

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»**

# **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

для студентов специальности  
1–54 01 01–04 «Метрология, стандартизация и сертификация  
(легкая промышленность)»

Витебск  
2016

УДК 658.516

Теоретическая метрология : лабораторный практикум для студентов специальности 1–54 01 01–04 «Метрология, стандартизация и сертификация (легкая промышленность)».

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2016.

Составитель: доц., к.т.н. Петюль И.А.

В лабораторном практикуме приведены основные лабораторные работы, направленные на закрепление лекционного курса дисциплины «Теоретическая метрология» и получение практических навыков работы при выполнении измерений. В лабораторных работах изложены основные теоретические сведения по изучаемой теме, порядок выполнения работы, а также требования к оформлению и содержанию отчета о выполненной работе. Лабораторный практикум предназначен для студентов специальности 1–54 01 01–04 «Метрология, стандартизация и сертификация (легкая промышленность)» дневной и заочной форм обучения.

Одобрено кафедрой «Стандартизация» 11 октября 2016 г., протокол № 3.

Рецензент: ст. преп. Сяборов В.В.

Редактор: к.т.н., доц. Шевцова М.В.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» 26 октября 2016 г., протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Абазовская Н.В.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати 02.12.16. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. лист. 2,9.

Печать ризографическая. Тираж 40 экз. Заказ № 380.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

210035, Витебск, Московский пр-т, 72.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1. Международная система единиц (СИ). Размерность физических величин.....	5
Лабораторная работа № 2. Измерительные шкалы.....	14
Лабораторная работа № 3. Классификация средств измерений. Метрологические характеристики средств измерений.....	21
Лабораторная работа № 4. Погрешности средств измерений. Классы точности.....	29
Лабораторная работа № 5. Виды и методы измерений.....	34
Лабораторная работа № 6. Оценивание качества измерений.....	41
Информационные источники.....	49
Приложение А.....	50

## ВВЕДЕНИЕ

Данный лабораторный практикум направлен на закрепление основных теоретических сведений дисциплины «Теоретическая метрология», поэтому выполнение лабораторных работ целесообразно после представления соответствующего материала в лекционном курсе.

Применяемые в лабораторных работах средства измерений просты в эксплуатации, обеспечивают достаточное разнообразие реализации видов и методов измерений, а также имеют достаточно разнообразные конструктивные и метрологические характеристики.

Рекомендуемые объекты измерений доступны и просты в изготовлении.

Все лабораторные работы имеют однотипную структуру, в которую включены:

- наименование и цель работы;
- общие теоретические сведения;
- материально-техническое обеспечение работы (при необходимости);
- порядок выполнения работы;
- требования к содержанию и оформлению отчёта.

В раздел «Общие теоретические сведения» включен краткий теоретический материал, на закрепление которого направлена данная лабораторная работа. При отработке пропущенных лабораторных работ материал изучается студентом самостоятельно, и к выполнению работы студент допускается только после контроля усвоения теоретического материала.

Содержание раздела «Материально-техническое обеспечение работы» характеризует минимально необходимый для лабораторной работы состав технических средств (средства измерений, объекты измерений, необходимые ТНПА). При необходимости возможно применение других технических средств в рамках принятой методической концепции лабораторной работы.

В разделе «Порядок выполнения работы» изложена последовательность действий, которые необходимо выполнить студенту при индивидуальной работе или в составе группы. Приведены формы таблиц и при необходимости примеры их заполнения.

В разделе «Требования к содержанию и оформлению отчета» каждой лабораторной работы указано, какие сведения должны быть представлены в отчете.

В процессе выполнения лабораторных работ студенты развивают способности к самостоятельному и групповому решению конкретных практических задач, связанных с использованием и применением средств измерений, овладевают способностью применения полученных теоретических знаний к решению конкретных инженерных проблем.

По завершении работы целесообразно провести ее групповое обсуждение, акцентировав внимание на цели, поставленной в начале работы, полученных результатах и сделанных выводах.

## Лабораторная работа № 1

### МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ). РАЗМЕРНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

**Цель работы:** изучить основные и производные единицы международной системы, правила их написания, обозначения и применения. Получить представление о размерности физических величин.

#### 1 Общие теоретические сведения

Требования к единицам измерений, к их наименованиям, обозначениям, соотношениям, правилам написания и применения, а также кратным и дольным значениям этих единиц установлены техническим регламентом Республики Беларусь ТР 2007/003/ВУ «Единицы измерений, допущенные к применению на территории Республики Беларусь».

На территории Республики Беларусь применяются:

- единицы Международной системы единиц (далее – СИ), принятой на Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ);
- единицы, не входящие в СИ;
- условные единицы, оцениваемые по условным шкалам (шкалам твердости Бринелля, Виккерса, Роквелла и Супер-Роквелла, шкале активности водородных ионов (рН) и другим шкалам, для которых созданы условия и средства обеспечения единства измерений).

Основные единицы СИ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные единицы СИ

Физическая величина		Единица физической величины			
наименование	размерность	наименование	обозначение		определение
			международное	русское	
1	2	3	4	5	6
Длина	<b>L</b>	метр	m	м	метр – длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 секунды
Масса	<b>M</b>	килограмм	kg	кг	килограмм – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма
Время	<b>T</b>	секунда	s	с	секунда – время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Электрический ток	<b>I</b>	ампер	A	A	ампер – сила неизменяющегося тока, который при прохождении

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6
					по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную $2 \times 10^{-7}$ ньютона
Термодинамическая температура	<b>Θ</b>	кельвин	K	K	кельвин – единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	<b>N</b>	моль	mol	моль	моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 килограмма. При применении моля структурные элементы должны быть определены и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или определенными группами частиц
Сила света	<b>J</b>	кандела	cd	кд	кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \times 10^{12}$ герц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ ватт настерадиан

Производные единицы СИ образуются из основных единиц СИ по правилам образования когерентных производных единиц СИ на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или математических формул. Некоторые производные единицы СИ, имеющие специальные наименования и обозначения, представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Примеры некоторых производных единиц измерений в СИ

Физическая величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение международное	обозначение русское
1	2	3	4	5
Частота	$T^{-1}$	герц	Hz	Гц
Сила	$L M T^{-2}$	ньютон	N	Н
Давление	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	J	Дж
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	W	Вт
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	V	В
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	$\Omega$	Ом

Наименования и обозначения десятичных кратных и дольных единиц СИ образуются с помощью множителей и приставок, указанных в таблице 1.3. Присоединение к наименованию и обозначению единицы двух или более приставок одновременно не допускается.

Таблица 1.3 – Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц СИ

Десятичный множитель	Приставка			
	наименование		обозначение	
	международное	русское	международное	русское
1	2	3	4	5
$10^{24}$	yotta	иотта	Y	И
$10^{21}$	zetta	зетта	Z	З
$10^{18}$	exa	экса	E	Э
$10^{15}$	peta	пета	P	П
$10^{12}$	tera	тера	T	Т
$10^9$	giga	гига	G	Г
$10^6$	mega	мега	M	М
$10^3$	kilo	кило	k	к
$10^2$	hecto	гекто	h	г
$10^1$	deca	дека	da	да
$10^{-1}$	deci	деци	d	д
$10^{-2}$	centi	санتي	c	с
$10^{-3}$	milli	милли	m	м
$10^{-6}$	micro	микро	$\mu$	мк
$10^{-9}$	nano	нано	n	н
$10^{-12}$	pico	пико	p	п
$10^{-15}$	femto	фемто	f	ф
$10^{-18}$	atto	атто	a	а
$10^{-21}$	zepto	зепто	z	з
$10^{-24}$	yocto	иокто	y	и

В ТР 2007/003/ВУ также указаны единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ (например тонна, минута, час, сутки, литр и др.); единицы, допускаемые к применению в отдельных областях (например, линейная плотность, единица измерения – текст; кровяное давление, атмосферное давление воздуха, единица измерения – миллиметр ртутного столба (1 мм.рт.ст.=133,322 Па)); некоторые из относительных и логарифмических единиц и допустимые единицы количества информации. Некоторые сведения об относительных и логарифмических единицах приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Относительные и логарифмические единицы измерений

Наименование величины	Единица измерения			
	наименование	обозначение		значение
		международное	русское	
1 Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	единица	1	1	1
	процент	%	%	$1 \cdot 10^{-2}$
	промилле	‰	‰	$1 \cdot 10^{-3}$
	миллионная	ppm	млн <sup>-1</sup>	$1 \cdot 10^{-6}$
	доля			
2 Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): уровень звукового давления; усиление, ослабление и другие	бел	В	Б	1 Б = $\lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10 P_1$ , 1 Б = $2 \lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{F_1}$ , где $P_1, P_2$ – одноименные энергетические величины (мощность, энергия, плотность энергии и другие), $F_1, F_2$ – одноименные «силовые» величины (напряжение, сила тока, напряженность поля и другие)
	децибел	дВ	дБ	0,1 Б

В конструкторских, технологических и других технических документах на продукцию различных видов применяются международные или русские обозначения единиц. При указании единиц величин на табличках, шкалах и щитках средств измерений применяют международные обозначения единиц, независи-

мо от того, какие обозначения использованы в документах на эти средства измерений. При договорно-правовых отношениях с зарубежными странами в технических и других документах, направляемых с экспортной продукцией (включая транспортную и потребительскую тару), применяются международные обозначения единиц.

**При применении и написании** обозначений единиц руководствуются следующими **правилами**:

1. При написании значений величин применяются обозначения единиц измерения буквами или специальными знаками (...°, ...', ..."), причем устанавливаются два вида буквенных обозначений: международное и русское.

2. Буквенные обозначения единиц печатают прямым шрифтом. **В обозначениях единиц точка не ставится.**

3. Обозначения единиц помещаются за числовыми значениями величин и в строку с ними (без переноса на следующую строку). Числовое значение, представляющее собой дробь с косой чертой, стоящее перед обозначением единицы, заключается в скобки. Между последней цифрой числа и обозначением единицы оставляется пробел.

Например:

Правильно:

100 kW; 100 кВт

80 %

20 °C

(1/60) s<sup>-1</sup>

Неправильно:

100kW; 100кВт

80%

20°C

1/60/s<sup>-1</sup>

Исключения составляют обозначения единиц в виде знака, размещенного над строкой, перед которыми пробел не оставляют.

Например:

Правильно:

20°

Неправильно:

20 °

4. При наличии десятичной дроби в числовом значении величины обозначение единицы необходимо помещать за всеми цифрами.

Например:

Правильно:

423,06 m; 423,06 м

5,758° или 5°45,48' или

5°45'28,8"

Неправильно:

423 m 0,6; 423 м 06

5°758, или 5°45',48 или

5°45'28",8

5. При указании значений величин с предельными отклонениями они заключаются в скобки, а обозначения единиц помещаются за скобками или прощаются за числовым значением величины и за ее предельным отклонением.

Например:

Правильно:

$(100,0 \pm 0,1) \text{ kg}$ ;  $(100,0 \pm 0,1) \text{ кг}$

$50 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ ;  $50 \text{ г} \pm 1 \text{ г}$

Неправильно:

$100,0 \pm 0,1 \text{ kg}$ ;  $100,0 \pm 0,1 \text{ кг}$

$50 \pm 1 \text{ g}$ ;  $50 \pm 1 \text{ г}$

6. Обозначения единиц применяются в пояснениях обозначений величин к формулам. Не допускается помещать обозначения единиц в одной строке с формулами, выражающими зависимость между величинами или между их числовыми значениями, обозначенными буквами.

7. Буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, отделяются точками на средней линии как знаками умножения.

Например:

Правильно:

$\text{N} \cdot \text{m}$ ;  $\text{Н} \cdot \text{м}$

$\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\text{Па} \cdot \text{с}$

Неправильно:

$\text{Nm}$ ;  $\text{Нм}$

$\text{Pas}$ ;  $\text{Пас}$

В буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления необходимо использовать только одну косую или горизонтальную черту. Обозначения единиц применяются в виде произведения обозначений единиц, возведенных в степени (положительные и отрицательные).

8. Если для одной из единиц, входящих в отношение, установлено буквенное обозначение в виде отрицательной степени (например,  $\text{s}^{-1}$ ,  $\text{m}^{-1}$ ,  $\text{c}^{-1}$ ,  $\text{m}^{-1}$ ), то при этом косая или горизонтальная черта не применяется.

Например:

Правильно:

$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$  или

$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ ;  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

Неправильно:

$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ;  $\text{Вт}/\text{м}^2/\text{К}$

9. При применении косой черты буквенные обозначения единиц в числителе и знаменателе помещаются в строку, произведение обозначений единиц в знаменателе заключается в скобки.

Например:

Правильно:

$\text{m}/\text{s}$ ;  $\text{м}/\text{с}$

$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

Неправильно:

$\text{m}/\text{s} \cdot \text{м}/\text{с}$

$\text{W}/\text{m} \cdot \text{К}$ ;  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$

10. При указании производной единицы, состоящей из двух и более единиц, не допускается комбинировать буквенные обозначения и наименования

единиц (для одних единиц указывать обозначения, а для других – наименования).

Например:

Правильно:

80 км/ч

80 километров в час

Неправильно:

80 км/час

80 км в час

11. Сочетания знаков: ...°, ...', ...", % и ‰ применяют с буквенными обозначениями единиц, например: ...°/s.

12. При указании диапазонов числовых значений величины, выраженных в одних и тех же единицах, обозначение единицы указывают за последним числовым значением диапазона, *за исключением* знаков: %, °С, ...°.

Формализованным отражением качественного различия измеряемых величин является их размерность. В соответствии с международной практикой размерность величин следует обозначать знаком **dim**.

**Размерность величины** – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Размерность основных физических величин обозначается соответствующими заглавными буквами (размерности основных величин СИ обозначены LMTIΘNJ). Тогда размерность  $\dim x$  любой производной физической величины  $x$  в общем виде можно записать как

$$\dim x = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\varepsilon \Theta^1 N^v J^\tau,$$

где L, M, T...- размерности соответствующих основных физических величин;  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ - показатели размерности.

При определении размерности производных величин используют уравнения связи – уравнения, отражающие связь между величинами, в которых буквенными символами обозначают физические величины. Уравнения могут отражать законы природы (например, закон Ома  $I=U/R$ ) или быть определениями величин (например, плотность  $\rho=m/V^3$ ). Чтобы найти размерность производной физической величины, надо в правую часть уравнения связи, используемого для определения этой величины, вместо обозначений величин подставить их размерности. При этом соблюдаются следующие правила:

1. Размерность левой и правой частей уравнения должны совпадать, так как сравниваться между собой могут только одинаковые свойства.

2. Алгебра размерностей состоит из одного действия – умножения, то есть над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечение корня.

## 2 Порядок выполнения работы

1. Запишите тему и цель работы.

2. Изучите наименования, обозначения основных и указанных производных величин и единиц СИ в соответствии с техническим регламентом ТР 2007/003/ВУ. Обратите внимание на обозначение размерности основных величин СИ.

3. Изучите приставки, применяемые для образования кратных и дольных единиц.

4. Изучите правила применения и написания обозначений единиц.

5. Ответьте на вопросы и решите практические задачи:

5.1 Как следовало бы называть такие единицы, как литр и тонна по логике названий метрической системы мер?

5.2 В методике аналитического определения химического вещества использованы обозначения в %, ‰, ppm. Прокомментируйте их.

5.3 Выразите размерность следующих производных величин: скорости  $V$ , силы  $F$ , давления  $P$ .

5.4 Выполните перевод единиц:

$$100 \text{ г/км} = \quad \text{мг/м}$$

$$20 \text{ Н/мм}^2 = \quad \text{сН/м}^2$$

$$40 \text{ кВ/м} = \quad \text{В/см}$$

$$100 \text{ мг/мл} = \quad \text{г/дм}^3$$

$$38 \text{ кгс/мм}^2 = \quad \text{МПа}$$

$$120 \text{ кгс/мм} = \quad \text{Н/м}$$

5.5 В методике измерения уровня напряженности электростатического поля сказано, что если разброс отсчетов (отношение наибольшего и наименьшего значений результатов измерений) превышает 2 дБ, то число измерений должно быть увеличено до обеспечения доверительной границы случайной погрешности результата измерений в каждой точке не более 2 дБ с вероятностью 0,95. Если минимальное измеренное значение 0,4 кВ/м, то каким может быть максимальное значение, чтобы не пришлось проводить дополнительных измерений?

5.6 В результате наблюдений установлено, что при движении тела по окружности сила  $F$ , прижимающая его к опоре (рис. 1.1), в какой-то степени зависит от скорости тела  $v$ , его массы  $m$  и радиуса окружности  $r$ :  $F \rightarrow m v r$ . Пользуясь теорией размерности, определите вид этой зависимости.

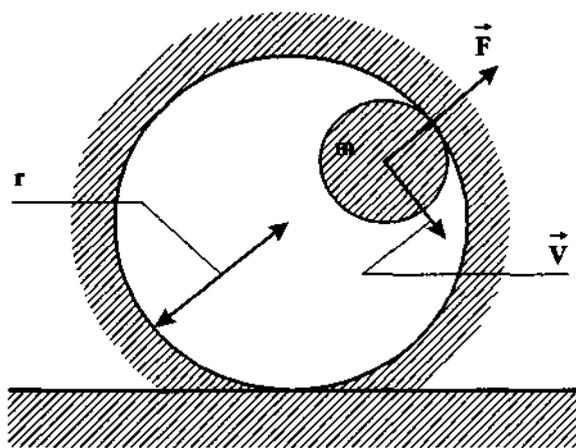


Рисунок 1.1 – Движение тела по окружности

6. Выполните вариант контрольного задания, полученного у преподавателя.

### 3 Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по данной работе должен содержать:

- 1) тему и цель работы;
- 2) выполненные задания п.5.3-5.6.

Вариант контрольного задания выполняется на отдельном листе и сдается преподавателю на проверку.

## Лабораторная работа № 2

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ШКАЛЫ

**Цель работы:** изучить основные типы измерительных шкал и провести их сравнительный анализ. Изучить основные элементы шкал средств измерений.

#### 1 Общие теоретические сведения

Термин «шкала» в метрологической практике имеет два различных значения. Во-первых, шкалой измерений называют принятый по соглашению порядок определения и обозначения всевозможных проявлений (значений) конкретного свойства (величины). Во-вторых, шкалой называют отсчетные устройства аналоговых средств измерений. В этом случае говорят о шкале измерительного устройства.

##### 1.1 Шкалы измерений

**Шкала измерений (шкала)** – отображение множества различных проявлений качественного или количественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений).

В соответствии с логической структурой проявления свойств в теории измерений различают пять основных типов шкал измерений: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные. Каждый тип шкалы обладает определенными признаками.

**Шкалы наименований** отражают качественные свойства. Их элементы характеризуются только соотношениями эквивалентности (равенства) и сходства конкретных качественных проявлений свойств.

В шкалах наименований нельзя ввести понятия единицы измерения; в них отсутствует и нулевой элемент.

Шкалы наименований, по существу, качественные; однако возможны некоторые статистические операции при обработке результатов измерений в этих шкалах, например, можно найти модальный или наиболее многочисленный класс эквивалентности.

При построении такой шкалы решающую роль играет выбор логики построения шкалы, принципа кодирования, а также большое значение имеет рациональный выбор градаций (классов эквивалентности) шкалы.

**Шкалы порядка** описывают свойства, для которых имеют смысл не только соотношения эквивалентности, но и соотношения порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Узкоспециализированные шкалы порядка широко применяются в методах испытаний различной

продукции. В этих шкалах также нет возможности ввести единицы измерений из-за того, что они не только принципиально нелинейны, но и вид нелинейности может быть различен и неизвестен на разных ее участках. Результаты измерений в шкалах твердости, например, выражаются в числах твердости по Бриггеллю, Виккерсу, Роквеллу, а не в единицах измерений. Шкалы порядка допускают монотонные преобразования, в них может быть или отсутствовать нулевой элемент.

**Шкалы разностей (интервалов)** отличаются от шкал порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только соотношения эквивалентности и порядка, но и суммирования интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств.

Шкалы разностей имеют условные (принятые по соглашению) единицы измерений и нули, опирающиеся на какие-либо реперы. Начало отсчета на шкале интервалов устанавливается произвольно. Несмотря на значительную неопределенность измеряемых разностей размеров в условных единицах, результаты измерений по шкале интервалов более информативны по сравнению с измерениями по шкале порядка, так как они позволяют не только установить, что один размер больше или меньше другого, но и численно определить, на сколько единиц отличаются исследуемые размеры один от другого. Однако, по шкале интервалов нельзя определить, во сколько раз данный размер больше или меньше другого, так как неизвестными остаются величины сопоставляемых размеров.

В этих шкалах допустимы линейные преобразования, в них применимы процедуры для отыскания математического ожидания, стандартного отклонения, коэффициента асимметрии и смещенных моментов.

**Шкалы отношений.** К множеству количественных проявлений в этих шкалах применимы соотношения эквивалентности и порядка – операции вычитания и умножения, а во многих случаях и суммирования (шкалы отношений 2-го рода – аддитивные шкалы).

В шкалах отношений существуют условные (принятые по соглашению) единицы и естественные нули. Примерами шкал отношений являются шкалы массы (2-го рода), термодинамическая температурная шкала (1-го рода).

Массы любых объектов можно суммировать, но суммировать температуры разных тел нет смысла, хотя можно судить о разности и отношении их термодинамических температур. Шкалы отношений широко используются в физике и технике, в них допустимы все арифметические и статистические операции.

**Абсолютные шкалы** – обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно в них существует естественное однозначное определение единицы измерений. Такие шкалы используются для измерений относительных величин (отношений одноименных величин: коэффициентов усиления, ослабления, КПД, коэффициентов отражений и поглощений, амплитудной модуляции и т. д.).

Практическая реализация шкал измерений достигается путем стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и, в необходимых случаях, способов и условий (спецификаций) их однозначного воспроизведения. Шкалы наименований и порядка могут реализовываться и без эталонов (шкала-классификация Линнея, шкала запахов, шкала Бофорта), но если создание эталонов необходимо, то они воспроизводят весь применяемый на практике участок шкалы (пример – эталоны твердости). Внесение любых изменений в спецификацию, определяющую шкалу наименований или порядка, практически означает введение новой шкалы.

Шкалы разностей и отношений (метрические шкалы), соответствующие СИ, как правило, воспроизводятся эталонами. Эталоны этих шкал измерений могут воспроизводить одну точку шкалы (эталон массы), некоторый участок шкалы (эталон длины) или практически всю шкалу (эталон времени).

Основные понятия, необходимые для определения шкал: нуль, условный нуль, условная единица измерений, естественная (безразмерная) единица измерений, диапазон шкалы измерений.

Нуль шкалы – элемент шкал порядка (некоторых), интервалов, отношений и абсолютных, их начальная точка. Различают естественный и условный нули шкал. Естественный нуль шкалы – это начальная точка шкалы, соответствующая стремящемуся к нулю количественному проявлению измеряемого свойства. Условный нуль шкалы – это точка шкалы разностей (интервалов) или шкалы порядка, которой по соглашению присвоено нулевое значение измеряемого свойства (величины). Шкала может простирается по обе стороны от точки условного нуля. Например, в наиболее распространенной календарной шкале за условный ноль принят день Рождества Христова.

Диапазон шкалы измерений – пределы изменений значений измеряемого свойства, охватываемые данной конкретной реализацией шкалы.

## 1.2 Шкалы средств измерений

**Шкала величины** – упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

**Шкала средства измерений** – часть показывающего устройства средства измерений, представляющая собой упорядоченный ряд отметок вместе со связанной с ними нумерацией.

Эскиз шкалы средства измерений представлен на рисунке 2.1.

На шкале можно выделить следующие элементы.

**Отметка шкалы** – знак на шкале средства измерений (черточка, зубец, точка и др.), соответствующий некоторому значению физической величины.

**Числовая отметка шкалы** – отметка шкалы средства измерений, у которой проставлено число.

**Деление шкалы** – промежуток между двумя соседними отметками шкалы средства измерений.

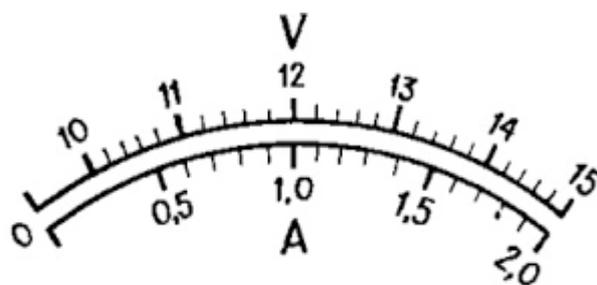


Рисунок 2.1 – Шкала аналогового ампервольтметра

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

**Начальное значение шкалы** – наименьшее значение измеряемой величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений.

**Конечное значение шкалы** – наибольшее значение измеряемой величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений.

**Длина шкалы** – длина линии, проходящей через центры всех самых коротких отметок шкалы средства измерений и ограниченной начальной и конечной отметками.

**Цена деления шкалы** – разность значения величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

При построении измерительных шкал используют градации арифметической или геометрической прогрессии, логарифмическую шкалу или шкалу экспоненциального распределения, а также шкалы вероятностного распределения измеряемых величин, такие как шкалы нормального распределения, распределений Пуассона, Бернулли или иные удобные для измерений градации.

В зависимости от градации шкалы бывают:

- практически равномерными – шкала, длина делений которой отличается друг от друга не более чем на 30 % и имеет постоянную цену делений;
- существенно неравномерными – шкала с сужающимися делениями, для которой значение выходного сигнала, соответствующее полусумме верхнего и нижнего пределов диапазона изменений входного (выходного) сигнала, находится в интервале между 65 и 100 % длины шкалы, соответствующей диапазону изменений входного (выходного) сигнала;
- степенными – шкала с расширяющимися или сужающимися делениями, отличная от шкал, указанных выше.

## 2 Материально-техническое обеспечение работы

Измерительные приборы с аналоговым устройством отображения информации: тераомметр, амперметры, вольтметры, манометры.

Шкала серых эталонов.

Шкала эталонов стандартного тона.

Атлас цветов.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Запишите тему и цель работы.

2. Изучите основные теоретические сведения по работе.

3. Составьте сравнительную характеристику основных типов измерительных шкал в форме таблицы 2.1, указав их основные классификационные признаки и особенности реализации. Соотнесите перечисленные в таблице 2.2 показатели и характеристики с определенным типом шкалы измерения и запишите их в строку 7 «Примеры...» таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Основные признаки классификации и особенности реализации шкал измерений

Признак типа шкалы измерений	Тип шкалы измерений				
	наименований	порядка	разностей (интервалов)	отношений	абсолютные
1	2	3	4	5	6
1 Допустимые логические и математические соотношения между проявлениями свойств					
2 Наличие нуля					
3 Возможность введения единицы измерения и ее наличие					
4 Необходимость эталона реализуемой шкалы					
5 Что должен воспроизводить эталон при его наличии					
6 Метрологические характеристики, определяемые в шкале					
7 Примеры шкал или характеристик, определяемых по шкале					

При заполнении соответствующих признаков шкалы рекомендуется использовать характеристики, приведенные ниже.

1. Допустимые логические и математические соотношения между проявлениями свойств:

- эквивалентность,
- порядок,
- суммирование,

- суммирование интервалов,
  - пропорциональность.
2. Наличие нуля:
- не имеет смысла,
  - обязательно,
  - устанавливается по соглашению,
  - имеется естественное определение нуля.
3. Возможность введения единицы измерения и ее наличие:
- не имеет смысла, принципиально невозможно ввести единицы измерений,
  - устанавливается по соглашению, есть возможность ввести единицы измерений,
  - имеется естественный критерий установления размера единиц, есть возможность ввести единицы измерений.
4. Необходимость эталона реализуемой шкалы:
- шкалы могут реализовываться без специальных эталонов,
  - реализуются только посредством специальных эталонов,
  - нет необходимости.
5. Что должен воспроизводить эталон при его наличии:
- весь используемый участок шкалы,
  - какую либо часть или точку шкалы и условный ноль,
  - какую либо часть или точку шкалы,
  - обязательные требования отсутствуют.
6. Метрологические характеристики, определяемые в шкале:
- среднее арифметическое,
  - мода,
  - среднее квадратическое отклонение,
  - абсолютная погрешность,
  - относительная погрешность.

Таблица 2.2 – Перечень примеров показателей, характеристик, величин для заполнения таблицы 2.1 (строка 7)

Показатели, характеристики, величины	
1 Длительность урока	13 Электрический ток в сети
2 Экзаменационная оценка	14 Диаметр детали
3 Запах	15 Группа крови
4 Интенсивность запаха	16 Коэффициент полезного действия
5 Температура воздуха по Фарингейту	17 Шкала твердости минералов Мооса <sup>3</sup>
6 Прочность	18 Скорость автомобиля
7 Масса детали	19 Возраст студента
8 Высота звука в музыке <sup>1</sup>	20 Шкала твердости резин по Шору
9 Температура тела человека	21 Водородный показатель (рН) <sup>4</sup>
10 Шкала серых эталонов	22 Коэффициент трения скольжения
11 Количество ошибок в тесте	23 Шкала боли <sup>5</sup>
12 Сила ветра по Бофорту <sup>2</sup>	24 Термодинамическая температура

Примечания:

<sup>1</sup> Единица измерения – октава, опорное значение  $f_0 = 440$  Гц – высота звука ноты «ля» первой октавы.

<sup>2</sup> приложение А таблица А.1

<sup>3</sup> приложение А таблица А.2

<sup>4</sup> Единица измерения - единица десятичного логарифма безразмерной величины, опорное значение  $m_0=1$  моль · кг<sup>-1</sup> – молярность ионов водорода в стандартном состоянии.

<sup>5</sup> приложение А рисунок А.1

4. Сделайте эскиз шкалы средства измерений, выданного преподавателем, и нанесите на нее обозначения и наименования основных элементов.

#### **4 Требования к содержанию и оформлению отчета**

Отчет по данной работе должен содержать:

- 1) тему и цель работы;
- 2) заполненную таблицу 2.1;
- 3) эскиз шкалы средства измерения, выданного преподавателем, с нанесенными обозначениями и наименованиями основных элементов.

## Лабораторная работа № 3

### КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** ознакомиться со средствами измерений (СИ) различных видов, их структурными элементами и изучить основные метрологические характеристики.

#### 1 Общие теоретические сведения

##### 1.1 Классификация средств измерений

**Средство измерения** – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

**Вид средств измерений** – совокупность средств измерений, предназначенных для измерений величин определенного вида. В соответствии с действующими техническими нормативными правовыми актами различают следующие виды величин, а, следовательно, и средств измерений (с указанием соответствующего кода):

- 01 – измерения геометрических величин;
- 02 – измерения массы;
- 03 – измерения силы и твердости;
- 04 – измерения давления;
- 05 – измерения вакуума;
- 06 – измерения параметров движения;
- 07 – измерения расхода и количества жидкостей и газов;
- 08 – измерения вязкости и плотности;
- 09 – физико-химические измерения;
- 10 – температурные и теплофизические измерения;
- 11 – оптические и оптико-физические измерения;
- 12 – акустические измерения;
- 13 – электрические измерения;
- 14 – магнитные измерения;
- 15 – измерения времени и частоты;
- 16 – радиотехнические измерения;
- 17 – измерения ионизирующих излучений;
- 19 – средства измерений параметров, влияющих на безопасность эксплуатации транспортных средств;
- 20 – средства неразрушающего контроля;
- 22 – измерения аэрогидродинамические;

23 – информационно-измерительные и управляющие системы, комплексы;

25 – средства измерений медицинского назначения;

99 – прочие средства измерений.

В зависимости от функционального назначения и конструктивного исполнения различают следующие средства измерений:

- меры;
- измерительные преобразователи;
- измерительные приборы;
- индикаторы.

Кроме того, основные и вспомогательные средства измерений и дополнительные устройства могут быть объединены в более сложные средства измерений: измерительные установки или измерительные системы.

**Меры** предназначены для хранения и воспроизведения физической величины одного заданного размера (однозначные меры) или ряда размеров (многозначные меры), значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Меры могут комплектоваться в наборы (наборы концевых мер длины, наборы разновесов).

**Измерительные преобразователи** предназначены для получения сигнала измерительной информации, его преобразования и выдачи в любой форме, удобной для передачи, обработки, хранения или дальнейшего преобразования, но не поддающейся непосредственному восприятию оператором. По характеру преобразования различают аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые преобразователи. По месту в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи. *Первичные измерительные преобразователи* – первые в измерительной цепи воспринимают информацию об измеряемой физической величине непосредственно от объекта измерений и формируют сигнал измерительной информации (терморезистор термометра сопротивления, фотоэлемент блескомера). *Промежуточные измерительные преобразователи* занимают в измерительной цепи любое место после первичного. Они получают сигнал измерительной информации от предшествующих преобразователей и осуществляют его дальнейшее преобразование и передачу. Конструктивно обособленный первичный преобразователь традиционно называют «датчик».

**Измерительные приборы** предназначены для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. В процессе измерения происходит преобразование измерительной информации и выдача ее в форме, поддающейся непосредственному восприятию оператором. По виду выходного сигнала приборы принято делить на *аналоговые* и «*цифровые*» (числовые). Выходной сигнал аналогового прибора является *непрерывной* функцией измеряемой величины. У «цифровых» приборов выходной сигнал *дискретный*, он обычно выдается на табло в числовой форме. По способу индикации значений принято различать приборы показывающие и регистрирующие (самопишущие и печатающие).

Измерительный прибор обычно состоит из цепочки измерительных преобразователей, включающей первичный и промежуточные преобразователи, а также устройства отображения измерительной информации. Измерительная информация может выдаваться на систему шкала-указатель, цифровое табло, громкоговоритель, самопишущее, цифропечатающее или другое регистрирующее устройство.

**Измерительные установки** включают в себя основные и вспомогательные средства измерений и дополнительные устройства, объединенные в одном месте и предназначенные для одновременных измерений нескольких одноименных или разноименных физических величин (установка для измерения удельного поверхностного электрического сопротивления текстильных материалов, установка для определения коэффициента линейного расширения материала детали).

**Измерительные системы** включают в себя основные и вспомогательные средства измерений и дополнительные устройства, расположенные в разных местах и объединенные каналами связи. Измерительные системы, как и измерительные установки, предназначены для одновременных измерений нескольких одноименных или разноименных физических величин (система контроля температуры технологической линии производства пищевых продуктов, радионавигационная система для определения местоположения различных объектов).

**Индикаторы** – особый вид средств измерений в виде технического устройства или вещества, предназначенного для установления наличия (отсутствия) какой-либо физической величины или определения ее порогового значения. В качестве примера можно привести лакмусовую бумагу и какие-либо вещества. В области измерений ионизирующих излучений индикатор часто дает световой и (или) звуковой сигнал о превышении уровнем радиации его порогового значения. В некоторых случаях в качестве индикаторов могут использоваться измерительные приборы (часы-будильник, омметр при проверке обрыва в электрической цепи, осциллограф для обнаружения измерительного сигнала).

Совокупность преобразовательных элементов, осуществляющих все преобразования измерительной информации в данном устройстве **называется измерительной цепью средства измерений**. Измерительная цепь прибора начинается с **чувствительного элемента**, который представляет собой часть первого в измерительной цепи преобразовательного элемента (первичного измерительного преобразователя), непосредственно воспринимающую сигнал измерительной информации от измеряемого объекта, т. е. находящуюся под непосредственным воздействием измеряемой физической величины (резервуар жидкостного термометра, крюк динамометра, губки штангенциркуля). У ряда средств измерений (приборы для измерений линейных и угловых размеров, приборы для измерений электрических величин, двухчашечные весы) могут быть два чувствительных элемента. Измерительная цепь прибора заканчивается устройством отображения измерительной информации (УОИ).

**Устройства отображения измерительной информации** бывают шкальными, цифровыми и регистрирующими. Шкальные и цифровые выдают информацию сразу для визуального восприятия. **Шкальные отсчетные устройства** обычно имеют систему *шкала-указатель*.

*Шкала средства измерений* – часть отсчетного устройства, представляющая собой совокупность отметок и поставленных у некоторых из них чисел отсчета или других символов, соответствующих ряду последовательных значений величины. Шкала устройства отображения измерительной информации может иметь множество делений или только одно нулевое деление – «вырожденная» шкала, характерная для приборов типа нуль-компаратора, которые предназначены для измерения нулевым методом.

*Указатель средства измерений* – часть отсчетного устройства, положение которого относительно отметок шкалы определяет показание средства измерений. Указатель может быть выполнен в виде стрелки, штриха, светового пятна, кромки детали и т. д. Изменение показаний в системе шкала-указатель, может осуществляться за счет перемещения указателя относительно неподвижной шкалы (стрелка часов) или шкалы относительно неподвижного указателя (круговая шкала на барабане микрометра).

Прибор может быть снабжен несколькими системами шкала-указатель (индикатор часового типа, измерительные головки ИГМ) или одной шкалой с несколькими указателями (часы с одним циферблатом, часовой, минутной и центральной секундной стрелками).

В современных электрических и электронных приборах в качестве **цифровых отсчетных устройств** широко используют световые табло, проекционные системы, светодиодные лампы и др. При выдаче измерительной информации на цифровое табло существенно важны такие его структурные элементы, как:

- вид выходного кода (двоичный, десятичный или другой);
- число разрядов выходного кода – предельное число знаков, в том числе цифр и не цифровых знаков, виды знаков и их содержание (наличие фиксированной или плавающей разделительной десятичной запятой (точки), минуса, знака переполнения или неправильного подключения и др.);
- цена единицы наименьшего разряда кода и номинальная ступень квантования, если она больше цены единицы наименьшего разряда кода.

У **регистрирующих** приборов выходной сигнал может записываться в виде графика на диаграммной бумаге, печататься в цифровой форме. В качестве устройств выдачи информации могут использоваться любые регистрирующие самопишущие или печатающие устройства. В приборах и индикаторах применяют и другие устройства визуальной индикации (нуль-указатели, светодиоды, табло светофорного типа), а также акустические устройства (звонок, громкоговоритель).

## 1.2 Метрологические характеристики (МХ) средств измерений

*Метрологические характеристики средства измерений* – характеристики свойств средства измерений, оказывающих влияние на результаты и погрешности измерений.

К характеристикам, предназначенным для определения результатов измерений (без введения поправки), относят функцию преобразования измерительного преобразователя, значение однозначной или значения многозначной меры, цену деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры, вид выходного кода, число разрядов кода, цену единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

К характеристикам погрешностей средств измерений относят значение систематической составляющей, характеристики случайной составляющей (среднее квадратическое отклонение, нормализованная автокорреляционная функция или функция спектральной плотности, вариация выходного сигнала и др.).

Часто погрешность средства измерения указывается в виде *пределов допускаемой основной погрешности* (абсолютной или относительной) и при необходимости *предела допускаемой дополнительной погрешности* (абсолютной или относительной). На многих средствах измерения может быть указан класс точности. *Класс точности* – обобщенная характеристика средства измерений, отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей.

Одним из свойств средств измерений является их чувствительность. Различают чувствительность к измеряемой величине и к влияющим величинам. Чувствительность средства измерения к измеряемой величине определяется отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины. В паспортах или руководствах по эксплуатации на средства измерения может быть указан *порог чувствительности* – наименьшее значение изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством. К характеристикам чувствительности средств измерений к влияющим величинам относят функции влияния  $\psi(\xi)$  или допустимые пределы изменения значений МХ средств измерений, вызванные изменениями влияющих величин  $\xi$ . *Функция влияния  $\psi(\xi)$*  – зависимость изменения МХ средства измерений от изменения влияющей величины или от изменения совокупности влияющих величин.

Для средств измерений некоторых видов указывают динамические характеристики, которые бывают полными и частными. Динамические характеристики средства измерений обусловлены свойствами средства измерений, проявляющимися в том, что на выходной сигнал этого средства измерений влияют значения входного сигнала и любые изменения этих значений во времени. *Полная динамическая характеристика* полностью описывает принятую математическую модель динамических свойств средства измерений. Описание может быть математическим, графическим и т. п. Так, например, для аналоговых

средств измерений могут указываться такие полные характеристики как: переходная характеристика  $h(t)$ ; импульсная переходная характеристика  $g(t)$ ; амплитудно-фазовая характеристика  $G(j\omega)$  и др.

К частным динамическим характеристикам средств измерений относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик. Примерами таких характеристик для аналоговых средств являются: время реакции  $t_r$ ; коэффициент демпфирования  $\gamma_{\text{dam}}$ ; значение резонансной собственной круговой частоты  $\omega_0$  и др. Примерами частных динамических характеристик аналого-цифровых преобразователей (АЦП), цифровых измерительных приборов (ЦИП), а также цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) являются: время реакции  $t_r$ ; погрешность датирования отсчета  $t_d$ ; максимальная частота (скорость) измерений  $f_{\text{max}}$ . *Время реакции средства измерений*  $t_r$  для показывающего измерительного прибора – это время установления показаний; для измерительного преобразователя – это время установления выходного сигнала.

Кроме перечисленных характеристик, необходимых для получения результата измерения и оценки погрешности, существенно важными для пользователя, особенно при выборе средства измерения для конкретной измерительной задачи, являются такие метрологические характеристики, как:

диапазон показаний – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы;

диапазон измерений – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

Во многих приборах диапазоны показаний и измерений совпадают.

## 2 Материально-техническое обеспечение работы

Гири в наборах по ГОСТ 7328-2001.

Набор плоскопараллельных концевых мер длины № 1 по ГОСТ 9038-90.

Пластины плоскопараллельные стеклянные ПМ 15 (меры плоскостности и взаимной параллельности измерительных поверхностей).

Лекальная линейка типа ЛД по ГОСТ 8026-92.

Линейка металлическая по ГОСТ 427-75.

Угольник поверочный по ГОСТ 3749-77.

Измерительные приборы с аналоговым устройством отображения информации:

- тераомметр Е6-13А;
- штангенциркуль типа ШЦ по ГОСТ 166-89;
- микрометр типа МК по ГОСТ 6507-90;
- толщиномер типа ТР или ТЧ по ГОСТ 11358-89,
- аспирационный психрометр типа МВ-4М.

Измерительные приборы с цифровым устройством отображения информации:

- мультиметр УТВ 158С;

- измеритель влажности и температуры ИВТМ-7 или типа ПОИНТ;
- измеритель-регулятор температуры типа ЦР 8001;
- измеритель напряженности типа ИЭСП-7.

Измерительные преобразователи:

- термопара типа К (датчик температуры в комплекте к прибору УТВ 158С );
- термометр сопротивления (к измерителю-регулятору температуры ЦР 8001).

Паспорта и руководства по эксплуатации на указанные средства измерения.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Запишите тему и цель работы.
2. Изучите основные теоретические сведения по работе.
3. Ознакомьтесь с характеристиками СИ разных видов и составом их структурных элементов, включая чувствительные элементы и устройства отображения измерительной информации.

При изучении воспользоваться паспортами и/или руководствами по эксплуатации на средства измерения.

Результаты изучения однозначных и многозначных мер систематизируйте в форме таблицы 3.1

Таблица 3.1 – Характеристики однозначных и многозначных мер

Наименование меры	Воспроизводимая величина	Номинальное значение	Цена деления	Погрешность
Набор мер массы				
Набор плоскопараллельных концевых мер длины				
Пластины плоскопараллельные стеклянные типа ПМ 15				
Лекальная линейка типа ЛД				
Линейка металлическая				
Угольник поверочный				

Результаты классификации средств измерений и изучения их характеристик целесообразно представить в виде таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Общие характеристики средств измерений

Наименование средства измерения	Чувствительный элемент, первичный преобразователь	Вид выходного сигнала	Устройство отображения информации	Погрешность, класс точности	Предел измерений / диапазон измерений (нижн. и верхн.)
1	2	3	4	5	6
Микрометр					
Штангенциркуль					

Вольтметр					
-----------	--	--	--	--	--

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Толщиномер					
Аспирационный психрометр					
Измеритель влажности и температуры					
Измеритель напряженности поля					
Мультиметр					
Термопара					
Измеритель-регулятор ЦР 8001/4					

Результаты изучения устройств отображения измерительной информации представьте в форме таблиц 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Характеристика шкальных устройств отображения измерительной информации

Наименование прибора	Характеристики устройства шкала-указатель					
	число шкал	вид шкалы	вид отметок	цена деления	число указат.	вид указателя
Микрометр						
Штангенциркуль						
Вольтметр						
Толщиномер						
Аспирационный психрометр						

Таблица 3.4 – Характеристика цифровых (дискретных) устройств отображения информации

Наименование прибора	Характеристики числового табло				
	вид кода	число рядов кода	номинальная ступень квантования	запятая (точка)	другие символы
Измеритель влажности и температуры					
Измеритель напряженности поля					
Мультиметр					

#### 4 Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по данной работе должен содержать:

- 1) тему и цель работы;
- 2) заполненные формы таблиц 3.1–3.4 для средств измерений, указанных преподавателем.

## Лабораторная работа № 4

### ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ

**Цель работы:** изучить формы выражения погрешностей средств измерений и способы нормирования классов точности.

#### 1 Общие теоретические сведения

**Точность средства измерения** – характеристика качества средства измерений, отражающая близость его погрешности к нулю.

**Погрешность средства измерения** – разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Обобщенной метрологической характеристикой средств измерения является **класс точности**. Он выражается пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерения, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерения.

**Основной** называют погрешность, которая наблюдается при соблюдении нормальных условий измерения. Дополнительная погрешность возникает вследствие отклонения условий измерения от нормальных. **Дополнительная** погрешность средства измерений – разность (без учета знака) между значением погрешности, соответствующим некоторому заданному значению влияющей величины в пределах рабочих условий применения, и значением погрешности, соответствующим нормальному значению влияющей величины.

В свою очередь, пределы допускаемых основных погрешностей выражаются в форме абсолютных, относительных или приведенных погрешностей в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений входного или выходного сигнала, а также от условий применения и назначения конкретных видов средств измерений.

**Абсолютная погрешность**  $\Delta$  – это погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины и определяемая как разность между результатом измерения  $X$  и истинным (действительным) значением  $Q$  измеряемой величины

$$\Delta = X - Q .$$

Абсолютная погрешность не может, однако, сама по себе служить показателем точности измерений, так как одно и то же ее значение, например  $\Delta = 0,05$  мм при  $X = 100$  мм, соответствует достаточно высокой точности, а при  $X = 1$  мм – низкой. Поэтому для характеристики точности результатов измерения вводится понятие **относительной** погрешности, выражаемой в относительных единицах или в процентах.

**Относительная погрешность**  $\delta$  – это погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности к результату измерения (действительному значению)

$$\delta = \frac{\Delta}{X} 100.$$

Относительную погрешность обычно выражают в процентах. Но эта очень наглядная характеристика точности результата измерения не годится для нормирования погрешности СИ, так как при различных значениях  $X$  принимает различные значения. Поэтому для указания и нормирования погрешности СИ используется еще одна разновидность относительной погрешности, а именно так называемая *приведенная погрешность*.

**Приведенная погрешность средства измерений**  $\gamma$  – относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Условно принятое значение величины называют *нормирующим значением*  $X_N$ . Часто за нормирующее значение принимают верхний предел измерений. Выражается в относительных единицах или в процентах

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} 100.$$

Ее основное отличие от относительной погрешности состоит в том, что  $\Delta$  относится не к переменной текущей величине  $X$ , а к постоянной величине протяженности диапазона.

Приведенная погрешность удобна тем, что для многих многопредельных СИ она имеет одно и то же значение как для всех точек каждого поддиапазона, так и для всех его поддиапазонов, т. е. ее очень удобно использовать для нормирования свойств СИ.

Деление средств измерений на классы точности, способы нормирования метрологических характеристик, комплекс требований к которым зависит от класса точности средств измерений, и обозначения классов точности осуществляются в соответствии с ГОСТ 8.401-80.

Пределы допускаемой основной погрешности могут устанавливаться:

- в виде абсолютной погрешности по формуле

$$\Delta = \pm a, \quad (1)$$

или

$$\Delta = \pm(a + b \cdot X), \quad (2)$$

где  $\Delta$  – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины на входе (выходе) или условно в делениях шкалы;

$X$  – значение измеряемой величины на входе (выходе) средств измерений или число делений, отсчитанных по шкале;

$a, b$  – положительные числа, не зависящие от  $X$ .

➤ в виде приведенной погрешности по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – пределы допускаемой приведенной основной погрешности, %;

$\Delta$  – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (1);

$X_N$  – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и  $\Delta$ ;

$p$  – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $1,6 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $3 \cdot 10^n$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ ; ( $n = 1, 0, -1, -2$ , и т. д.).

Нормирующее значение  $X_N$  назначают с учетом следующих требований:

1. Для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, следует устанавливать равным большему из пределов измерений или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений.

2. Для средств измерений физической величины, для которых принята шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений. Например, для милливольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений  $200^\circ\text{C}$  и  $600^\circ\text{C}$  нормирующее значение  $X_N = 400^\circ\text{C}$ .

3. Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение устанавливают равным этому номинальному значению. Например, для частотомеров с диапазоном измерений 45-55 Гц и номинальной частотой 50 Гц нормирующее значение  $X_N = 50$  Гц.

4. Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины:

➤ в виде относительной погрешности по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{X} = \pm q, \quad (4)$$

если  $\Delta$  установлено по формуле (1), или по формуле

$$\delta = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_k}{X} \right| - 1 \right) \right], \quad (5)$$

если  $\Delta$  установлено по формуле (2),

где  $\delta$  – пределы допускаемой относительной основной погрешности, %;

$X_K$  – больший (по модулю) из пределов измерений;

$X$  – значение измеряемой величины;

$c, d$  – положительные числа, выбираемые из установленного ряда.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме абсолютных погрешностей (или относительных погрешностей, заданных в виде графика, таблицы или сложной формулы), классы точности обозначают в документации прописными буквами латинского алфавита (например, для гирь) или римскими цифрами (например, для весов, штангенциркулей).

В необходимых случаях к обозначению класса точности буквами латинского алфавита допускается добавлять индексы в виде арабской цифры. Классам точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, должны соответствовать буквы, находящиеся ближе к началу алфавита, или цифры, означающие меньшие числа.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Способы нормирования классов точности

Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
			в документации	на средстве измерения
Приведенная	$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p$ если нормирующее значение выражено в единицах величины на входе (выходе) средств измерений (п.1–3)	$\gamma = \pm 0,5$	класс точности 0,5	0,5
	$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p$ если нормирующее значение принято равным длине шкалы или ее части (п. 4)	$\gamma = \pm 0,5$	класс точности 0,5	0,5 ✓
Относительная	$\delta = \frac{\Delta}{X} = \pm q$	$\delta = \pm 0,5$	класс точности 0,5	0,5
	$\delta = \pm \left[ c + d \left( \left  \frac{X_K}{X} \right  - 1 \right) \right]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01 \left( \left  \frac{X_K}{x} \right  - 1 \right)]$	класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01
	если устанавливают по более сложной формуле или в виде графика, либо таблицы		класс точности M	M
Абсолютная	$\Delta = \pm a$ или $\Delta = \pm(a + b \cdot X)$		класс точности C	C

## 2 Материально-техническое обеспечение работы

Измерительные приборы:

- амперметры;
- вольтметры;
- манометры;
- тераомметры;
- терморегулятор ЦР 8001/4.

Технические нормативные правовые акты:

- ГОСТ 24104-2001;
- ГОСТ 7328-2001;
- ГОСТ 166-89.

## 3 Порядок выполнения работы

1. Запишите тему и цель работы.
2. Изучите основные теоретические сведения по работе.
3. На основании стандартов, содержащих технические требования к весам, гирям, штангенциркулям, записать возможные классы точности для этих средств измерений.
4. Для выданных преподавателем средств измерений установить класс точности и рассчитать предел абсолютной основной погрешности для нижнего и верхнего предела диапазона, а также для середины. Результаты вычислений абсолютной основной погрешности для нижнего, верхнего предела и середины диапазона измерений для выданных средств измерений представьте в форме таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета абсолютной погрешности

Средство измерения	Класс точности	Диапазон измерений	Расчетная формула	Расчет абсолютной погрешности
Амперметр				$\Delta_n =$ $\Delta_c =$ $\Delta_k =$

5. Решить контрольные задачи, выданные преподавателем.

## 4 Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по данной работе должен содержать:

- 1) тему и цель работы;
- 2) таблицу 4.1;
- 3) классы точности весов, гирь, штангенциркулей;
- 4) таблицу 4.2;
- 5) решение контрольных задач.

## Лабораторная работа № 5

### ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** изучение видов и методов измерений физических величин.

#### 1 Общие теоретические сведения

##### 1.1 Виды измерений

**Измерение физической величины** – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

**Принцип измерений** – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений. Поскольку принципы измерений связаны с измерительными преобразованиями, то можно говорить о средствах измерений, построенных на механических, оптических, электрических, магнитных и других (в том числе комбинированных) принципах преобразования измерительной информации.

В зависимости от способа получения результата различают прямые и косвенные измерения.

**Прямое измерение** – измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно. Примеры: измерение длины детали штангенциркулем, измерение силы электрического тока амперметром, массы тела на электронных весах.

**Косвенное измерение** – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Примеры косвенных измерений: нахождение по измеренным длинам сторон прямоугольного треугольника значений его углов и площади, определение плотности материала твердого тела.

Измерения любого множества физических величин в соответствии с их однородностью (или неоднородностью) принято классифицировать на совокупные и совместные измерений.

**Совокупные измерения** – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. Пример: определение значений массы отдельных гирь набора по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь.

**Совместные измерения** – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Пример: одновременные измерения длин и температур для нахождения температурного коэффициента линейного расширения.

Для отображения результатов, получаемых при измерениях, могут быть использованы разные оценочные шкалы, в том числе градуированные в единицах измеряемой физической величины, либо в некоторых относительных единицах, в том числе и в неименованных. В соответствии с этим принято различать *абсолютные* и *относительные* измерения.

*Абсолютное измерение* – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

*Относительное измерение* – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную. Пример – измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве эталонной меры активности.

По числу повторных измерений одной и той же величины различают *однократные* и *многократные* измерения.

*Однократное измерение* – измерение, выполненное один раз.

*Многократное измерение* – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений.

## 1.2 Методы измерений

*Метод измерений* – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Метод измерений обычно обусловлен устройством средств измерений.

Различают метод *непосредственной оценки* и метод *сравнения с мерой*. Принципиальные различия заключаются в том, что метод сравнения с мерой предусматривает обязательное использование *овеществленной меры*, а метод непосредственной оценки реализуют с помощью приборов без дополнительного применения мер в явном виде.

*Метод непосредственной оценки* – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Суть метода непосредственной оценки, как любого метода измерения, состоит в сравнении измеряемой величины с мерой, принятой за единицу, но в этом случае мера «заложена» в измерительный прибор *опосредованно*.

*Метод сравнения с мерой* – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Примеры: измерение массы на рычажных весах с использованием гирь (мер массы), измерение напряжения постоянного тока прибором-компаратором, путем сравнения с известной ЭДС нормального элемента.

Разновидностями метода сравнения с мерой являются:

- *дифференциальный и нулевой методы измерений,*
- *метод замещения и метод противопоставления.*

В зависимости от степени приближения размера, воспроизводимого мерой, к измеряемой величине, различают дифференциальный и нулевой методы.

**Дифференциальный метод измерений** – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Примеры: измерение массы взвешиванием на равноплечих рычажных весах с уравниванием чашек и подсчетом колебаний указателя в пределах микрошкал; измерение длины детали на станковом приборе с измерительной головкой при настройке по блоку концевых мер.

**Нулевой метод измерений** – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Пример: измерение массы взвешиванием на равноплечих рычажных весах с полным уравниванием чашек и остановкой указателя.

В зависимости от одновременности или неодновременности воздействия на прибор сравнения объекта измерения и меры различают метод замещения и метод противопоставления.

**Метод замещения** метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Пример: взвешивание на рычажных весах с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда).

В другой интерпретации метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором известную величину, воспроизводимую мерой, после настройки прибора замещают измеряемой величиной, то есть эти величины воздействуют на прибор **последовательно**. Пример: измерение длины станковым прибором при настройке по блоку концевых мер.

**Метод противопоставления** – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, **одновременно** воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами. Пример: измерение массы на рычажных весах с использованием гирь (классическим способом или методом Гаусса).

В зависимости от способа взаимодействия средства измерения и объекта измерения различают контактные и бесконтактные методы измерения.

**Контактный метод измерений** – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения. Примеры: измерение диаметра вала индикаторной скобой, измерение температуры тела термометром.

**Бесконтактный метод измерений** – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения. Пример: измерение температуры инфракрасным пирометром; измерение расстояния до объекта радиолокатором.

## 2 Материально-техническое обеспечение работы

Гири в наборах по ГОСТ 7328-2001.

Весы технические равноплечие по действующей нормативной документации.

Весы электронные типа AS 220/C/2 по ГОСТ 24104-2001 высокого класса точности.

Штангенциркуль типа ШЦ по ГОСТ 166-89.

Микрометр типа МК по ГОСТ 6507-90.

Штатив с индикатором типа ИЧ.

Набор плоскопараллельных концевых мер длины № 1 по ГОСТ 9038-90.

Паспорта и руководства по эксплуатации на указанные средства измерения.

Объекты измерения: детали цилиндрической формы.

## 3 Порядок выполнения работы

1. Запишите тему и цель работы.

2. Изучите основные теоретические сведения по работе.

3. Выполните прямые и косвенные измерения заданных физических величин с использованием метода непосредственной оценки и разных вариантов метода сравнения с мерой.

3.1 Определите массу детали различными методами на технических весах.

Для этого сначала определяют цену деления микрошкалы  $d$

$$d = p/n,$$

где  $p$  – масса грузика, вызвавшего отклонение стрелки;

$n$  – число делений, на которое отклонилась стрелка под влиянием грузика  $p$ .

При взвешивании на весах с микрошкалой обычно не ожидают полной остановки стрелки, так как это отнимает много времени, а определяют положение равновесия  $L$  по двум, трем или четырем отклонениям стрелки, следующих друг за другом. Отклонения обозначают  $l_1, l_2, l_3, l_4$ .

Если положение равновесия  $L$  определяют из двух отклонений, то

$$L = (l_1 + l_2) / 2,$$

если положение равновесия находят по трем отклонениям, то берут среднее арифметическое из двух пар наблюдений

$$L = \left[ \frac{l_1 + l_2}{2} + \frac{l_2 + l_3}{2} \right] \div 2 = \frac{l_1 + 2l_2 + l_3}{4}.$$

Если нуль расположен посередине шкалы, то наблюдение справа записывают со знаком «+», а слева со знаком «-». Подсчет ведут как с алгебраическими числами.

### 3.1.1 Определение массы детали методом замещения (методом Борда).

При взвешивании по этому способу взвешиваемое тело  $Q$  помещают на одну из чашек весов и уравнивают его какой-то тарой  $T$ . Уравновешивать весы следует таким образом, чтобы стрелка совершала колебания приблизительно симметрично относительно среднего штриха шкалы. Получают положение равновесия  $L_1$ . Затем, не трогая тары, снимают с чашки весов тело  $Q$  и, уравновесив тару гирями  $P$ , получают новое положение равновесия  $L_2$ .

Если положения равновесия  $L_1$  и  $L_2$  окажутся равными между собой, то значит масса тела  $Q$  равна массе гирь  $P$ . На практике такое случается редко. Для учета этой разницы при окончательном определении массы тела необходимо знать цену деления  $d$ .

Для достоверности можно определить ее еще раз. Для этого проводят третье взвешивание, добавив на одну из чашек грузик  $p$ , значение которого выбирают применительно к чувствительности весов. Получают третье положение равновесия  $L_3$ . Масса тела определяется по формуле

$$Q = P + (L_1 - L_2) \cdot d = P + (L_1 - L_2) \frac{p}{(L_3 - L_2)}.$$

Если нуль на шкале расположен в центре, то перед скобкой  $(L_1 - L_2) \cdot d$  ставят знак «+», но отсчетам присваивают знак «+», если показание находится справа от нуля, и знак «-», если показание находится слева от нуля.

### 3.1.2 Определение массы детали методом противопоставления (метод Гаусса).

При взвешивании по этому способу взвешиваемое тело  $Q$  помещают на правую чашку весов и уравнивают его гирями  $P$  так, чтобы колебания стрелки не выходили за пределы шкалы. определяют положение равновесия  $L_1$ . Затем гири и тело меняют местами и определяют положение  $L_2$ . Если при перемещении тела и гирь с чашки на чашку стрелка вышла за пределы шкалы или совершает колебания в одной из половин шкалы, то необходимо на одну из чашек добавить гирю  $k$ , для того, чтобы привести колебания стрелки к середине шкалы.

Вычисляют массу тела по формуле

$$Q = P \pm \frac{k}{2} \pm \frac{1}{2} (L_1 - L_2) \cdot d = P \pm \frac{k}{2} \pm \frac{1}{2} (L_1 - L_2) \cdot \frac{p}{L_3 - L_2}$$

Значение  $\frac{k}{2}$  берут со знаком «+», если гиря добавлена на чашку с гирями, и со знаком «-», если гиря добавлена на чашку с взвешиваемым телом. Правило выбора знака перед выражением  $\frac{1}{2} \cdot (L_1 - L_2) \cdot d$  такое же, как и при взвешивании по способу Борда. Разность  $(L_3 - L_2)$  берут без учета знака.

Результаты определения массы на технических весах свести в таблицу 5.1, форма которой показана ниже.

Таблица 5.1 – Результаты определения массы детали

Наблюдение	Нагрузка на чашку весов		Отсчеты по шкале			Положение равновесия L	Примечание
	левую	правую	$l_1$	$l_2$	$l_3$		
Метод Борда							
1-е	T	Q				$L_1$	
2-е	T	P				$L_2$	P=
3-е	T	P+p				$L_3$	p=
Метод Гаусса							
1-е	Q	P				$L_1$	P=
2-е	P+k	Q				$L_2$	k=
3-е	при необходимости для определения ц.д.						

3.2 Определите массу деталей методом непосредственной оценки на электронных весах.

3.3 Проведите серию измерений длины, диаметра, объема и плотности для десяти деталей, выданных преподавателем. Результаты измерения представьте в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты косвенных измерений

Физическая величина, ед.изм.	Применяемое СИ / расчетная формула	Результаты измерения										Среднее значение
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Масса, г												
Длина, мм												
Диаметр, мм												
Объем, мм <sup>3</sup>												
Плотность материала, г/мм <sup>3</sup>												

Результаты измерений записывают, указывая все значащие цифры, получаемые при отсчете. Результаты косвенных измерений округляют, оставляя цифру, соответствующую наименьшему разряду входящих в расчетную формулу результатов прямых измерений или на разряд меньше.

4. Проведите анализ выполненной работы, классифицируйте использованные виды и методы измерений, результаты анализа оформите в виде таблицы 5.3.

Таблица 5.3 – Характеристики видов и методов измерений

Измеряемые величины и средства измерений (из таблиц 5.1 и 5.2)	Характеристика метода измерений	Виды измерений				
		по видам ФВ	прямые/ косвенные	совокуп./ совместн.	абс./отн.	однократн./ многократн.

#### 4 Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по данной работе должен содержать:

- 1) тему и цель работы;
- 2) таблицу 5.1 и необходимые промежуточные вычисления;
- 3) таблицу 5.2;
- 4) таблицу 5.3.

## Лабораторная работа № 6

### ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

**Цель работы:** изучить характеристики качества измерений и простейшие способы их оценивания при выполнении многократных измерений с применением разных методик выполнения измерений в различных лабораториях.

#### 1 Общие теоретические сведения

##### 1.1 Основная терминология

**Измерение физической величины** – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Для описания точности метода измерений в современной метрологической практике применяется серия стандартов СТБ ИСО 5725 (часть 1-6), во всех частях которых применяются два термина: «правильность» и «прецизионность». «Правильность» касается близости между средним арифметическим значением большого числа результатов испытаний и истинным или принятым эталонным значением. «Прецизионность» касается близости между результатами испытаний.

Необходимость принятия во внимание «прецизионности» возникает из-за того, что испытания или измерения, выполняемые на предположительно идентичных материалах при предположительно идентичных обстоятельствах, обычно не дают тождественно равных результатов. Это дает основания говорить о неопределенности измерительной информации.

Неопределенность информации, полученной при измерении конкретной физической величины с многократными наблюдениями, зависит от множества объективных и субъективных причин. На неопределенность измерений оказывают влияние:

- использованные технические ресурсы (средства измерений, меры и др.);
- операторы;
- условия окружающей среды (температура, влажность, напряжение питающей сети и т. д.);
- число наблюдений в серии;
- выбор гипотез о «законах распределения», выбор критериев согласия, уровней значимости при проверке гипотез по критериям согласия;
- выбор методов исключения наблюдений с явно выраженными грубыми погрешностями, выбор критериев статистического анализа «подозрительных» наблюдений и уровней значимости при проверке гипотез по этим критериям;
- выбор значения доверительной вероятности для описания результата измерений.

Для оценки качества измерений и получения его дифференцированных количественных оценок в метрологии часто используют такие свойства, как **точность, правильность, прецизионность, повторяемость и воспроизводимость** измерений.

В лабораторной работе используем терминологию, применяемую в серии стандартов СТБ ИСО 5725 (часть 1–6).

**Точность результата измерений** (*точность измерений*) – одна из характеристик качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения.

**Правильность измерений** – близость среднего значения, полученного на основании большой серии результатов испытаний, к принятому эталонному значению величины. Является характеристикой качества измерений, отражающей близость к нулю систематических погрешностей в результатах.

**Прецизионность** – близость между независимыми результатами измерений, полученными при определенных принятых условиях. Прецизионность зависит только от распределения случайных погрешностей и не связана ни с истинным значением, ни с заданным значением. Показатель прецизионности обычно выражают в терминах рассеяния и вычисляют как стандартное отклонение результатов испытаний. В международной практике и стандартах под термином «стандартное отклонение» понимается среднее квадратическое отклонение (СКО).

**Повторяемость** – прецизионность в условиях повторяемости.

**Условия повторяемости** – условия, при которых независимые результаты испытаний получены одним методом на идентичных образцах испытаний в одной лаборатории одним оператором с использованием одного оборудования и за короткий интервал времени.

**Стандартное отклонение повторяемости** – стандартное отклонение результатов испытаний, полученных в условиях повторяемости.

**Предел повторяемости  $r$**  – такое значение, что абсолютная разность между двумя результатами испытаний, полученными в условиях повторяемости, будет ожидаться меньше его или равной ему с вероятностью 95 %.

**Воспроизводимость** – прецизионность в условиях воспроизводимости.

**Условия воспроизводимости** – условия, при которых результаты испытаний получены одним методом на идентичных образцах испытаний в различных лабораториях, разными операторами с использованием различного оборудования.

**Стандартное отклонение воспроизводимости** – стандартное отклонение результатов испытаний, полученных в условиях воспроизводимости.

**Предел воспроизводимости  $R$**  – такое значение, что абсолютная разность между двумя результатами испытаний, полученными в условиях воспроизводимости, будет ожидаться меньше его или равной ему с вероятностью 95 %.

В соответствии с РМГ 29-99 применяется несколько другое определение воспроизводимости, которое не искажает сути понятия, а также используется такая характеристика качества измерений, как сходимость.

**Сходимость результатов измерений** – близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

**Воспроизводимость результатов измерений** – близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.).

Воспроизводимость измерений в разных сериях следует оценивать близостью средних значений, учитывая рассеяния (размахи результатов наблюдений или значения средних квадратических либо средних арифметических погрешностей).

## 1.2 Определение воспроизводимости с использованием значений размахов результатов многократных измерений $R'$

При использовании значений размахов результатов многократных измерений  $R'$  для оценки сходимости нескольких серий измерений, параметр  $R'_i$  для каждой серии рассчитывают по формуле

$$R' = X_{\max} - X_{\min}. \quad (6.1)$$

Геометрическое представление размаха  $R'$  результатов измерений можно получить на **точечной диаграмме** результатов многократных измерений физической величины, которая строится в системе координат «номера наблюдений  $n_i$  – результаты наблюдений при измерениях  $X_i$ » (рисунок 6.1). Идеальная точечная диаграмма (рисунок 6.1 а) представляет собой множество точек на одной высоте, соответствующей истинному значению измеряемой физической величины. Поскольку отсутствуют какие-либо тенденции изменения результатов – все точки лежат на прямой, параллельной оси абсцисс, можно говорить об отсутствии переменных систематических погрешностей. Отсутствие отклонений точек от этой прямой свидетельствует об отсутствии случайных погрешностей.

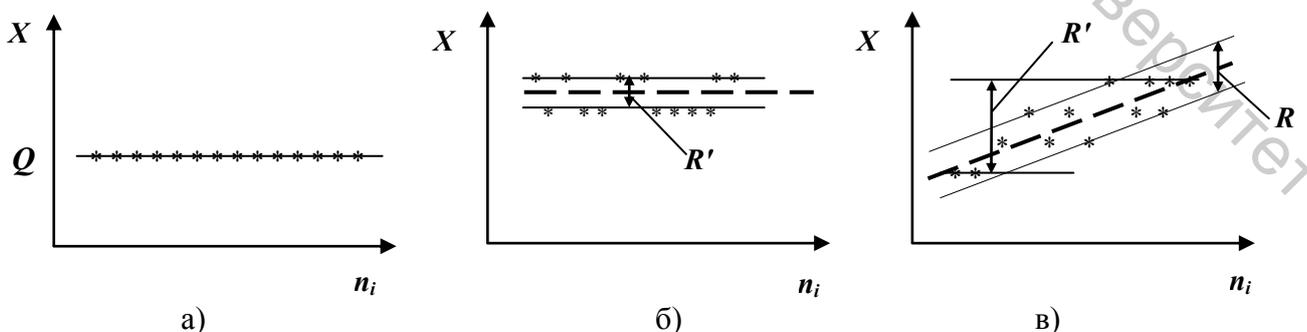


Рисунок 6.1 – Точечные диаграммы результатов измерений с многократными наблюдениями

На рисунках 6.1 б, 6.1 в приведены диаграммы, отличающиеся от идеальных наличием погрешностей, которые ограничивают определенность измерительной информации. В качестве первичных оценок неопределенностей можно использовать размахи результатов в сериях. На рисунке 6.1 б очевидно отсутствует сходимость результатов в серии. Заметное рассеяние результатов наблюдений относительно возможной горизонтальной аппроксимирующей прямой (штриховая линия) можно оценить размахом  $R'$ .

Наличие устойчивой тенденции изменения (увеличения) результатов измерений на рисунке 6.1 в свидетельствует о влиянии на результаты измерений некоторых закономерно изменяющихся факторов, вызывающих систематические погрешности в серии (имеется очевидное нарушение правильности измерений). На этой точечной диаграмме проведена наклонная аппроксимирующая прямая (штриховая линия), соответствующая наблюдаемой тенденции. На диаграмме показаны два размаха результатов – общий размах  $R'$ , вызванный комплексным влиянием систематических и случайных воздействий, и размах  $R$ , определяемый случайными отклонениями результатов от аппроксимирующей линии (последний характеризует рассеяние, свободное от влияния систематических воздействий).

Выполнение нескольких серий измерений одной и той же физической величины с использованием разных методик выполнения измерений (МВИ) позволяет оценить воспроизводимость измерений.

На рисунке 6.2 представлены точечные диаграммы двух серий измерений, полученные при использовании двух разных МВИ. Диаграммы построены в одной координатной сетке с одинаковым масштабом, что позволяет непосредственно сопоставлять их размахи. На рисунке видно, что наблюдается низкая воспроизводимость измерений, поскольку не совпадают ни средние значения, ни размахи в сериях.

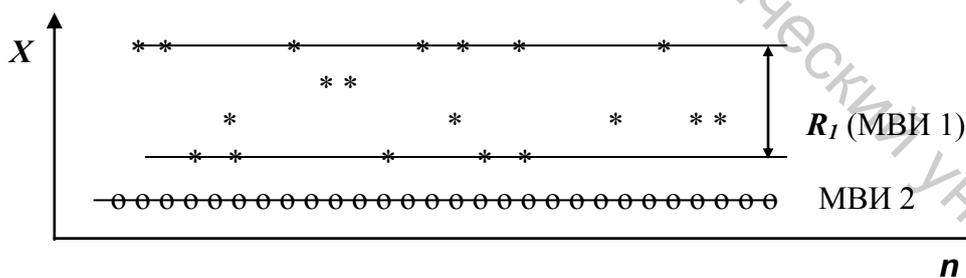


Рисунок 6.2 – Точечные диаграммы двух серий многократных измерений

### 1.3 Определение показателей воспроизводимости методом статистического анализа

При анализе точности выполненных измерений в различных лабораториях в первую очередь рассчитывают следующие оценки:

– среднее значение каждой лаборатории (МВИ)  $\bar{y}_i$  и общее среднее  $\bar{y}$  между ними;

– внутрिलाбораторная дисперсия (или дисперсия каждой МВИ)  $S_w^2$ ;

$$S_w^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2}{n - 1}, \quad (6.2)$$

где  $x_i$  - единичный результат измерения;

$n$  – количество результатов измерений в лаборатории (по МВИ);

– дисперсия повторяемости  $S_r^2$  – среднее арифметическое значений  $S_w^2$ ;

– межлабораторная дисперсия, отражающая изменчивость между МВИ (или операторами)  $S_L^2$

$$S_L^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{m - 1}, \quad (6.3)$$

где  $m$  – количество задействованных лабораторий (МВИ);

– дисперсия воспроизводимости  $S_R^2$

$$S_R^2 = S_r^2 + S_L^2. \quad (6.4)$$

Стандартное отклонение повторяемости  $\sigma_r$  и воспроизводимости  $\sigma_R$  вычисляются как корень квадратный из соответствующей дисперсии.

В обычной лабораторной практике требуется исследование разности, наблюдаемой между результатами испытаний. Для этой цели более необходимо наличие некоторой меры, схожей скорее с критической разностью, чем со стандартным отклонением.

Процесс оценки точности предполагает получение оценок истинного стандартного отклонения, в то время как истинное значение стандартного отклонения все равно остается неизвестным. Поэтому в статистической практике принято обозначать эти оценки буквой  $S$ , а не  $\sigma$ . Но если оценки будут определяться на основе некоторого значительного числа результатов испытаний и будут давать наилучшую информацию, для нахождения истинных значений стандартных отклонений, то целесообразным представляется использовать символ  $\sigma$  для обозначения стандартного отклонения, полученного на основе результатов полномасштабного эксперимента по оценке прецизионности и использовать его как истинное стандартное отклонение, с которым будут сравниваться другие оценки  $S$ .

При проверке двух результатов испытаний, полученных в условиях повторяемости или воспроизводимости, сравнение должно проводиться с использованием значения предела повторяемости

$$r = 2,8\sigma_r \quad (6.5)$$

или предела воспроизводимости

$$R = 2,8\sigma_R. \quad (6.6)$$

Если выполняются две группы измерений в одной лаборатории в условиях повторяемости, где первая группа - результаты измерений  $n_1$  со средним арифметическим  $\bar{y}_1$ , вторая группа - результаты измерений  $n_2$  со средним арифметическим  $\bar{y}_2$ , то критическая разность для  $|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|$  будет:

$$CD = 2,8\sigma_r \sqrt{\frac{1}{2n_1} + \frac{1}{2n_2}} \quad (6.7)$$

при 95 %-ном уровне вероятности.

Если выполнено две группы измерений в двух лабораториях, т.е. первая лаборатория получает  $n_1$  результатов измерений со средним арифметическим  $\bar{y}_1$ , а вторая  $n_2$  результатов со средним арифметическим  $\bar{y}_2$ , то критическая разность для  $|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|$  будет

$$CD = \sqrt{(2,8\sigma_R)^2 - (2,8\sigma_r)^2 \left(1 - \frac{1}{2n_1} - \frac{1}{2n_2}\right)} \quad (6.8)$$

при 95 %-ном уровне вероятности.

Если  $n_1$  и  $n_2$  оба равны единице, это приведет к  $R = 2,8\sigma_R$ .

При наличии эталонного значения  $\mu_0$  сравнение с ним результата измерения, полученного в одной лаборатории осуществляется следующим образом. Если в лаборатории в условиях повторяемости получены  $n$  результатов испытаний со средним арифметическим  $\bar{y}$ , то критическую разность для  $|\bar{y} - \mu_0|$  вычисляют

$$CD = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(2,8\sigma_R)^2 - (2,8\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right)}. \quad (6.9)$$

После расчета соответствующих пределов с ними сравнивается значение критической разности средних арифметических по каждой МВИ между двумя группами результатов измерения или разность среднего и эталонного значения. Если абсолютное значение разности превышает соответствующий предел, то эта разность получает статус «подозрительной» и подлежит тщательному изучению, так же, как и измерения, на основании которых она получена.

## 2 Материально-техническое обеспечение работы

Средства измерений:

- штангенциркуль типа ШЦ по ГОСТ 166-89;
- микрометр типа МК по ГОСТ 6507-90;
- толщиномер типа ТР или ТЧ по ГОСТ 11358-89.

Объекты измерений: однотипные детали цилиндрической формы.

### 3 Порядок выполнения работы

1. Запишите тему и цель работы.
2. Изучите основные теоретические сведения по работе.
3. Выполните три серии многократных измерений одной и той же физической величины ( $n = 10$ ). Целесообразно проводить измерение диаметра деталей с применением разных средств измерений (МВИ1 – микрометром, МВИ2 – штангенциркулем; МВИ3 – толщиномером). Результаты занесите в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты серий многократных измерений диаметра детали

№ МВИ	Номер наблюдения $n$									
	1	2	3	4	5	6	7	.....	.....	среднее
МВИ1										
МВИ2										
МВИ3										

4. По результатам измерений постройте точечные диаграммы (можно совместить на одной диаграмме, обозначая результаты измерения каждой МВИ разными маркерами) в координатах «номер наблюдений  $n$  – результат измерения  $X_i$ » и проведите анализ каждой серии и совместный анализ точечных диаграмм. По оси ординат диаграммы предпочтительно откладывать не результаты измерений, а отклонения результатов от среднего значения. Масштаб желательно выбрать таким, чтобы размах  $R'$  на диаграмме можно было оценить двумя значащими цифрами.

Анализ результатов каждой отдельной серии включает оценку размахов результатов измерений и оценку наличия тенденции изменения. При наличии явно выраженной тенденции оценивают размах результатов  $R'$  (общий размах), затем на диаграмму наносят аппроксимирующую линию и оценивают размах отклонений от аппроксимирующей линии  $R$ , складывая по модулю максимальные отклонения от нее с противоположными знаками. Результаты анализа запишите в произвольной форме под соответствующими диаграммами. Оцените расхождение средних значений.

Воспроизводимость измерений в трех сериях оцените по степени совпадения размахов и аппроксимирующих линий. При наличии в сериях отличающихся тенденций воспроизводимость, как правило, низкая, даже если результаты будут практически равномерными ( $R_3 \approx R_2 \approx R_1$ ).

5. Рассчитайте необходимые оценки дисперсий.

6. Определите пределы повторяемости и воспроизводимости. Проведите анализ критических разностей результатов, полученных по МВИ2 и МВИ3. Сравните эти результаты с эталонным значением, в качестве которого принят результат, полученный с использованием МВИ1. Сделайте выводы о воспроизводимости результатов.

#### 4 Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по данной работе должен содержать:

1. Результаты серий многократных измерений диаметра детали, как в таблице 6.1.
2. Совместную точечную диаграмму трех серий измерений с необходимыми обозначениями.
3. Результаты анализа воспроизводимости с применением метода графического анализа размахов и сделанные выводы.
4. Результаты вычисления дисперсий повторяемости и воспроизводимости, стандартных отклонений повторяемости и воспроизводимости, пределов повторяемости и воспроизводимости.
5. Результаты анализа и выводы о воспроизводимости результатов, полученные методом статистической обработки.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Цитович, Б. В. Метрология. Лабораторный практикум: учебно-методическое пособие для студентов приборостроительного факультета / Б. В. Цитович. – Мн.: БНТУ, 2006. – 153 с.
2. ТР 2007/003/ВУ «Единицы измерений, допущенные к применению на территории Республики Беларусь».
3. МИ 2365-96 ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения.
4. ГОСТ 8.009 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
5. ГОСТ 8.401-90 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
6. Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – Москва : Логос, 2001. – 408. : ил.
7. Бурдун, Г. Д. Основы метрологии : уч. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
8. Фридман, А. Э. Основы метрологии. Современный курс / А. Э. Фридман. – СПб.: НПО Профессионал, 2008. – 284 с.: ил.
9. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника: Учебное пособие / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, В. Ю. Барбарович; под ред. К. К. Кима. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.
10. СТБ ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1–6.

## Приложение А

### Определения некоторых шкал измерений

Таблица А.1 - Шкала Бофорта для силы морского ветра

Сила ветра, балл	Название	Признаки
0	Штиль	Дым идет вертикально
1	Тихий	Дым идет слегка наклонно
2	Легкий	Ощущается лицом, шелестят листья
3	Слабый	Развеваются флаги
4	Умеренный	Поднимается пыль
5	Свежий	Вызывает волны на воде
6	Сильный	Свистит в вантах, гудят провода
7	Крепкий	На волнах образуется пена
8	Очень крепкий	Трудно идти против ветра
9	Шторм	Срывает черепицу
10	Сильный шторм	Вырывает деревья с корнем
11	Жестокий шторм	Большие разрушения
12	Ураган	Опустошительное действие

Таблица А.2 – Шкала твердости минералов Мооса

Твердость, балл	Название минерала
1	тальк
2	гипс
3	кальцит (известковый шпат)
4	флюорит (плавиковый шпат)
5	апатит
6	ортоклаз (роговая обманка)
7	кварц
8	топаз
9	корунд
10	алмаз

Перечисленные минералы приняты в качестве эталонных и по отношению к их твердостям оценивается твердость оцениваемого минерала. Если эталон, имеющий твердость  $n$  баллов, царапает поверхность исследуемого минерала, а исследуемый образец царапает эталон с твердостью  $(n - 1)$  баллов, то оцениваемая твердость считается равной  $(n - 1)$ .

### Модифицированная лицевая шкала боли (The Faces Pain Scale-Revised (FPS-R))

Модифицированная лицевая шкала боли, которая представляет шесть выражений лиц, начиная с нейтрального выражение лица. Каждое из представленных в шкале изображений получило цифровую оценку в диапазоне от 0 до 10 баллов.

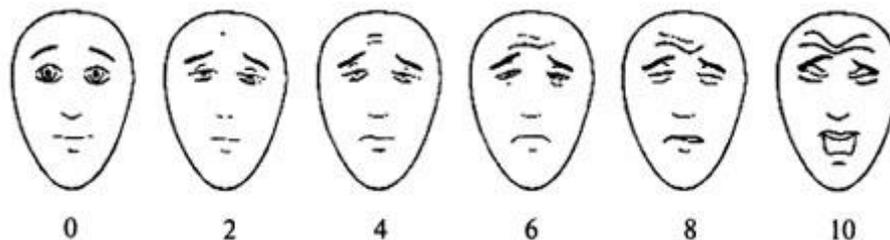


Рисунок А.1 – Лицевая шкала боли

Самое левое лицо показывает человека, которому совсем не больно. Лица слева направо показывают людей, у которых боль увеличивается, нарастает. Лицо справа показывает человека, которому нестерпимо больно. Шкала применяется для оценки степени боли у детей. Пациент должен указать лицо, указывающее, насколько ему больно в данный момент.