41,74	41,54	41,345	41,145	40,945	40,75	40,55	40,35
-30	44,11	43,915	43,715	43,52	43,32	43,125	42,925	42,73	42,53	42,335
-20	46,08	45,885	45,685	45,49	45,295	45,095	44,9	44,7	44,505	44,31
-10	48,045	47,845	47,65	47,455	47,26	47,06	46,865	46,67	46,475	46,275
0	50	49,8055	49,611	49,4165	49,222	49,0225	48,828	48,6335	48,439	48,24
$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	50	50,195	50,39	50,585	50,78	50,975	51,17	51,365	51,56	51,755
10	51,95	52,145	52,34	52,535	52,73	52,925	53,12	53,315	53,51	53,7
20	53,895	54,09	54,285	54,48	54,675	54,865	55,06	55,255	55,45	55,645
30	55,835	56,03	56,225	56,415	56,61	56,805	57	57,19	57,385	57,575
40	57,77	57,965	58,155	58,35	58,54	58,735	58,93	58,12	58,315	59,505
50	59,7	59,89	60,085	60,275	60,47	60,66	60,855	61,045	61,235	61,43
60	61,62	61,815	62,005	62,195	62,39	62,58	62,77	62,965	63,155	63,345
70	63,54	63,73	63,82	64,11	64,305	64,495	64,685	64,875	65,065	65,26
80	65,45	65,64	65,83	66,02	66,21	66,3	66,59	66,785	66,975	67,165
90	67,355	67,545	67,735	67,925	68,115	68,305	68,495	68,685	68,875	69,065
100	69,255	69,44	69,63	69,82	70,01	70,2	70,39	70,58	70,77	70,955
110	71,145	71,335	71,525	71,715	71,9	72,09	72,28	72,47	72,655	72,845
120	73,035	73,22	73,41	73,6	73,785	73,975	74,165	74,35	74,54	74,73
130	74,915	75,105	75,29	75,48	75,665	75,855	76,04	76,23	76,415	76,605
140	76,79	76,98	77,165	77,355	77,54	77,73	77,915	78,1	78,29	78,475
150	78,665	78,85	79,035	79,225	79,41	79,595	79,78	79,97	80,155	80,34
160	80,525	80,715	80,9	81,085	81,27	81,455	81,645	81,83	82,015	82,2
170	82,385	82,57	82,755	82,945	83,13	83,315	83,5	83,685	83,87	84,055
180	84,24	84,425	84,61	84,795	84,98	85,165	85,35	85,535	85,715	85,9
190	86,085	86,27	86,455	86,64	86,825	87,01	87,19	87,375	87,56	87,745
200	87,93	88,11	88,295	88,48	88,665	88,845	89,03	88,215	89,395	89,58

Номинальная статическая характеристика для платиновых термометров сопротивления и чувствительных элементов $R_0 = 10 \text{ Ом}$

$t, ^\circ\text{C}$	Сопротивление ТС при температуре t , Ом, $\alpha = -0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$									
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-200	1,852	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-190	2,283	2,24	2,197	2,154	2,111	2,068	2,025	1,982	1,938	1,895
-180	2,71	2,667	2,624	2,582	2,539	2,497	2,454	2,411	2,368	2,325
-170	3,134	3,091	3,049	3,007	2,964	2,922	2,88	2,837	2,795	2,752
-160	3,554	3,512	3,47	3,428	3,386	3,344	3,302	3,26	3,218	3,176
-150	3,972	3,931	3,889	3,847	3,805	3,764	3,722	3,68	3,638	3,596
-140	4,388	4,346	4,305	4,263	4,222	4,18	4,139	4,097	4,056	4,014
-130	4,8	4,759	4,718	4,677	4,636	4,594	4,553	4,512	4,47	4,429
-120	5,211	5,17	5,129	5,088	5,047	5,006	4,965	4,924	4,883	4,842
-110	5,619	5,579	5,538	5,497	5,456	5,415	5,375	5,334	5,293	5,252
-100	6,026	5,985	5,944	5,904	5,863	5,823	5,782	5,741	5,701	5,66
-90	6,43	6,39	6,349	6,309	6,268	6,228	6,188	6,147	6,107	6,066
-80	6,833	6,792	6,752	6,712	6,672	6,631	6,591	6,551	6,511	6,47
-70	7,233	7,193	7,153	7,113	7,073	7,033	6,993	6,953	6,913	6,873
-60	7,633	7,593	7,553	7,513	7,473	7,433	7,393	7,353	7,313	7,273
-50	8,031	7,991	7,951	7,911	7,872	7,832	7,792	7,752	7,712	7,673
-40	8,427	8,387	8,348	8,308	8,269	8,229	8,189	8,15	8,11	8,07
-30	8,822	8,783	8,743	8,704	8,664	8,625	8,585	8,546	8,506	8,467
-20	9,216	9,177	9,137	9,098	9,059	9,019	8,98	8,94	8,901	8,862
-10	9,609	9,569	9,53	9,491	9,452	9,412	9,373	9,334	9,295	9,255
0	10	9,9611	9,9222	9,8833	9,8444	9,8045	9,7656	9,7267	9,6878	9,648
$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	10	10,039	10,078	10,117	10,156	10,195	10,234	10,273	10,312	10,351
10	10,39	10,429	10,468	10,507	10,546	10,585	10,624	10,663	10,702	10,74
20	10,779	10,818	10,857	10,896	10,935	10,973	11,012	11,051	11,09	11,129
30	11,167	11,206	11,245	11,283	11,322	11,361	11,4	11,438	11,477	11,515
40	11,554	11,593	11,631	11,67	11,708	11,747	11,786	11,824	11,863	11,901
50	11,94	11,978	12,017	12,055	12,094	12,132	12,171	12,209	12,247	12,286
60	12,324	12,363	12,401	12,439	12,478	12,516	12,554	12,593	12,631	12,669
70	12,708	12,746	12,784	12,822	12,861	12,899	12,937	12,975	13,013	13,052
80	13,09	13,128	13,166	13,204	13,242	13,28	13,318	13,357	13,395	13,433
90	13,471	13,509	13,547	13,585	13,623	13,661	13,699	13,737	13,775	13,813
100	13,851	13,888	13,926	13,964	14,002	14,04	14,078	14,116	14,154	14,191
110	14,229	14,267	14,305	14,343	14,38	14,418	14,456	14,494	14,531	14,569
120	14,607	14,644	14,682	14,72	14,757	14,795	14,833	14,87	14,908	14,946
130	14,983	15,021	15,058	15,096	15,133	15,171	15,208	15,246	15,283	15,321
140	15,358	15,396	15,433	15,471	15,508	15,546	15,583	15,62	15,658	15,695
150	15,733	15,77	15,807	15,845	15,882	15,919	15,956	15,994	16,031	16,068
160	16,105	16,143	16,18	16,217	16,254	16,291	16,329	16,366	16,403	16,44
170	16,477	16,514	16,551	16,589	16,626	16,663	16,7	16,737	16,774	16,811
180	16,848	16,885	16,922	16,959	16,996	17,033	17,07	17,107	17,143	17,18
190	17,217	17,254	17,291	17,328	17,365	17,402	17,438	17,475	17,512	17,549
200	17,586	17,622	17,659	17,696	17,733	17,769	17,806	17,843	17,879	17,916

**Номинальная статическая характеристика для медных термометров
сопротивления чувствительных элементов $R_0 = 100 \text{ Ом}$.**

t, °C	Сопротивление ТС при температуре t, Ом, $\alpha = -0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$									
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-180	20,53									
-170	25,10	24,64	24,19	23,73	23,27	22,82	22,36	21,90	21,44	20,99
-160	29,65	29,20	28,74	28,29	27,83	27,38	26,92	26,47	26,01	25,56
-150	34,18	33,73	33,27	32,82	32,37	31,92	31,46	31,01	30,56	30,10
-140	38,69	38,24	37,79	37,34	36,89	36,44	35,99	35,53	35,08	34,63
-130	43,18	42,73	42,28	41,83	41,38	40,94	40,49	40,04	39,59	39,14
-120	47,65	47,20	46,76	46,31	45,86	45,42	44,97	44,52	44,07	43,63
-110	52,10	51,66	51,21	50,77	50,32	49,88	49,43	48,99	48,54	48,10
-100	56,54	56,09	55,65	55,21	54,76	54,32	53,88	53,43	52,99	52,55
-90	60,95	60,51	60,07	59,63	59,19	58,75	58,30	57,86	57,42	56,98
-80	65,35	64,91	64,47	64,03	63,59	63,15	62,71	62,27	61,83	61,39
-70	69,74	69,30	68,86	68,42	67,98	67,55	67,11	66,67	66,23	65,79
-60	74,10	73,67	73,23	72,79	72,36	71,92	71,48	71,05	70,61	70,17
-50	78,46	78,02	77,59	77,15	76,72	76,28	75,85	75,41	74,97	74,54
-40	82,79	82,36	81,93	81,49	81,06	80,63	80,19	79,76	79,32	78,89
-30	87,11	86,68	86,25	85,82	85,39	84,95	84,52	84,09	83,66	83,22
-20	91,42	90,99	90,56	90,13	89,70	89,27	88,84	88,41	87,98	87,55
-10	95,72	95,29	94,86	94,43	94,00	93,57	93,14	92,71	92,28	91,85
0	100,00	99,57	99,14	98,72	98,29	97,86	97,43	97,00	96,58	96,15
t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,00	100,43	100,86	101,28	101,71	102,14	102,57	103,00	103,42	103,85
10	104,28	104,71	105,14	105,56	105,99	106,42	106,85	107,28	107,70	108,13
20	108,56	108,99	109,42	109,84	110,27	110,70	111,13	111,56	111,98	112,41
30	112,84	113,27	113,70	114,12	114,55	114,98	115,41	115,84	116,26	116,69
40	117,12	117,55	117,98	118,40	118,83	119,26	119,69	120,12	120,54	120,97
50	121,40	121,83	122,26	122,68	123,11	123,54	123,97	124,40	124,82	125,25
60	125,68	126,11	126,54	126,96	127,39	127,82	128,25	128,68	129,10	129,53
70	129,96	130,39	130,82	131,24	131,67	132,10	132,53	132,96	133,38	133,81
80	134,24	134,67	135,10	135,52	135,95	136,38	136,81	137,24	137,66	138,09
90	138,52	138,95	139,38	139,80	140,23	140,66	141,09	141,52	141,94	142,37
100	142,80	143,23	143,66	144,08	144,51	144,94	145,37	145,80	146,22	146,65
110	147,08	147,51	147,94	148,36	148,79	149,22	149,65	150,08	150,50	150,93
120	151,36	151,79	152,22	152,64	153,07	153,50	153,93	154,36	154,78	155,21
130	155,64	156,07	156,50	156,92	157,35	157,78	158,21	158,64	159,06	159,49
140	159,92	160,35	160,78	161,20	161,63	162,06	162,49	162,92	163,34	163,77
150	164,20	164,63	165,06	165,48	165,91	166,34	166,77	167,20	167,62	168,05
160	168,48	168,91	169,34	169,76	170,19	170,62	171,05	171,46	171,90	172,33
170	172,76	173,19	173,62	174,04	174,47	174,90	175,33	175,76	176,18	176,61
180	177,04	177,47	177,90	178,32	178,75	179,18	179,61	180,04	180,46	180,89
190	181,32	181,75	182,18	182,60	183,03	183,46	183,89	184,32	184,74	185,17
200	185,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Номинальная статическая характеристика для медных термометров
сопротивления чувствительных элементов $R_0 = 10 \text{ Ом}$**

t, °C	Сопротивление ТС при температуре t, Ом, $\alpha = -0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$									
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-180	2,053	–	–	–	–	–	–	–	–	–
-170	2,51	2,464	2,419	2,373	2,327	2,282	2,236	2,19	2,144	2,099
-160	2,965	2,92	2,874	2,829	2,783	2,738	2,692	2,647	2,601	2,556
-150	3,418	3,373	3,327	3,282	3,237	3,192	3,146	3,101	3,056	3,01
-140	3,869	3,824	3,779	3,734	3,689	3,644	3,599	3,553	3,508	3,463
-130	4,318	4,273	4,228	4,183	4,138	4,094	4,049	4,004	3,959	3,914
-120	4,765	4,72	4,676	4,631	4,586	4,542	4,497	4,452	4,407	4,363
-110	5,21	5,166	5,121	5,077	5,032	4,988	4,943	4,899	4,854	4,81
-100	5,654	5,609	5,565	5,521	5,476	5,432	5,388	5,343	5,299	5,255
-90	6,095	6,051	6,007	5,963	5,919	5,875	5,83	5,786	5,742	5,698
-80	6,535	6,491	6,447	6,403	6,359	6,315	6,271	6,227	6,183	6,139
-70	6,974	6,93	6,886	6,842	6,798	6,755	6,711	6,667	6,623	6,579
-60	7,41	7,367	7,323	7,279	7,236	7,192	7,148	7,105	7,061	7,017
-50	7,846	7,802	7,759	7,715	7,672	7,628	7,585	7,541	7,497	7,454
-40	8,279	8,236	8,193	8,149	8,106	8,063	8,019	7,976	7,932	7,889
-30	8,711	8,668	8,625	8,582	8,539	8,495	8,452	8,409	8,366	8,322
-20	9,142	9,099	9,056	9,013	8,97	8,927	8,884	8,841	8,798	8,755
-10	9,572	9,529	9,486	9,443	9,4	9,357	9,314	9,271	9,228	9,185
0	10	9,957	9,914	9,872	9,829	9,786	9,743	9,7	9,658	9,615
t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	10	10,043	10,086	10,128	10,171	10,214	10,257	10,3	10,342	10,385
10	10,428	10,471	10,514	10,556	10,599	10,642	10,685	10,728	10,77	10,813
20	10,856	10,899	10,942	10,984	11,027	11,07	11,113	11,156	11,198	11,241
30	11,284	11,327	11,37	11,412	11,455	11,498	11,541	11,584	11,626	11,669
40	11,712	11,755	11,798	11,84	11,883	11,926	11,969	12,012	12,054	12,097
50	12,14	12,183	12,226	12,268	12,311	12,354	12,397	12,44	12,482	12,525
60	12,568	12,611	12,654	12,696	12,739	12,762	12,825	12,668	12,91	12,953
70	12,996	13,039	13,082	13,124	13,167	13,21	13,253	13,296	13,338	13,381
80	13,424	13,467	13,51	13,552	13,595	13,638	13,681	13,724	13,766	13,809
90	13,852	13,895	13,938	13,98	14,023	14,066	14,109	14,152	14,194	14,237
100	14,28	14,323	14,366	14,408	14,451	14,494	14,537	14,58	14,622	14,665
110	14,708	14,751	14,794	14,836	14,679	14,922	14,965	15,008	15,05	15,093
120	15,136	15,179	15,222	15,264	15,307	15,35	15,393	15,436	15,478	15,521
130	15,564	15,607	15,65	15,692	15,735	15,778	15,821	15,864	15,906	15,949
140	15,992	16,035	16,078	16,12	16,163	16,206	16,249	16,292	16,334	16,377
150	16,42	16,463	16,506	16,548	16,591	16,634	16,677	16,72	16,762	16,805
160	16,848	16,891	16,934	16,976	17,019	17,062	17,105	17,146	17,19	17,233
170	17,276	17,319	17,362	17,404	17,447	17,49	17,533	17,576	17,618	17,661
180	17,704	17,747	17,79	17,832	17,675	17,918	17,961	18,004	18,046	18,089
190	18,132	18,175	18,218	18,26	18,303	18,346	18,389	18,432	18,474	18,517
200	18,56	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Психрометрическая таблица

$T_{\text{сух}}$	Разность показаний сухого и мокрого термометров, С°																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	74	55	36	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	81	57	39	21	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	82	64	42	25	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	83	66	49	28	13	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	83	67	51	36	16	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	84	69	54	39	24	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	85	70	56	41	28	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	85	71	57	44	31	18	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	86	72	59	46	34	21	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	87	73	61	48	36	24	13	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	84	71	60	48	37	26	16	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	91	75	64	52	41	30	20	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	88	80	65	54	43	33	23	13	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	88	77	69	55	45	35	25	16	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	89	78	67	60	47	37	28	19	10	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	89	78	68	58	52	39	30	21	13	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	89	79	69	60	50	44	33	24	16	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	90	80	70	61	52	43	37	26	18	11	3	—	—	—	—	—	—	—	—
18	90	80	71	62	53	45	37	31	21	13	6	—	—	—	—	—	—	—	—
19	90	81	72	63	55	46	38	31	26	16	9	2	—	—	—	—	—	—	—
20	91	81	73	64	56	48	40	33	26	21	11	5	—	—	—	—	—	—	—
21	91	82	73	65	57	49	42	35	28	21	16	8	2	—	—	—	—	—	—
22	91	82	74	66	58	51	43	36	30	23	17	12	4	—	—	—	—	—	—
23	91	83	75	67	59	52	45	38	31	25	19	13	9	1	—	—	—	—	—
24	91	83	75	68	60	53	46	40	33	27	21	15	9	6	—	—	—	—	—
25	92	84	76	68	61	54	48	41	35	29	23	17	12	6	3	—	—	—	—
26	92	84	76	69	62	55	49	42	36	30	25	19	14	9	4	—	—	—	—
27	92	84	77	70	63	56	50	44	38	32	26	21	16	11	6	1	—	—	—
28	92	85	77	71	64	57	51	45	39	34	28	23	18	13	8	3	—	—	—
29	92	85	78	71	65	58	52	46	40	35	30	25	20	15	10	6	1	—	—
30	93	85	78	72	65	59	53	47	42	36	31	26	21	17	12	8	3	—	—
31	93	86	79	72	66	60	54	48	43	38	33	28	23	18	14	10	5	1	—
32	93	86	79	73	67	61	55	49	44	39	34	29	24	20	16	11	7	4	—
33	93	86	80	73	67	61	56	50	45	40	35	30	26	22	17	13	9	5	2
34	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41	36	32	27	23	19	15	11	7	4
35	93	87	80	74	68	63	57	52	47	42	37	33	29	24	20	16	13	9	5
36	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43	39	34	30	26	22	18	14	11	7
37	93	87	81	75	69	64	59	54	49	44	40	35	31	27	23	19	16	12	9
38	94	87	81	75	70	65	59	54	50	45	41	36	32	28	24	21	17	14	10
39	94	87	82	76	70	65	60	55	50	46	42	37	33	29	26	22	18	15	12
40	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47	42	38	34	30	27	23	20	16	13
41	94	88	82	76	71	66	61	56	52	47	43	39	35	31	27	24	20	17	14
42	94	88	82	77	71	66	62	57	52	48	44	40	36	32	28	25	22	18	15
43	94	88	82	77	72	67	62	57	53	49	45	41	37	33	29	26	23	20	17
44	94	88	83	78	72	67	63	59	54	49	45	41	38	34	30	27	24	21	18
45	94	88	83	78	73	68	63	59	54	50	46	42	38	35	31	28	25	22	19



Уважаемые читатели!

Издательство «Спутник+»
предлагает:

- 📖 **ИЗДАНИЕ И ПЕЧАТЬ МОНОГРАФИЙ, КНИГ** любыми тиражами (от 50 экз.).
 - ✓ Срок - от 3-х дней в полноцветной и простой обложке или твердом переплете.
 - ✓ Присвоение ISBN, рассылка по библиотекам и регистрация в Книжной палате.
 - ✓ Оказываем помощь в реализации книжной продукции.
 - 📖 **ПУБЛИКАЦИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ** для защиты диссертаций в журналах по гуманитарным, естественным и техническим наукам.
 - ✓ Журнал «Естественные и технические науки» входит в перечень ВАК.
 - 📖 **ПРОВЕДЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАОЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ** по всем научным направлениям для аспирантов, соискателей, докторантов и научных работников.
 - 📖 **ПУБЛИКАЦИЯ СТИХОВ И ПРОЗЫ** в журналах «Российская литература», «Литературный альманах «Спутник» и «Литературная столица».
- + **Набор, верстка, корректура и редакция текстов.**
+ **Печать авторефератов, переплет диссертаций (от 1 часа).**
-
- **Переплетные работы, тиснение, полноцветная цифровая печать.**

Наш адрес: Москва, 109428, Рязанский проспект, д. 8А
тел. (495) 730-47-74, 778-45-60, 730-48-71 с 9 до 18 (обед с 14 до 15)
<http://www.sputnikplus.ru> e-mail: print@sputnikplus.ru

Учебное издание

Леонов Олег Альбертович,
Шкаруба Нина Жоровна,
Голиницкий Павел Вячеславович,
Антонова Ульяна Юрьевна,
Вергазова Юлия Геннадьевна

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. ПРАКТИКУМ

Учебное пособие

Издательство «Спутник +»

109428, Москва, Рязанский проспект, д. 8А.

Тел.: (495) 730-47-74, 778-45-60 (с 9.00 до 18.00)

<http://www.sputnikplus.ru> E-mail: print@sputnikplus.ru

Подписано в печать 23.07.2021. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,25. Тираж 500 экз. Заказ 273.

Отпечатано в ООО «Издательство «Спутник +»