

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А.В. Волошенко, М.М. Григорьева, В.В. Медведев

МЕТРОЛОГИЯ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Задачи и вопросы

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 621.1.002.56(076)

ББК 31.391я73

В68

Волошенко А.В.

В68 Метрология и теплотехнические измерения. Задачи и вопросы: учебное пособие / А.В. Волошенко, М.М. Григорьева, В.В. Медведев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 100 с.

В пособии приведены задания по расчету метрологических характеристик технических измерительных приборов и преобразователей, применяемых в теплотехнических измерениях. Приведено описание методик расчета погрешностей.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств (в теплоэнергетике)» и другим теплоэнергетическим специальностям, также может быть использовано при подготовке и переподготовке специалистов, осуществляющих метрологический контроль и надзор.

УДК 621.1.002.56(076)

ББК 31.391я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор ТУСУРа

А.А. Светлаков

Доктор технических наук, профессор ТГУ

С.В. Шидловский

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2010

© Волошенко А.В., Григорьева М.М.,
Медведев В.В., 2010

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	6
1.1. Общие сведения	6
1.2. Формулировка задачи	9
2. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	12
2.1. Общие сведения	12
2.2. Формулировка задачи	12
2.3. Методика расчета	13
3. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В НОРМАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ	19
3.1. Общие сведения	19
3.2. Формулировка задачи	19
3.3. Методика расчета	20
4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ..	25
4.1 Исключение грубых погрешностей из результатов многократных измерений	25
4.2. Статистическая оценка параметров распределений случайных физических величин	27
4.3. Формулировка задачи.....	32
5. ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ.....	37
6. РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ А. НОМИНАЛЬНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПАР И ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	65
Таблица А.1. Номинальная статическая характеристика платинородий-платиновой термопары, тип S, в диапазоне температур от –50 до +1660 °С	65
Таблица А.2. Номинальная статическая характеристика хромель-алюмелевой термопары, тип K, в диапазоне температур –250 ÷ +1370 °С	75
Таблица А.3. Номинальная статическая характеристика хромель-копелевой термопары, тип L, в диапазоне температур от –200 до +800 °С	85
Таблица А.4. Номинальная статическая характеристика	

платинового термопреобразователя сопротивления, тип ТСП, в диапазоне температур от 0 до +500 °С для градуировки 50П	90
Таблица А.5. Номинальная статическая характеристика медного термопреобразователя сопротивления, тип ТСМ, в диапазоне температур от 0 до +200 °С для градуировки 50М	91
Таблица А.6. Номинальная статическая характеристика медного термопреобразователя сопротивления, тип ТСМ, в диапазоне температур от 0 до +200 °С для градуировки 100М	92
Таблица А.7. Номинальная статическая характеристика платинового термопреобразователя сопротивления, тип ТСП, в диапазоне температур от 0 до +500 °С для градуировки 100П	93
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ТЕСТЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	99

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования АСУ ТП во многом определяется достоверностью измерительной информации и надежностью работы средств измерений. Поэтому вопросам получения достоверной информации о значениях параметров технологических процессов уделяется большое внимание.

Государственный образовательный стандарт по дисциплинам «Метрология, стандартизация и сертификация», «Технические измерения и приборы», «Теплотехнические измерения», предусматривает практические занятия, которые выполняются студентами специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств (в теплоэнергетике)».

В разделах 1–4 пособия изложен теоретический материал, задачи и исходные данные для вариантов заданий к практическим занятиям по перечисленным выше дисциплинам. Задания, приведенные в учебном пособии, учитывают специфику расчета метрологических характеристик технических средств измерений теплотехнических параметров и обработки результатов измерений этими средствами. Пособие содержит также все справочные данные, необходимые для расчетов.

В разделе 5 пособия приведены вопросы и задачи, которые часто встречаются в практической деятельности инженера-теплоэнергетика, а также при обработке результатов экспериментальных исследований. Решение изложенных в пособии задач предназначено для закрепления теоретических знаний по метрологии, основным принципам и методам измерений теплотехнических параметров и способам обработки их результатов.

В разделе 6 пособия даны ответы и решения задач, приведенных в разделе 5 пособия. При решении задач обращается внимание не только на получение результата, но и на анализ физических особенностей используемых принципов измерений.

Учебное пособие составлено авторским коллективом под руководством Волошенко А.В. Материал между авторами распределяется следующим образом: Волошенко А.В. – все разделы и приложения; Медведев В.В. – раздел 4; Григорьева М.М. – приложение А, разделы 2 и 4.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Общие сведения

При измерениях получают значение измеряемой физической величины, отличающееся от его истинного значения. Истинное значение физической величины определить невозможно, поэтому вместо него используют действительное значение физической величины. Значение физической величины, найденное путем ее измерения, называют результатом измерения. Точность результата измерения – качество измерения, отражающее близость его результата к истинному значению измеряемой физической величины. Основным показателем точности измерения является погрешность измерения. Измерения производят с помощью средств измерения (СИ). Средство измерения – техническое средство (мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, измерительная система), используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики. По форме представления погрешности средств измерения подразделяют на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная погрешность – разность между измеренным значением X_{II} и действительным (истинным) значением $X_{д}$ измеряемой величины. Абсолютную погрешность (Δ) выражают в единицах измеряемой физической величины:

$$\pm\Delta = X_{II} - X_{д}. \quad (1.1)$$

Под **действительным значением** физической величины понимают ее значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближенное к истинному значению физической величины, что для практических целей может быть использовано вместо него.

Истинное значение физической величины – значение, идеальным образом отражающее свойства объекта контроля как в количественном, так и в качественном отношении. Истинное значение физической величины всегда остается неизвестным.

Относительная погрешность (δ) – отношение абсолютной погрешности $\pm\Delta$ к действительному значению $X_{д}$ измеряемой физической величины. Это отношение обычно определяют в процентах:

$$\pm\delta = \frac{\Delta}{X_{д}} \cdot 100 \quad (1.2)$$

или

$$\pm\delta = \frac{\Delta}{X_H} \cdot 100. \quad (1.3)$$

Приведенная погрешность (γ) – отношение абсолютной погрешности $\pm\Delta$ к нормирующему значению X_N . Это отношение также чаще всего определяют в процентах:

$$\pm\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100. \quad (1.4)$$

Нормирующее значение X_N – значение, которое в большинстве случаев принимают равным диапазону показаний СИ. Если принять X_B за верхний предел измерения, а X_H – за нижний предел измерения, то

$$X_N = X_B - X_H. \quad (1.5)$$

Диапазон измерений (рабочая часть шкалы) – область значений измеряемой физической величины, для которой нормирован предел допускаемой основной погрешности СИ.

Диапазон показаний – область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы. Для технических СИ чаще всего указанные выше диапазоны совпадают.

По характеру возникновения погрешности СИ подразделяют на основные и дополнительные.

Основная погрешность СИ – погрешность, присущая СИ в нормальных условиях эксплуатации.

Дополнительная погрешность СИ (изменение показаний СИ под действием внешних влияющих физических величин) – изменение погрешности СИ, вызванное отклонением одной из влияющих физических величин от нормального значения или выходом ее за пределы нормальной области значений.

Чувствительность СИ – отношение изменения выходного сигнала СИ ΔY к вызывающему его изменению измеряемой физической величины ΔX . Чувствительность (S) определяют по формуле

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \quad (1.6)$$

Чувствительность СИ может быть определена также как величина, обратная цене деления шкалы СИ.

Цена деления шкалы СИ – разность между значениями физической величины, соответствующими двум соседним отметкам шкалы. Цену деления шкалы (ΔN) СИ определяют по формуле:

$$\Delta N = \frac{X_B - X_H}{N}, \quad (1.7)$$

где N – число делений шкалы.

Класс точности – обобщенная характеристика СИ, определяемая пределами допускаемой основной погрешности, отражающая уровень их точности при нормальных условиях эксплуатации. Кроме класса точности, уровень точности СИ может быть представлен набором других нормируемых метрологических характеристик, связанных определенными соотношениями с классом точности, таких, как допускаемые дополнительные погрешности, допускаемые вариация и размах.

Для технических СИ класс точности K чаще всего принимают равным пределу допускаемой основной приведенной погрешности $\pm \gamma_{\text{доп}}$, выраженной в процентах:

$$K = \pm \gamma_{\text{доп}} = \frac{\Delta_{\text{доп}}}{X_N} \cdot 100, \quad (1.8)$$

где $\pm \Delta_{\text{доп}}$ – предел допускаемой основной абсолютной погрешности.

Предел допускаемой основной абсолютной погрешности выражают в единицах измеряемой величины и определяют по формуле:

$$\pm \Delta_{\text{доп}} = \frac{\pm \gamma_{\text{доп}} \cdot (X_B - X_H)}{100}. \quad (1.9)$$

Вариация – полученная экспериментально разность между показаниями измерительного прибора, соответствующими одному и тому же значению измеряемой физической величины при двустороннем подходе к этому значению, т.е. при прямом и обратном ходе стрелки-указателя СИ и при одинаковых условиях измерения.

Предел допускаемой вариации ($V_{\text{доп}}$) нормируется следующим образом:

$$V_{\text{доп}} = (0.5 \div 1) \cdot |\Delta_{\text{доп}}|. \quad (1.10)$$

Поверка СИ – совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы с целью определения и подтверждения соответствия метрологических характеристик СИ установленным техническим требованиям.

СИ пригоден для эксплуатации, если максимальные значения погрешности (Δ_{MAX}) и вариации (V_{MAX}) СИ меньше или равны допускаемым значениям:

$$|\Delta_{MAX}| \leq |\Delta_{доп}|. \quad (1.11)$$

$$V_{MAX} \leq V_{доп}, \quad (1.12)$$

Если хотя бы одно из условий (1.11), (1.12) не выполняется, то СИ непригодно для эксплуатации.

1.2. Формулировка задачи

Произведена поверка прибора, предназначенного для измерения напряжения. Известно, что нижний предел шкалы прибора X_H , верхний предел шкалы прибора X_B , диапазон измерений $X_B - X_H$, класс точности прибора K , число интервалов равномерной шкалы N . На отметке X_{II} шкалы, на которой стоит стрелка-указатель, определена максимальная абсолютная погрешность Δ_{MAX} и максимальная вариация V_{MAX} .

Определить: предел допускаемой основной абсолютной погрешности показаний измерительного прибора $\pm \Delta_{доп}$, максимальную относительную погрешность измерения $\pm \delta_{MAX}$, приведенную максимальную погрешность измерения $\pm \gamma_{MAX}$, цену деления шкалы ΔN , чувствительность прибора S и метрологическую годность прибора.

На рис. 1.1 показаны характерные параметры шкалы прибора.

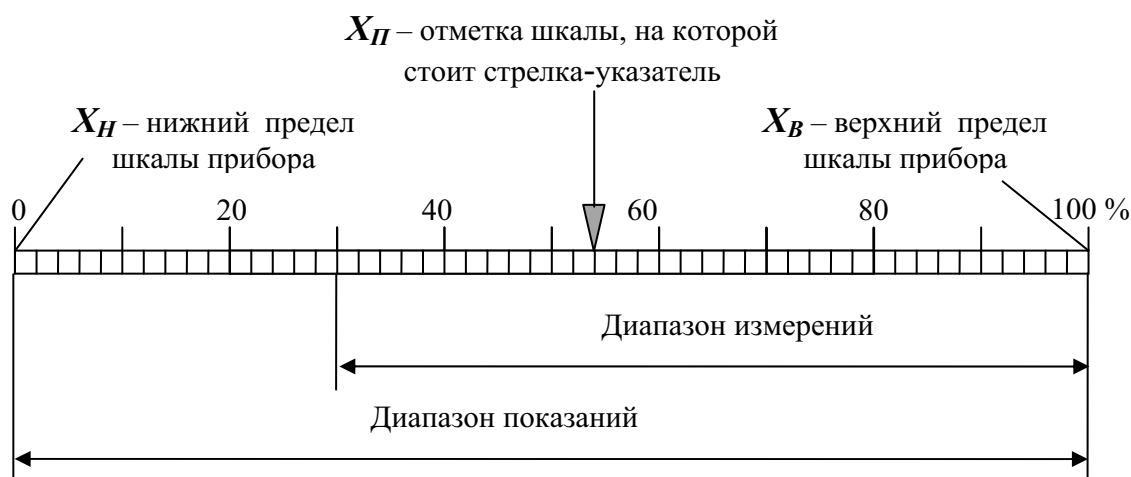


Рис. 1.1. Шкала измерительного прибора

В таблице 1.1 приведены варианты исходных данных к изложенной выше задаче.

Таблица 1.1 – Варианты исходных данных

№ варианта	X_H	X_B	<i>Ед. изм.</i>	K	N	X_{II}	Δ_{MAX}	V_{MAX}
1	0	10	мВ	0,5	100	5	0,05	0,03
2	0	20	мВ	0,5	100	10	0,1	0,07
3	0	50	мВ	0,5	100	30	0,25	0,30
4	0	100	мВ	0,5	100	75	0,5	0,40
5	0	200	мВ	0,5	100	150	1,0	0,90
6	0	500	мВ	0,5	100	400	2,5	3,00
7	-10	10	мВ	1,5	100	-5	0,3	0,60
8	-20	20	мВ	1,5	80	-5	0,6	0,50
9	-50	50	мВ	1,5	50	40	1,5	0,80
10	-100	100	мВ	1,5	100	75	3,0	2,40
11	-200	200	мВ	1,5	80	-150	6,0	6,00
12	-500	500	мВ	1,5	100	250	15,0	10,00
13	0	75	мВ	1,5	75	5	1,125	1,00
14	-75	75	мВ	1,5	75	50	2,25	2,0
15	0	1	В	0,5	50	0,5	0,4	0,003
16	0	1,5	В	0,5	75	0,5	0,02	0,007
17	0	3	В	0,5	150	2,8	0,01	0,005
18	0	7,5	В	0,5	75	7	0,1	0,11
19	-1	1	В	0,5	100	0,8	0,008	0,01
20	-1,5	1,5	В	0,5	150	0,8	0,016	0,01
21	-3	3	В	0,5	120	-2	0,02	0,02
22	0	10	В	1,0	50	7,5	0,03	0,02
23	0	15	В	1,0	75	12	0,02	0,02
24	0	30	В	1,0	60	25	0,05	0,02
25	0	50	В	1,0	25	25	0,075	0,03
26	-75	75	В	1,0	150	25	0,75	0,75

Продолжение табл. 1.1

№ варианта	X_H	X_B	<i>Ед. изм.</i>	K	N	X_{II}	Δ_{MAX}	V_{MAX}
27	0	150	В	1,0	75	25	1,5	1,5
28	0	250	В	1,0	50	200	0,4	0,3
29	0	400	В	1,0	80	300	0,27	2,0
30	0	600	В	1,0	120	500	10,0	5,0
31	-7,5	7,5	В	1,5	75	-7,5	0,15	0,3
32	-10	10	В	1,5	40	8	0,24	0,3
33	-15	15	В	1,5	60	-14	0,6	0,8
34	-30	30	В	1,5	120	15	0,6	0,8
35	-50	50	В	1,5	50	40	1,6	0,3
36	-75	75	В	1,5	75	50	1,5	1,6
37	-150	150	В	1,5	60	150	4,5	4,5
38	-250	250	В	1,5	50	200	6,0	7,5
39	-400	400	В	1,5	80	350	7,0	11,0
40	-600	600	В	1,5	60	500	15,0	10,0
41	0	10	МВ	1,5	50	9	0,1	0,05
42	0	20	МВ	1,5	40	3	0,6	0,3
43	0	50	МВ	1,5	25	5	1,5	0,7
44	0	100	МВ	1,5	50	90	0,18	0,5
45	0	200	МВ	1,5	40	190	0,038	0,3
46	0	500	МВ	1,5	50	450	0,9	5,0
47	-10	10	МВ	1,0	40	9,5	0,19	0,1
48	-20	20	МВ	1,0	80	2	0,4	0,4
49	-50	50	МВ	1,0	50	50	0,5	1,0
50	-100	100	МВ	1,0	80	-100	0,5	0,5

2. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Общие сведения

Технические измерения широко применяются как в промышленности, так и в лабораторных условиях. Они выполняются однократно с помощью рабочих средств измерений, градуированных в соответствующих единицах. Однократный отсчет показаний по шкале измерительного прибора принимается за окончательный результат измерения физической величины.

При технических измерениях, как правило, применяют измерительные системы, в состав которых входит несколько измерительных устройств. Поэтому при оценке погрешности измерения необходимо определить погрешность всей измерительной системы. Измерительная система может быть представлена как последовательно соединенные измерительные преобразователи и измерительные приборы. Каждое измерительное устройство, входящее в измерительную систему, преобразует входной сигнал $X_{ВХ}$ в выходной $X_{ВЫХ}$ с погрешностью Δ .

Чаще всего оценка предела погрешности измерительной системы ($\gamma_{ИС}$) производится с использованием значений пределов допускаемых основных и дополнительных погрешностей измерительных устройств, входящих в систему, т.е. фактически определяется максимальное значение предела погрешности измерительной системы по формуле

$$\gamma_{ИС} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \dots + \gamma_n^2}. \quad (2.1)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ – предел допускаемой основной приведенной погрешности i -го измерительного устройства.

Для решения задачи определения предела погрешности измерительной системы применим изложенную выше методику, с помощью которой можно также выполнять метрологическое обоснование выбора измерительной системы.

2.2. Формулировка задачи

Произвести оценку предельной статической погрешности измерения температуры показывающим милливольтметром класса точности K , с пределами измерений $t_H \div t_B$, в цепи с термоэлектрическим преобразователем (ТЭП), имеющим определенную номинальную статическую характеристику (НСХ), и включенным в цепь милливольтметра термокомпенсатором типа КТ-4 для автоматического введения поправки на

температуру свободных концов ТЭП. Милливольтметр показывает температуру t , заданная средняя температура свободных концов ТЭП, на которую производится компенсация, равна t'_0 . Схема системы измерения температуры приведена на рисунке 2.1.

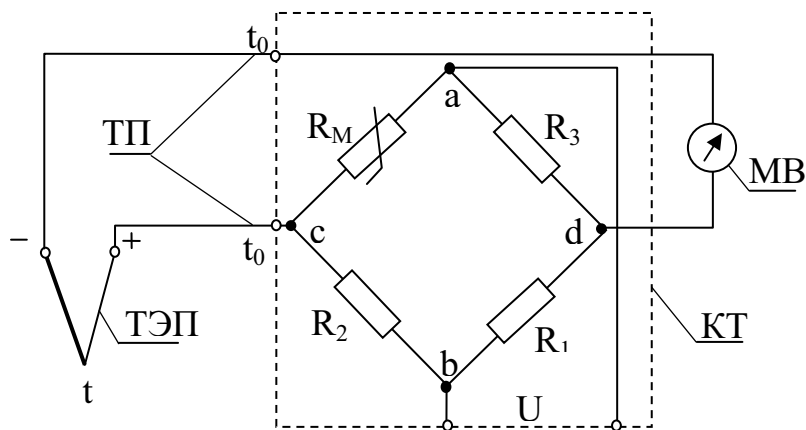


Рис. 2.1. Схема системы измерения температуры:

R_M – медный резистор, R_1, R_2, R_3 – сопротивления мостовой измерительной схемы, КТ – термокомпенсатор, ТЭП – термоэлектрический преобразователь, ТП – термоэлектродные провода, МВ – милливольтметр пирометрический

2.3. Методика расчета

Диапазон измерений милливольтметра определяют с помощью таблицы номинальной статической характеристики ТЭП

$$E_D = E(t_B, 0) - E(t_H, 0). \quad (2.2)$$

Предел допускаемой основной погрешности показаний милливольтметра:

- в милливольтцах
$$\pm \Delta E_{MB} = \pm \frac{\gamma_{MB} \cdot E_D}{100}, \quad (2.3)$$

- в градусах Цельсия
$$\pm \Delta t_{MB} = \pm \Delta E_{MB} \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta E} \right), \quad (2.4)$$

- в процентах
$$\pm \delta_{MB} = \pm \frac{\Delta t_{MB}}{t} \cdot 100. \quad (2.5)$$

где $\left(\frac{\Delta t}{\Delta E} \right)$ – обратный коэффициент преобразования ТЭП, определяемый с помощью таблицы НСХ ТЭП.

Рис. 2.2 иллюстрирует определение обратного коэффициента преобразования ТЭП.

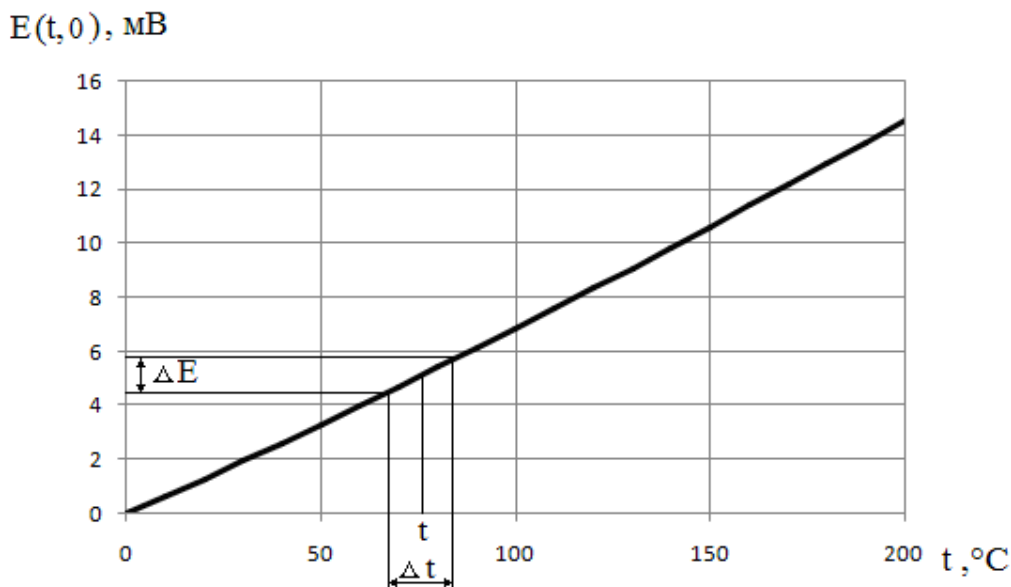


Рис. 2.2. Определение обратного коэффициента преобразования ТЭП по НСХ

Обратный коэффициент преобразования ТЭП определяется следующим образом:

- в окрестности измеряемой температуры t выбирают небольшой интервал температур $\Delta t = t_2 - t_1$, причем $t_2 > t > t_1$;
- по известной НСХ ТЭП находят изменение ТЭДС, соответствующее выбранному интервалу температур $\Delta E = E(t_2, t_0) - E(t_1, t_0)$;
- находят отношение $\left(\frac{\Delta t}{\Delta E} \right)$.

Предел допускаемого отклонения ТЭДС ТЭП:

- в милливольтгах
$$\pm \Delta E_T = \Delta t_{\text{доп}} \cdot \left(\frac{\Delta E}{\Delta t} \right), \quad (2.6)$$

где $\pm \Delta t_{\text{доп}}$ – предел допускаемой абсолютной погрешности, °С.

$\frac{\Delta E}{\Delta t}$ – чувствительность ТЭП, рассчитанная для измеряемого

значения температуры по НСХ аналогично обратному коэффициенту преобразования ТЭП.

- в градусах Цельсия
$$\pm \Delta t_T = \pm \Delta E_T \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta E} \right), \quad (2.7)$$

- в процентах
$$\pm\delta_T = \pm \frac{\Delta t}{t} \cdot 100. \quad (2.8)$$

Пределы допускаемых температурных погрешностей ТЭП приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Допускаемые погрешности ТЭП

Тип ТЭП	НСХ	Класс допуска	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых погрешностей, $\pm\Delta t_{доп}$, °С
ТХК	L (ХК)	2	от –40 до 300 от 300 до 800	$\pm 2,5$ $\pm(0,7 + 0,005 \cdot t)$
ТХА	К (ХА)	2	от –40 до 333 от 333 до 1300	$\pm 2,5$ $\pm 0,0075 \cdot t$
		1	от –40 до 375 от 375 до 1300	$\pm 1,5$ $\pm 0,004 \cdot t$
ТПП	S (ПП)	2	от 0 до 600 от 600 до 1600	$\pm 1,5$ $\pm 0,0025 \cdot t$
		1	от 0 до 1100 от 1100 до 1600	$\pm 1,0$ $\pm(1,0 + 0,003 \cdot (t - 1100))$

Допускаемые отклонения ТЭДС в паре между жилами термоэлектродных (компенсационных) проводов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Допускаемые отклонения ТЭДС в паре между жилами термоэлектродных проводов

НСХ ТЭП	L (ХК)	K (ХА)	S (ПП)
Допускаемое отклонение ТЭДС $\pm\Delta E_{ТП}$, мВ	$\pm 0,2$	$\pm 0,15$	$\pm 0,003$

- в градусах Цельсия
$$\pm\Delta t_{ТП} = \pm\Delta E_{ТП} \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta E} \right), \quad (2.9)$$

- в процентах
$$\pm\delta_{ТП} = \pm \frac{\Delta t_{ТП}}{t} \cdot 100. \quad (2.10)$$

Рассчитывают сопротивление R_M мостовой схемы для автоматического введения поправки на изменение температуры свободных концов ТЭП и погрешность измерений, вызванную отклонением температуры свободных концов ТЭП от заданного значения.

С помощью таблицы НСХ ТЭП определяют поправку для заданной средней температуры t'_0 свободных концов ТЭП

$$E(t'_0, 0) = \Delta e_{dc}, \text{ мВ.} \quad (2.11)$$

Определяют напряжение питания мостовой схемы

$$U_{ab} = \frac{\Delta e_{dc}(2 + \alpha \cdot t'_0)}{\alpha \cdot t'_0}, \quad (2.12)$$

где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$ – температурный коэффициент сопротивления меди, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

t'_0 – заданная средняя температура свободных концов ТЭП, $^{\circ}\text{C}$.

При напряжении источника питания $U = 4$ В для обеспечения требуемого значения U_{ab} величина сопротивления R_M должна быть равна

$$R_M = \frac{U}{U_{ab}}, \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

Если сопротивления мостовой схемы и свободные концы ТЭП находятся при нормальной температуре $t_0 = 20$ $^{\circ}\text{C}$, а с помощью резистора R_M вводится поправка на заданное среднее значение температуры свободных концов ТЭП $t'_0 = 50$ $^{\circ}\text{C}$, то на диагонали моста развивается разность потенциалов, которая определяется по формуле

$$\Delta e'_{dc} = U_{ab} \cdot \frac{\alpha \cdot t_0}{2 + \alpha \cdot t_0}, \text{ мВ.} \quad (2.14)$$

При этом $\Delta e'_{dc} > E(t_0, 0) = E(20^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C})$, т.е. происходит перекомпенсация, вызывающая погрешность измерения температуры:

- в милливольтгах $\pm \Delta E_{KT} = \pm \left[\Delta e'_{dc} - E(t_0, 0) \right], \text{ мВ,} \quad (2.15)$

- в градусах Цельсия $\pm \Delta t_{KT} = \pm \Delta E_{KT} \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta E} \right), \quad (2.16)$

- в процентах $\pm \delta_{KT} = \pm \frac{\Delta t_{KT}}{t} \cdot 100. \quad (2.17)$

Задавая различные температуры свободных концов ТЭП t_0 , строят график зависимости Δt_{KT} от t_0 .

Приближенное значение предельной статической погрешности показаний измерительной системы определяют по формуле

$$\pm\delta_{ис} = \pm\sqrt{\delta_{МВ}^2 + \delta_T^2 + \delta_{ТП}^2 + \delta_{КТ}^2}, \quad (2.18)$$

где $\delta_{МВ}$, δ_T , $\delta_{ТП}$, $\delta_{КТ}$ – статическая погрешность показаний соответственно милливольтметра, ТЭП, термоэлектродных проводов и термокомпенсатора.

что соответствует $\pm\Delta t_{ис} = \pm\frac{t \cdot \delta_{ис}}{100}, \text{ } ^\circ\text{C}.$ (2.19)

Подробный пример расчета изложен в [1].

Варианты исходных данных к изложенной выше задаче приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Варианты исходных данных

№ варианта	$t_H \div t_B, \text{ } ^\circ\text{C}$	НСХ	Класс допуска ТЭП	K	$t, \text{ } ^\circ\text{C}$
1	–50–50	L (XK)	2	1	45
2	–50–100	L (XK)	2	1	90
3	–50–150	L (XK)	2	1	100
4	–50–200	L (XK)	2	1	150
5	0–100	L (XK)	2	1	80
6	0–150	L (XK)	2	1	120
7	0–200	L (XK)	2	1	170
8	0–300	L (XK)	2	1	290
9	0–400	L (XK)	2	1	350
10	0–600	L (XK)	2	1	550
11	200–800	L (XK)	2	1	700
12	200–600	L (XK)	2	1	500
13	0–400	K (XA)	1	1	300
14	0–600	K (XA)	1	1	545
15	0–800	K (XA)	1	1	770
16	0–900	K (XA)	1	1	800
17	0–1100	K (XA)	1	1	1000
18	0–1300	K (XA)	2	1	900
19	200–1200	K (XA)	2	1	950
20	400–900	K (XA)	2	1	830
21	600–1100	K (XA)	2	1	970
22	700–1300	K (XA)	2	1	1050
23	0–1300	S (III)	1	1	1200
24	0–1600	S (III)	1	1	1500

Продолжение табл. 2.1

№ варианта	$t_H \div t_B, ^\circ\text{C}$	НСХ	Класс допуска ТЭП	K	$t, ^\circ\text{C}$
25	0–1300	S (III)	2	1	1250
26	–50–50	L (XK)	2	1,5	45
27	–50–100	L (XK)	2	1,5	90
28	–50–150	L (XK)	2	1,5	100
29	–50–200	L (XK)	2	1,5	150
30	0–100	L (XK)	2	1,5	80
31	0–150	L (XK)	2	1,5	120
32	0–200	L (XK)	2	1,5	170
33	0–300	L (XK)	2	1,5	290
34	0–400	L (XK)	2	1,5	350
35	0–600	L (XK)	2	1,5	550
36	200–800	L (XK)	2	1,5	700
37	200–600	L (XK)	2	1,5	500
38	0–400	K (XA)	1	1,5	300
39	0–600	K (XA)	1	1,5	545
40	0–800	K (XA)	1	1,5	770
41	0–900	K (XA)	1	1,5	800
42	0–1100	K (XA)	1	1,5	1000
43	0–1300	K (XA)	1	1,5	900
44	200–1200	K (XA)	2	1,5	950
45	400–900	K (XA)	2	1,5	830
46	600–1100	K (XA)	2	1,5	970
47	700–1300	K (XA)	2	1,5	1050
48	0–1300	S (III)	2	1,5	1200
49	0–1600	S (III)	2	1,5	1500
50	0–1300	S (III)	1	1,5	1250

3. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В НОРМАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

3.1. Общие сведения

Для оценки предельной статической погрешности систем измерения температуры применяют метод, изложенный в разделе 2.

Для измерительных систем под нормальными условиями понимают условия, при которых влияющие физические величины (температура окружающего воздуха $t_{ОВ}$, барометрическое давление P_B , влажность, напряжение питания и т.п.) имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. Для средств измерений нормальными условиями применения являются также их пространственное положение, отсутствие вибрации, внешних электрических и магнитных полей, кроме земного магнитного поля.

Например, нормальные значения основных влияющих величин:

- температура воздуха
 $t_{ОВ} = +20 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- атмосферное давление
 $P_{АТМ} = 760 \pm 25 \text{ мм рт.ст.} (101,325 \pm 3,3 \text{ кПа})$,
- напряжение питания 220 В частотой 50 Гц.

Нормальные значения влияющих величин устанавливают в стандартах на технические средства измерения.

Указанные условия не всегда являются эксплуатационными. Поэтому в стандартах устанавливают расширенную область значений влияющих величин, в пределах которой значение нормированных дополнительных погрешностей не должно превышать установленных пределов. Величины дополнительных погрешностей указывают в технических описаниях средств измерений в разделах «Технические характеристики».

3.2. Формулировка задачи

Определить предельную статическую погрешность измерения температуры в нормальных и эксплуатационных условиях. Измерение производят автоматическим потенциометром класса точности K с диапазоном измерений $t_H \div t_B$ в цепи с ТЭП. Автоматический потенциометр измеряет температуру t .

Схема системы измерения температуры приведена на рис. 3.1.

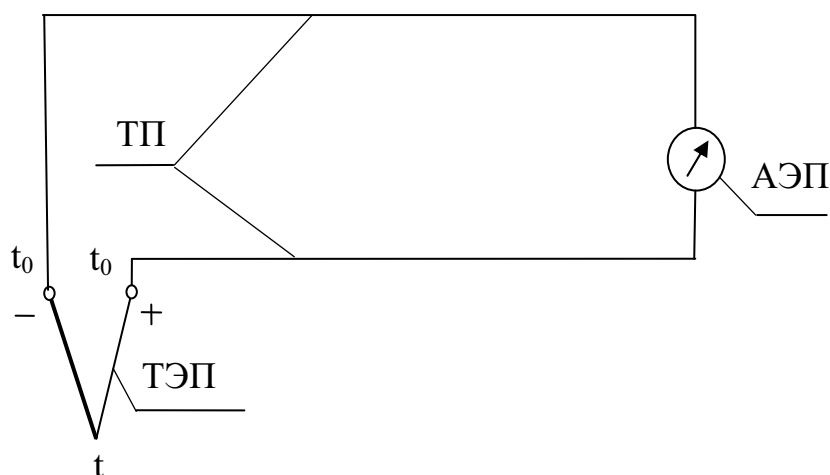


Рис. 3.1. Схема системы измерения температуры:
ТЭП – термоэлектрический преобразователь, ТП – термоэлектродные провода,
АЭП – автоматический электронный потенциометр

3.3. Методика расчета

Приведенная в разделе 2 методика расчета предельной статической погрешности системы измерения температуры, может быть использована и для решения вышеприведенной задачи. Подробный пример расчета изложен в [1].

Диапазон измерений автоматического потенциометра в милливольтках определяется с помощью таблицы номинальной статической характеристики (НСХ) ТЭП

$$E_{\text{д}} = E(t_{\text{в}}, 0) - E(t_{\text{н}}, 0). \quad (3.1)$$

Предел допускаемого отклонения ТЭДС ТЭП ΔE_T в милливольтках рассчитывают по формуле

$$\pm \Delta E_T = \Delta t_{\text{доп}} \cdot \frac{dE}{dt}, \quad (3.2)$$

Пределы допускаемых погрешностей ТЭП приведены в табл. 2.1.

Допускаемые отклонения ТЭДС в паре между жилами термоэлектродных (компенсационных) проводов приведены в таблице 2.2.

Для каждого устройства измерительной системы рассчитывают допускаемое значение основной погрешности:

- в милливольтках
$$\pm \Delta E_i = \pm \frac{\gamma_i \cdot E_{\text{д}}}{100}, \quad (3.3)$$

- в градусах Цельсия
$$\pm \Delta t_i = \pm \Delta E_i \cdot \frac{dt}{dE}, \quad (3.4)$$

- в процентах
$$\pm \delta_i = \pm \frac{\Delta t_i}{t} \cdot 100. \quad (3.5)$$

Приближенное значение предельной статической погрешности показаний для измерительной системы в нормальных условиях определяют по формуле

$$\pm \delta_{ис}^{HY} = \pm \sqrt{\delta_T^2 + \delta_{ТП}^2 + \delta_{П}^2}, \quad (3.6)$$

где $\delta_T, \delta_{ТП}, \delta_{П}$ – статическая погрешность показаний соответственно ТЭП, термоэлектродных проводов и показаний потенциометра,

что соответствует
$$\pm \Delta t_{ис}^{HY} = \pm \frac{t \cdot \delta_{ис}^{HY}}{100}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (3.7)$$

Приближенное значение предельной статической погрешности записи показаний для измерительной системы в нормальных условиях определяют по формуле

$$\pm \delta_{ис}^{HY} = \pm \sqrt{\delta_T^2 + \delta_{ТП}^2 + \delta_3^2}, \quad (3.8)$$

где δ_3 – статическая погрешность записи показаний потенциометра.

Приближенное значение предельной статической погрешности для измерительной системы в эксплуатационных условиях определяют по формуле

$$\pm \delta_{ис}^{\text{ЭУ}} = \pm \sqrt{(\delta_{ис}^{HY})^2 + \delta_{ПИТ}^2 + \delta_{ОВ}^2 + \delta_{МП}^2 + \delta_{ПН1}^2 + \delta_{ПН2}^2}, \quad (3.9)$$

где $\delta_{ПИТ}$ – погрешность, вызванная изменением напряжения питания;

$\delta_{ОВ}$ – погрешность, вызванная изменением температуры окружающего воздуха;

$\delta_{МП}$ – погрешность, вызванная влиянием магнитного поля;

$\delta_{ПН1}$ – погрешность, вызванная влиянием паразитного напряжения (поперечная помеха);

$\delta_{ПН2}$ – погрешность, вызванная влиянием паразитного напряжения (продольная помеха),

что соответствует
$$\pm \Delta t_{ис}^{\text{ЭУ}} = \pm \frac{t \cdot \delta_{ис}^{\text{ЭУ}}}{100}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (3.10)$$

В табл. 3.1 приведены исходные данные к задаче, в которой указаны: тип потенциометра, класс точности K , диапазон измерений потенциометра $t_H \div t_B$, НСХ, измеряемая температура t . Перечень и значения основных и дополнительных погрешностей автоматических потенциометров представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.1 – Варианты исходных данных

№ варианта	Тип автоматического электронного потенциометра	Класс точности	$t_H \div t_B, ^\circ\text{C}$	НСХ	Класс допуска ТЭП	$t, ^\circ\text{C}$
1	КСП2	0,5	0–100	L(XK)	2	45
2	КСП3	0,5	0–100	L(XK)	2	90
3	КСП3	0,5	0–1100	K(XA)	2	1000
4	КСП4	0,25	0–1100	K(XA)	2	950
5	КСП3	0,5	0–1300	K(XA)	2	800
6	КСП2	0,5	0–1300	S(III)	2	1200
7	КВП1	0,5	0–1300	S(III)	2	1170
8	КСП4	0,5	0–1300	K(XA)	2	1100
9	КВП1	0,25	0–1300	S(III)	2	950
10	КСП2	0,5	0–1300	S(III)	2	1050
11	КСП2	0,5	0–150	L(XK)	2	70
12	КСП3	0,5	0–150	L(XK)	2	50
13	КСП3	0,5	0–1600	S(III)	1	1300
14	КВП1	0,5	0–1600	S(III)	1	1350
15	КСП3	0,5	0–200	L(XK)	1	170
16	КСП2	0,5	0–200	L(XK)	1	80
17	КСП3	0,5	0–300	L(XK)	1	100
18	КСП2	0,5	0–300	L(XK)	2	190
19	КСП4	0,25	0–400	L(XK)	2	330
20	КСП1	1,0	0–400	K(XA)	2	230
21	КСП1	1,0	0–400	L(XK)	2	270
22	КВП1	0,25	0–400	K(XA)	2	150
23	КСП4	0,5	0–600	L(XK)	1	120
24	КСП1	1,0	0–600	L(XA)	1	150
25	КВП1	0,5	0–600	K(XA)	2	550

Продолжение табл. 3.1

№ варианта	Тип автоматического потенциометра	Класс точности	$t_H \div t_B, ^\circ\text{C}$	НСХ	Класс допуска ТЭП	$t, ^\circ\text{C}$
26	КСП1	1,0	0–600	L(XK)	2	450
27	КСП2	0,5	0–800	K(XA)	2	590
28	КСП3	0,5	0–800	K(XA)	2	700
29	КСП2	0,5	0–900	K(XA)	2	650
30	КСП3	0,5	0–900	K(XA)	2	800
31	КСП4	0,25	200–1200	K(XA)	2	1000
32	КСП2	0,5	200–1200	K(XA)	2	1100
33	КВП1	0,5	200–600	L(XK)	2	490
34	КПП1	0,5	200–600	L(XK)	2	350
35	КВП1	0,25	200–800	L(XK)	2	550
36	КПП1	0,5	200–800	L(XK)	2	700
37	КСП4	0,5	400–900	K(XA)	2	500
38	КСП2	0,5	400–900	K(XA)	1	800
39	КПП1	0,5	–50–100	L(XK)	1	45
40	КВП1	0,5	–50–100	L(XK)	1	70
41	КСП1	1,0	–50–150	L(XK)	1	80
42	КПП4	0,25	–50–150	L(XK)	1	100
43	КСП1	1,0	–50–200	L(XK)	1	90
44	КСП4	0,5	–50–200	L(XK)	2	95
45	КПП1	0,5	–50–50	L(XK)	2	30
46	КВП1	0,25	–50–50	L(XK)	2	20
47	КВП1	0,25	600–1100	K(XA)	2	1000
48	КСП1	1,0	600–1100	K(XA)	2	920
49	КВП1	0,5	700–1300	K(XA)	2	1000
50	КСП1	1,0	700–1300	K(XA)	1	1200

Таблица 3.2 – Метрологические характеристики автоматических потенциометров

Наименования основных и дополнительных погрешностей	Значения погрешностей, %					
	КПП1	КСП1	КСП2	КСП3	КСП4	КВП1
Основные погрешности						
1. Основная приведенная погрешность показаний АЭП $\pm\gamma_{II}$	$\pm 0,5$	± 1	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,25$ $\pm 0,5$	$\pm 0,25$ $\pm 0,5$
2. Погрешность записи АЭП $\pm\gamma_3$	–	± 1	± 1	± 1	$\pm 0,5$	–
Дополнительные погрешности						
3. Изменение показаний АЭП, вызванное изменением напряжения питания на +10% и –15% от номинального значения $\pm\gamma_{пит}$	$\pm 0,25$	± 1	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$	$\pm 0,2$ $\pm 0,25$	$\pm 0,13$ $\pm 0,25$
4. Изменение показаний АЭП, вызванное изменением температуры окружающего воздуха от 20 ± 5 °C $\pm\gamma_{ов}$ – для любого диапазона измерения – при диапазоне измерения 10 мВ и более – при диапазоне измерения до 10 мВ	$\pm 0,25$	$\pm 0,25$	$\pm 0,2$ $\pm 0,4$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$ $\pm 0,3$
5. Изменение показаний АЭП, вызванное влиянием внешнего магнитного поля напряженностью 400 А/м $\pm\gamma_{мп}$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	–	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	–
6. Изменение показаний АЭП, вызванное влиянием паразитного напряжения, действующего последовательно с полезным сигналом (поперечная помеха) $\pm\gamma_{пн1}$	–	–	$\pm 0,25$	$\pm 0,5$	–	–
7. Изменение показаний АЭП, вызванное влиянием паразитного напряжения переменного тока между любыми измерительными зажимами и заземленным корпусом (продольная помеха) $\pm\gamma_{пн2}$	–	–	$\pm 0,25$	$\pm 0,5$	–	–

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОКРАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Исключение грубых погрешностей из результатов многократных измерений

В процессе обработки результатов многократных измерений следует исключать грубые ошибки из ряда результатов измерений. Наличие грубых ошибок существенно влияет на результаты обработки полученных при измерениях данных. Прежде чем исключать тот или иной результат из ряда результатов измерений, необходимо убедиться в том, что этот результат действительно представляет грубую ошибку, а не отклонение вследствие статистического разброса результатов измерений. Известно несколько методов определения грубых ошибок статистического ряда результатов измерений. Наиболее простым способом исключения грубых ошибок из статистического ряда результатов измерений является правило трех сигм: разброс случайных величин от среднего значения не должен превышать 3σ :

$$x_m = \bar{x} \pm 3\sigma, \quad (4.1)$$

где x_m – максимальное или минимальное значение статистического ряда,

\bar{x} – среднее арифметическое статистического ряда,

σ – среднеквадратичное отклонение.

Более достоверными являются методы, которые базируются на использовании доверительных интервалов.

Если имеется статистический ряд результатов измерений малой выборки (количество результатов измерений не превышает 20), подчиняющийся закону нормального распределения, то при наличии грубых ошибок критерии β_1, β_2 их появления вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \beta_1 &= (x_{\max} - \bar{x}) / \sigma \sqrt{(n-1)/n}, \\ \beta_2 &= (\bar{x} - x_{\min}) / \sigma \sqrt{(n-1)/n}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где x_{\max}, x_{\min} – наибольшее и наименьшее значения из n измерений.

В таблице 4.1. приведены максимальные значения критериев появления грубых ошибок β_{\max} в зависимости от доверительной вероятности, возникающие вследствие статистического разброса результатов измерений.

Если $\beta_1 > \beta_{\max}$, то значение x_{\max} следует исключить из статистического ряда результатов измерений как грубую ошибку.

Если $\beta_2 > \beta_{\max}$, то значение x_{\min} следует исключить из статистического ряда результатов измерений как грубую ошибку. После исключения грубых ошибок определяют новые значения x и σ из $(n-1)$ или $(n-2)$ измерений.

Таблица 4.1 – Максимальные значения критерия β

n	β_{\max} при p_D			n	β_{\max} при p_D		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
3	1,41	1,41	1,41	15	2,33	2,49	2,80
4	1,64	1,69	1,72	16	2,35	2,52	2,84
5	1,79	1,87	1,96	17	2,38	2,55	2,87
6	1,89	2,00	2,13	18	2,40	2,58	2,90
7	1,97	2,09	2,26	19	2,43	2,60	2,93
8	2,04	2,17	2,37	20	2,45	2,62	2,96
9	2,10	2,24	2,46	25	2,54	2,72	3,07
10	2,15	2,29	2,54	30	2,61	2,79	3,16
11	2,19	2,34	2,61	35	2,67	2,85	3,22
12	2,23	2,39	2,66	40	2,72	2,90	3,28
13	2,26	2,43	2,71	45	2,76	2,95	3,33
14	2,30	2,46	2,76	50	2,80	2,99	3,37

Второй из наиболее часто используемых методов определения наличия грубых ошибок основан на применении критерия Романовского. Этот метод также применим для малой выборки результатов измерений. Процесс выявления наличия грубых ошибок по критерию Романовского сводится к следующему. Задаются доверительной вероятностью p и по таблице 4.2. в зависимости от числа членов статистического ряда n находят величину q . Вычисляют предельно допустимую абсолютную ошибку ε_{np} результата отдельного измерения

$$\varepsilon_{np} = \sigma q. \quad (4.3)$$

Оценкой действительного значения случайной физической величины x является значение \bar{x} , определяемое по формуле $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.

Если $x_{\max} - \bar{x} > \varepsilon_{np}$, то результат измерения x_{\max} исключают из ряда как грубую ошибку. Если $\bar{x} - x_{\min} > \varepsilon_{np}$, то результат измерения x_{\min} исключают из ряда как грубую ошибку. После исключения одной или двух грубых ошибок вновь находят величину q .

Таблица 4.2 – Критерий наличия грубых ошибок q в малой выборке

n	q при p_d		
	0,90	0,95	0,99
2	15,56	38,97	77,96
3	4,97	8,04	11,46
4	3,56	5,08	6,53
5	3,04	4,10	5,04
6	2,78	3,64	4,36
7	2,62	3,36	3,96
8	2,51	3,18	3,71
9	2,43	3,05	3,54
10	2,37	2,96	3,41
12	2,29	2,83	3,23
14	2,24	2,74	3,15
16	2,20	2,68	3,04
18	2,17	2,64	3,00
20	2,15	2,60	2,93
∞	1,96	2,33	2,58

Вычисляют предельно допустимую абсолютную ошибку результата отдельного измерения $\varepsilon_{np} = \sigma q$ для нового числа членов статистического ряда n и сравнивают максимальные абсолютные погрешности $\Delta_{\max} = x_{\max} - \bar{x}$ и $\Delta_{\min} = \bar{x} - x_{\min}$ с величиной предельно допустимой абсолютной ошибки результата отдельного измерения ε_{np} . Исключение грубых ошибок продолжают до тех пор, пока абсолютные погрешности Δ_{\max} и Δ_{\min} не станут меньше предельно допустимой абсолютной ошибки результата отдельного измерения ε_{np} .

4.2. Статистическая оценка параметров распределений случайных физических величин

При статистической обработке результатов измерений используют основные сведения теории вероятностей. Основными понятиями при статистических оценках параметров распределений случайных физических величин являются понятия доверительного интервала и доверительной вероятности. В реальных условиях действительное значение параметра x неизвестно и его заменяют статистической оценкой \bar{x} . Доверительный интервал и доверительная вероятность дают представление о точности и надежности статистической оценки \bar{x} , а также о

том, с какой степенью уверенности можно ожидать, что ошибка, связанная с заменой x на \bar{x} , не выйдет за заданные пределы.

Для заданной вероятности p_1 по определенной совокупности значений измеряемой физической величины можно определить такое значение величины x_H , что интервал от x_H до $+\infty$ накрывает действительное значение x с вероятностью p_1 :

$$\text{Вер} \{ \bar{x} \geq x_H \} = p_1. \quad (4.4)$$

Значение x_H называют нижней доверительной границей для значения \bar{x} при односторонней доверительной вероятности p_1 .

Значение x_B , являющееся верхней границей интервала от $-\infty$ до x_B , который с вероятностью p_2 накрывает значение \bar{x} , называют верхней доверительной границей при односторонней доверительной вероятности p_2 :

$$\text{Вер} \{ \bar{x} \leq x_B \} = p_2. \quad (4.5)$$

Нижняя x_H и верхняя x_B границы ограничивают доверительный интервал, который с доверительной вероятностью p накрывает неизвестное действительное значение измеряемой физической величины:

$$\text{Вер} \{ x_H \leq \bar{x} \leq x_B \} = p. \quad (4.6)$$

Если $p_1 > 0,5$ и $p_2 > 0,5$, то $p = p_1 + p_2 - 1$.

Оценкой действительного значения случайной физической величины x является значение \bar{x} , определяемое по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (4.7)$$

Наиболее часто в задачах по статистическим оценкам параметров распределений случайных величин рассматривают доверительные интервалы, симметричные относительно \bar{x} , с двусторонней доверительной вероятностью p . Если известна полуширина доверительного интервала, равная ε , то нижняя x_H и верхняя x_B границы доверительного интервала определяют по соотношениям:

$$\begin{aligned} x_H &= \bar{x} - \varepsilon, \\ x_B &= \bar{x} + \varepsilon. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Значение ε для ряда измерений (отдельных значений ряда) определяют по формуле

$$\varepsilon = t_p \sigma, \quad (4.9)$$

где σ – оценка средней квадратической погрешности ряда измерений,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.10)$$

где n – число наблюдений;

t_p – коэффициент, определяемый характером распределения результатов наблюдений для заданной вероятности p .

Для ограниченного числа измерений (как правило, менее 100) характер распределения часто может быть описан законом распределения Стьюдента. Тогда t_p – коэффициент распределения Стьюдента для числа измерений n и вероятности p . При решении большинства задач приходится определять доверительные интервалы результата измерений. В этом случае ε_B определяют по формуле

$$\varepsilon_B = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.11)$$

Значения t_p и $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$ приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения коэффициентов t_p распределения Стьюдента и величины t_p/\sqrt{n} в зависимости от p и $k = n-1$

$k=n-1$	p					
	0,90		0,95		0,99	
	t_p	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	t_p	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	t_p	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$
1	6,31	4,48	12,71	9,00	63,70	45,00
2	2,92	1,69	4,30	2,50	9,92	5,70
3	2,35	1,18	3,18	1,59	5,84	2,90
4	2,13	0,95	2,78	1,24	4,60	2,10
5	2,02	0,82	2,57	1,05	4,03	1,60
6	1,94	0,73	2,45	0,93	3,71	1,40
7	1,90	0,67	2,36	0,84	3,50	1,24
8	1,86	0,62	2,31	0,77	3,36	1,12
9	1,83	0,58	2,26	0,72	3,25	1,03
10	1,81	0,55	2,23	0,67	3,17	0,96
11	1,80	0,52	2,20	0,65	3,11	0,90
12	1,78	0,49	2,18	0,60	3,06	0,85
13	1,77	0,47	2,16	0,58	3,01	0,80
14	1,76	0,45	2,14	0,55	2,98	0,77

$k=n-1$	p					
	0,90		0,95		0,99	
	t_p	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	t_p	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	t_p	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$
15	1,75	0,44	2,13	0,53	2,95	0,74
16	1,75	0,42	2,12	0,51	2,92	0,71
17	1,74	0,41	2,11	0,50	2,9	0,68
18	1,73	0,40	2,10	0,48	2,88	0,66
19	1,73	0,39	2,09	0,47	2,86	0,64
20	1,72	0,38	2,09	0,47	2,84	0,62
30	1,70	0,31	2,04	0,37	2,75	0,49
40	1,68	0,26	2,02	0,32	2,70	0,42
50	1,68	0,24	2,01	0,28	2,68	0,38
100	1,66	0,17	1,98	0,20	2,63	0,26
200	1,65	0,12	1,97	0,14	2,60	0,18
∞	1,645	0	1,96	0	2,58	0

В разделе 5 приведены задачи, связанные с оценкой погрешности при косвенных измерениях.

Косвенным измерением называют измерение, при котором искомое значение величины y находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами x_i , найденными путем прямых измерений:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n).$$

Если величины x_i независимы, то зависимость погрешности δ_y от погрешностей исходных величин δ_{x_i} выражается формулой:

$$\Delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \delta_{x_i} \right)^2}. \quad (4.12)$$

Выражение для погрешности сохраняет свой вид независимо от того, является ли δ_{x_i} средней квадратической или предельной погрешностью, только результат будет представлять соответственно среднюю квадратическую или предельную погрешность.

При решении задач на проверку согласия распределения, найденного опытным путем, с теоретическим распределением следует руководствоваться правилами, изложенными в [6]. В разделе 5 в качестве критериев согласия приняты критерии Колмогорова χ^2 и ω^2 .

При использовании критерия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями рассматривается максимальное значение модуля разности K между статистической функцией распределения $F_n(x)$ и соответствующей теоретической функцией распределения $F(x)$

$$K = \max |F_n(x) - F(x)| \quad (4.13)$$

Значение $F_n(x)$ на границе какого-либо интервала определяется как сумма частот всех интервалов, лежащих левее этой границы. Значения $F(x)$ определяются из таблиц [4]. Максимальная разность K определяется путем либо построения графиков $F_n(x)$ и $F(x)$ [4, 6], либо составления таблиц. По найденному значению K вычисляют вспомогательную величину $\lambda = K\sqrt{n}$ и задаются доверительной вероятностью

$$p = \text{Вер}\{\lambda \leq \lambda^*\}, \quad (4.14)$$

при которой отклонение функции опытного распределения от теоретического будет меньше λ^* , установленной для доверительной вероятности p .

Вспомогательную величину λ^* , соответствующую этой доверительной вероятности, находят по методике, изложенной в [6].

При выполнении соотношения $\lambda \leq \lambda^*$ гипотеза о согласии теоретического и опытного распределений принимается, в противном случае – отвергается.

При проверке согласия по критерию χ^2 вычисляется значение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^h \frac{(n_i - np'_i)^2}{np'_i}, \quad (4.15)$$

где h – число интервалов;

n_i – число наблюдений в i -м интервале;

n – общее число наблюдений;

p'_i – теоретическая (т. е. в соответствии с выбранным теоретическим законом распределения) вероятность попадания в i -й интервал.

Затем следует задаться доверительной вероятностью

$$p = \text{Вер}\{\chi^2 \leq (\chi^*)^2\},$$

при которой χ^2 , полученное вследствие случайных отклонений частей опытного распределения от соответствующих вероятностей теоретического распределения, будет меньше значения $(\chi^*)^2$, установленного для доверительной вероятности p . В зависимости от p и числа степеней свободы (равно числу интервалов минус число наложенных связей) определяют $(\chi^*)^2$ по методике, изложенной в [5]. При выполнении условия $\chi^2 \leq (\chi^*)^2$ гипотеза о согласии найденного опытным путем и теоретического распределений принимается, в противном случае – отвергается.

Для упрощения решения в условиях задач раздела 5 приведены необходимые для решения значения p и $(\chi^*)^2$.

4.3 Формулировка задачи

Произведено x_i измерений термо-ЭДС термоэлектрическим преобразователем. Температура свободных концов термоэлектрического преобразователя равна 0 °С. Результаты измерений не содержат систематических погрешностей.

Определить действительное значение термо-ЭДС и температуры, доверительные границы и доверительный интервал при доверительной вероятности p . Исключить грубые погрешности из результатов измерений термо-ЭДС.

Варианты исходных данных к задаче приведены в табл. 4.4.

Номинальные статические характеристики термоэлектрических преобразователей приведены в приложении А.

Таблица 4.4 – Варианты исходных данных

x_i	№ варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,10	5,55	9,67	14,75	16,43	21,22	24,29	18,31	19,08	16,07
2	4,26	4,49	10,06	14,60	16,17	20,93	25,13	17,97	13,67	15,40
3	4,41	4,37	9,51	14,92	16,32	19,63	23,95	16,74	17,61	16,07
4	4,47	5,31	10,24	15,61	15,08	19,87	25,52	17,89	15,82	15,02
5	4,45	4,63	9,39	15,11	15,12	21,03	23,69	22,23	16,73	15,94
6	4,13	5,27	11,33	15,31	15,12	21,19	27,85	21,89	17,03	15,70
7	3,65	5,33	8,09	15,44	15,67	20,54	20,91	21,52	17,61	16,02
8	4,23	5,26	10,61	14,99	14,95	19,68	26,31	17,88	18,53	18,14
9	3,92	5,07	11,53	15,17	13,73	19,77	28,27	19,17	19,81	15,91
10	3,57	4,97	10,76	15,10	17,02	20,20	26,63	23,21	17,03	15,44
11	5,06	5,16	10,82	15,26	16,63	21,30	26,76	20,05	17,02	17,24
12	3,38	5,12	9,32	14,71	16,11	22,94	23,54	19,34	16,26	17,67
13	3,15	4,91	8,90	14,58	15,19	20,10	22,64	19,09	17,16	14,24
14	4,19	4,77	10,32	16,83	15,28	20,85	25,70	20,79	17,51	17,55
15	3,29	5,15	11,03	14,83	15,30	20,84	27,21	20,99	17,76	14,60
16	3,79	5,08	10,82	14,23	16,22	22,84	26,75	19,84	16,44	14,32
17	4,44	4,53	9,47	15,46	15,68	22,22	23,85	20,17	17,55	15,38
18	3,72	5,40	10,36	14,76	17,04	16,56	25,76	20,84	17,43	15,79
19	3,55	5,36	10,35	14,28	14,90	20,99	25,74	18,46	16,17	16,77
20	3,57	5,52	9,44	14,38	16,30	19,34	23,80	19,73	17,85	15,75
P	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,90	0,95
HСХ	S(III)	S(III)	S(III)	K(XA)	K(XA)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	K(XA)	K(XA)

Продолжение табл. 4.4

x_i	№ варианта																			
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	21,97	23,61	20,76	16,19	16,73	31,21	32,11	31,46	28,94	30,75	21,97	23,61	20,76	16,19	16,73	31,21	32,11	31,46	28,94	30,75
2	22,05	25,46	17,36	17,15	16,47	25,13	31,05	35,99	29,94	22,83	22,05	25,46	17,36	17,15	16,47	25,13	31,05	35,99	29,94	22,83
3	22,40	22,09	17,00	15,81	15,55	29,56	32,11	31,66	31,59	28,48	22,40	22,09	17,00	15,81	15,55	29,56	32,11	31,66	31,59	28,48
4	22,74	23,77	20,00	17,59	16,42	27,55	30,44	33,94	26,20	29,06	22,74	23,77	20,00	17,59	16,42	27,55	30,44	33,94	26,20	29,06
5	22,36	25,17	17,82	15,51	19,67	28,57	31,91	33,35	28,19	29,95	22,36	25,17	17,82	15,51	19,67	28,57	31,91	33,35	28,19	29,95
6	20,97	20,45	19,87	20,23	19,42	28,91	31,52	32,07	29,37	27,54	20,97	20,45	19,87	20,23	19,42	28,91	31,52	32,07	29,37	27,54
7	19,58	24,83	20,06	12,37	19,14	29,56	32,04	30,62	28,59	30,04	19,58	24,83	20,06	12,37	19,14	29,56	32,04	30,62	28,59	30,04
8	24,12	21,53	19,83	18,48	16,41	30,59	35,39	34,70	29,35	24,62	24,12	21,53	19,83	18,48	16,41	30,59	35,39	34,70	29,35	24,62
9	23,46	23,64	19,23	20,70	17,38	32,04	31,86	35,29	30,15	32,04	23,46	23,64	19,23	20,70	17,38	32,04	31,86	35,29	30,15	32,04
10	20,27	21,53	18,92	18,84	20,41	28,91	31,11	33,57	29,39	30,75	20,27	21,53	18,92	18,84	20,41	28,91	31,11	33,57	29,39	30,75
11	22,22	21,26	19,51	19,00	18,04	28,90	33,97	35,85	28,27	28,13	22,22	21,26	19,51	19,00	18,04	28,90	33,97	35,85	28,27	28,13
12	24,55	23,59	19,40	15,35	17,50	28,04	34,64	33,90	28,30	28,19	24,55	23,59	19,40	15,35	17,50	28,04	34,64	33,90	28,30	28,19
13	21,52	20,32	18,73	14,32	17,32	29,05	29,21	33,26	31,31	25,21	21,52	20,32	18,73	14,32	17,32	29,05	29,21	33,26	31,31	25,21
14	18,95	22,83	18,28	17,79	18,60	29,45	34,45	30,01	27,33	25,75	18,95	22,83	18,28	17,79	18,60	29,45	34,45	30,01	27,33	25,75
15	19,88	23,58	19,47	19,51	18,74	29,73	29,78	32,10	28,37	27,75	19,88	23,58	19,47	19,51	18,74	29,73	29,78	32,10	28,37	27,75
16	20,01	25,05	19,24	18,98	17,88	28,24	29,34	33,66	26,92	27,33	20,01	25,05	19,24	18,98	17,88	28,24	29,34	33,66	26,92	27,33
17	21,22	21,28	17,51	15,70	18,12	29,49	31,02	33,44	28,32	29,93	21,22	21,28	17,51	15,70	18,12	29,49	31,02	33,44	28,32	29,93
18	22,09	22,46	20,27	17,87	18,63	29,36	31,66	36,24	25,52	24,53	22,09	22,46	20,27	17,87	18,63	29,36	31,66	36,24	25,52	24,53
19	21,11	23,67	20,15	17,84	16,84	27,94	33,22	34,46	31,08	29,23	21,11	23,67	20,15	17,84	16,84	27,94	33,22	34,46	31,08	29,23
20	21,50	23,26	20,67	15,64	17,80	29,83	31,61	36,16	27,24	27,36	21,50	23,26	20,67	15,64	17,80	29,83	31,61	36,16	27,24	27,36
P	0,99	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,90	0,95	0,99	0,90	0,99	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,90	0,95	0,99	0,90
HCX	K(XA)	K(XA)	K(XA)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	K(XA)	K(XA)	K(XA)	K(XA)	K(XA)	K(XA)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	K(XA)	K(XA)	K(XA)

Продолжение табл. 4.4

x_i	№ варианта																													
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30																				
1	26,99	34,08	19,94	25,27	22,94	42,59	39,05	43,58	46,08	45,68																				
2	29,78	32,74	20,21	22,27	23,95	39,54	41,35	42,73	41,23	47,07																				
3	26,11	31,56	19,31	21,42	24,15	43,46	37,03	45,08	39,73	44,88																				
4	26,00	34,97	17,61	22,17	26,00	42,30	38,43	48,55	43,66	43,58																				
5	24,75	31,95	20,58	23,97	23,92	43,20	42,23	44,31	41,57	39,49																				
6	24,12	36,50	21,02	22,94	24,02	42,28	37,71	43,65	42,72	44,61																				
7	28,77	29,61	20,38	23,68	25,84	41,27	41,51	43,56	44,26	39,44																				
8	27,58	36,05	21,73	24,28	23,81	38,68	39,85	42,24	44,12	41,56																				
9	28,50	37,78	22,06	23,91	27,45	42,45	33,47	41,03	46,62	42,88																				
10	27,62	32,53	23,39	23,79	24,55	39,66	36,82	45,32	39,96	45,16																				
11	27,26	31,61	17,49	24,89	23,81	41,18	41,33	41,76	39,94	42,20																				
12	20,44	34,17	25,78	21,52	24,64	39,32	40,33	44,03	44,87	42,57																				
13	23,54	33,58	22,94	23,06	22,78	40,92	39,62	45,27	46,30	47,26																				
14	26,71	33,03	20,86	21,65	23,24	34,86	41,26	41,34	46,80	42,86																				
15	23,60	27,31	20,15	21,61	22,78	39,96	41,77	42,95	41,87	43,90																				
16	26,09	33,95	21,58	21,82	26,75	37,58	39,02	41,84	44,43	45,18																				
17	26,34	32,62	17,85	21,94	26,63	38,49	38,14	43,46	40,64	41,07																				
18	25,23	34,48	22,42	18,50	24,52	39,43	42,40	41,84	44,85	44,65																				
19	23,44	29,05	20,98	23,41	24,52	37,85	44,20	41,56	40,34	48,74																				
20	28,00	31,51	19,41	22,43	23,21	41,19	39,19	40,40	41,51	47,90																				
P	0,95	0,99	0,9	0,95	0,99	0,9	0,95	0,99	0,9	0,95																				
HСХ	K(XA)	L(XK)	K(XA)	L(XK)	K(XA)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	L(XK)																				

Продолжение табл. 4.4

x _i	№ варианта													
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40				
1	48,12	46,37	49,57	48,37	51,85	10,90	12,58	15,81	15,74	20,82				
2	45,86	46,70	47,65	49,34	48,33	11,03	12,26	14,43	15,12	17,21				
3	43,47	46,83	48,51	46,90	48,33	9,70	12,46	14,14	17,24	17,37				
4	46,36	44,03	45,56	50,13	50,94	9,68	10,97	13,96	16,93	18,91				
5	47,82	49,38	49,03	50,60	52,38	10,28	12,32	14,94	15,40	18,61				
6	45,27	46,30	46,18	48,54	50,69	8,86	11,90	14,09	15,02	21,58				
7	44,75	45,84	47,47	52,63	47,75	9,97	11,67	13,61	15,97	17,71				
8	42,96	43,60	47,42	46,19	45,72	9,84	10,89	14,04	15,26	16,63				
9	43,60	41,98	46,59	49,19	47,77	10,61	11,49	13,78	16,27	19,31				
10	46,87	48,52	46,86	47,72	48,48	11,22	10,47	15,32	14,96	17,83				
11	45,03	44,60	45,33	47,66	47,35	10,68	12,03	15,10	15,92	18,31				
12	42,63	46,18	45,12	49,23	50,60	9,84	12,25	13,69	16,24	17,84				
13	41,92	48,41	42,34	46,51	49,51	11,48	11,92	14,97	15,21	17,28				
14	42,99	45,66	46,23	50,03	48,45	10,65	11,15	13,43	14,90	17,81				
15	46,55	45,72	46,62	47,92	48,62	9,91	12,03	13,75	15,60	14,40				
16	45,51	43,56	43,07	48,88	50,17	10,77	11,89	14,34	15,99	20,65				
17	40,24	48,75	46,76	46,34	47,56	9,73	11,80	15,59	15,95	19,52				
18	49,02	45,39	46,20	47,37	48,47	9,03	11,91	12,84	15,93	17,97				
19	42,60	45,36	47,32	45,80	47,43	10,42	12,03	14,09	15,42	14,15				
20	44,45	44,45	50,11	47,35	49,78	9,27	12,12	13,21	15,26	15,67				
p	0,95	0,99	0,9	0,95	0,99	0,9	0,95	0,99	0,9	0,95				
HСХ	L(XK)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	L(XK)	S(III)	S(III)	S(III)	K(XA)	K(XA)				

5. ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

5.1. Температура в термостате измерялась техническим термометром со шкалой $0...500\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеющим пределы допускаемой основной погрешности $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показания термометра составили $346\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одновременно с техническим термометром в термостат был погружен лабораторный термометр, имеющий свидетельство о поверке. Показания лабораторного термометра составили $352\text{ }^{\circ}\text{C}$, поправка по свидетельству составляет $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, поправка на выступающий столбик равна $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Определите, выходит ли за пределы допускаемой основной погрешности действительное значение погрешности показаний технического термометра.

5.2. Милливольтметр имеет равномерную шкалу, разделенную на 50 интервалов. Нижний предел измерений $U_H = -10\text{ мВ}$, верхний предел измерений $U_K = +10\text{ мВ}$.

Определите цену деления шкалы и чувствительность милливольтметра.

5.3. Зависят ли коэффициенты преобразования медного и платинового термопреобразователей сопротивления от температуры, если известно, что сопротивления связаны с температурой выражениями $R_t = R_0(1 - \alpha t)$ для медного термопреобразователя сопротивления, $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ для платинового термопреобразователя сопротивления.

5.4. При проверке автоматического потенциометра со шкалой $0...500\text{ }^{\circ}\text{C}$ с номинальной статической характеристикой $K(XA)$ выяснилось, что стрелка и пишущий узел прибора смещены относительно нулевой отметки на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сторону завышения. Как должна быть учтена эта систематическая погрешность измерений температуры при обработке диаграммной бумаги, например, на отметке, $430\text{ }^{\circ}\text{C}$?

5.5. При испытании измерительной системы измерительный преобразователь – измерительный прибор в нормальных условиях эксплуатации стрелка устанавливалась на конечной отметке шкалы при следующих i -х значениях перепада давления ΔP_i на входе преобразователя:

i	1	2	3	4	5	6	7	8
ΔP_i , кПа	84,15	84,06	83,80	83,90	83,94	84,10	84,02	84,03.

Затем было изменено напряжение питания измерительной системы на $+10\% U_{ном}$. При этом стрелка устанавливалась на конечной отметке шкалы при следующих i -х значениях перепада давления ΔP_i^* на входе:

i	1	2	3	4	5	6	7	8
ΔP_i^* , кПа	83,85	83,75	83,82	83,76	83,84	83,82	83,83	83,75.

Оцените погрешность показаний измерительной системы, вызванную отклонением напряжения питания. Как называют эту погрешность?

5.6. Определите абсолютное и относительное изменение показаний газового манометрического термометра, вызванное изменением барометрического давления от 100,45 кПа до 96,45 кПа. Шкала прибора $0...100$ °С, что соответствует изменению давления от 0,67 МПа до 0,92 МПа. Прибор показывает температуру 80 °С. Шкала прибора равномерная.

5.7. Для технического манометра класса точности 1,5 температура окружающей среды (20 ± 5) °С, рабочая температура $5 \div 50$ °С. Одинаковыми ли погрешностями будут характеризоваться показания прибора при температуре окружающей среды $t = 24$ °С, $t = 10$ °С и $t = 55$ °С при условии, что остальные влияющие величины имеют нормальные значения?

5.8. Одинаков ли предел допускаемой относительной погрешности измерений во всех точках шкалы автоматического потенциометра?

5.9. Было проведено однократное измерение термо-ЭДС автоматическим потенциометром класса точности 0,5 с НСХ L(ХК) и шкалой $200...600$ °С. Оцените максимальную относительную погрешность измерений термо-ЭДС потенциометром, если стрелка-указатель стоит на отметке 550 °С. Зависит ли относительная погрешность измерений от показаний прибора? Условия эксплуатации нормальные.

5.10. При градуировке расходомера в конечной точке шкалы объемным методом были получены следующие значения времени наполнения бака τ :

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
τ_i , с	97,5	94,8	94,7	95,2	94,9	95,3	91,1	95,2	95,3.

Предполагается, что эти значения времени распределены по закону Стьюдента. Объем бака $V = (507 \pm 0,1)$ л.

Каким образом оценить значение расхода в конечной точке шкалы расходомера и как определить погрешность этой оценки, если систематическая погрешность измерений времени отсутствует?

5.11. Сопротивление термопреобразователя сопротивления с НСХ 10П измеряется потенциометрическим методом. Оцените погрешность измерения температуры термопреобразователем сопротивления, если известно, что допускаемое отклонение от значений НСХ не должно превышать $0,3$ °С. Термопреобразователь сопротивления класса допуска B , измеряемая температура $t = 100$ °С. Сопротивление эталонной катушки составляет $R_k = (10 \pm 0,01)$ Ом.

Измерение падения напряжения осуществляется лабораторным потенциометром типа класса точности $0,05$. Допускаемое значение его основной погрешности, не превышает:

$$\Delta e \leq \pm(5 \cdot 10^{-4} U + 0,5 \cdot U_p),$$

где U – показание потенциометра, мВ;

U_p – цена деления шкалы реохорда, мВ.

Значение тока, протекающего через сопротивление эталонной катушки, равно 3 мА.

5.12. Каким образом оценить погрешность измерения температуры, если известно, что для медного термопреобразователя сопротивления $R_0 = 49,95$ Ом и $\alpha^* = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. НСХ определена для $R_0 = 50$ Ом и $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

5.13. При измерении расхода калориметрическим расходомером измерение мощности нагревателя производилось по показаниям амперметра и вольтметра. Оба эти прибора имеют класс точности $0,5$, работают в нормальных условиях и имеют соответственно шкалы $0 \dots 5$ А и $0 \dots 30$ В. Номинальные значения силы тока $3,5$ А и напряжения 24 В. Оцените погрешность, с которой производится измерение мощности.

5.14. Сопротивление медного термопреобразователя связано с температурой зависимостью $R_t = R_0(1 - \alpha t)$. Оцените возможные погрешности измерения температуры термопреобразователем сопротивления класса допуска C с НСХ 50М за счет отклонения ΔR_0 и $\Delta \alpha$ при 100 °С и 150 °С.

5.15. При исследовании теплоотдачи от трубы к воздуху коэффициент теплоотдачи рассчитывался по уравнению

$$\alpha_k = \frac{Q}{F(t_c - t_B)}$$

Количество теплоты Q , передаваемой трубой путем конвекции, определялось по мощности, потребляемой электронагревателем, как произведение сопротивления трубки R на квадрат силы тока I . Сила тока измерялась амперметром со шкалой 0...50 А класса точности 0,1, номинальное значение тока 42 А. Зависимость сопротивления трубы от температуры описывается выражением $R_t = R_0(1 - \alpha t)$. При $t = 0$ значение сопротивления $R_0 = 0,5$ Ом, $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Погрешность измерения сопротивления не превышает $\pm 0,2$ %. Площадь поверхности трубы F определялась по длине l рабочего участка и его диаметру d . Значение длины $l = (100 \pm 0,5)$ мм, диаметра $d = (10 \pm 0,01)$ мм. Температура стенки t_c измерялась стандартным термоэлектрическим преобразователем с НСХ L(XK). Термоэлектрический преобразователь подсоединяется к лабораторному потенциометру класса точности 0,05, а холодные концы его термостатируются. Номинальное значение температуры стенки 200 °С. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности, потенциометра определяется по уравнению:

$$\Delta e = \pm(5 \cdot 10^{-4} U + 0,5 \cdot U_p),$$

где U – показание потенциометра, мВ;

$U_p = 0,05$ мВ – цена деления шкалы реохорда.

Температура воздуха t_B измерялась вдали от трубы ртутным термометром повышенной точности со шкалой 100...150 °С и ценой деления 0,2 °С. Номинальное значение температуры воздуха равно 120 °С.

Оцените погрешность измерения коэффициента теплоотдачи и укажите возможные пути ее уменьшения. Погрешностями, связанными с методами измерения, пренебрегаем.

5.16. В результате проведенных измерений оказалось, что наиболее вероятное содержание кислорода в газовой смеси составляет 11,75 %. Доверительный интервал, погрешности измерения определялся для доверительной вероятности 0,683 и составил $\pm 0,5$ %. Определите границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0,95, если известно, что закон распределения погрешностей нормальный.

5.17. Погрешность измерения давления пара распределена по нормальному закону и состоит из систематической и случайной составляющих. Систематическая погрешность вызвана давлением столба жидкости в импульсной линии и завышает показания на 0,12 МПа. Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей равно $\pm 0,08$ МПа.

Найдите вероятность того, что отклонение измеренного значения от действительного не превышает по абсолютному значению 0,15 МПа.

5.18. Определите для задачи 5.17 вероятность того, что погрешность не превышает по абсолютному значению 0,15 МПа, полагая, что систематическая составляющая погрешности отсутствует.

5.19. Допускаемое отклонение температуры стали на выпуске из печи не должно превышать ± 10 °С от заданного значения. Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности $\sigma = 8$ °С. Кроме того, имеет место систематическая погрешность -6 °С, вызванная сдвигом стрелки прибора в сторону занижения. Определите вероятность, с которой результат измерения температуры уложится в заданный интервал ± 10 °С. Случайная погрешность распределена по нормальному закону.

5.20. Были произведены многократные измерения термо-ЭДС с целью определения закона распределения погрешности. Все результаты разбиты на 10 интервалов, границы которых и число приходящихся на каждый из них значений измеряемой величины приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

i	e_i , мВ	n_i	i	e_i , мВ	n_i
1	9,69-9,85	20	6	10,00-10,01	18
2	9,85-9,93	22	7	10,01-10,03	21
3	9,93-9,97	18	8	10,03-10,07	19
4	9,97-9,99	20	9	10,07-10,15	17
5	9,99-10,00	22	10	10,15-10,31	23

Постройте гистограмму статистического ряда и определите, соответствует ли она закону равномерной плотности.

5.21. Было произведено 844 измерения значения силы тока на выходе одного из нормирующих преобразователей, результаты были разбиты на 18 интервалов шириной $\Delta = 0,003$ мА и приведены в табл. 5.2.

Там же указано число измерений n_i в каждом интервале и границы интервалов в миллиамперах.

Таблица 5.2.

i	$I_i, \text{мА}$	n_i	i	$I_i, \text{мА}$	n_i	i	$I_i, \text{мА}$	n_i
1	4,983-4,986	5	7	5,001-5,004	77	13	5,019-5,022	55
2	4,986-4,989	8	8	5,004-5,007	92	14	5,022-5,025	42
3	4,989-4,992	16	9	5,007-5,010	98	15	5,025-5,028	25
4	4,992-4,995	27	10	5,010-5,013	100	16	5,028-5,031	15
5	4,995-4,998	40	11	5,013-5,016	90	17	5,031-5,034	10
6	4,998-5,001	59	12	5,016-5,019	80	18	5,034-5,037	5

Постройте гистограмму приведенного статистического ряда и произведите его выравнивание нормальным законом распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\tilde{x})^2}{2\sigma^2}\right].$$

5.22. Проверьте с помощью критерия согласия Колмогорова соответствие теоретического распределения опытному, приведенному в задаче 5.21.

5.23. С целью исследования закона распределения ошибки измерения концентрации кислорода газоанализатором было выполнено 315 измерений. Совокупность погрешностей представлена в виде статистического ряда в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

$\Delta C, \%$	\tilde{x}_i	n_i	p_i	$\Delta C, \%$	\tilde{x}_i	n_i	p_i
-0,50 ÷ -	-0,475	12	0,03810	0,00 ÷ 0,05	0,025	18	0,05714
-0,45 ÷ -	-0,425	19	0,06032	0,05 ÷ 0,10	0,075	19	0,06032
-0,40 ÷ -	-0,375	17	0,05397	0,10 ÷ 0,15	0,125	15	0,04762
-0,35 ÷ -	-0,325	15	0,04762	0,15 ÷ 0,20	0,175	16	0,05079
-0,30 ÷ -	-0,275	16	0,05079	0,20 ÷ 0,25	0,225	13	0,04127
-0,25 ÷ -	-0,225	14	0,04444	0,00 ÷ 0,05	0,275	17	0,05397
-0,20 ÷ -	-0,175	18	0,05714	0,00 ÷ 0,05	0,325	16	0,05079
-0,15 ÷ -	-0,125	12	0,03810	0,00 ÷ 0,05	0,375	16	0,05079

-0,10 ÷ -	-0,075	16	0,05079	0,00 ÷ 0,05	0,425	14	0,04444
-0,05 ÷ -	-0,025	13	0,04127	0,00 ÷ 0,05	0,475	19	0,06032

Произведите выравнивание статистического ряда с помощью закона равномерной плотности и проверьте согласованность теоретического и статистического распределений с помощью критерия χ^2 .

Доверительную вероятность того, что значение χ^2 , полученное по опытными данным, будет меньше соответствующего значения $(\chi^*)^2$ теоретического распределения, принять равной $p = 0,05$. Для этой вероятности при $k = 17$ $(\chi^*)^2/k = 0,51$, при $k = 18$ $(\chi^*)^2/k = 0,522$ и при $k = 19$ $(\chi^*)^2/k = 0,532$, где k – число степеней свободы.

5.24. Проведен ряд измерений температуры кипения воды в барометрическом термостате. Полученные результаты приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

i	$t_i, ^\circ\text{C}$	i	$t_i, ^\circ\text{C}$	i	$t_i, ^\circ\text{C}$	i	$t_i, ^\circ\text{C}$
1	98,6	4	97,8	7	97,9	10	98,2
2	97,8	5	98,4	8	98,0	11	98,3
3	98,1	6	98,3	9	98,1	12	98,3

Измерение барометрического давления не проводилось, предполагалось, что оно составляет 760 мм. рт. ст., а температура кипения при этом 100°C .

По полученным результатам дайте заключение, какая погрешность систематическая или случайная является определяющей и как ее уменьшить.

5.25. Определите границы доверительного интервала погрешности измерения температуры с вероятностью 0,95, если при большом числе измерений было получено, что $\bar{x}_i = 1072^\circ\text{C}$, а дисперсия $\tilde{D} = 64 (^\circ\text{C})^2$. Предполагается нормальный закон распределения погрешностей.

5.26. В результате большого числа измерений термо-ЭДС был определен доверительный интервал ($16,73 \text{ мВ} < \bar{x}_i < 17,27 \text{ мВ}$), с доверительной вероятностью 0,997. Определите среднюю квадратическую погрешность измерения термо-ЭДС в предположении нормального закона распределения погрешностей.

5.27. Определите 99 % доверительный интервал для температуры термоэлектрического преобразователя НСХ К(ХА), если при измерении были получены следующие результаты (в мВ): 31,56; 31,82; 31,73; 31,68; 31,49; 31,73; 31,74 и 31,72. Предполагается, что термо-ЭДС – случайная величина, распределена по закону Стьюдента.

5.28. Яркостная температура слитка металла, измеренная квази-монохроматическим пирометром в пяти различных точках, оказалась следующей (в °С): 975, 1005, 945, 950, 987. Полагаем, что действительная температура во всех точках одинакова. Разница в яркостных температурах вызвана систематической погрешностью за счет окислов на поверхности.

Оцените наиболее вероятное значение температуры слитка, а также доверительный интервал систематической погрешности, соответствующий доверительной вероятности $p = 0,9$, предполагая, что погрешности распределены по закону Стьюдента.

5.29. Для задачи 5.28 определите доверительный интервал для $p = 0,9$, если было произведено 10 измерений температуры слитка:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_i, ^\circ\text{C}$	975	1005	945	950	987	967	953	980	980	990.

5.30. По результатам 25 наблюдений был определён доверительный интервал отклонений измеряемого давления от наиболее вероятного его значения с доверительной вероятностью $p = 0,7$ и доверительным интервалом $I_{0,7} = 23,84 \div 24,37$ МПа. Определите доверительный интервал с доверительной вероятностью 0,95, полагая, что отклонения давления распределены по закону Стьюдента.

6. РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ

6.1. Для технического термометра можно определить только интервал, в котором находится действительное значение температуры: $(346 \pm 4) \text{ }^\circ\text{C}$ или $342 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$. Для лабораторного термометра известны значения поправок, поэтому по его показаниям может быть определена действительная температура

$$t_D = 352 + (-1) + (+0,5) = 351,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Отсюда легко заметить, что действительная погрешность технического термометра выходит за допускаемые пределы.

6.2. В рассматриваемом случае стрелка переместится с одной отметки шкалы на соседнюю при изменении входного напряжения на ΔU :

$$\Delta U = \frac{U_K - U_H}{N} = \frac{10 - (-10)}{50} = 0,4 \text{ мВ};$$

следовательно, цена деления $\Delta U = 0,4 \text{ мВ}$.

Если за изменение выходной величины прибора принять перемещение стрелки на один интервал, то легко заметить, что чувствительность S и цена деления K являются обратными величинами:

$$S = 1/K = 1/0,4 = 2,5 \text{ 1/мВ}.$$

6.3. Коэффициент преобразования S подобен чувствительности, но чувствительность – это характеристика измерительного прибора, а коэффициент преобразования – характеристика измерительного преобразователя.

Входным сигналом термопреобразователя сопротивления является температура, а выходным сигналом – электрическое сопротивление. Коэффициент преобразования для медного термопреобразователя сопротивления

$$S_M = dR/dt = R_0 \cdot \alpha;$$

для платинового термометра

$$S_{II} = dR/dt = R_0(A + Bt).$$

Следовательно, для медного термопреобразователя сопротивления коэффициент преобразования не зависит от температуры, а для платинового – изменяется с изменением температуры.

6.4. Для учета систематической погрешности все результаты, считанные с диаграммной ленты в градусах, необходимо перевести по НСХ в милливольты, прибавить поправку в милливольтгах, а затем результат снова перевести в градусы.

Смещение стрелки и пера от 0 до 10 °С соответствует для ХК НСХ изменению термо-ЭДС на 0,65 мВ. По диаграммной ленте отсчитано 430 °С, термо-ЭДС для 430 °С составляет 34,12 мВ, с учетом поправки $34,12 + (-0,65) = 33,47$ мВ. Определяем значение температуры $t = 422,75$ °С.

6.5. Определим оценку наиболее вероятного значения перепада давления, соответствующего конечной точке шкалы прибора, при нормальных условиях [формула (4.7)]:

$$\Delta \tilde{P} = \frac{84,15 + 84,06 + 83,8 + 83,9 + 83,94 + 84,1 + 84,02 + 84,03}{8} = \frac{672}{8} = 84 \text{ кПа.}$$

Найдем оценку наиболее вероятного значения перепада давления при напряжении питания, составляющем 110 % $U_{ном}$:

$$\Delta \tilde{P}^* = \frac{83,85 + 83,73 + 83,82 + 83,76 + 83,84 + 83,82 + 83,83 + 83,75}{8} = \frac{670,4}{8} = 83,8 \text{ кПа}$$

Таким образом, можно найти оценку наиболее вероятного значения погрешности в конечной точке шкалы, вызванной изменением напряжений питания измерительной системы:

$$\tilde{\Delta} = \Delta \tilde{P}^* - \Delta P^* = 83,8 - 84 = -0,2 \text{ кПа.}$$

Эта погрешность называется дополнительной, так как она вызвана отклонением одной из влияющих величин (напряжения питания) от нормального значения.

6.6. Изменение барометрического давления составляет 4 кПа. Так как манометрический термометр измеряет избыточное давление, то показания прибора будут завышены на 4 кПа. Шкала газового термометра равномерная. По давлению диапазон шкалы составляет 250 кПа. Таким образом, показания будут завышены на $100 \cdot 4 / 250 = 1,6$ °С. Абсолютная погрешность на отметке 80 °С:

$$\delta = \frac{+1,6}{80} 100 = +2 \text{ \%}.$$

6.7. При температуре 24 °С будет иметь место основная погрешность, так как нормальные условия работы прибора (20±5) °С. При температуре 10°С, кроме основной погрешности будет иметь место дополнительное изменение показаний прибора от изменения температуры окружающей среды. Погрешность при температуре 55 °С не нормируется, так как она выходит за пределы рабочей области температур.

6.8. Нет. Для всех точек шкалы одинаков предел основной допускаемой абсолютной погрешности Δ_0 , определяемый классом точности средств измерений и диапазоном измерения. Предел допускаемой относительной погрешности $\delta_0 = \Delta_0 / x_i$ зависит от значения измеряемой величины x_i . Чем меньше показания прибора по шкале, тем больше относительная погрешность. Поэтому диапазон измерения прибора нужно выбирать таким образом, чтобы измеряемая величина находилась в конце шкалы.

6.9. Если кроме класса точности потенциометра нет никаких других метрологических характеристик, то можно оценить только пределы допускаемой погрешности. Предел допускаемой основной погрешности в нашем случае определяется через класс $K = \gamma \%$ и диапазон измерения $x_K - x_H$ потенциометра:

$$\Delta_0 = \frac{x_K - x_H}{100} \cdot \gamma.$$

Для потенциометров погрешность, выраженная в милливольтгах, будет равна:

$$\Delta_0 = \frac{49,11 - 14,59}{100} \cdot 0,5 = 0,1726 \text{ мВ},$$

где $x_K = E(600 \text{ °C}, 0 \text{ °C}) = 49,11 \text{ мВ}$;

$x_H = E(200 \text{ °C}, 0 \text{ °C}) = 14,59 \text{ мВ}$.

Предел относительной погрешности на отметке 550 °С

$$\delta_0 = \frac{\Delta_0}{E(550 \text{ °C}, 0 \text{ °C})} \cdot 100 = \frac{0,1726}{44,71} \cdot 100 = 0,386 \%.$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности одинаков, для всех отметок шкалы, тогда как предел относительной погрешности увеличивается к началу шкалы. Например, на отметке 300 °С.

$$\delta_0 = \frac{0,1726}{22,88} \cdot 100 = 0,754 \%.$$

Поэтому диапазон измерения прибора нужно выбирать таким образом, чтобы измеряемая величина находилась в конечной части шкалы.

6.10. Найдем оценку наиболее вероятного значения времени наполнения бака [формула (1.3)]

$$\tau = \frac{94,5 + 94,8 + 94,7 + 95,2 + 94,9 + 95,3 + 95,1 + 95,2 + 95,3}{9} = 95 \text{ с.}$$

Половина ширины доверительного интервала для распределения Стьюдента определяется по формуле (1.7).

$$\varepsilon_p = 3,36 \sqrt{\frac{0,0825}{9}} = 0,32 \text{ с.}$$

Расход определяется по формуле $Q = V / \tau$. Измерения объема V и времени τ являются взаимонезависимыми; поэтому погрешность градуировки расходомера вычисляется как результат косвенного измерения по формуле (1.1):

$$\Delta = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \Delta \tau\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{95}\right)^2 + \left(\frac{507}{95} \cdot 0,32\right)^2} = \pm 0,018 \text{ мВ.}$$

6.11. Сопротивление термопреобразователя сопротивления

$$R_t = R_0 \cdot \frac{U_t}{U_0}.$$

Падение напряжения на эталонной катушке составляет:

$$U_0 = 10 \cdot 3 = 30 \text{ мВ.}$$

Сопротивление термопреобразователя сопротивления при $t = 100$ °С (прил. А.7) $R_{100} = 13,9113$ Ом. Падение напряжения на термопреобразователе сопротивления $U_t = 13,9113 \cdot 3 = 41,73$ мВ.

Оценим предел допускаемой погрешности определения сопротивления термопреобразователя по формуле (4.12)

$$\frac{\Delta R_t}{R_t} \leq \sqrt{\left(\frac{\Delta R_0}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_t}{U_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2}.$$

Тогда $\Delta R_0 / R_0 \leq \pm 0,01/10 = 0,001$ (по условию).

ΔU_t подсчитывается по формуле:

$$\Delta U_t = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 41,73 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,0459 \text{ мВ;}$$

отношение $\Delta U_t / U_t \leq \pm 0,0011$, или $\pm 0,11\%$.

Величина равна: $\Delta U_0 \leq \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 30 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,04 \text{ мВ}$;

отношение $\Delta U_0 / U_0 \leq \pm 0,0013$, или $\pm 0,13\%$.

Значение $\Delta R_t / R_t \leq \pm \sqrt{(0,001)^2 + (0,0011)^2 + (0,0013)^2} = 0,00197$,

откуда $\Delta R_t \leq 0,0274 \text{ Ом}$.

Точность измерения сопротивления достаточно высока, однако изменение сопротивления термопреобразователя при изменении температуры от 0 до 100 °С также невелико и составляет 3,9113 Ом, поэтому относительная погрешность измерения сопротивления уже составляет $\delta = \Delta R_t / (R_{100} - R_0) \cdot 100 = 0,0274 / 3,9113 \cdot 100 = 0,7\%$, что соответствует $\Delta t_R \leq 0,712 \text{ °С}$.

Оценим предел допускаемой суммарной погрешности определения температуры с учетом погрешности термопреобразователя $\Delta t_T = 0,3 \text{ °С}$ (по условию):

$$\Delta t_{\Sigma} \leq \sqrt{\Delta t_T^2 + \Delta t_R^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,712^2} = \pm 0,773 \text{ °С}.$$

Таким образом, суммарная погрешность измерения температуры $\Delta t_{\Sigma} \leq \pm 0,773 \text{ °С}$.

6.12. Погрешность, возникающая в результате того, что $R_0^* = 49,95 \text{ Ом}$ $\alpha^* = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, будет систематической. Температура, определенная по НСХ, $t^* = (R_t^* - R_0) / R_0 \cdot \alpha$.

Действительная температура $t = (R_t^* - R_0^*) / (R_0^* \cdot \alpha^*)$.

Погрешность к показаниям, определенным по НСХ,

$$t - t^* = \frac{R_t^* - R_0^*}{R_0^* \cdot \alpha^*} - \frac{R_t^* - R_0}{R_0 \cdot \alpha}.$$

Для $R_t^* = 71,4 \text{ Ом}$ и $t^* = 100 \text{ °С}$

$$t = 100 + \frac{71,40 - 49,95}{49,95 \cdot 4,25 \cdot 10^{-3}} - \frac{71,40 - 50,00}{50,00 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3}} = 101,04 \text{ °С}.$$

Погрешность имеет постоянный знак, и поэтому мы ее учитываем, введя поправку в измеренное значение температуры. В предыдущей задаче можно было определить интервал, в котором находится действительная температура, но вводить поправку было нельзя, поскольку знак и значение погрешности были неизвестны.

6.13. Погрешность измерения мощности ΔW оценивается как погрешность косвенного измерения [формула (4.12)]:

$$\Delta W = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial I} \Delta I\right)^2}.$$

В связи с отсутствием каких-либо других метрологических характеристик средств измерения, кроме класса точности, мы можем оценить только пределы допускаемых значений погрешности в соответствии с классом точности и шкалой прибора

$$\Delta U_0 = \frac{U_K - U_H}{100} \cdot \gamma = \frac{30 - 0}{100} \cdot 0,5 = \pm 0,15 \text{ В};$$

$$\Delta I_0 = \frac{I_K - I_H}{100} \cdot \gamma = \frac{5 - 0}{100} \cdot 0,5 = \pm 0,025 \text{ А}.$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности изменения мощности

$$\Delta W = \sqrt{(3,5 \cdot 0,15)^2 + (24 \cdot 0,025)^2} = \pm 0,795 \text{ Вт}.$$

Предел допускаемой относительной погрешности измерения мощности

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{0,795}{24 \cdot 3,5} \cdot 100 = \pm 0,95 \text{ \%}.$$

6.14. Определим коэффициент преобразования термопреобразователя сопротивления:

$$S = \Delta R_t / \Delta t = R_0 \alpha = 50 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3} = 0,214 \text{ Ом / К}.$$

Возможную погрешность измерения температуры оцениваем как погрешность косвенного измерения по формуле (4.12):

$$\Delta R_t = \sqrt{\left(\frac{\partial R_t}{\partial R_0} \Delta R_0\right)^2 + \left(\frac{\partial R_t}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2} = \sqrt{(1 + \alpha t)^2 \Delta R_0^2 + (R_0 \cdot t \cdot \Delta \alpha)^2}.$$

Погрешность в градусах определяется как $\Delta t = \Delta R_t / S$.

$$\text{При } 100 \text{ }^\circ\text{C } \Delta R_t = \sqrt{(1 + 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot 100)^2 \cdot 0,1^2 + (50 \cdot 100 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3})^2} = \pm 0,174 \text{ Ом}.$$

$$\Delta t = \pm 0,813 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\text{При } 150 \text{ }^\circ\text{C } \Delta R_t = \sqrt{(1 + 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot 150)^2 \cdot 0,1^2 + (50 \cdot 150 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3})^2} = \pm 0,197 \text{ Ом}.$$

$$\Delta t = \pm 0,922 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, пределы допускаемых значений погрешности медного термопреобразователя сопротивления, обусловленные отклонениями R_0 и α от номинальных значений, составляют: при $t=100$ °С $\Delta t = \pm 0,813$ °С; при $t=150$ °С $\Delta t = \pm 0,922$ °С.

6.15. В связи с тем, что все измеряемые параметры определяются с допускаемыми отклонениями, которые можно считать предельными значениями погрешности, и сам коэффициент теплоотдачи может быть оценен с каким-то пределом допускаемой погрешности. Коэффициент теплоотдачи определяется как результат косвенных измерений параметров Q, F, t_c, t_B . Поэтому предел допускаемой абсолютной погрешности определения коэффициента теплоотдачи может быть подсчитан из выражения [формула (4.12)]

$$\Delta\alpha_K = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha_K}{\partial Q}\Delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_K}{\partial F}\Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_K}{\partial t_c}\Delta t_c\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_K}{\partial t_B}\Delta t_B\right)^2}.$$

Количество теплоты Q определяется по мощности электронагревателя $Q = I^2 \cdot R$. Таким образом, Q в свою очередь является результатом косвенных измерений I и R . Ток измерялся амперметром класса точности 0,1 со шкалой 0...50 А. Основная погрешность измерения силы тока не превышала $\pm 0,05$ А. Температура трубки измерялась стандартным термоэлектрическим преобразователем с НСХ L(ХК) в комплекте с потенциометром ПП-63 класса 0,05. Допускаемое отклонение термо-ЭДС термоэлектрического преобразователем ТХК от градуировочных значений при $t \leq 300$ °С составляет $\Delta e_T = \pm 0,2$ мВ. Предел допускаемой погрешности потенциометра

$$\Delta e_{II} = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 14,66 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,032 \text{ мВ}.$$

$$U = E(200 \text{ } ^\circ\text{C}, 0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 14,66 \text{ мВ}.$$

Оценим предел суммарной погрешности Δe_Σ измерения температуры в предположении, что погрешности термоэлектрического преобразователя и потенциометра являются независимыми величинами. Тогда

$$\Delta e_\Sigma = \sqrt{\Delta e_T^2 + \Delta e_{II}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,032^2} = \pm 0,203 \text{ мВ},$$

что соответствует $\Delta t = \pm 2,9$ °С или $\Delta t / \Delta t_c = \pm 0,0145$. Сопротивление трубки R определялось по измеренной температуре в соответствии с выражением:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t).$$

Погрешность определения значения R обусловлена погрешностью прибора, измеряющего сопротивление, и погрешностью измерения температуры. Составляющая погрешности, обусловленная погрешностью прибора, не превышает

$$\Delta R_{II} = \pm 0,002 \cdot R_0(1 + \alpha \cdot t);$$

при $R_0 = 0,5$ Ом, $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $t = 200$ °С

$$\Delta R_{II} = \pm 0,0018 \text{ Ом}.$$

Составляющая погрешности, обусловленная погрешностью измерения температуры, не превышает

$$\Delta R_t = \pm R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t = \pm 0,5 \cdot 0,004 \cdot 2,9 = \pm 0,0058 \text{ Ом}.$$

Оценим предел суммарной погрешности определения сопротивления нагреваемой трубки по ее температуре, полагая, что погрешность градуировки трубки и погрешность измерения температуры – независимые величины:

$$\Delta R_{\Sigma} = \sqrt{\Delta R_{II}^2 + \Delta R_t^2} = \pm \sqrt{0,0018^2 + 0,0058^2} = \pm 0,00606 \text{ Ом}.$$

или в относительных величинах $\Delta R_{\Sigma} / R = \pm 0,00673$.

Теперь можно оценить погрешность определения количества теплоты, передаваемой от трубки к воздуху,

$$Q = I^2 \cdot R = 42^2 \cdot 0,9 = 1588 \text{ Вт},$$

откуда

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial R} \Delta R\right)^2} = \pm \sqrt{(2 \cdot 0,9 \cdot 42 \cdot 0,05)^2 + (42^2 \cdot 0,00606)^2} = \pm 11,34 \text{ Вт}$$

Оценим предел погрешности определения поверхности теплообмена F :

$$F = \pi dl = 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,1 = 0,00314 \text{ м}^2;$$

$$\begin{aligned} \Delta F &= \pm \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial l} \Delta l\right)^2} = \\ &= \pm \sqrt{(3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,0001)^2 + (3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,0005)^2} = \pm 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Оценим погрешность измерения температуры воздуха по характеристикам стеклянного термометра. Термометр с ценой деления 0,2 и со шкалой 100...150 °С имеет предел допускаемой погрешности $\pm 0,5$ °С. Таким образом, $\Delta t_B = \pm 0,5$ °С или $\Delta t_B / t_B = \pm 0,00416$. Для оценки предела погрешности определения коэффициента теплоотдачи воспользуемся формулой для определения абсолютной погрешности. Для дальнейших вычислений определим производные:

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial Q} = \frac{1}{F(t_C - t_B)} = \frac{1}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 80} = 3,981 / (\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial F} = \frac{Q}{F^2(t_C - t_B)} = \frac{1588}{(3,14 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 80} = 2,013 \cdot 10^6 \text{ Вт} / (\text{м}^4 \cdot \text{К});$$

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial t_C} = \frac{Q}{F(t_C - t_B)^2} = \frac{1588}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 80^2} = 79,02 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^2);$$

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial t_B} = \frac{Q}{F(t_C - t_B)^2} = \frac{1588}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 80^2} = 79,02 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^2);$$

$$\Delta \alpha_K = \sqrt{(3,98 \cdot 11,34)^2 + (2,013 \cdot 16)^2 + (79,02 \cdot 2,9)^2 + (79,02 \cdot 0,5)^2} = \\ = \pm 239,06 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Расчетный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_K = \frac{Q}{F(t_C - t_B)} = \frac{1588}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot (200 - 120)} = 6321,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Предел допускаемой относительной погрешности

$$\delta_0 = \pm \frac{\Delta \alpha_K}{\alpha_K} \cdot 100 = \pm \frac{239,06}{6321,7} \cdot 100 = \pm 3,78 \%.$$

Из решения видно, что наибольшая составляющая погрешности приходится на погрешность измерения температуры поверхности трубки. В самой погрешности измерения температуры определяющее значение принадлежит погрешности термоэлектрического преобразователя. Если предположить, что в результате индивидуальной градуировки погрешность измерительного комплекта для измерения температуры удалось бы довести до значения, не превышающего $\pm 0,5$ °С, то предел допускаемой абсолютной погрешности измерения коэффициента теплоотдачи уменьшился бы до

$$\Delta \alpha_K = \pm \sqrt{2037 + 1037 + 1561 + 1561} = \pm 78,72 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

или

$$\delta_0 = \pm \frac{78,72}{6321,7} \cdot 100 = \pm 1,24 \%$$

В результате расчетов получен предел допускаемой погрешности измерения коэффициента теплопередачи. Однако мы не знаем значения погрешности. Известно, что каждая из составляющих погрешности не выходит за пределы допускаемых, но равна ли погрешность пределу, или в несколько раз меньше его, неизвестно. Для оценки погрешности необходимо знать для каждой ее составляющей наиболее вероятные значения с соответствующими доверительными интервалами. Эти значения могут быть получены путем многократных измерений и дальнейшей статистической обработки результатов. Повышение точности определения коэффициента теплоотдачи возможно за счет использования средств измерения более высокого класса точности. В этом случае мы оценим значение предела допускаемой погрешности, которое для средств измерения более высокого класса точности естественно будет меньше, а соответственно и погрешность будет лежать в более узком интервале. Следует отметить, что в расчете не учтен ряд факторов, влияющих на погрешности, поэтому реальные погрешности (пределы допускаемых значений) будут больше.

6.16. При нормальном законе распределения при доверительной вероятности 0,683 доверительный интервал $\varepsilon = \pm\sigma$. При доверительной вероятности 0,95 доверительный интервал $\varepsilon = \pm 2\sigma$. Таким образом, числовое значение доверительного интервала для доверительной вероятности 0,95 составит $2 \cdot 0,5 = \pm 1 \% O_2$. Границы доверительного интервала соответственно будут

$$I = (11,75 \pm 1,0) \% O_2, \text{ или } (10,75 \div 12,75) \% O_2.$$

6.17. Для решения задачи удобнее представить суммарную погрешность в виде случайной величины, распределенной по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,08$ МПа и математическим ожиданием x_0 , равным систематической погрешности $x_0 = 0,12$ МПа. Вероятность нахождения погрешности в интервале $\Delta_H < \Delta < \Delta_B$ можно оценить с помощью нормальной функции распределения [4]:

$$\begin{aligned}
\text{Вер}(\Delta_H < \Delta < \Delta_B) &= \Phi^* \left(\frac{\Delta_B - x_0}{\sigma} \right) - \Phi^* \left(\frac{\Delta_H - x_0}{\sigma} \right); \\
\text{Вер}(-0,15 < \Delta < +0,15) &= \Phi^* \left(\frac{0,15 - 0,12}{0,08} \right) - \Phi^* \left(\frac{-0,15 - 0,12}{0,08} \right) = \\
&= 0,64615 - 0,00035 = 0,6458.
\end{aligned}$$

Таким образом, вероятность того, что отклонение измеренного значения от действительного не превышает 0,15 МПа, составляет 64,58%.

6.18. Ход решения аналогичен 6.17:

$$\text{Вер}(-0,15 < \Delta < +0,15) = \Phi^* \left(\frac{0,15 - 0}{0,08} \right) - \Phi^* \left(\frac{-0,15 - 0}{0,08} \right) = 0,9696 - 0,0304 = 0,9392.$$

т. е. вероятность того, что измеренное значение не будет отличаться от действительного более чем на 0,15 МПа, составляет 93,9 %. Рассмотренная задача показывает, целесообразность устранения систематической погрешности.

6.19. По условию погрешность измерений температуры распределена по нормальному закону с параметрами $x_0 = -6$ °С и $\sigma = 8$ °С. Заданный интервал $-10 < \Delta < +10$. Для определения вероятности используем нормальную функцию распределения

$$\text{Вер}(-10 < \Delta < +10) = \Phi^* \left(\frac{10 - 6}{8} \right) - \Phi^* \left(\frac{-10 - 6}{8} \right) = 0,9772 - 0,3085 = 0,6687,$$

или 66,87 %.

Такая вероятность может оказаться недостаточной. Для ее повышения необходимо устранить смещение стрелки, после чего вероятность будет

$$\text{Вер}(-10 < \Delta < +10) = \Phi^* \left(\frac{10 - 0}{8} \right) - \Phi^* \left(\frac{-10 - 0}{8} \right) = 0,8944 - 0,1056 = 0,7888,$$

или 78,88 %.

6.20. Не соответствует. На первый взгляд, согласно табл. 6.1, может показаться, что статистический ряд действительно выравнивается законом равномерной плотности, поскольку число значений во всех интервалах примерно одинаково.

Таблица 6.1.

i	$\Delta_i, мВ$	p_i	l_i	i	$\Delta_i, мВ$	p_i	l_i
1	0,16	0,10	0,625	6	0,01	0,090	9,0000
2	0,08	0,11	1,375	7	0,02	0,105	5,2500
3	0,04	0,09	2,250	8	0,04	0,095	2,3750
4	0,02	0,10	5,000	9	0,08	0,085	1,0625
5	0,01	0,11	11,000	10	0,16	0,115	0,7188

Однако при построении гистограмм следует учитывать не только число значений в каждом интервале, но и их ширину, а в предложенной задаче ширина различная. Для построения гистограммы по оси абсцисс откладываются интервалы и на каждом интервале, как на основании, строится прямоугольник. Площадь каждого прямоугольника равна частоте p_i данного интервала (частота p_i равна отношению количества значений в интервале n_i к общему числу значений n в выборке $p_i = n_i / n$). Следовательно, для построения гистограммы нужно частоту p_i каждого интервала разделить на его ширину Δ_i и полученное число взять в качестве высоты прямоугольника l_i . В табл. 6.1 приведены значения высот. Общее число наблюдений $n = 200$.

Вид гистограммы (рис. 6.1) показывает, что предложенное экспериментальное распределение не может описываться законом равномерной плотности.

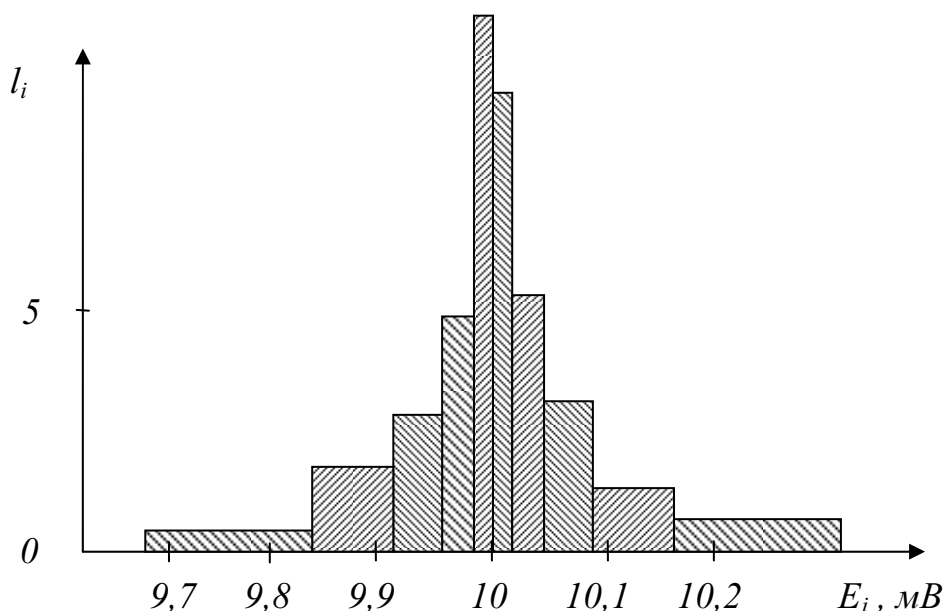


Рис. 6.1. Гистограмма к задаче 6.20

6.21. Задача выравнивания заключается в том, чтобы подобрать теоретическую кривую распределения, наилучшим образом описывающую экспериментальное статистическое распределение. Например, метод моментов заключается в подборе нескольких важнейших числовых характеристик (моментов) теоретического распределения, равных соответствующим моментам экспериментального распределения. Если для выравнивания используется нормальный закон, то такими числовыми характеристиками являются математическое ожидание x_i и дисперсия D , которые должны быть равны соответствующим статистическим характеристикам \tilde{x} и \tilde{D} . При большом числе измерений среднее значение можно вычислить по приближенной формуле

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^k x_i p_i,$$

где k – число разрядов (в нашем случае $k = 18$);

p_i – частота i -го разряда, представляющая отношение числа измерений n_i в данном интервале к общему числу измерений n (в нашем случае $n = 844$);

x_i – представитель i -го разряда (обычно принимается значение, соответствующее середине интервала).

Для данного случая получим $\tilde{x} = 5,01$ мА. Статистическую дисперсию \tilde{D} вычисляем по формуле

$$\tilde{D} = \sum_{i=1}^k (x_i - \tilde{x})^2 p_i.$$

После вычисления получим $\tilde{D} = 0,0001016$ (мА)².

Таким образом, параметры нормального закона будут

$$x_0 = 5,01 \text{ мА} \text{ и } \sigma = \sqrt{\tilde{D}} = 0,01008 \text{ мА},$$

а уравнение нормального закона, примет вид

$$f(x) = \frac{1}{0,01008\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - 5,01)^2}{2 \cdot 0,01008^2}\right].$$

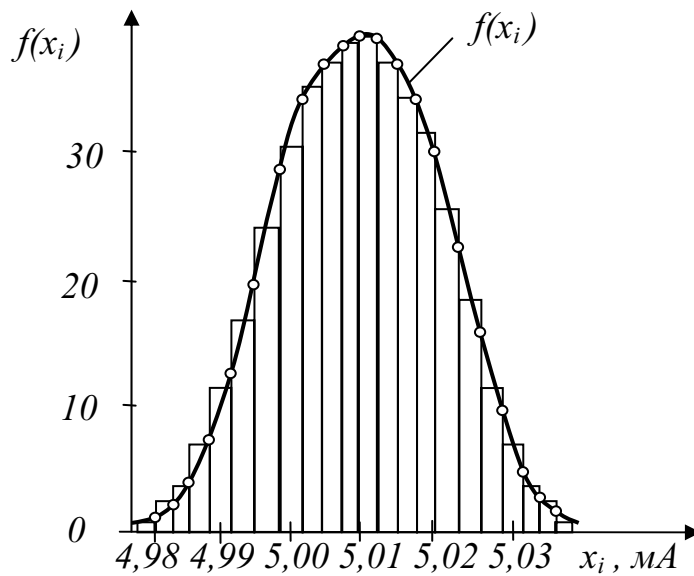


Рис. 6.2. Гистограмма и выравнивающая ее кривая распределения

Гистограмма и выравнивающая ее кривая распределения представлены на рис. 6.2. При построении гистограммы следует иметь в виду, что составляющие ее прямоугольники имеют основанием интервал Δ_i , а площадь их равна частоте разряда p_i , т. е. высота i -го прямоугольника $l_i = p_i / \Delta_i$. Теоретическую кривую распределения удобно строить путем вычисления значений на границах интервалов. Определяются значения аргумента x'_i , для границ интервалов

$$x'_i = \frac{x_i - x_0}{\sigma} = \frac{x_i - 5,01}{0,01008}.$$

По таблицам [4] определяются значения функции для соответствующих значений x'_i

$$f^*(x'_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x'_i)^2}{2}\right],$$

после чего определяются значения плотности распределения x_i на границах интервалов

$$f(x_i) = \frac{f^*(x'_i)}{\sigma}.$$

Все результаты вычислений приведены в табл. 6.2 и 6.3.

Таблица 6.2.

$I_i, \text{мА}$	p_i	l_i	$I_i, \text{мА}$	p_i	l_i
4,983–4,986	0,0059	1,97	5,010–5,013	0,1185	39,07
4,986–4,989	0,0095	3,17	5,013–5,016	0,1066	35,53
4,989–4,992	0,0190	6,33	5,016–5,019	0,0948	31,60
4,992–4,995	0,0320	10,67	5,019–5,022	0,0651	21,70
4,995–4,998	0,0474	15,80	5,022–5,025	0,0498	16,60
4,988–5,001	0,0699	23,30	5,025–5,028	0,0296	9,87
5,001–5,004	0,0912	30,40	5,028–5,031	0,0178	5,93
5,004–5,007	0,1090	36,33	5,031–5,034	0,0118	3,93
5,007–5,010	0,1161	38,70	5,034–5,037	0,0059	1,97

Таблица 6.3.

x_i	x'_i	$f^*(x_i)$	$\frac{f^*(x'_i)}{\sigma}$	x_i	x'_i	$f^*(x_i)$	$\frac{f^*(x'_i)}{\sigma}$
4,983	-2,680	0,0110	1,09	5,013	0,298	0,298	37,90
4,986	-2,380	0,0235	2,33	5,016	0,596	0,596	33,20
4,989	-2,080	0,0459	4,55	5,019	0,890	0,890	26,70
4,992	-1,790	0,0804	7,98	5,022	1,190	1,190	19,50
4,955	-1,490	0,1315	13,05	5,025	1,490	1,490	13,05
4,998	-1,190	0,1965	19,50	5,028	1,790	1,790	7,98
5,001	-0,890	0,2685	26,70	5,031	2,080	2,080	4,55
5,004	-0,596	0,3340	33,20	5,034	2,380	2,380	2,33
5,007	-0,298	0,3816	37,90	5,037	2,680	2,680	1,09
5,010	0	0,3989	39,60				

Из рис. 6.2. видно, что теоретическая кривая распределения сохраняет в основном особенности статистического распределения. Количественная оценка соответствия теоретического распределения экспериментальному производится с помощью специальных критериев согласия.

6.22. Как указывалось выше, правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим регламентированы [6]. При использовании критерия Колмогорова задача решается следующим образом.

Таблица 6.4.

x_i	$F_n(x_i)$	$F(x_i)$	K_i	x_i	$F_n(x_i)$	$F(x_i)$	K_i
4,983	0	0,0037	0,0037	5,013	0,6186	0,6171	0,0014
4,986	0,0058	0,0087	0,0028	5,016	0,7251	0,7244	0,0007
4,989	0,0154	0,0189	0,0035	5,019	0,8199	0,8133	0,0063
4,992	0,0344	0,0367	0,0023	5,022	0,8850	0,8830	0,0020
4,955	0,0664	0,0681	0,0017	5,025	0,9348	0,9319	0,0029
4,998	0,1138	0,1170	0,0032	5,028	0,9644	0,9633	0,0011
5,001	0,1837	0,1867	0,0030	5,031	0,9822	0,9812	0,0010
5,004	0,2749	0,2756	0,0007	5,034	0,9940	0,9913	0,0027
5,007	0,3839	0,3827	0,0012	5,037	0,9999	0,9963	0,0036
5,010	0,5000	0,5000	0,0000				

Функций $F_n(x_i)$ на границе интервала определяют как накопленную сумму частот всех интервалов, стоящих на гистограмме левее этой границы:

$$F_n(x_i) = \sum_1^i p_i.$$

Значения $F_n(x_i)$ на границах интервалов приведены в табл. 6.4. Значения теоретической функции распределения $F(x_i)$ определяются с помощью нормальной функции распределения

$$F(x_i) = \Phi^* \left(\frac{x_i - x_0}{\sigma} \right).$$

Пользуясь значениями x'_i (см. 6.21), определяют $F(x_i)$ и $K_i = |F_n(x_i) - F(x_i)|$ на границах интервалов. Все эти значения приведены в табл. 6.4. Максимальный $K = 0,0063$, откуда

$$\lambda = K\sqrt{n} = 0,0063\sqrt{844} = 0,183.$$

Величина $\lambda = 0,183$ вписывается в любые границы для доверительной вероятности, большей 0,01. Поэтому согласие опытного и теоретического распределения считается хорошим. При использовании таблиц [6] следует помнить, что чем меньше λ^* , при которой выполняется неравенство $\lambda \leq \lambda^*$, тем лучше совпадение теоретического и опытного распределения.

6.23. Закон равномерной плотности определяется выражением [4]

$$f(x) = \begin{cases} c & \text{при } \alpha < x < \beta; \\ 0 & \text{при } x < \alpha \text{ или } x > \beta, \end{cases}$$

где $c = \frac{1}{\beta - \alpha}$.

Математическое ожидание и дисперсия подсчитываются по формулам

$$x_0 = \frac{\alpha + \beta}{2}; \quad D = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12}.$$

При выравнивании следует выбрать α и β таким образом, чтобы x_0 и D были равны статистическому среднему \tilde{x} и статистической дисперсии \tilde{D} . В нашем случае

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^{20} x_i p_i = 0,005;$$

$$\tilde{D} = \sum_{i=1}^{20} (x_i - \tilde{x})^2 p_i = 0,09957.$$

Следовательно, $\frac{\alpha + \beta}{2} = 0,005$; $\frac{(\beta - \alpha)^2}{12} = 0,09957$, откуда $\alpha = -0,5415$ и $\beta = 0,5515$.

Таким образом, $f(x) = \frac{1}{\beta - \alpha} = \frac{1}{1,093} = 0,915$.

На рис. 6.3 представлены гистограмма и выравнивающий ее закон равномерной плотности $f(x)$. Для проверки соответствия опытного распределения теоретическому используем критерий χ^2 . Для этого вычисляем значение критерия χ^2 [формула (4.15)]. Для закона равномерной плотности при одинаковых интервалах вероятность попадания p_i будет одинакова для всех интервалов:

$$np_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\beta - \alpha} \cdot n = \frac{0,05}{1,093} \cdot 315 = 14,41;$$

$$\begin{aligned} \chi^2 &= 2 \frac{(12 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(13 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(14 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(15 - 14,41)^2}{14,41} + \\ &+ 2 \frac{(16 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(17 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(18 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(19 - 14,41)^2}{14,41} = \\ &= 7,1485. \end{aligned}$$

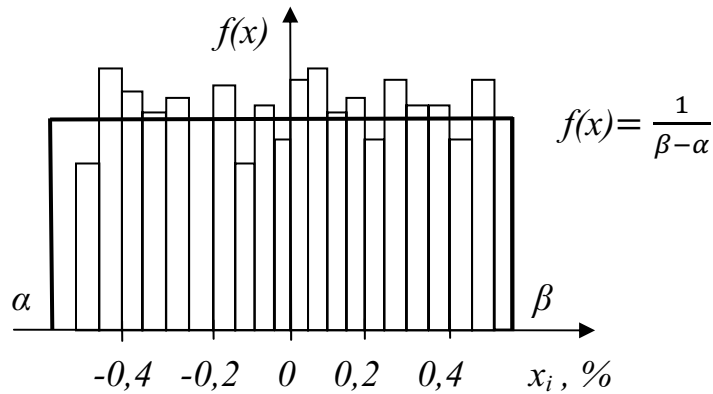


Рис. 6.3. Гистограмма и выравнивающий ее закон равномерной плотности

Определим число степеней свободы S . Оно определяется как число интервалов минус число наложенных связей. В нашем случае число наложенных связей равно трем.

Первая сумма частот равна единице:

$$\sum_1^i p_i = 1;$$

вторая – теоретическое и статистическое (экспериментальное) среднее значения должны быть равны:

$$\sum_1^i x_i p_i = x_0;$$

третья – теоретическая и статистическая дисперсия должны быть равны:

$$D = \sum_{i=1}^k (x_i - \tilde{x})^2 p_i.$$

Следовательно, в нашем случае число степеней свободы $s = 20 - 3 = 17$.

Вычисляем $(\chi^*)^2 = 0,51 \cdot 17 = 8,67$. Так как $\chi^2 < (\chi^*)^2$, то гипотеза о согласовании теоретического и экспериментального распределений считается правдоподобной.

6.24. Проведем оценку наиболее вероятного значения измеряемой величины и дисперсии [формулы (4.7) и (4.10)]:

$$x_0 = \frac{98,6 + 97,8 + 98,1 + 97,8 + 98,4 + 98,3 + 97,9 + 98,0 + 98,1 + 98,2 + 98,3 + 98,3}{12} = 98,15 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tilde{D} = \frac{0,45^2 + 0,35^2 + 0,05^2 + 0,35^2 + 0,25^2 + 0,15^2 + 0,25^2 + 0,15 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,15^2 + 0,15^2}{11} = 0,061 \text{ } (^{\circ}\text{C})^2.$$

Определим среднюю квадратическую погрешность единичного результата измерения

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{D}} = 0,247 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Очевидно, что определяющей является систематическая погрешность

$$\Delta_c = 100 - 98,15 = 1,85 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По-видимому, отклонение температуры кипения от $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ вызвано отклонением барометрического давления от 760 мм рт. ст. Случайная составляющая погрешности на порядок меньше систематической.

6.25. Среднее квадратическое отклонение $\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{D}} = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$. Для вероятности $0,95$ половина ширины доверительного интервала $\varepsilon = 2\tilde{\sigma} = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$. Следовательно, границы доверительного интервала $I_{0,95} = [(x_0 - \varepsilon); (x_0 + \varepsilon)] = (1056; 1088) \text{ } ^\circ\text{C}$.

6.26. Доверительной вероятности $0,997$ при нормальном законе распределения погрешности соответствует ширина интервала $(-3\tilde{\sigma} \div +3\tilde{\sigma})$. Отсюда легко определить

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{6}(17,27 - 16,73) = 0,09 \text{ мВ}.$$

6.27. Для оценки погрешности при небольшом числе измерений можно воспользоваться распределением Стьюдента. Для рассматриваемого примера

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i = 31,684 \text{ мВ};$$

$$\tilde{D} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - x_0)^2 = 0,01146 (\text{мВ})^2.$$

По табл. 4.3 для $p = 0,99$ и $(n-1) = 7$ определяем $t_p = 3,5$. Таким образом, полуширина интервала [формула (4.11)]

$$\varepsilon_p = t_p \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}} = 3,5 \sqrt{\frac{0,01146}{8}} = 0,132 \text{ мВ}.$$

Действительная температура с вероятностью 0,99 находится в интервале $757,3 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 763,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.28. По своей природе погрешность за счет неполноты излучения является систематической, однако значения ее изменяются случайным образом, в связи с этим численная оценка должна производиться статистическими методами. Поскольку число измерений небольшое, то обработку результатов следует производить по формулам распределения Стьюдента. Наиболее вероятное значение температуры слитка $x_0 = 972,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Дисперсия $\tilde{D} = 633,8 (\text{ }^\circ\text{C})^2$, коэффициент $t_p = 2,13$, полуширина доверительного интервала $\varepsilon_p = 23,98 \text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, для $p = 0,9$ доверительный интервал $948,42 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 996,38 \text{ }^\circ\text{C}$. Как видно, ширина доверительного интервала достаточно велика, а для ее уменьшения необходимо увеличить число измерений.

6.29. Ход решения аналогичен ходу решения 6.28:

$$x_0 = 973,2 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \tilde{D} = 373,33 (\text{ }^\circ\text{C})^2; \quad t_p = 1,833; \quad \varepsilon_p = 11,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Следовательно, при $p = 0,9$ доверительный интервал $962 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 984,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Ширина доверительного интервала уменьшилась более чем в 2 раза.

6.30. Определим оценку математического ожидания:

$$x = \frac{\left(x - t_p \sqrt{\frac{D}{n}}\right) + \left(x + t_p \sqrt{\frac{D}{n}}\right)}{2} = \frac{23,84 + 24,37}{2} = 24,105 \text{ МПа.}$$

Отсюда

$$t_p \sqrt{\frac{D}{n}} = 24,105 - 23,84 = 0,265 \text{ МПа.}$$

По доверительной вероятности 0,7 и числу наблюдений 25 определим по табл. 4.3 коэффициент Стьюдента. При $n - 1 = 24$ $t_{0,7} = 1,06$, откуда $\sqrt{D/n} = 0,265/1,06 = 0,25$ МПа. Найдем коэффициент Стьюдента для вероятности 0,95: при $n - 1 = 24$ $t_{0,95} = 2,07$. Тогда доверительный интервал отклонений измеряемого давления с вероятностью 0,95 составит:

$$I_{0,95} = (24,105 - 2,07 \cdot 0,25; 24,105 + 2,07 \cdot 0,25) = (23,59; 24,62) \text{ МПа.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**НОМИНАЛЬНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕРМОПАР И ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Выписка из ГОСТ Р 8.585 – 2001 и ГОСТ Р 6651 – 94

Таблица А.1 – Номинальная статическая характеристика платинородий-платиновой (ПП) термопары, тип S, в диапазоне температур от –50 до +1660 °С

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-0,236									
-40	-0,194	-0,199	-0,203	-0,207	-0,211	-0,215	-0,219	-0,224	-0,228	-0,232
-30	-0,150	-0,155	-0,159	-0,164	-0,168	-0,173	-0,177	-0,181	-0,186	-0,190
-20	-0,103	-0,108	-0,113	-0,117	-0,122	-0,127	-0,132	-0,136	-0,141	-0,146
-10	-0,053	-0,058	-0,063	-0,068	-0,073	-0,078	-0,083	-0,088	-0,093	-0,098
0	0,000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,027	-0,032	-0,037	-0,042	-0,048
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,050
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,095	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,131	0,137	0,143	0,149	0,155	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,204	0,210	0,216	0,222	0,229
40	0,235	0,241	0,248	0,254	0,260	0,267	0,273	0,280	0,286	0,292
50	0,299	0,305	0,312	0,319	0,325	0,332	0,338	0,345	0,352	0,358

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	0,365	0,372	0,378	0,385	0,392	0,399	0,405	0,412	0,419	0,426
70	0,433	0,440	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,538	0,545	0,552	0,559	0,566
90	0,573	0,580	0,588	0,595	0,602	0,609	0,617	0,624	0,631	0,639
100	0,646	0,653	0,661	0,668	0,675	0,683	0,690	0,698	0,705	0,713
110	0,720	0,727	0,735	0,743	0,750	0,758	0,765	0,773	0,780	0,788
120	0,795	0,803	0,811	0,818	0,826	0,834	0,841	0,849	0,857	0,865
130	0,872	0,880	0,888	0,896	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,942
140	0,950	0,958	0,966	0,974	0,982	0,990	0,998	1,006	1,013	1,021
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,094	1,102
160	1,110	1,118	1,126	1,134	1,142	1,150	1,158	1,167	1,175	1,183
170	1,191	1,199	1,207	1,216	1,224	1,232	1,240	1,249	1,257	1,265
180	1,273	1,282	1,290	1,298	1,307	1,315	1,323	1,332	1,340	1,348
190	1,357	1,365	1,373	1,382	1,390	1,399	1,407	1,415	1,424	1,432
200	1,441	1,449	1,458	1,466	1,475	1,483	1,492	1,500	1,509	1,517
210	1,526	1,534	1,543	1,551	1,560	1,569	1,577	1,586	1,594	1,603
220	1,612	1,620	1,629	1,638	1,646	1,655	1,663	1,672	1,681	1,690

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
230	1,698	1,707	1,716	1,724	1,733	1,742	1,751	1,759	1,768	1,777
240	1,786	1,794	1,803	1,812	1,821	1,829	1,838	1,847	1,856	1,865
250	1,874	1,882	1,891	1,900	1,909	1,918	1,927	1,936	1,944	1,953
260	1,962	1,971	1,980	1,989	1,998	2,007	2,016	2,025	2,034	2,043
270	2,052	2,061	2,070	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132
280	2,141	2,151	2,160	2,169	2,178	2,187	2,196	2,205	2,214	2,223
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,287	2,296	2,305	2,314
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,360	2,369	2,378	2,387	2,396	2,405
310	2,415	2,424	2,433	2,442	2,451	2,461	2,470	2,479	2,488	2,497
320	2,507	2,516	2,525	2,534	2,544	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590
330	2,599	2,609	2,618	2,627	2,636	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683
340	2,692	2,702	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,776
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,823	2,833	2,842	2,851	2,861	2,870
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,917	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965
370	2,974	2,983	2,993	3,002	3,012	3,021	3,031	3,040	3,050	3,059
380	3,069	3,078	3,088	3,097	3,107	3,116	3,126	3,135	3,145	3,154
390	3,164	3,173	3,183	3,192	3,202	3,212	3,221	3,231	3,240	3,250
400	3,259	3,269	3,279	3,288	3,298	3,307	3,317	3,326	3,336	3,346

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
410	3,355	3,365	3,374	3,384	3,394	3,403	3,413	3,423	3,432	3,442
420	3,451	3,461	3,471	3,480	3,490	3,500	3,509	3,519	3,529	3,538
430	3,548	3,558	3,567	3,577	3,587	3,596	3,606	3,616	3,626	3,635
440	3,645	3,655	3,664	3,674	3,684	3,694	3,703	3,713	3,723	3,732
450	3,742	3,752	3,762	3,771	3,781	3,791	3,801	3,810	3,820	3,830
460	3,840	3,850	3,859	3,869	3,879	3,889	3,898	3,908	3,918	3,928
470	3,938	3,947	3,957	3,967	3,977	3,987	3,997	4,006	4,016	4,026
480	4,036	4,046	4,056	4,065	4,075	4,085	4,095	4,105	4,115	4,125
490	4,134	4,144	4,154	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,213	4,223
500	4,233	4,243	4,253	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323
510	4,332	4,342	4,352	4,362	4,372	4,382	4,392	4,402	4,412	4,422
520	4,432	4,442	4,452	4,462	4,472	4,482	4,492	4,502	4,512	4,522
530	4,532	4,542	4,552	4,562	4,572	4,582	4,592	4,602	4,612	4,622
540	4,632	4,642	4,652	4,662	4,672	4,682	4,692	4,702	4,712	4,722
550	4,732	4,742	4,752	4,762	4,772	4,782	4,793	4,803	4,813	4,823
560	4,833	4,843	4,853	4,863	4,873	4,883	4,893	4,904	4,914	4,924
570	4,934	4,944	4,954	4,964	4,974	4,984	4,995	5,005	5,015	5,025
580	5,035	5,045	5,055	5,066	5,076	5,086	5,096	5,106	5,116	5,127

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
590	5,137	5,147	5,157	5,167	5,178	5,188	5,198	5,208	5,218	5,228
600	5,239	5,249	5,259	5,269	5,280	5,290	5,300	5,310	5,320	5,331
610	5,341	5,351	5,361	5,372	5,382	5,392	5,402	5,413	5,423	5,433
620	5,443	5,454	5,464	5,474	5,485	5,495	5,505	5,515	5,526	5,536
630	5,546	5,557	5,567	5,577	5,588	5,598	5,608	5,618	5,629	5,639
640	5,649	5,660	5,670	5,680	5,691	5,701	5,712	5,722	5,732	5,743
650	5,753	5,763	5,774	5,784	5,794	5,805	5,815	5,826	5,836	5,846
660	5,857	5,867	5,878	5,888	5,898	5,909	5,919	5,930	5,940	5,950
670	5,961	5,971	5,982	5,992	6,003	6,013	6,024	6,034	6,044	6,055
680	6,065	6,076	6,086	6,097	6,107	6,118	6,128	6,139	6,149	6,160
690	6,170	6,181	6,191	6,202	6,212	6,223	6,233	6,244	6,254	6,265
700	6,275	6,286	6,296	6,307	6,317	6,328	6,338	6,349	6,360	6,370
710	6,381	6,391	6,402	6,412	6,423	6,434	6,444	6,455	6,465	6,476
720	6,486	6,497	6,508	6,518	6,529	6,539	6,550	6,561	6,571	6,582
730	6,593	6,603	6,614	6,624	6,635	6,646	6,656	6,667	6,678	6,688
740	6,699	6,710	6,720	6,731	6,742	6,752	6,763	6,774	6,784	6,795
750	6,806	6,817	6,827	6,838	6,849	6,859	6,870	6,881	6,892	6,902
760	6,913	6,924	6,934	6,945	6,956	6,967	6,977	6,988	6,999	7,010

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
770	7,020	7,031	7,042	7,053	7,064	7,074	7,085	7,096	7,107	7,117
780	7,128	7,139	7,150	7,161	7,172	7,182	7,193	7,204	7,215	7,226
790	7,236	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,302	7,312	7,323	7,334
800	7,345	7,356	7,367	7,378	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443
810	7,454	7,465	7,476	7,487	7,497	7,508	7,519	7,530	7,541	7,552
820	7,563	7,574	7,585	7,596	7,607	7,618	7,629	7,640	7,651	7,662
830	7,673	7,684	7,695	7,706	7,717	7,728	7,739	7,750	7,761	7,772
840	7,783	7,794	7,805	7,816	7,827	7,838	7,849	7,860	7,871	7,882
850	7,893	7,904	7,915	7,926	7,937	7,948	7,959	7,970	7,981	7,992
860	8,003	8,014	8,026	8,037	8,048	8,059	8,070	8,081	8,092	8,103
870	8,114	8,125	8,137	8,148	8,159	8,170	8,181	8,192	8,203	8,214
880	8,226	8,237	8,248	8,259	8,270	8,281	8,293	8,304	8,315	8,326
890	8,337	8,348	8,360	8,371	8,382	8,393	8,404	8,416	8,427	8,438
900	8,449	8,460	8,472	8,483	8,494	8,505	8,517	8,528	8,539	8,550
910	8,562	8,573	8,584	8,595	8,607	8,618	8,629	8,640	8,652	8,663
920	8,674	8,685	8,697	8,708	8,719	8,731	8,742	8,753	8,765	8,776
930	8,787	8,798	8,810	8,821	8,832	8,844	8,855	8,866	8,878	8,889
940	8,900	8,912	8,923	8,935	8,946	8,957	8,969	8,980	8,991	9,003

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
950	9,014	9,025	9,037	9,048	9,060	9,071	9,082	9,094	9,105	9,117
960	9,128	9,139	9,151	9,162	9,174	9,185	9,197	9,208	9,219	9,231
970	9,242	9,254	9,265	9,277	9,288	9,300	9,311	9,323	9,334	9,345
980	9,357	9,368	9,380	9,391	9,403	9,414	9,426	9,437	9,449	9,460
990	9,472	9,483	9,495	9,506	9,518	9,529	9,541	9,552	9,564	9,576
1000	9,587	9,599	9,610	9,622	9,633	9,645	9,656	9,668	9,680	9,691
1010	9,703	9,714	9,726	9,737	9,749	9,761	9,772	9,784	9,795	9,807
1020	9,819	9,830	9,842	9,853	9,865	9,877	9,888	9,900	9,911	9,923
1030	9,935	9,946	9,958	9,970	9,981	9,993	10,005	10,016	10,028	10,040
1040	10,051	10,063	10,075	10,086	10,098	10,110	10,121	10,133	10,145	10,156
1050	10,168	10,180	10,191	10,203	10,215	10,227	10,238	10,250	10,262	10,273
1060	10,285	10,297	10,309	10,320	10,332	10,344	10,356	10,367	10,379	10,391
1070	10,403	10,414	10,426	10,438	10,450	10,461	10,473	10,485	10,497	10,509
1080	10,520	10,532	10,544	10,556	10,567	10,579	10,591	10,603	10,615	10,626
1090	10,638	10,650	10,662	10,674	10,686	10,697	10,709	10,721	10,733	10,745
1100	10,757	10,768	10,780	10,792	10,804	10,816	10,828	10,839	10,851	10,863
1110	10,875	10,887	10,899	10,911	10,922	10,934	10,946	10,958	10,970	10,982
1120	10,994	11,006	11,017	11,029	11,041	11,053	11,065	11,077	11,089	11,101

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1130	11,113	11,125	11,136	11,148	11,160	11,172	11,184	11,196	11,208	11,220
1140	11,232	11,244	11,256	11,268	11,280	11,291	11,303	11,315	11,327	11,339
1150	11,351	11,363	11,375	11,387	11,399	11,411	11,423	11,435	11,447	11,459
1160	11,471	11,483	11,495	11,507	11,519	11,531	11,542	11,554	11,566	11,578
1170	11,590	11,602	11,614	11,626	11,638	11,650	11,662	11,674	11,686	11,698
1180	11,710	11,722	11,734	11,746	11,758	11,770	11,782	11,794	11,806	11,818
1190	11,830	11,842	11,854	11,866	11,878	11,890	11,902	11,914	11,926	11,939
1200	11,951	11,963	11,975	11,987	11,999	12,011	12,023	12,035	12,047	12,059
1210	12,071	12,083	12,095	12,107	12,119	12,131	12,143	12,155	12,167	12,179
1220	12,191	12,203	12,216	12,228	12,240	12,252	12,264	12,276	12,288	12,300
1230	12,312	12,324	12,336	12,348	12,360	12,372	12,384	12,397	12,409	12,421
1240	12,433	12,445	12,457	12,469	12,481	12,493	12,505	12,517	12,529	12,542
1250	12,554	12,566	12,578	12,590	12,602	12,614	12,626	12,638	12,650	12,662
1260	12,675	12,687	12,699	12,711	12,723	12,735	12,747	12,759	12,771	12,783
1270	12,796	12,808	12,820	12,832	12,844	12,856	12,868	12,880	12,892	12,905
1280	12,917	12,929	12,941	12,953	12,965	12,977	12,989	13,001	13,014	13,026
1290	13,038	13,050	13,062	13,074	13,086	13,098	13,111	13,123	13,135	13,147
1300	13,159	13,171	13,183	13,195	13,208	13,220	13,232	13,244	13,256	13,268

Продолжение табл. А.1

Температура, °С	ТЭС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1310	13,280	13,292	13,305	13,317	13,329	13,341	13,353	13,365	13,377	13,390
1320	13,402	13,414	13,426	13,438	13,450	13,462	13,474	13,487	13,499	13,511
1330	13,523	13,535	13,547	13,559	13,572	13,584	13,596	13,608	13,620	13,632
1340	13,644	13,657	13,669	13,681	13,693	13,705	13,717	13,729	13,742	13,754
1350	13,766	13,778	13,790	13,802	13,814	13,826	13,839	13,851	13,863	13,875
1360	13,887	13,899	13,911	13,924	13,936	13,948	13,960	13,972	13,984	13,996
1370	14,009	14,021	14,033	14,045	14,057	14,069	14,081	14,094	14,106	14,118
1380	14,130	14,142	14,154	14,166	14,178	14,191	14,203	14,215	14,227	14,239
1390	14,251	14,263	14,276	14,288	14,300	14,312	14,324	14,336	14,348	14,360
1400	14,373	14,385	14,397	14,409	14,421	14,433	14,445	14,457	14,470	14,482
1410	14,494	14,506	14,518	14,530	14,542	14,554	14,567	14,579	14,591	14,603
1420	14,615	14,627	14,639	14,651	14,664	14,676	14,688	14,700	14,712	14,724
1430	14,736	14,748	14,760	14,773	14,785	14,797	14,809	14,821	14,833	14,845
1440	14,857	14,869	14,881	14,894	14,906	14,918	14,930	14,942	14,954	14,966
1450	14,978	14,990	15,002	15,015	15,027	15,039	15,051	15,063	15,075	15,087
1460	15,099	15,111	15,123	15,135	15,148	15,160	15,172	15,184	15,196	15,208
1470	15,220	15,232	15,244	15,256	15,268	15,280	15,292	15,304	15,317	15,329
1480	15,341	15,353	15,365	15,377	15,389	15,401	15,413	15,425	15,437	15,449

Температура, °С	ТЭС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1490	15,461	15,473	15,485	15,497	15,509	15,521	15,534	15,546	15,558	15,570
1500	15,582	15,594	15,606	15,618	15,630	15,642	15,654	15,666	15,678	15,690
1510	15,702	15,714	15,726	15,738	15,750	15,762	15,774	15,786	15,798	15,810
1520	15,822	15,834	15,846	15,858	15,870	15,882	15,894	15,906	15,918	15,930
1530	15,942	15,954	15,966	15,978	15,990	16,002	16,014	16,026	16,038	16,050
1540	16,062	16,074	16,086	16,098	16,110	16,122	16,134	16,146	16,158	16,170
1550	16,182	16,194	16,205	16,217	16,229	16,241	16,253	16,265	16,277	16,289
1560	16,301	16,313	16,325	16,337	16,349	16,361	16,373	16,385	16,396	16,408
1570	16,420	16,432	16,444	16,456	16,468	16,480	16,492	16,504	16,516	16,527
1580	16,539	16,551	16,563	16,575	16,587	16,599	16,611	16,623	16,634	16,646
1590	16,658	16,670	16,682	16,694	16,706	16,718	16,729	16,741	16,753	16,765
1600	16,777	16,789	16,801	16,812	16,824	16,836	16,848	16,860	16,872	16,883
1610	16,895	16,907	16,919	16,931	16,943	16,954	16,966	16,978	16,990	17,002
1620	17,013	17,025	17,037	17,049	17,061	17,072	17,084	17,096	17,108	17,120
1630	17,131	17,143	17,155	17,167	17,178	17,190	17,202	17,214	17,225	17,237
1640	17,249	17,261	17,272	17,284	17,296	17,308	17,319	17,331	17,343	17,355
1650	17,366	17,378	17,390	17,401	17,413	17,425	17,437	17,448	17,460	17,472
1660	17,483	17,495	17,507	17,518	17,530	17,542	17,553	17,565	17,577	17,588

Таблица А.2 – Номинальная статическая характеристика хромель-алюмелевой (ХА) термопары, тип К, в диапазоне температур $-250 \div +1370 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура, $^{\circ}\text{C}$	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-250	-6,404									
-240	-6,344	-6,351	-6,358	-6,364	-6,370	-6,377	-6,382	-6,388	-6,393	-6,399
-230	-6,262	-6,271	-6,280	-6,289	-6,297	-6,306	-6,314	-6,322	-6,329	-6,337
-220	-6,158	-6,170	-6,181	-6,192	-6,202	-6,213	-6,223	-6,233	-6,243	-6,252
-210	-6,035	-6,048	-6,061	-6,074	-6,087	-6,099	-6,111	-6,123	-6,135	-6,147
-200	-5,891	-5,907	-5,922	-5,936	-5,951	-5,965	-5,980	-5,994	-6,007	-6,021
-190	-5,730	-5,747	-5,763	-5,780	-5,797	-5,813	-5,829	-5,845	-5,861	-5,876
-180	-5,550	-5,569	-5,588	-5,606	-5,624	-5,642	-5,660	-5,678	-5,695	-5,713
-170	-5,354	-5,374	-5,395	-5,415	-5,435	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,250	-5,271	-5,292	-5,313	-5,333
-150	-4,913	-4,936	-4,960	-4,983	-5,006	-5,029	-5,052	-5,074	-5,097	-5,119
-140	-4,669	-4,694	-4,719	-4,744	-4,768	-4,793	-4,817	-4,841	-4,865	-4,889
-130	-4,411	-4,437	-4,463	-4,490	-4,516	-4,542	-4,567	-4,593	-4,618	-4,644
-120	-4,138	-4,166	-4,194	-4,221	-4,249	-4,276	-4,303	-4,330	-4,357	-4,384
-110	-3,852	-3,882	-3,911	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,054	-4,082	-4,110
-100	-3,554	-3,584	-3,614	-3,645	-3,675	-3,705	-3,734	-3,764	-3,794	-3,823

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-90	-3,243	-3,274	-3,306	-3,337	-3,368	-3,400	-3,431	-3,462	-3,492	-3,523
-80	-2,920	-2,953	-2,986	-3,018	-3,050	-3,083	-3,115	-3,147	-3,179	-3,211
-70	-2,587	-2,620	-2,654	-2,688	-2,721	-2,755	-2,788	-2,821	-2,854	-2,887
-60	-2,243	-2,278	-2,312	-2,347	-2,382	-2,416	-2,450	-2,485	-2,519	-2,553
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,103	-2,138	-2,173	-2,208
-40	-1,527	-1,564	-1,600	-1,637	-1,673	-1,709	-1,745	-1,782	-1,818	-1,854
-30	-1,156	-1,194	-1,231	-1,268	-1,305	-1,343	-1,380	-1,417	-1,453	-1,490
-20	-0,778	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,006	-1,043	-1,081	-1,119
-10	-0,392	-0,431	-0,470	-0,508	-0,547	-0,586	-0,624	-0,663	-0,701	-0,739
0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302
230	9,343	9,383	9,423	9,464	9,504	9,545	9,585	9,626	9,666	9,707

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
240	9,747	9,788	9,828	9,869	9,909	9,950	9,991	10,031	10,072	10,113
250	10,153	10,194	10,235	10,276	10,316	10,357	10,398	10,439	10,480	10,520
260	10,561	10,602	10,643	10,684	10,725	10,766	10,807	10,848	10,889	10,930
270	10,971	11,012	11,053	11,094	11,135	11,176	11,217	11,259	11,300	11,341
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582
310	12,624	12,665	12,707	12,748	12,790	12,831	12,873	12,915	12,956	12,998
320	13,040	13,081	13,123	13,165	13,206	13,248	13,290	13,331	13,373	13,415
330	13,457	13,498	13,540	13,582	13,624	13,665	13,707	13,749	13,791	13,833
340	13,874	13,916	13,958	14,000	14,042	14,084	14,126	14,167	14,209	14,251
350	14,293	14,335	14,377	14,419	14,461	14,503	14,545	14,587	14,629	14,671
360	14,713	14,755	14,797	14,839	14,881	14,923	14,965	15,007	15,049	15,091
370	15,133	15,175	15,217	15,259	15,301	15,343	15,385	15,427	15,469	15,511
380	15,554	15,596	15,638	15,680	15,722	15,764	15,806	15,849	15,891	15,933
390	15,975	16,017	16,059	16,102	16,144	16,186	16,228	16,270	16,313	16,355
400	16,397	16,439	16,482	16,524	16,566	16,608	16,651	16,693	16,735	16,778

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
410	16,820	16,862	16,904	16,947	16,989	17,031	17,074	17,116	17,158	17,201
420	17,243	17,285	17,328	17,370	17,413	17,455	17,497	17,540	17,582	17,624
430	17,667	17,709	17,752	17,794	17,837	17,879	17,921	17,964	18,006	18,049
440	18,091	18,134	18,176	18,218	18,261	18,303	18,346	18,388	18,431	18,473
450	18,516	18,558	18,601	18,643	18,686	18,728	18,771	18,813	18,856	18,898
460	18,941	18,983	19,026	19,068	19,111	19,154	19,196	19,239	19,281	19,324
470	19,366	19,409	19,451	19,494	19,537	19,579	19,622	19,664	19,707	19,750
480	19,792	19,835	19,877	19,920	19,962	20,005	20,048	20,090	20,133	20,175
490	20,218	20,261	20,303	20,346	20,389	20,431	20,474	20,516	20,559	20,602
500	20,644	20,687	20,730	20,772	20,815	20,857	20,900	20,943	20,985	21,028
510	21,071	21,113	21,156	21,199	21,241	21,284	21,326	21,369	21,412	21,454
520	21,497	21,540	21,582	21,625	21,668	21,710	21,753	21,796	21,838	21,881
530	21,924	21,966	22,009	22,052	22,094	22,137	22,179	22,222	22,265	22,307
540	22,350	22,393	22,435	22,478	22,521	22,563	22,606	22,649	22,691	22,734
550	22,776	22,819	22,862	22,904	22,947	22,990	23,032	23,075	23,117	23,160
560	23,203	23,245	23,288	23,331	23,373	23,416	23,458	23,501	23,544	23,586
570	23,629	23,671	23,714	23,757	23,799	23,842	23,884	23,927	23,970	24,012

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
580	24,055	24,097	24,140	24,182	24,225	24,267	24,310	24,353	24,395	24,438
590	24,480	24,523	24,565	24,608	24,650	24,693	24,735	24,778	24,820	24,863
600	24,905	24,948	24,990	25,033	25,075	25,118	25,160	25,203	25,245	25,288
610	25,330	25,373	25,415	25,458	25,500	25,543	25,585	25,627	25,670	25,712
620	25,755	25,797	25,840	25,882	25,924	25,967	26,009	26,052	26,094	26,136
630	26,179	26,221	26,263	26,306	26,348	26,390	26,433	26,475	26,517	26,560
640	26,602	26,644	26,687	26,729	26,771	26,814	26,856	26,898	26,940	26,983
650	27,025	27,067	27,109	27,152	27,194	27,236	27,278	27,320	27,363	27,405
660	27,447	27,489	27,531	27,574	27,616	27,658	27,700	27,742	27,784	27,826
670	27,869	27,911	27,953	27,995	28,037	28,079	28,121	28,163	28,205	28,247
680	28,289	28,332	28,374	28,416	28,458	28,500	28,542	28,584	28,626	28,668
690	28,710	28,752	28,794	28,835	28,877	28,919	28,961	29,003	29,045	29,087
700	29,129	29,171	29,213	29,255	29,297	29,338	29,380	29,422	29,464	29,506
710	29,548	29,589	29,631	29,673	29,715	29,757	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,090	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,382	30,424	30,466	30,507	30,549	30,590	30,632	30,674	30,715	30,757
740	30,798	30,840	30,881	30,923	30,964	31,006	31,047	31,089	31,130	31,172

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
750	31,213	31,255	31,296	31,338	31,379	31,421	31,462	31,504	31,545	31,586
760	31,628	31,669	31,710	31,752	31,793	31,834	31,876	31,917	31,958	32,000
770	32,041	32,082	32,124	32,165	32,206	32,247	32,289	32,330	32,371	32,412
780	32,453	32,495	32,536	32,577	32,618	32,659	32,700	32,742	32,783	32,824
790	32,865	32,906	32,947	32,988	33,029	33,070	33,111	33,152	33,193	33,234
800	33,275	33,316	33,357	33,398	33,439	33,480	33,521	33,562	33,603	33,644
810	33,685	33,726	33,767	33,808	33,848	33,889	33,930	33,971	34,012	34,053
820	34,093	34,134	34,175	34,216	34,257	34,297	34,338	34,379	34,420	34,460
830	34,501	34,542	34,582	34,623	34,664	34,704	34,745	34,786	34,826	34,867
840	34,908	34,948	34,989	35,029	35,070	35,110	35,151	35,192	35,232	35,273
850	35,313	35,354	35,394	35,435	35,475	35,516	35,556	35,596	35,637	35,677
860	35,718	35,758	35,798	35,839	35,879	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,484
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,685	36,725	36,765	36,805	36,845	36,885
890	36,925	36,965	37,006	37,046	37,086	37,126	37,166	37,206	37,246	37,286
900	37,326	37,366	37,406	37,446	37,486	37,526	37,566	37,606	37,646	37,686
910	37,725	37,765	37,805	37,845	37,885	37,925	37,965	38,005	38,044	38,084

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
920	38,124	38,164	38,204	38,243	38,283	38,323	38,363	38,402	38,442	38,482
930	38,522	38,561	38,601	38,641	38,680	38,720	38,760	38,799	38,839	38,878
940	38,918	38,958	38,997	39,037	39,076	39,116	39,155	39,195	39,235	39,274
950	39,314	39,353	39,393	39,432	39,471	39,511	39,550	39,590	39,629	39,669
960	39,708	39,747	39,787	39,826	39,866	39,905	39,944	39,984	40,023	40,062
970	40,101	40,141	40,180	40,219	40,259	40,298	40,337	40,376	40,415	40,455
980	40,494	40,533	40,572	40,611	40,651	40,690	40,729	40,768	40,807	40,846
990	40,885	40,924	40,963	41,002	41,042	41,081	41,120	41,159	41,198	41,237
1000	41,276	41,315	41,354	41,393	41,431	41,470	41,509	41,548	41,587	41,626
1010	41,665	41,704	41,743	41,781	41,820	41,859	41,898	41,937	41,976	42,014
1020	42,053	42,092	42,131	42,169	42,208	42,247	42,286	42,324	42,363	42,402
1030	42,440	42,479	42,518	42,556	42,595	42,633	42,672	42,711	42,749	42,788
1040	42,826	42,865	42,903	42,942	42,980	43,019	43,057	43,096	43,134	43,173
1050	43,211	43,250	43,288	43,327	43,365	43,403	43,442	43,480	43,518	43,557
1060	43,595	43,633	43,672	43,710	43,748	43,787	43,825	43,863	43,901	43,940
1070	43,978	44,016	44,054	44,092	44,130	44,169	44,207	44,245	44,283	44,321
1080	44,359	44,397	44,435	44,473	44,512	44,550	44,588	44,626	44,664	44,702

Продолжение табл. А.2

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1090	44,740	44,778	44,816	44,853	44,891	44,929	44,967	45,005	45,043	45,081
1100	45,119	45,157	45,194	45,232	45,270	45,308	45,346	45,383	45,421	45,459
1110	45,497	45,534	45,572	45,610	45,647	45,685	45,723	45,760	45,798	45,836
1120	45,873	45,911	45,948	45,986	46,024	46,061	46,099	46,136	46,174	46,211
1130	46,249	46,286	46,324	46,361	46,398	46,436	46,473	46,511	46,548	46,585
1140	46,623	46,660	46,697	46,735	46,772	46,809	46,847	46,884	46,921	46,958
1150	46,995	47,033	47,070	47,107	47,144	47,181	47,218	47,256	47,293	47,330
1160	47,367	47,404	47,441	47,478	47,515	47,552	47,589	47,626	47,663	47,700
1170	47,737	47,774	47,811	47,848	47,884	47,921	47,958	47,995	48,032	48,069
1180	48,105	48,142	48,179	48,216	48,252	48,289	48,326	48,363	48,399	48,436
1190	48,473	48,509	48,546	48,582	48,619	48,656	48,692	48,729	48,765	48,802
1200	48,838	48,875	48,911	48,948	48,984	49,021	49,057	49,093	49,130	49,166
1210	49,202	49,239	49,275	49,311	49,348	49,384	49,420	49,456	49,493	49,529
1220	49,565	49,601	49,637	49,674	49,710	49,746	49,782	49,818	49,854	49,890
1230	49,926	49,962	49,998	50,034	50,070	50,106	50,142	50,178	50,214	50,250
1240	50,286	50,322	50,358	50,393	50,429	50,465	50,501	50,537	50,572	50,608
1250	50,644	50,680	50,715	50,751	50,787	50,822	50,858	50,894	50,929	50,965

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1260	51,000	51,036	51,071	51,107	51,142	51,178	51,213	51,249	51,284	51,320
1270	51,355	51,391	51,426	51,461	51,497	51,532	51,567	51,603	51,638	51,673
1280	51,708	51,744	51,779	51,814	51,849	51,885	51,920	51,955	51,990	52,025
1290	52,060	52,095	52,130	52,165	52,200	52,235	52,270	52,305	52,340	52,375
1300	52,410	52,445	52,480	52,515	52,550	52,585	52,620	52,654	52,689	52,724
1310	52,759	52,794	52,828	52,863	52,898	52,932	52,967	53,002	53,037	53,071
1320	53,106	53,140	53,175	53,210	53,244	53,279	53,313	53,348	53,382	53,417
1330	53,451	53,486	53,520	53,555	53,589	53,623	53,658	53,692	53,727	53,761
1340	53,795	53,830	53,864	53,898	53,932	53,967	54,001	54,035	54,069	54,104
1350	54,138	54,172	54,206	54,240	54,274	54,308	54,343	54,377	54,411	54,445
1360	54,479	54,513	54,547	54,581	54,615	54,649	54,683	54,717	54,751	54,785
1370	54,819									

Таблица А.3 – Номинальная статическая характеристика хромель–копелевой (ХК) термопары, тип L, в диапазоне температур от –200 до +800 °С

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
–200	–9,488									
–190	–9,203	–9,233	–9,262	–9,291	–9,32	–9,349	–9,377	–9,405	–9,433	–9,461
–180	–8,894	–8,926	–8,958	–8,989	–9,02	–9,051	–9,082	–9,113	–9,143	–9,173
–170	–8,562	–8,596	–8,63	–8,664	–8,697	–8,731	–8,764	–8,797	–8,829	–8,862
–160	–8,207	–8,243	–8,28	–8,316	–8,351	–8,387	–8,422	–8,458	–8,492	–8,527
–150	–7,83	–7,869	–7,907	–7,945	–7,983	–8,021	–8,059	–8,096	–8,133	–8,17
–140	–7,432	–7,473	–7,513	–7,554	–7,594	–7,634	–7,673	–7,713	–7,752	–7,791
–130	–7,013	–7,056	–7,099	–7,141	–7,183	–7,225	–7,267	–7,308	–7,35	–7,391
–120	–6,575	–6,619	–6,664	–6,708	–6,752	–6,796	–6,84	–6,884	–6,927	–6,97
–110	–6,117	–6,164	–6,21	–6,256	–6,302	–6,348	–6,394	–6,439	–6,485	–6,53
–100	–5,641	–5,689	–5,737	–5,785	–5,833	–5,881	–5,929	–5,976	–6,023	–6,07
–90	–5,146	–5,197	–5,247	–5,297	–5,346	–5,396	–5,445	–5,494	–5,543	–5,592
–80	–4,635	–4,687	–4,739	–4,79	–4,842	–4,893	–4,944	–4,995	–5,046	–5,006
–70	–4,107	–4,161	–4,214	–4,267	–4,32	–4,373	–4,426	–4,478	–4,531	–4,583
–60	–3,563	–3,618	–3,673	–3,728	–3,783	–3,837	–3,892	–3,946	–4	–4,054
–50	–3,004	–3,061	–3,117	–3,174	–3,23	–3,286	–3,342	–3,397	–3,453	–3,508
–40	–2,431	–2,489	–2,546	–2,604	–2,662	–2,719	–2,777	–2,834	–2,891	–2,948
–30	–1,843	–1,902	–1,961	–2,021	–2,08	–2,138	–2,197	–2,256	–2,314	–2,372

Продолжение табл. А.3

Температура, °С	ТЭС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-20	-1,241	-1,302	-1,363	-1,423	-1,483	-1,544	-1,604	-1,664	-1,723	-1,783
-10	-0,627	-0,689	-0,751	-0,813	-0,874	-0,936	-0,997	-1,058	-1,119	-1,18
0	0	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,378	-0,44	-0,503	-0,565
0	0	0,063	0,127	0,19	0,254	0,318	0,382	0,446	0,51	0,574
10	0,639	0,703	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,158	1,224
20	1,289	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,751	1,818	1,884
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,353	2,42	2,488	2,556
40	2,623	2,691	2,759	2,827	2,895	2,963	3,032	3,1	3,168	3,237
50	3,306	3,375	3,443	3,512	3,582	3,651	3,72	3,789	3,859	3,928
60	3,998	4,068	4,138	4,208	4,278	4,348	4,418	4,489	4,559	4,63
70	4,7	4,771	4,842	4,913	4,984	5,055	5,126	5,197	5,268	5,34
80	5,441	5,483	5,555	5,626	5,698	5,77	5,842	5,914	5,987	6,059
90	6,131	6,204	6,276	6,349	6,422	6,495	6,567	6,64	6,714	6,787
100	6,86	6,933	7,007	7,08	7,154	7,227	7,301	7,375	7,449	7,523
110	7,597	7,671	7,745	7,819	7,894	7,968	8,043	8,117	8,192	8,267
120	8,342	8,417	8,492	8,567	8,642	8,717	8,792	8,868	8,943	9,019
130	9,094	9,17	9,246	9,321	9,397	9,473	9,549	9,625	9,702	9,778
140	9,854	9,931	10,007	10,084	10,16	10,237	10,314	10,391	10,467	10,544

Продолжение табл. А.3

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
150	10,621	10,699	10,776	10,853	10,93	11,008	11,085	11,163	11,24	11,318
160	11,396	11,473	11,551	11,629	11,707	11,785	11,863	11,942	12,02	12,098
170	12,176	12,255	12,333	12,412	12,491	12,569	12,648	12,727	12,806	12,885
180	12,964	13,043	13,122	13,201	13,281	13,36	13,439	13,519	13,598	13,678
190	13,758	13,837	13,917	13,997	14,077	14,157	14,237	14,317	14,397	14,477
200	14,557	14,638	14,718	14,798	14,879	14,959	15,04	15,121	15,201	15,282
210	15,363	15,444	15,525	15,606	15,687	15,768	15,849	15,93	16,011	16,093
220	16,174	16,255	16,337	16,418	16,5	16,582	16,663	16,745	16,827	16,909
230	16,99	17,072	17,154	17,236	17,319	17,401	17,483	17,565	17,647	17,73
240	17,812	17,895	17,977	18,06	18,142	18,225	18,308	18,39	18,473	18,556
250	18,639	18,722	18,805	18,888	18,971	19,054	19,137	19,22	19,304	19,387
260	19,47	19,554	19,637	19,721	19,804	19,888	19,971	20,055	20,139	20,223
270	20,306	20,39	20,474	20,558	20,642	20,726	20,81	20,894	20,978	21,062
280	21,147	21,231	21,315	21,4	21,484	21,568	21,653	21,737	21,822	21,906
290	21,991	22,076	22,16	22,245	22,33	22,415	22,5	22,585	22,669	22,754
300	22,839	22,924	23,01	23,095	23,18	23,265	23,35	23,435	23,521	23,606
310	23,691	23,777	23,802	23,948	24,033	24,119	24,204	24,29	24,375	24,461
320	24,547	24,633	24,718	24,804	24,89	24,976	25,062	25,148	25,234	25,319
330	25,405	25,492	25,578	25,664	25,75	25,836	25,922	26,008	26,095	26,181

Продолжение табл. А.3

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
340	26,267	26,353	26,44	26,526	26,613	26,699	26,786	26,872	26,958	27,045
350	27,132	27,218	27,305	27,391	27,478	27,565	27,652	27,738	27,825	27,912
360	27,999	28,085	28,172	28,259	28,346	28,433	28,52	28,607	28,694	28,781
370	28,858	28,955	29,042	29,129	29,216	29,303	29,391	29,478	29,565	29,652
380	29,739	29,827	29,914	30,001	30,089	30,176	30,263	30,351	30,438	30,525
390	30,613	30,7	30,788	30,875	30,963	31,05	31,138	31,225	31,313	31,4
400	31,488	31,576	31,663	31,751	31,838	31,926	32,014	32,101	32,189	32,277
410	32,365	32,452	32,54	32,628	32,716	32,803	32,891	32,979	33,067	33,155
420	33,243	33,33	33,418	33,506	33,594	33,682	33,77	33,858	33,946	34,034
430	34,122	34,21	34,297	34,385	34,473	34,561	34,649	34,737	34,825	34,914
440	35,002	35,09	35,178	35,266	35,354	35,442	35,53	35,618	35,706	35,794
450	35,882	35,97	36,058	36,147	36,235	36,323	36,411	36,499	36,587	36,675
460	36,764	36,852	36,94	37,028	37,116	37,204	37,293	37,381	37,469	37,557
470	37,645	37,734	37,822	37,91	37,998	38,086	38,175	38,263	38,351	38,439
480	38,527	38,616	38,704	38,792	38,88	38,968	39,057	39,145	39,233	39,321
490	39,41	39,498	39,586	39,674	39,762	39,851	39,939	40,027	40,115	40,204
500	40,292	40,38	40,468	40,556	40,645	40,733	40,821	40,909	40,998	41,086
510	41,174	41,262	41,35	41,439	41,527	41,615	41,703	41,791	41,88	41,968
520	42,056	42,144	42,232	42,32	42,409	42,497	42,585	42,673	42,761	42,85

Продолжение табл. А.3

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
530	42,938	43,026	43,114	43,202	43,29	43,378	43,467	43,555	43,643	43,731
540	43,819	43,907	43,995	44,083	44,172	44,26	44,348	44,436	44,524	44,612
550	44,7	44,788	44,876	44,964	45,052	45,14	45,228	45,317	45,405	45,493
560	45,581	45,669	45,757	45,845	45,933	46,021	46,109	46,197	46,285	46,373
570	46,461	46,549	46,637	46,725	46,813	46,901	46,98	47,077	47,165	47,253
580	47,34	47,428	47,516	47,604	47,692	47,78	47,868	47,956	48,014	48,132
590	48,22	48,307	48,395	48,483	48,571	48,659	48,747	48,835	48,923	49,01
600	49,098	49,186	49,274	49,362	49,45	49,537	49,625	49,713	49,801	49,889
610	49,976	50,064	50,152	50,24	50,328	50,415	50,503	50,591	50,679	50,766
620	50,854	50,942	51,029	51,117	51,205	51,293	51,38	51,468	51,556	51,643
630	51,731	51,819	51,907	51,994	52,082	52,17	52,257	52,345	52,433	52,52
640	52,608	52,695	52,783	52,871	52,958	53,046	53,134	53,221	53,309	53,396
650	53,484	53,572	53,659	53,747	53,834	53,922	54,009	54,097	54,184	54,272
660	54,36	54,447	54,535	54,622	54,71	54,797	54,885	54,972	55,06	55,147
670	55,235	55,322	55,41	55,497	55,584	55,672	55,759	55,847	55,934	56,022
680	56,109	56,196	56,284	56,371	56,459	56,546	56,633	56,721	56,808	56,895
690	56,983	57,07	57,157	57,245	57,332	57,419	57,507	57,594	57,681	57,768
700	57,856	57,943	58,03	58,117	58,205	58,292	58,379	58,466	58,553	58,64
710	58,728	58,815	58,902	58,989	59,076	59,163	59,25	59,337	59,424	59,511

Температура, °С	ТЭДС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
720	59,598	59,685	59,772	59,859	59,946	60,033	60,12	60,207	60,294	60,381
730	60,468	60,554	60,641	60,728	60,815	60,901	60,988	61,075	61,162	61,248
740	61,335	61,421	61,508	61,595	61,681	61,768	61,854	61,941	62,027	62,114
750	62,2	62,286	62,373	62,459	62,545	62,632	62,718	62,804	62,89	62,976
760	63,062	63,148	63,234	63,32	63,406	63,492	63,578	63,664	63,75	63,835
770	63,921	64,007	64,092	64,178	64,264	64,349	64,435	64,52	64,605	64,691
780	64,776	64,861	64,946	65,031	65,116	65,201	65,286	65,371	65,456	65,541
790	65,626	65,71	65,795	65,879	65,964	66,048	66,133	66,217	66,301	66,385
800	66,469									

Таблица А.4 – Номинальная статическая характеристика платинового термопреобразователя сопротивления, тип ТСП, в диапазоне температур от 0 до +500 °С для градуировки 50П

Температура, °С	R, Ом									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	51,98	53,96	55,93	57,895	59,855	61,805	63,755	65,695	67,63	
100	69,55	71,48	73,395	75,305	77,21	79,11	81,005	82,84	84,77	86,645
200	88,515	90,38	92,24	94,09	95,935	97,775	99,61	101,44	103,26	105,08
300	106,89	108,7	110,5	112,29	114,08	115,86	117,64	119,41	121,17	122,93
400	124,68	126,43	128,17	129,9	131,63	133,36	135,09	136,78	138,49	140,19
500	141,88									

Таблица А.5 – Номинальная статическая характеристика медного термопреобразователя сопротивления, тип ТСМ, в диапазоне температур от 0 до +200 °С для градуировки 50М

Температура, °С	R, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	50,000	50,214	50,428	50,642	50,856	51,070	51,284	51,498	51,712	51,926
10	52,140	52,354	52,569	52,783	52,997	53,211	53,425	53,639	53,853	54,067
20	54,281	54,495	54,709	54,923	55,137	55,351	55,565	55,780	55,994	56,208
30	56,422	56,636	56,850	57,064	57,278	57,492	57,706	57,920	58,134	58,348
40	58,562	58,776	58,990	59,204	59,418	59,632	59,846	60,060	60,274	60,488
50	60,702	60,916	61,130	61,344	61,558	61,772	61,986	62,200	62,414	62,628
60	62,842	63,056	63,270	63,484	63,698	63,912	64,126	34,340	64,553	64,767
70	64,981	65,195	65,409	65,623	65,837	66,051	66,265	66,479	66,693	66,907
80	67,121	67,335	67,549	67,763	67,977	68,191	68,405	68,619	68,833	69,047
90	69,261	69,474	69,688	69,902	70,116	70,330	70,544	70,758	70,972	71,186
100	71,400	71,614	71,828	72,042	72,256	72,470	72,684	72,898	73,112	73,326
110	73,539	73,753	73,967	74,181	74,395	74,609	74,823	75,037	75,251	75,465
120	75,678	75,892	76,106	76,320	76,534	76,748	76,962	77,176	77,390	77,604
130	77,817	78,031	78,245	78,459	78,673	78,887	79,101	79,315	79,529	79,743
140	79,956	80,170	80,384	80,598	80,812	81,026	81,240	81,454	81,668	81,882
150	82,096	82,310	82,524	82,738	82,952	83,165	83,379	83,593	83,807	84,021
160	84,235	84,449	84,663	84,877	85,091	85,305	85,518	85,732	85,946	86,160
170	86,374	86,588	86,802	87,016	87,230	87,444	87,658	87,871	88,085	88,299
180	88,513	88,727	88,941	89,155	89,369	89,583	89,797	90,010	90,225	90,438
190	90,653	90,866	91,080	91,294	91,508	91,722	91,936	92,149	92,363	92,577
200	92,791									

Таблица А.6 – Номинальная статическая характеристика медного термопреобразователя сопротивления, тип ТСМ, в диапазоне температур от 0 до +200 °С для градуировки 100М

Температура, °С	R, Ом									
	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	102,99	103,42	103,85
10	104,28	104,71	105,14	105,57	105,99	106,42	106,85	107,28	107,71	108,13
20	108,56	108,99	109,42	109,85	110,27	110,70	110,13	111,56	111,99	112,42
30	112,84	113,27	113,70	114,13	114,55	114,98	115,41	115,84	116,27	116,69
40	117,12	117,55	117,98	118,41	118,84	119,26	119,69	120,12	120,55	120,98
50	121,40	121,83	122,26	122,69	123,12	123,54	123,97	124,40	124,83	125,26
60	125,68	126,11	126,54	126,97	127,39	127,82	128,25	128,68	129,11	129,53
70	129,96	130,39	130,82	131,25	131,67	132,10	132,53	132,96	133,39	133,81
80	134,24	134,67	135,09	135,53	135,95	136,38	136,81	137,24	137,67	138,09
90	138,52	138,95	139,38	139,81	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	145,79	146,22	146,65
110	147,08	147,51	147,93	148,36	148,79	149,22	149,65	150,07	150,50	150,93
120	151,36	151,78	152,21	152,64	153,07	153,49	153,92	154,35	154,78	155,21
130	155,63	156,06	156,49	156,92	157,34	157,77	158,20	158,63	159,06	159,49
140	159,91	160,34	160,77	161,19	161,62	162,05	162,48	162,94	163,34	163,76
150	164,19	164,62	165,05	165,48	165,90	166,33	166,76	167,19	167,61	168,04
160	168,47	168,89	169,33	169,75	170,18	170,61	171,04	171,46	171,89	172,32
170	172,75	173,18	173,60	174,03	174,46	174,89	175,32	175,74	176,17	176,59
180	177,02	177,45	177,88	178,31	178,74	179,17	179,59	180,02	180,45	180,88
190	181,30	181,73	182,16	182,59	183,02	183,44	183,87	184,29	184,73	185,15
200	185,58									

Таблица А,7 – Номинальная статическая характеристика платинового термопреобразователя сопротивления, тип ТСП, в диапазоне температур от 0 до +500 °С для градуировки 100П

Температура, °С	R, Ом									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	100	103,96	107,92	111,86	115,79	119,71	123,61	127,51	131,39	135,26
100	139,1	142,96	146,79	150,61	154,42	158,22	162,01	165,68	169,54	173,29
200	177,03	180,76	184,48	188,18	191,87	195,55	199,22	202,88	206,52	210,16
300	213,78	217,39	220,99	224,58	228,15	231,71	235,27	238,81	242,34	245,85
400	249,36	252,85	256,33	259,8	263,26	266,71	266,71	273,56	276,98	280,37
500	283,76									

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ТЕСТЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Действительное значение физической величины (ФВ) это:

- а) значение ФВ найденное с минимально возможной погрешностью с помощью эталонов и рабочих эталонов;
- б) значение ФВ, погрешность которой близка к нулю;
- в) качественно и количественно оцененная ФВ;
- г) значение ФВ свободное от погрешностей измерения.

2. Истинное значение физической величины (ФВ) это:

- а) значение ФВ свободное от погрешностей измерения;
- б) значение ФВ найденное с минимально возможной погрешностью с помощью рабочих эталонов;
- в) значение ФВ погрешность которой близка к нулю;
- г) качественно и количественно оцененная ФВ.

3. Измерение это:

- а) определение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств;
- б) определение значения физической величины расчетным путем с помощью специальных технических средств;
- в) определение значения физической величины путем измерения ее с помощью измерительных преобразователей;
- г) определение значения физической величины расчетным путем.

4. По сложившимся совокупностям измеряемых физических величин измерения можно разделить на:

- а) механические, электрические, радиотехнические, теплотехнические и т.п.;
- б) измерения температуры, давления, расхода, концентрации и т.п.;
- в) прямые, косвенные, совокупные и совместные;
- г) технические, образцовые, эталонные и т.п.

5. По числу измерений, выполняемых для получения результата, измерения можно разделить на:

- а) с однократным наблюдением (обыкновенные), с многократными наблюдениями (статистические);
- б) измерения технические, контрольно–поверочные, максимально возможной точности;
- в) прямые, косвенные, совокупные и совместные;
- г) технические, образцовые, эталонные.

6. По условиям, определяющим точность результата, измерения можно разделить на:

- а) технические, контрольно–поверочные, максимально возможной точности;
- б) технические, образцовые, эталонные;
- в) прямые, косвенные, совокупные и совместные;
- г) статические и динамические.

7. По способу получения результата, измерения можно разделить на:

- а) прямые, косвенные, совокупные и совместные;
- б) технические, контрольно–поверочные, максимально возможной точности;
- в) технические, образцовые, эталонные;
- г) с однократным наблюдением (обыкновенные), с многократными наблюдениями (статистические).

8. Метод непосредственной оценки это:

- а) метод измерений, в котором значение измеряемой величины определяют по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия;
- б) метод измерений, в котором значение измеряемой величины определяют по отсчетному устройству измерительного прибора косвенного действия;
- в) метод измерений, в котором значение измеряемой величины определяют по отсчетному устройству измерительного прибора совокупного действия;
- г) метод измерений, в котором значение измеряемой величины определяют по отсчетному устройству измерительного прибора совместного действия.

9. Нулевой метод измерения это:

- а) метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля;
- б) метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на измерительный прибор доводят до нуля;
- в) метод сравнения измеряемой величины, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля;
- г) метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на преобразователь доводят до нуля.

10. Дифференциальный метод измерения это:

- а) метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор (ИП) воздействует разность между измеряемой величиной и величиной воспроизводимой мерой;
- б) метод, в котором на ИП воздействует сумма измеряемой величины и величины воспроизводимой мерой;
- в) метод сравнения с мерой, в котором на ИП воздействует отношение измеряемой величины к величине воспроизводимой мерой;
- г) метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на измерительный прибор доводят до разности.

11. Случайная погрешность это:

- а) погрешность измерения, явно и резко искажающая результат;
- б) погрешность измерения, получающаяся в результате специально созданных условий;
- в) погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях;
- г) погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях.

12. Ожидаемая случайная погрешность это:

- а) погрешность измерения, получающаяся в результате специально созданных условий;
- б) погрешность измерения, явно и резко искажающая результат;
- в) погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях;
- г) погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях.

13. Грубая погрешность это:

- а) погрешность измерения, явно и резко искажающая результат;
- б) погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях;
- в) погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях;
- г) погрешность измерения, получающаяся в результате специально созданных условий.

14. Промах это:

- а) погрешность измерения, получающаяся в результате специально созданных условий;
- б) погрешность измерения, явно и резко искажающая результат;
- в) погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях;
- г) погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях.

15. Методическая погрешность это погрешность измерения:

- а) обусловленная несовершенством метода измерения;
- б) обусловленная несовершенством средства измерения;
- в) обусловленная несовершенством методики измерения, используемой экспериментатором;
- г) обусловленная неправильной установкой средств измерения.

16. Инструментальная погрешность это погрешность измерения:

- а) обусловленная несовершенством метода измерения;
- б) обусловленная несовершенством средства измерения;
- в) обусловленная несовершенством методики измерения, используемой экспериментатором;
- г) обусловленная неправильной установкой средств измерения.

17. Погрешность установки – это погрешность измерения:

- а) обусловленная несовершенством метода измерения;
- б) обусловленная несовершенством средства измерения;
- в) обусловленная несовершенством методики измерения, используемой экспериментатором;
- г) обусловленная неправильной установкой средств измерения.

18. Основной погрешностью измерительного устройства называется:

- а) погрешность ИУ при использовании его в нормальных условиях;
- б) погрешность ИУ при использовании его в эксплуатационных условиях;
- в) погрешность ИУ при использовании его в тропических условиях;
- г) погрешность ИУ при использовании его в условиях Крайнего Севера.

19. Дополнительной погрешностью измерительного устройства называется:

- а) погрешности, вызванные отклонением влияющих физических величин от их нормальных значений;
- б) погрешности, вызванные отклонением измеряемой величины от ее нормального значения;
- в) погрешности, вызванные отклонением измеряемых физических величин от их нормальных значений;
- г) погрешности, вызванные отклонением задаваемых величин от их нормальных значений.

20. Абсолютная погрешность это:

- а) разность показаний прибора и действительного значения измеряемой величины;
- б) разность между действительным значением измеряемой величины и показанием прибора;
- в) разность показаний прибора и истинного значения измеряемой величины;
- г) разность между показанием прибора и измеряемой величиной.

21. Относительная погрешность это:

- а) отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в %;
- б) отношение абсолютной погрешности к нормированному значению, выраженное в %;
- в) отношение абсолютной погрешности к диапазону показаний, выраженное в %;
- г) отношение абсолютной погрешности к диапазону измерений, выраженное в %.

22. Приведенная погрешность это:

- а) отношение абсолютной погрешности к нормированному значению, выраженное в %;
- б) отношение абсолютной погрешности к действительному значению, выраженное в %;
- в) отношение абсолютной погрешности к диапазону измерений, выраженное в %;
- г) разность показаний прибора и действительного значения измеряемой величины.

23. Измерительное преобразование это:

- а) отражение одной физической величины (ФВ) размером другой ФВ, функционально с ней связанной;
- б) отражение одной ФВ размером другой ФВ, функционально с ней не связанной;
- в) отражение одной ФВ размером другой ФВ, зависимой от третьей ФВ;
- г) функциональная зависимость между двумя физическими величинами.

24. Аддитивная погрешность это погрешность...

- а) выражающаяся в несоответствии реальной функции преобразования при прямом и обратном ходе;
- б) остающаяся постоянной при любых значениях измеряемой величины;
- в) линейно возрастающая при увеличении измеряемой величины.

25. Мультипликативная погрешность это погрешность...

- а) выражающаяся в несоответствии реальной функции преобразования при прямом и обратном ходе;
- б) остающаяся постоянной при любых значениях измеряемой величины;
- в) линейно возрастающая при увеличении измеряемой величины.

26. Гистерезисная погрешность это погрешность...

- а) линейно возрастающая при увеличении измеряемой величины;
- б) выражающаяся в несоответствии реальной функции преобразования при прямом и обратном ходе;
- в) остающаяся постоянной при любых значениях измеряемой величины.

27. Вариацией показаний ИП называют разность между

- а) наибольшим и наименьшим значениями показаний, соответствующую одному и тому же значению измеряемой величины и полученную при многократном и одностороннем подходе к этому значению;
- б) значениями показаний ИП, соответствующую одному и тому же значению измеряемой величины и полученную при многократном и двустороннем подходе к этому значению.

28. Размахом показаний ИП называют разность между:

- а) значениями показаний ИП, соответствующую одному и тому же значению измеряемой величины и полученную при многократном и двустороннем подходе к этому значению;
- б) наибольшим и наименьшим значениями показаний, соответствующую одному и тому же значению измеряемой величины и полученную при многократном и одностороннем подходе к этому значению.

29. Класс точности измерительных устройств (ИУ) это:

- а) обобщенная характеристика ИУ, определяемая пределом допускаемой основной погрешности, отражающим уровень их точности, при нормальных условиях;
- б) обобщенная характеристика ИУ, определяемая пределом допускаемой основной погрешности, отражающим уровень их точности, при эксплуатационных условиях;
- в) обобщенная характеристика ИУ, определяемая основной погрешностью, отражающей уровень их точности, в лабораторных условиях;
- г) обобщенная характеристика ИУ, определяемая основной погрешностью, отражающей уровень их точности, при рабочих условиях.

30. Диапазон показаний ИП это область значений...

- а) шкалы, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы;
- б) измеряемой величины, для которой нормирована допускаемая погрешность;
- в) шкалы, в пределах которых может изменяться измеряемая величина;
- г) шкалы, в пределах которой должна находиться измеряемая величина.

31. Диапазон измерения ИП это область значений...

- а) шкалы, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы;
- б) измеряемой величины, для которой нормирована допускаемая погрешность;
- в) шкалы, в пределах которых может изменяться измеряемая величина;
- г) шкалы, в пределах которой должна находиться измеряемая величина.

32. Калибровка средств измерений это

- а) экспериментальное определение градуировочной характеристики средства измерений;
- б) операция нанесения отметок на шкалу;
- в) совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений;
- г) совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

33. Поверка средств измерений это

- а) совокупность операций, выполняемых в целях доведения погрешностей средств измерений до значений, соответствующих техническим требованиям;
- б) совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений;
- в) совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям;
- г) экспериментальное определение градуировочной характеристики средства измерений в целях определения метрологических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
2. Кулаков В.М. Технологические измерения и приборы для химических производств. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
3. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергия. 1985 – 326 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 572 с.
5. ГОСТ 11.004–74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.
6. ГОСТ 11.006–74. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим.
7. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г. М. Иванова. Н. Д. Кузнецов. В. С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 460 с.
8. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Логос, 2000. – 408 с.

Учебное издание

ВОЛОШЕНКО Александр Викторович
ГРИГОРЬЕВА Муза Михайловна
МЕДВЕДЕВ Валерий Васильевич

МЕТРОЛОГИЯ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Задачи и вопросы

Учебное пособие

Издано в авторской редакции


Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 18.11.2010. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 5,26.
Заказ 1951-10. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru