

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В трех томах

Том 3

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Рекомендовано
Учебно-методическим объединением по образованию в области
машиностроительного оборудования и технологий
в качестве учебно-методического пособия для студентов
специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения»
(6-05-0714-02 «Технология машиностроения, металлорежущие
станки и инструменты»)

Витебск
2024

УДК 621
ББК 34.4
Ш 42

Рецензенты:

кафедра «Технологии металлов» учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»
(зав. кафедрой, д.т.н., проф. В. М. Капцевич);

профессор кафедры «Стандартизация, метрология и информационные
системы» Белорусского национального технического университета,
д.т.н., проф. В. Л. Соломахо.

Одобрено кафедрой технологии машиностроения,
протокол № 12 от 16.03.2023.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 4 от 27.12.2023 г.

Ш42

Управление качеством в машиностроении : учебное пособие.
В 3 т. Т. 3. Метрологические основы / В. К. Шелег, Н. Н. Попок,
Н. В. Беляков; УО «ВГТУ». – Витебск, 2024. – 422 с.
ISBN 978-985-481-757-6 (Т. 3)
ISBN 978-985-481-754-5

Приводятся основные понятия научной, технической и организационной основ метрологического обеспечения качества в машиностроении. Описаны особенности системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь и метрологических служб предприятий. Приведены методики проведения метрологической экспертизы технической документации, выбора универсальных средств измерения и контроля геометрических и механических величин, а также проведения поверки средств измерения. Изложены основы теории измерений, погрешностей измерений и обработки результатов, а также средств измерений и их метрологической надежности.

Издание предназначено для студентов первой ступени высшего образования в области машиностроения и может быть полезным инженерно-техническим и научным работникам предприятий. Может использоваться также в системе повышения квалификации и переподготовки кадров машиностроительного профиля.

УДК 621
ББК 34.4

ISBN 978-985-481-757-6 (Т. 3)
ISBN 978-985-481-754-5

© УО «ВГТУ», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Понятие метрологического обеспечения качества	9
1.1 Некоторые сведения из истории метрологии	9
1.2 Место метрологии среди других наук	12
1.3 Понятие научной, технической и организационной основ метрологического обеспечения качества	13
1.4 Вопросы для самоконтроля	20
2 Организационные основы метрологического обеспечения качества	22
2.1 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь	22
2.1.1 Цели и задачи СОЕИ	22
2.1.2 Организационная структура СОЕИ	23
2.1.3 Особенности построения государственной метрологиче- ской службы	27
2.1.4 Белорусский государственный институт метрологии	29
2.1.5 Международное сотрудничество государственной метро- логической службы	33
2.2. Метрологическая служба предприятия	35
2.2.1. Задачи и обязанности	35
2.2.2 Структура и права метрологической службы предприятия	37
2.3 Метрологическая экспертиза технической документации	41
2.3.1 Общие положения	41
2.3.2 Порядок проведения метрологической экспертизы	42
2.3.3 Основные задачи метрологической экспертизы	44
2.3.4 Метрологическая экспертиза чертежей деталей	45
2.3.5 Метрологическая экспертиза сборочных чертежей	52
2.3.6 Метрологическая экспертиза технологической документации	54
2.3.7 Пример проведения МЭ чертежа	58
2.4 Вопросы для самоконтроля	61
3 Основные понятия теоретической метрологии	64
3.1. Физические свойства и величины	64
3.1.1 Классификация величин	64
3.1.2 Понятие счета, контроля, единицы величины и измерения	67
3.1.3 Шкалы измерений	71
3.2. Теория единства измерений	75
3.2.1 Системы физических величин и их единиц	75
3.2.2 Международная система единиц (система СИ)	83

3.2.3 Понятие о единстве измерений	90
3.2.4 Эталоны единиц физических величин	91
3.2.5 Эталоны единиц системы СИ	94
3.2.6 Понятие поверочной схемы и стандартного образца	102
3.3 Вопросы для самоконтроля	104
4 Основы теории измерений	107
4.1 Философский и научный аспекты	107
4.2 Измерение и его основные операции	107
4.3 Элементы процесса измерений	109
4.4 Основные этапы измерений	119
4.5 Постулаты теории измерений	121
4.6 Классификация измерений	124
4.7 Понятие об испытании и контроле	127
4.8 Вопросы для самоконтроля	130
5 Понятие погрешности измерений. Систематические погрешности	132
5.1 Общие вопросы погрешностей измерения	132
5.1.1 Классификация погрешностей	132
5.1.2 Принципы оценивания погрешностей	138
5.1.3 Округление результатов измерений	139
5.2 Систематические погрешности	141
5.2.1 Общие вопросы	141
5.2.1.1 Классификация систематических погрешностей	141
5.2.1.2 Инструментальные погрешности	142
5.2.1.3 Погрешности, возникающие в результате неправильной установки средств измерений	147
5.2.1.4 Погрешности, возникающие вследствие внешних влияний	148
5.2.1.5 Погрешности метода измерения или теоретические погрешности	151
5.2.1.6 Субъективные систематические погрешности	153
5.2.2 Учет и оценка погрешностей	154
5.2.2.1 Устранение источников погрешностей до начала измерения	154
5.2.2.2 Исключение систематических погрешностей в процессе измерения	157
5.2.2.3 Метод рандомизации и графический метод	165
5.2.2.4 Специальные статистические методы	165
5.2.2.5 Исключение систематических погрешностей путем введения поправок	170
5.3 Вопросы для самоконтроля	171

6 Случайные погрешности. Грубые погрешности. Обработка результатов измерений	174
6.1 Вероятностное описание случайных погрешностей	174
6.1.1 Дискретные случайные величины	174
6.1.2 Непрерывные случайные величины	177
6.2 Числовые параметры законов распределения	182
6.2.1 Понятие центра распределения	182
6.2.2 Моменты распределений	184
6.2.3 Энтропийное значение погрешности	187
6.3 Основные законы распределения	188
6.3.1 Общие сведения	188
6.3.2 Трапецеидальные распределения	188
6.3.3 Экспоненциальные распределения	190
6.3.4 Нормальное распределение (распределение Гаусса)	191
6.3.5 Уплощенные распределения	193
6.3.6 Семейство распределений Стьюдента	194
6.3.7 Двухмодальные распределения	196
6.4 Точечные оценки законов распределения	198
6.5 Доверительная вероятность и доверительный интервал	201
6.6 Грубые погрешности и методы их исключения	205
6.6.1 Понятие о грубых погрешностях	205
6.6.2 Критерии исключения грубых погрешностей	207
6.7 Основы теории суммирования погрешностей	210
6.8 Вопросы для самоконтроля	213
7 Средства измерений	216
7.1 Понятие о средстве измерения	216
7.2 Принципиальная схема СИ	217
7.3 Статические и динамические характеристики и параметры средств измерений	221
7.4 Классификация средств измерений	223
7.5 Деление СИ по роли в процессе измерения и выполняемым функциям	228
7.6 Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование	238
7.7 Классы точности средств измерений	243
7.8 Основы выбора средств измерений	246
7.9 Вопросы для самоконтроля	256
8 Универсальные средства измерения и контроля геометрических и механических величин в машиностроении	259
8.1 Классификация средств и методов измерения и контроля геометрических величин в зависимости	259

8.2 Основные измерительные инструменты и приборы в машиностроении	261
8.2.1 Плоскопараллельные концевые меры длины	261
8.2.2 Меры длины штриховые. Щупы	264
8.2.3 Контроль калибрами	264
8.2.4 Штангенинструмент и микрометрические инструменты...	270
8.2.5 Средства измерения и контроля с механическим преобразованием	276
8.2.6 Средства измерения и контроля с оптическим и оптико-механическим преобразованием	282
8.2.7 Средства измерения и контроля с пневматическим преобразованием. Электрические, электромеханические и радиоактивные измерительные приборы	294
8.3 Выбор средств измерений линейных размеров	299
8.3.1 Общие положения	299
8.3.2 Порядок выбора средств измерений	305
8.3.3 Система поддержки принятия решений по выбору средств измерения	310
8.4 Измерение и контроль механических величин	312
8.4.1 Методы и средства измерения и контроля кинематических величин	312
8.4.1.1 Методы и средства измерения и контроля линейных скоростей	312
8.4.1.2 Методы и средства измерения и контроля скоростей вращения	314
8.4.1.3 Методы и средства измерения ускорений	316
8.4.1.4 Методы и средства измерения вибраций	319
8.4.2 Методы и средства измерения и контроля динамических величин	320
8.4.3 Методы и средства измерения и контроля механических свойств веществ и материалов	326
8.5 Вопросы для самоконтроля	336
9 Метрологическая надежность средств измерений. Поверка...	340
9.1 Основные понятия теории метрологической надежности	340
9.2 Изменение метрологических характеристик средств измерений в процессе эксплуатации	342
9.3. Математические модели изменения во времени погрешности средств измерений	345
9.3.1 Линейная модель изменения погрешности	345
9.3.2 Экспоненциальная модель изменения погрешности	347
9.3.3 Логистическая модель изменения погрешности	350
9.4 Показатели метрологической надежности средств измерений	353
9.5 Поверка средств измерений	357

9.5.1 Общие сведения о поверке средств измерений	357
9.5.2 Классификация СИ, подлежащих поверке	358
9.5.3 Взаимодействие сторон при процедурах поверки	360
9.5.4 Поверочные схемы	361
9.5.5 Установки высшей точности для воспроизведения единиц	365
9.5.6 Метрологическая надежность и межповерочные интервалы	366
9.5.7. Методики поверки СИ	368
9.5.7.1 Общие положения	368
9.5.7.2 Основные принципы построения методики поверки средств измерений	370
9.5.7.3 Содержание требований к оформлению результатов поверки	372
9.5.8 Разновидности поверок	373
9.6 Вопросы для самоконтроля	377
Список использованных источников	380
Приложения.....	387
Приложение А. Перевод некоторых единиц, применяемых в Англии и США, в единицы СИ	387
Приложение Б. Номинальные значения влияющих величин при нормальных условиях	388
Приложение В. Статистические таблицы	389
Приложение Г. Предельные погрешности измерения наружных линейных размеров, биений и глубин некоторыми универсальными измерительными средствами	391
Приложение Д. Предельные погрешности измерения внутренних линейных размеров некоторыми универсальными измерительными средствами	407
Приложение Е. Измерение наружных размеров станковыми средствами измерения	410
Приложение Ж. Измерение наружных размеров накладными средствами измерения	413
Приложение И. Измерение внутренних размеров	415
Приложение К. Измерение глубин и уступов универсальными измерительными средствами	417
Приложение Л. Измерение радиального и торцевого биения поверхностей	419

ВВЕДЕНИЕ

Инженеры-машиностроители в своей практической работе постоянно связаны с измерениями. Измерения в современных производственных процессах машиностроения являются источником объективной информации и играют важнейшую роль в управлении качеством продукции. Метрология, как наука об измерениях, методах, средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности, является одной из важнейших составляющих всего комплекса мероприятий, направленных на создание продукции заданного качества.

Проблемам развития научных основ метрологического обеспечения посвящены работы Н. И. Тюрина, И. Ф. Шишкина, А. Г. Сергеева, В. В. Крохина, А. Э. Фридмана, В. А. Кузнецова, В. В. Лячнева и многих других авторов. Вопросам создания технических основ метрологического обеспечения посвящены работы К. И. Абаджи, С. А. Зайцева, И. Т. Махони, А. К. Кутая, Г. Г. Раннева, В. Г. Кострицкого и других авторов в виде учебных и справочных изданий. Организационные основы метрологического обеспечения регламентирует Госстандарт. Однако изданий с комплексным охватом этих проблем применительно к машиностроению практически нет. Поэтому главной задачей настоящего издания является интеграция знаний по *научным, организационным и техническим основам* метрологического обеспечения качества изделий в машиностроении.

Целью изучения издания является формирование системы научных знаний о современных методах метрологического обеспечения эксплуатационных свойств изделий, необходимых для решения теоретических и практических задач повышения эффективности производства и качества продукции.

В настоящем издании приводятся знания об: организационных основах метрологии; основных этапах и проблемах научно-технического развития метрологической службы; теории единства измерений; общих законах и правилах измерений; принципах построения современных измерительных устройств, применяемых в машиностроении и их возможностях; методах измерения различных величин, характерных для машиностроения; основах метрологического обеспечения машиностроительных предприятий.

С помощью учебно-методического пособия возможно научиться: проводить метрологическую экспертизу конструкторской и технологической документации; пользоваться наиболее распространенными в машиностроении средствами измерений; определять и оценивать погрешности измерений и средств измерений в машиностроении; производить поверку средств измерений.

1 ПОНЯТИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

1.1 Некоторые сведения из истории метрологии

В древнейшие времена люди обходились только счетом однородных объектов – голов скота, числа воинов и т. п. Такой счет не требовал введения понятия физической величины и установления условных единиц измерения. Не было потребности в изготовлении и использовании специальных технических средств для проведения счета [1–14].

Однако по мере развития общества появилась необходимость в количественной оценке различных величин – расстояний, веса, размеров, объемов и т. д. Эту оценку старались свести к счету, для чего выбирались природные и антропологические единицы. Из глубины веков дошли до нас:

- единица веса драгоценных камней – карат, что в переводе с языков древнего юго-востока означает «семя боба», «горошина»;

- единица аптекарского веса – гран, что в переводе с латинского, французского, английского, испанского означает «зерно».

В Киевской Руси применялись в обиходе:

- вершок – «верх перста» – длина фаланги указательного пальца;
- локоть, или по персидски арш, т. е. аршин – расстояние от локтя до конца среднего пальца вытянутой руки;
- дюйм – длина второго сустава большого пальца руки;
- фут – длина ступни человека;
- сажень – от «сягать», «достигать», т. е. можно достать;
- косая сажень (предел того, что можно достать) – расстояние от подошвы левой ноги до конца среднего пальца вытянутой вверх правой руки.

Древнее происхождение имеют и «естественные» меры. Первыми из них, получившими повсеместное распространение, стали меры времени. На основе астрономических наблюдений древние вавилоняне установили год, месяц, час. Впоследствии $1/86400$ часть среднего периода обращения Земли вокруг своей оси получила название секунды.

Наряду с этим уже на заре цивилизации люди пришли к пониманию ценности так называемых «вещественных» мер и единиц измерений. Так, в Вавилоне во II веке до н. э. время измерялось в минах. Мина равнялась промежутку времени (равному, примерно, двум астрономическим часам), за который из принятых в Вавилоне водяных часов вытекала «мина» воды, масса которой составляла около 500 г. Впоследствии мина сократилась и превратилась в привычную для нас минуту. Со вре-

менем водяные часы уступили место песочным, а затем более сложным маятниковым механизмам.

Ни в древнем мире, ни в средние века не существовало службы по измерениям и мерам, но имеются сведения о применении образцовых мер и хранении их в церквях и монастырях, а также о ежегодных проверках средств измерений, «...торговые все весы и мерила блюсти без пакости, ни умаливати, ни умноживати, а на всякий год извещивати...» (Устав новгородского князя Всеволода «О церковных судах и о людях и о мерилах торговли», 1136 г.). Примерами величин, принятых нашими предками в качестве эталонов могут быть:

- золотой пояс киевского князя Святослава Ярославовича – мера длины, о которой старинная грамота (1073 г.) говорит. «Се мера и основание» (его длина была 108 см);

- ярд – расстояние от кончика носа короля Англии Генриха I (XI–XII вв.) до конца среднего пальца его вытянутой руки (по другим источникам – длина меча этого же короля);

- законный дюйм – длина трех ячменных зерен – установлен английским королем Эдвардом II в 1324 г.;

- шток – 16 футов – длина ступней 16 человек, вышедших первыми из церкви от заутрени в воскресенье.

В Двинской грамоте Ивана Грозного (1550 г.) регламентированы правила хранения и передачи размера новой меры сыпучих веществ – осьмины. Ее медные экземпляры рассылались по городам на хранение выборным людям – старостам, соцким, целовальникам. С этих мер надлежало сделать клейменные деревянные копии для городских помещиков, а с тех, в свою очередь, – деревянные копии для использования в обиходе. Образцовые меры, с которых снимались первые копии, хранились централизованно в приказах Московского государства. Таким образом, можно говорить о начале создания при Иване Грозном государственной системы обеспечения единства измерений и государственной метрологической службы.

На определенном этапе своего развития измерения стали причиной возникновения метрологии. Долгое время последняя существовала как описательная наука, констатирующая сложившиеся в обществе соглашения о мерах используемых величин. Развитие науки и техники привело к использованию множества мер одних и тех же величин, применяемых в различных странах. Так, расстояние в России измерялось верстами, а в Англии – милями. Все это существенно затрудняло сотрудничество между государствами в торговле, науке [2, 5, 10–14].

С целью унифицировать единицы ФВ, сделать их независимыми от времени и разного рода случайностей во Франции была разработана метрическая система мер. Эта система строилась на основе естественной единицы – метра, равного одной сорокамиллионной части меридиана, проходящего через Париж. За единицу массы принимался кило-

грамм – масса кубического дециметра чистой воды при температуре +4 С. Учредительное собрание Франции 26 марта 1791 г. утвердило предложения Парижской академии наук. Это явилось серьезной предпосылкой для проведения международной унификации единиц ФВ.

В 1832 г. К. Гаусс предложил методику построения систем единиц ФВ как совокупности основных и производных величин. Он построил систему единиц, названную абсолютной, в которой за основу были приняты три произвольные, независимые друг от друга единицы: длины – миллиметр, массы – миллиграмм и времени – секунда.

В 1835 г. в России был издан указ «О системе Российских мер и весов», в котором были утверждены эталоны длины (платиновая сажень) и массы (платиновый фунт). В 1842 г. на территории Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге в специально построенном здании открылось первое метрологическое учреждение России – Депо образцовых мер и весов. В нем хранились эталоны и их копии, изготавливались образцовые меры для передачи в другие города, проводились сличения российских мер с иностранными. Деятельность Депо регламентировалась «Положением о мерах и весах», которое положило начало государственному подходу к обеспечению единства измерений в стране. В 1848 г. в России вышла первая книга по метрологии – «Общая метрология», написанная Ф. И. Петрушевским. В этой работе описаны меры и денежные знаки различных стран.

В 1875 г. семнадцать государств, в том числе и Россия, на дипломатической конференции подписали Метрическую конвенцию, к которой в настоящее время примкнуло 48 стран мира. Согласно этой конвенции устанавливается международное сотрудничество подписавших ее стран. Для этого было создано Международное бюро мер и весов (МБМВ), находящееся в г. Севре близ Парижа. В нем хранятся международные прототипы ряда мер и эталоны единиц некоторых ФВ. В соответствии с конвенцией для руководства деятельностью МБМВ был учрежден Международный комитет мер и весов (МКМВ), в который вошли ученые из различных стран. Сейчас при МКМВ действуют семь консультативных комитетов: по единицам, определению метра, секунды, термометрии, электричеству, фотометрии и по эталонам для измерения ионизирующих излучений.

Очень много для развития отечественной метрологии сделал Д. И. Менделеев. Период с 1892 по 1917 г. называют менделеевским этапом развития метрологии. В 1893 г. на базе Депо образцовых мер и весов была утверждена Главная палата мер и весов, управляющим которой до последних дней жизни был Д. И. Менделеев. Она стала одним из первых в мире научно-исследовательских учреждений метрологического профиля.

До 1918 г. метрическая система внедрялась в России факультативно, наряду со старой русской и английской (дюймовой) системами.

Значительные изменения в метрологической деятельности стали происходить после подписания Советом народных комиссаров РСФСР декрета «О введении международной метрической системы мер и весов». Внедрение метрической системы в России происходило с 1918 по 1927 гг. После Великой Отечественной войны метрологическая работа в СССР проводилась под руководством Государственного комитета по стандартам (Госстандарт).

В 1960 г. XI Международная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц ФВ – систему СИ. Сегодня метрическая система узаконена более чем в 124 странах мира.

В настоящее время на базе Главной палаты мер и весов существует высшее научное учреждение РФ – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ). В лабораториях института разрабатываются и хранятся государственные эталоны единиц измерений, определяются физические константы и свойства веществ и материалов. Тематика работ института охватывает линейные, угловые, оптические и фотометрические, акустические, электрические и магнитные измерения, измерения массы, плотности, силы, давления, вязкости, твердости, скорости, ускорения и ряда других величин.

В 1955 г. под Москвой был создан второй метрологический центр СССР – ныне Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он разрабатывает эталоны и средства точных измерений в ряде важнейших областей науки и техники.

Третьим метрологическим центром СССР являлся (и ныне является в России) Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС) – головная организация в области прикладной и законодательной метрологии России.

В Республике Беларусь метрологическая служба была создана в 1924 году. Днем создания считается 29 февраля 1924 г. – дата основания Белорусской палаты мер и веса – первое в Белоруссии метрологическое учреждение. Ныне это разветвленная и технически оснащенная сеть, состоящая из 16 областных и региональных центров стандартизации и метрологии, а также сеть ведомственных метрологических служб более 60 предприятий и организаций республики [1–14].

1.2 Место метрологии среди других наук

Академик Б. М. Кедров предложил [15] так называемый «треугольник наук», в «вершинах» которого находятся естественные, социальные и философские науки. По этой классификации метрология попа-

дает на сторону «естественные – социальные науки». Это связано с тем, что социальная значимость результатов, получаемых метрологией, очень велика. Например, отрицательные последствия от недостоверных результатов измерений в отдельных случаях могут быть катастрофическими. Правомерно и помещение метрологии на стороне «естественные – философские науки». Это обусловлено значением метрологии для теории познания.

Говоря о «месте» любой науки в системе наук, Б. М. Кедров указывает: «Место в системе наук выражает собой, во первых, совокупность всех связей и отношений между данной наукой и непосредственно соприкасающимися с ней науками, а через них, и с более отдаленными от нее, следовательно, со всей суммой человеческих знаний; это отвечает рассмотрению вопроса с его структурной стороны; во-вторых, определенную ступень развития научного познания, отражающую соответствующую ступень развития самого внешнего мира, а тем самым наличие переходов между данной наукой и непосредственно примыкающими к ней в общем ряду наук; это отвечает рассмотрению вопроса с его исторической или генетической стороны». Без измерений не может обойтись ни одна наука, поэтому метрология как наука об измерениях находится в тесной связи со всеми другими науками.

Используя ряд разделов фундаментальных и прикладных наук – физику, химию, математику, кибернетику и другие, метрология, вместе с тем, развивается как *обособленная наука*, изучающая и устанавливающая специфические законы и правила, позволяющие определять количественные выражения свойств объектов материального мира, опираясь на математический аппарат, в первую очередь, на теорию вероятностей и математическую статистику.

1.3 Понятие научной, технической и организационной основ метрологического обеспечения качества

Обеспечение единства и требуемой точности измерений, подготовленности методов или средств измерений, постоянного поддержания современного научно-технического и даже опережающего развития областей измерений, исходя из потребности народного хозяйства страны, отдельных отраслей или предприятий принципиально возможно только при условии реализации комплекса постоянно действующих мероприятий, многообразной и целенаправленной деятельности широкого круга специалистов, т. е. метрологического обеспечения [16–26].

Под метрологическим обеспечением понимают установление и применение научных и организационных основ, технических средств,

правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Хозяйственные, научные или конструкторские звенья зависят от степени и характера развития метрологического обеспечения. Каждое изделие и, даже отдельная деталь, а также любая стадия или этап создания продукции – технологический процесс изготовления, испытания, контроль и т. д. практически не могут существовать без надлежащего метрологического обеспечения. Что же касается эксплуатации машин, производственно-энергетического оборудования, то здесь метрологическое обеспечение – важнейшее средство достижения высокого качества, надежности и безопасной их работы. Метрологическое обеспечение в своем развитии опирается на *научную, техническую и организационную основы*.

Таким образом, метрология делится на три самостоятельных и взаимно дополняющих раздела, основным из которых является *«Теоретическая метрология»*. В нем излагаются общие вопросы теории измерений. Раздел *«Прикладная метрология»* посвящен изучению вопросов практического применения в различных сферах деятельности результатов теоретических исследований. В заключительном разделе *«Организационная метрология»* рассматриваются комплексы взаимосвязанных и взаимообусловленных общих правил, требований и норм, а также другие вопросы, нуждающиеся в регламентации и контроле со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений (СИ).

Теоретическая метрология является основным разделом метрологии. Ее структура представлена в виде схемы на рисунке 1.1.

Основные представления метрологии. Как и в любой науке, в метрологии необходимо сформулировать основные понятия, термины и постулаты, разработать учение о физических единицах и методологию. Данный раздел особенно важен ввиду того, что в основе отдельных областей измерений лежат специфические представления и в теоретическом плане области развиваются изолированно. При этих условиях недостаточная разработанность основных представлений заставляет решать аналогичные задачи, которые, по сути, являются общими, заново в каждой области.

Основные понятия и термины. Этот подраздел занимается обобщением и уточнением понятий, сложившихся в отдельных областях измерений с учетом специфики метрологии. Главной задачей является создание единой системы основных понятий метрологии, которая должна служить базой для ее развития. Значение системы понятий определяется значимостью самой теории измерений и тем, что указанная система стимулирует взаимопроникновение методов и результатов, наработанных в отдельных областях измерений.

Постулаты метрологии. В этом подразделе развивается аксиоматическое построение теоретических основ метрологии, выделяются такие постулаты, на основе которых можно построить содержательную и полную теорию и вывести важные практические следствия.

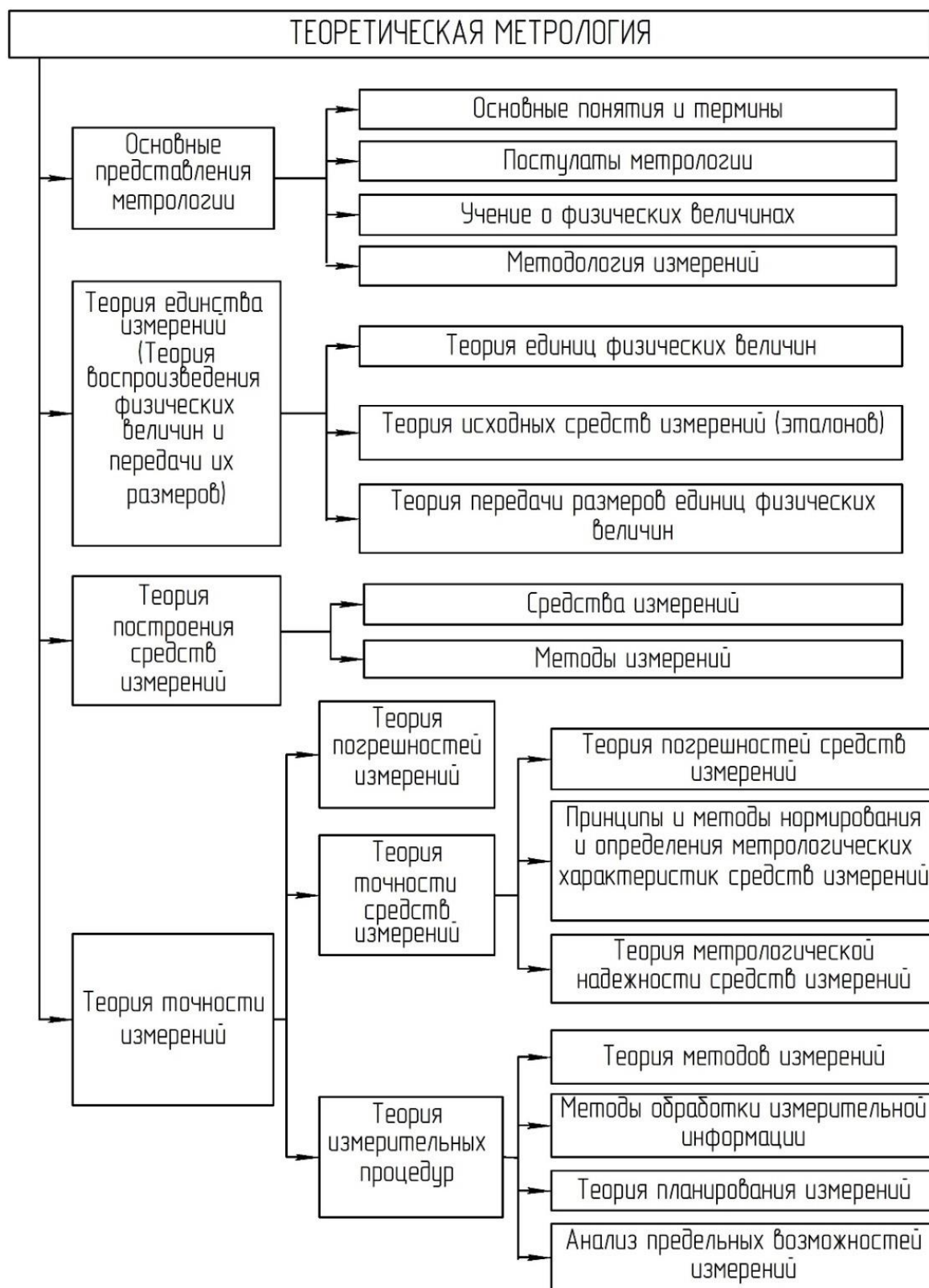


Рисунок 1.1 – Структура теоретической метрологии

Учение о физических величинах. Основной задачей подраздела является построение единой системы ФВ, т. е. выбор основных величин системы и уравнений связи для определения производных величин. Система ФВ служит основой для построения системы единиц ФВ, рациональный выбор которой важен для успешного развития теории и практики метрологического обеспечения.

Методология измерений. В подразделе разрабатывается научная организация измерительных процессов. Вопросы метрологической методологии являются весьма существенными, поскольку она объединяет области измерений, различные по физической природе измеряемых величин и методам измерений. Это создает определенные трудности при систематизации и объединении понятий, методов и опыта, накопленного в различных областях измерений. К числу основных направлений работ по методологии относятся:

- переосмысление основ измерительной техники и метрологии в условиях существенного обновления арсенала методов и средств измерений и широкого внедрения микропроцессорной техники;
- структурный анализ измерительных процессов с системных позиций;
- разработка принципиально новых подходов к организации процедуры измерений.

Теория единства измерений. (Теория воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров). Этот раздел традиционно является центральным в теоретической метрологии. Он включает в себя: теорию единиц ФВ, теорию исходных средств измерений (эталонов) и теорию передачи размеров единиц ФВ.

Теория единиц физических величин. Основная цель подраздела – совершенствование единиц ФВ в рамках существующей системы величин, заключающееся в уточнении и переопределении единиц. Другой задачей является развитие и совершенствование системы единиц ФВ, т. е. изменение состава и определений основных единиц. Работы в этом направлении проводятся постоянно на основе использования новых физических явлений и процессов.

Теория исходных средств измерений (эталонов). В данном подразделе рассматриваются вопросы создания рациональной системы эталонов единиц ФВ, обеспечивающих требуемый уровень единства измерений. Перспективное направление совершенствования эталонов – переход к эталонам, основанным на стабильных естественных физических процессах. Для эталонов основных единиц принципиально важным является достижение максимально возможного уровня для всех метрологических характеристик.

Теория передачи размеров единиц физических величин. Предметом изучения подраздела являются алгоритмы передачи размеров единиц ФВ при централизованном и децентрализованном их воспроизведении.

Указанные алгоритмы должны быть основаны как на метрологических, так и на технико-экономических показателях.

Теория построения средств измерений. В разделе обобщается опыт конкретных наук в области построения *средств и методов измерений*. В последние годы все большее значение приобретают знания, накопленные при разработке электронных СИ электрических и особенно неэлектрических величин. Это связано с бурным развитием микропроцессорной и вычислительной техники и ее активным использованием при построении СИ, что открывает новые возможности при обработке результатов. Важной задачей является разработка новых и совершенствование известных измерительных преобразователей.

Теория точности измерений. В данном разделе метрологии обобщены методы, развиваемые в конкретных областях измерений. Он состоит из трех подразделов: теории погрешностей, теории точности средств измерений и теории измерительных процедур.

Теория погрешностей. Этот подраздел является одним из центральных в метрологии, поскольку результаты измерений объективны настолько, насколько правильно оценены их погрешности. Предметом теории погрешностей является классификация погрешностей измерений, изучение и описание их свойств. Сложившееся исторически деление погрешностей на случайные и систематические, хотя и вызывает справедливые нарекания, тем не менее продолжает активно использоваться в метрологии. Как известная альтернатива такому делению погрешностей может рассматриваться развиваемое в последнее время описание погрешностей на основе теории нестационарных случайных процессов. Важной частью подраздела является теория суммирования погрешностей.

Теория точности средств измерений. Подраздел включает: теорию погрешностей средств измерений, принципы и методы определения и нормирования метрологических характеристик средств измерений, методы анализа их метрологической надежности.

Теория погрешностей средств измерений наиболее детально разработана в метрологии. Значительные знания накоплены и в конкретных областях измерений, на их основе развиты общие методы расчета погрешностей СИ. В настоящее время в связи с усложнением СИ, развитием микропроцессорных измерительных устройств актуальной стала задача по расчету погрешностей цифровых СИ вообще и измерительных систем и измерительно-вычислительных комплексов в частности.

Принципы и методы определения и нормирования метрологических характеристик СИ достаточно хорошо разработаны. Однако они требуют модификации с учетом специфики метрологии и в первую очередь тесной связи определения метрологических характеристик СИ с их нормированием. К числу не до конца решенных задач следует отнести определение динамических характеристик СИ и градуировочных харак-

теристик первичных измерительных преобразователей. Но по мере совершенствования средств обработки электрических измерительных сигналов наиболее существенные метрологические проблемы концентрируются вокруг выбора первичного преобразователя. Ввиду разнообразия принципов действия и типов СИ, а также повышения требуемой точности измерений появляется проблема выбора нормируемых метрологических характеристик СИ.

Теория метрологической надежности средств измерений по своей целевой направленности связана с общей теорией надежности. Однако специфика метрологических отказов и прежде всего непостоянство во времени их интенсивности делают невозможным автоматическое перенесение методов классической теории надежности в теорию метрологической надежности. Необходима разработка специальных методов анализа метрологической надежности СИ.

Теория измерительных процедур. Повышение сложности измерительных задач, постоянный рост требований к точности измерений, усложнение методов и средств измерений обуславливают проведение исследований, направленных на обеспечение рациональной организации и эффективного выполнения измерений. При этом главную роль играет анализ измерений как совокупности взаимосвязанных этапов, т. е. как процедуры. Подраздел включает теорию методов измерений; методы обработки измерительной информации; теорию планирования измерений; анализ предельных возможностей измерений.

Теория методов измерений – подраздел, посвященный разработке новых методов измерений и модификации существующих, что связано с ростом требований к точности измерений, диапазонам, быстродействию, условиям проведения измерений. С помощью современных средств измерений реализуются сложные совокупности классических методов. Поэтому остается актуальной традиционная задача совершенствования существующих методов и исследования их потенциальных возможностей с учетом условий реализации.

Методы обработки измерительной информации, используемые в метрологии, основываются на методах, которые заимствуются из математики, физики и других дисциплин. В связи с этим актуальна задача обоснованности выбора и применения того или иного способа обработки измерительной информации и соответствия требуемых исходных данных теоретического способа тем, которыми реально располагает экспериментатор.

Теория планирования измерений – область метрологии, которая весьма активно развивается. К числу ее основных задач относятся уточнение метрологического содержания задач планирования измерений и обоснование заимствований математических методов из общей теории планирования эксперимента.

Анализ предельных возможностей измерений на данном уровне развития науки и техники позволяет решить такую главную задачу, как исследование предельной точности измерений при помощи конкретных типов или экземпляров средств измерений.

Технической основой метрологического обеспечения на государственном уровне являются: подсистема воспроизведения единиц (это система национальных эталонов); подсистемы передачи размера единицы (используются при проведении поверок, метрологической аттестации, калибровок и т. п.); организация в стране производства СИ, включая разработку и государственные испытания собственных СИ и собственных стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (СО); подсистема передачи стандартов времени и частоты, включая ее создание и функционирование [1–26].

В масштабе предприятия:

- воспроизведение на предприятии единиц физических величин с помощью рабочих эталонов или образцовых средств измерений;

- ввод в эксплуатацию общепромышленных рабочих средств измерений, разработка и обязательная метрологическая аттестация нестандартизованных средств измерений, предназначенных для определения с требуемой точностью характеристик продукции и показателей технологических процессов, получения измерительной информации при испытаниях, контроле, научных исследованиях и учете материальных ценностей.

- передача размеров единиц физических величин рабочим средствам измерений, применяемым на предприятии путем осуществления обязательной государственной и ведомственной поверки средств измерений, с целью достижения единообразия парка средств измерений при их эксплуатации и ремонте;

- применение и в ряде случаев создание на предприятии стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, необходимых для воспроизведения и передачи размеров единиц величин, коэффициентов или условной шкалы, характеризующих состав и свойства веществ и материалов;

- использование и в ряде случаев разработка стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов, предназначенных для получения достоверных результатов при научных исследованиях, разработке конструкций и технологических процессов изготовления изделий и материалов.

Организационной основой метрологического обеспечения на государственном уровне является:

- создание принципов и структуры построения метрологической службы в стране;

- организацию подсистемы государственного метрологического надзора и контроля;

– подготовку метрологических кадров, а также правил и норм функционирования этой подсистемы:

– разработку научно-методических правил и документов, которые обеспечивают взаимодействие отдельных элементов метрологической службы между собой, взаимодействие государственной метрологической службы с метрологическими службами государственных органов управления (министерств, ведомств и т. п.) и предприятий, международными метрологическими органами, а также взаимодействие с другими системами Республики Беларусь: национальной системой сертификации, государственной системой стандартизации, национальной службой калибровки: системой аккредитации (поверочных, испытательных и калибровочных лабораторий) и др.

Организационной основой метрологического обеспечения качества *предприятия* является метрологическая служба предприятия, включающая основные аспекты ее организации:

– единство и централизованность обслуживания подразделений предприятий;

– схему организационной структуры и отдельных звеньев в составе службы;

– административную и методическую подчиненность как структурной единицы предприятия или объединения, так и государственной и ведомственной метрологической службам (с учетом особенностей организации в ведомствах головных и базовых метрологических служб).

1.4 Вопросы для самоконтроля

1. Назовите известные Вам природные и антропологические единицы, используемые в древности для оценки различных величин.

2. Какие «естественные» и «вещественные» меры и единицы измерений использовали древние вавилоняне?

3. Приведите примеры величин, принятых нашими предками в качестве эталонов.

4. О каком периоде в нашей истории можно говорить, как о периоде начала создания государственной системы обеспечения единства измерений и государственной метрологической службы?

5. В чем суть методики построения систем единиц ФВ, предложенной К. Гауссом в 1832 году ?

6. Какие значительные события в области развития метрологии произошли в России с 1835 по 1848 годы?

7. Для чего в XIX веке было создано Международное бюро мер и весов, находящееся в г. Севре близ Парижа?

8. Какова роль в развитие метрологии Д. И. Менделеева?

9. Перечислите основные метрологические центры бывшего СССР.
10. Когда была основана метрологическая служба Республики Беларусь?
11. Каково место метрологии среди других наук?
12. Дайте определение понятию «метрологическое обеспечение».
13. На какие разделы делится метрология?
14. Изобразите структурную схему теоретической метрологии?
15. Из каких подразделов состоит раздел «Основные представления метрологии»?
16. Каково назначение подразделов «Основных представлений метрологии»?
17. Из каких подразделов состоит раздел метрологии «Теория единства измерений»?
18. Изложите предметы изучения теории единиц физических величин.
19. Изложите предметы изучения теории исходных средств измерений (эталонов).
20. Изложите предметы изучения теории передачи размеров единиц физических величин.
21. Изложите предметы изучения теории построения средств измерений.
22. Из каких подразделов состоит раздел метрологии «Теория точности измерений»?
23. Изложите предметы изучения теории погрешностей.
24. Изложите предметы изучения теории точности средств измерений.
25. Изложите предметы изучения теории измерительных процедур.
26. Что является технической основой метрологического обеспечения на государственном уровне?
27. Что является технической основой метрологического обеспечения на уровне предприятия?
28. Что является организационной основой метрологического обеспечения на государственном уровне?
29. Что является организационной основой метрологического обеспечения на уровне предприятия?

2 ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА

2.1 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь

2.1.1 Цели и задачи СОЕИ

Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь (СОЕИ РБ) – это согласованная, официально признанная организационная и научно-техническая система, представляющая собой совокупность законов и норм, правил и положений, эталонов и СИ, органов и служб, деятельность которых направлена на достижение единства и требуемой точности измерений.

Основные положения о СОЕИ, цели, задачи и функции этой системы приведены в СТБ 8000 «Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь» и Законе Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» от 11 ноября 2019 г. № 254-З.

Основными целями СОЕИ являются:

- обеспечение единства измерений как одного из важнейших элементов единого рынка продукции, работ и услуг Республики Беларусь. Защита интересов населения и государства от последствий неточных и неправильных измерений;
- повышение качества товаров и услуг и обеспечение конкурентоспособности изделий на внутреннем и международном рынках;
- содействие безопасности государства, в том числе и экономической безопасности;
- развитие техники измерений в соответствии с уровнем технико-экономического развития в РБ;
- достоверный учет материальных, энергетических и природных ресурсов;
- правильная (сопоставимая) оценка параметров среды обитания;
- установление должной степени доверия в международных экономических отношениях к результатам измерений при проведении калибровки, поверки и испытаний.

Основными задачами СОЕИ являются:

- разработка научно-методических, правовых и организационных основ деятельности;
- стандартизация основных положений, правил, требований и норм этой деятельности;
- организация и проведение научных исследований по использованию новейших достижений науки и техники для создания и совершенствования методов и СИ высшей точности (эталонов) и определения

значений физических констант; создание; хранение и сличение национальных и исходных эталонов; установления порядка передачи размеров единиц от эталонов к другим СИ;

- разработка новых методов, средств и методик выполнения измерений;

- разработка требований к порядку, организации и проведению испытаний, поверки, калибровки и метрологической аттестации СИ; метрологической аттестации методик выполнения измерений; метрологической экспертизы конструкторской, технической проектной документации и т. п.;

- создание системы государственного надзора и контроля за производством, состоянием, применением и ремонтом СИ, а также за соблюдением метрологических норм и правил при выполнении этих операций;

- организация и осуществление подготовки и повышения квалификации специалистов в области метрологии;

- организация работы по международному сотрудничеству в области метрологии для обеспечения единства и требуемой точности измерений, которые необходимы для международной торговли, научно-технического и экономического сотрудничества;

Законодательной основой СОЕИ являются: закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений», указы президента страны, постановления правительства («О единицах измерений, применяемых в Республике Беларусь»; «Об исчислении времени в Республике Беларусь»; «О лицензировании изготовления, ремонта, поверки, калибровки, продажи и проката средств измерений». «О государственном надзоре за выполнением требований стандартов, обеспечением единства измерений и контроле за соблюдением правил обязательной сертификации в Республике Беларусь» и др.), нормативные документы, утвержденные Госстандартом Республики Беларусь.

2.1.2 Организационная структура СОЕИ

Организационная структура СОЕИ строится по иерархическому принципу. Координацию всех видов деятельности в области метрологии, стандартизации, сертификации, аккредитации и калибровки в Республике Беларусь осуществляет специальная государственная структура в ранге министерства, которая называется «Государственный комитет по стандартизации» (сокращенно Госстандарт РБ, см. рис. 2.1) [27–29].

Госстандарт Республики Беларусь создан в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 05.05.2006 г. № 289 «О структуре Правительства Республики Беларусь» путем слияния Комитета по стан-

дартизации, метрологии и сертификации при Совете Министров Республики Беларусь, Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь и департамента государственного строительного надзора Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь. Он имеет статус министерства, подчиняется только правительству, имеет межведомственную функцию.

Функциями Госстандарта являются:

- повышение безопасности, качества, конкурентоспособности продукции (услуг), рациональное использование топливно-энергетических ресурсов, устранение технических барьеров в торговле, защита интересов государства и потребителей;
- обеспечение эффективного функционирования и развития систем технического нормирования и стандартизации; обеспечения единства измерений; аккредитации; подтверждения соответствия;

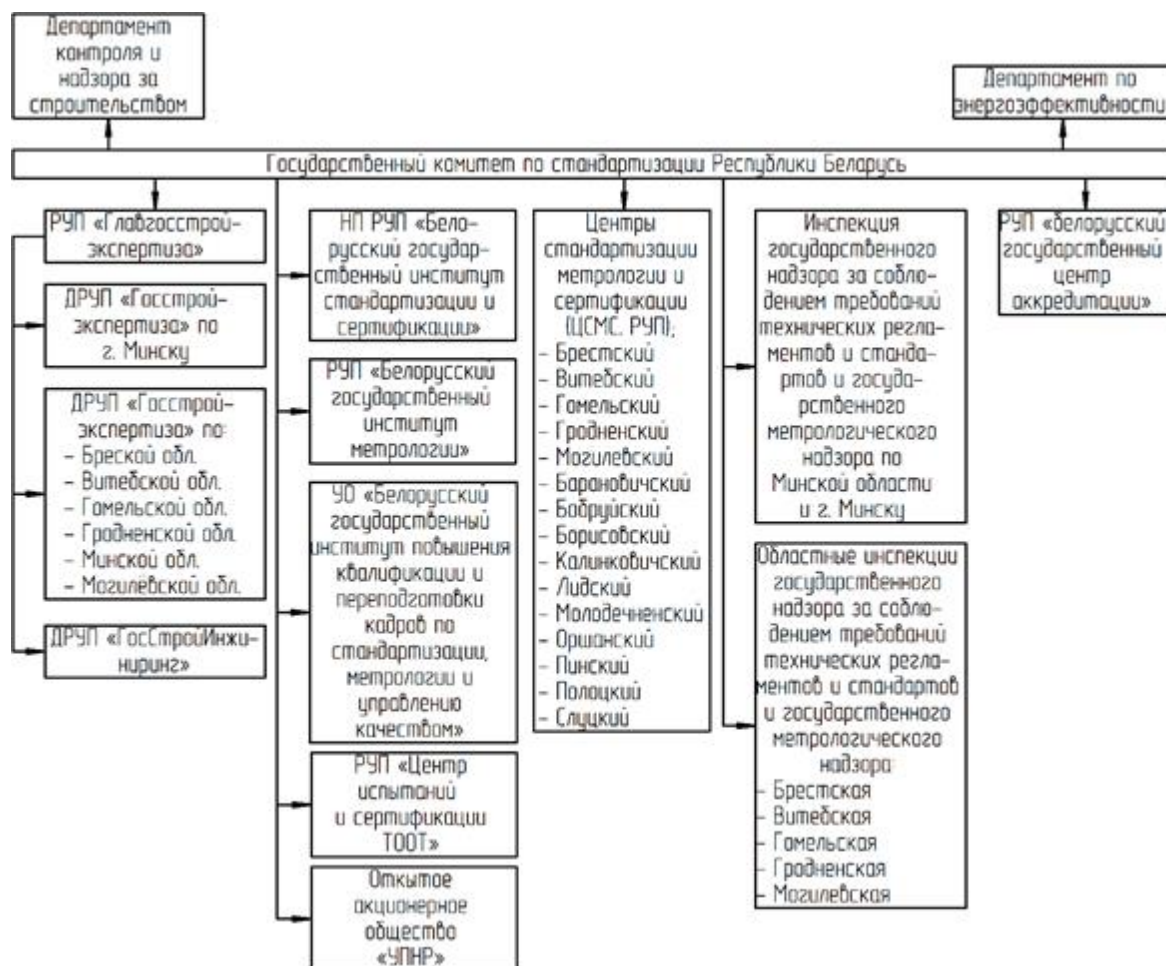


Рисунок 2.1 – Структура Госстандарта Республики Беларусь

- осуществление общей координации разработки технических регламентов и государственных стандартов, формирование и утверждение планов (программ) их разработки с учетом предложений республиканских органов государственного управления, организаций;

- обеспечение создания, развития и поддержания на требуемом уровне технической базы эталонов единиц величин, организация проведения государственных испытаний, метрологической аттестации, поверки и калибровки средств измерений;

- координация и организация проведения работ по сертификации продукции, работ, услуг, персонала, систем менеджмента качества, систем управления окружающей средой, охраной труда, энергетического менеджмента, безопасностью пищевых продуктов и др.;

- формирование государственной политики в сфере эффективного использования топливно-энергетических ресурсов, организация разработки и реализации концепций и республиканских программ по энергосбережению;

- осуществление государственного надзора за соблюдением технических регламентов и стандартов, средствами измерений, рациональным использованием топлива, электрической и тепловой энергии;

- надзор в строительстве и проведение государственной экспертизы градостроительной и проектной документации;

- организация и координация работ по международному сотрудничеству Республики Беларусь в сфере технического нормирования, стандартизации, метрологии, аккредитации, эффективного использования топливно-энергетических ресурсов.

Основные усилия в области технического нормирования в настоящее время сконцентрированы на развитии системы технического регулирования в Евразийском экономическом союзе (ЕАЭС).

Важнейшей задачей государственной стандартизации является развитие и поддержание в актуальном состоянии нормативной базы, обеспечивающей разработку и производство безопасной, высококачественной и конкурентоспособной продукции и услуг, а также реализацию требований технических регламентов ЕАЭС.

Нормативная база республики сегодня охватывает практически все отрасли экономики, активно развивается и совершенствуется. Наиболее значимые разработки осуществляются в машиностроении, строительстве, электротехнике, химии и нефтехимии, энергосбережении, агропромышленном и других секторах. Приоритет в этих работах отдан гармонизации национальных требований с международными и региональными стандартами.

Госстандарт осуществляет ведение Национального фонда технических нормативных правовых актов, обеспечивая промышленности и бизнесу доступ к государственным, международным, региональным и национальным стандартам других стран, в том числе на основе интернет-технологий.

В республике реализуется Государственная программа «Эталоны и научные приборы». Национальная эталонная база сегодня включает

более 63 национальных и исходных эталонов. Их разработка ведется с учетом потребностей экономики страны.

Госстандартом также осуществляется комплекс мер по дальнейшей гармонизации национальной системы аккредитации с международными требованиями и общепринятой мировой практикой с целью обеспечения международного признания результатов деятельности по аккредитации.

Госстандарт участвует в работе ведущих международных и европейских организаций в области стандартизации, метрологии, аккредитации (ISO, IEC, OIML, UNECE, CEN, CENELEC, ILAC, EA и др.), занимает активные позиции в проведении работ в сфере технического регулирования в рамках интеграционных образований на постсоветском пространстве – ЕАЭС и СНГ.

В пределах своей компетенции Госстандарт издает постановления, приказы, инструкции, указания, которые являются обязательными для исполнения всеми министерствами (ведомствами), другими республиканскими органами государственного управления, предприятиями, организациями и иными юридическими и физическими лицами.

НП РУП «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации» (БелГИСС) разрабатывает нормативные документы в области систем стандартизации и сертификации. В нем есть органы по сертификации, как отдельных видов продукции, так и производственных систем в целом. Это крупнейший информационный центр, в котором сосредоточены все стандарты, международные документы в области сертификации и стандартизации.

Подготовка кадров и повышение квалификации работников, как государственной метрологической службы, так и метрологических служб государственных органов управления и юридических лиц осуществляется в рамках УО «Белорусского государственного института повышения квалификации и переподготовки кадров по стандартизации, метрологии и управлению качеством» Госстандарта Республики Беларусь.

Региональными метрологическими центрами Госстандарта являются Центры стандартизации, метрологии и сертификации. Они созданы во всех крупнейших городах Беларуси, в том числе в шести областных городах и в некоторых районных центрах (Борисов, Молодечно, Слуцк, Барановичи, Пинск, Лида, Калинковичи, Орша, Полоцк и Бобруйск). БелГИМ является региональным метрологическим центром Госстандарта по г. Минску и Минской области.

Региональные метрологические центры Госстандарта выполняют следующие виды работ:

- проводят анализ состояния измерений и координацию работ по выполнению заданий отраслевых программ метрологического обеспечения;
- осуществляют хранение и поддержание на надлежащем уровне

рабочих эталонов и СИ и передачу размера единиц величин эталонам и СИ;

- проводят государственный надзор за производством, состоянием, применением, ремонтом СИ и соблюдением метрологических правил, требований и норм за состоянием и применением методик выполнения измерений, за работой метрологических служб, за измерениями радиоактивного загрязнения природной среды и всех видов сырья и продукции;

- осуществляют методическое руководство деятельностью метрологических служб субъектов хозяйствования;

- осуществляют метрологическую экспертизу проекта и образцов промышленной продукции:

- проводят государственные испытания, поверку, метрологическую аттестацию, калибровку СИ;

- выполняют особо точные измерения и прокат СИ.

Национальная система аккредитации обеспечивает единство измерений за счет установления единой политики, принципов и правил аккредитации поверочных, калибровочных и испытательных лабораторий, а также органов по сертификации систем качества, персонала, продукции и услуг инспекционных органов (см. СТБ 50.01-2000 «Система аккредитации Республики Беларусь. Основные положения»). Основным звеном этой системы является РУП «Белорусский государственный центр аккредитации» – государственное предприятие является единственным органом по аккредитации в сфере оценки соответствия Национальной системы аккредитации Республики Беларусь, осуществляющим функции Национального органа по аккредитации Республики Беларусь с 01 сентября 2010 г. в соответствии с нормативным правовым актом Правила аккредитации от 31 мая 2011 г. (в редакции Постановлений Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 26 июня 2019 г. № 39 и 22 декабря 2020 г. № 102). Предприятие осуществляет аккредитации лабораторий и дают им право на выполнение определенной деятельности.

2.1.3 Особенности построения государственной метрологической службы

Основу СОЕИ составляет Государственная метрологическая служба (ГМС), которая координирует все работы по МО в стране на межрегиональном и межотраслевом уровнях и согласовывает свою деятельность с рекомендациями ведущих зарубежных организаций в области метрологии. Далее ГМС координирует работу метрологических служб государственных органов управления (ведомств, министерств и

т. п.), а те в свою очередь – метрологических служб юридических лиц (подведомственных им предприятий).

Основу ГМС (согласно «Положению о государственной метрологической службе», утвержденного постановлением Госстандарта Республики Беларусь от № 76 от 27.11 2020) составляют:

- РУП «Белорусский государственный институт метрологии»;
- НП РУП «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации»;
- Центры стандартизации, метрологии и сертификации.

Задачами ГМС являются:

- реализация единой государственной политики в области обеспечения единства измерений;

- осуществление работ в области обеспечения единства измерений в сфере законодательной метрологии в соответствии с правилами осуществления метрологической оценки, установленными законодательством об обеспечении единства измерений, включая: создание, совершенствование, содержание национальных эталонов единиц величин; организация и проведение сличений национальных эталонов единиц величин с международными или национальными эталонами единиц величин других государств; создание и совершенствование инфраструктуры и материально-технической базы для передачи размеров единиц величин эталонам единиц величин и средствам измерений при осуществлении государственной поверки или калибровки; поддержание на необходимом техническом и профессиональном уровне работ по испытаниям средств измерений или стандартных образцов в целях утверждения типа средства измерений или утверждения типа стандартного образца, работ по метрологической оценке и расширению номенклатуры указанных работ в соответствии с потребностями в них субъектов хозяйствования;

- формирование предложений: для разработки государственных научно-технических программ в области обеспечения единства измерений; в инвестиционные программы, направленные на совершенствование эталонной базы ГМС, разработку стандартных образцов, методик поверки, калибровки, методик (методов) измерений, используемых в деятельности ГМС, направленных на совершенствование деятельности ГМС в области обеспечения единства измерений, а также на совершенствование Системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь;

- осуществление взаимодействия с юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами, включая координацию в этих целях работы их метрологических служб или деятельности в области обеспечения единства измерений;

- участие в мероприятиях по подготовке и переподготовке кадров в области метрологии;
- участие специалистов юридических лиц, входящих в ГМС, в работах по межрегиональному, международному сотрудничеству по вопросам обеспечения единства измерений.

2.1.4 Белорусский государственный институт метрологии

РУП «Белорусский государственный институт метрологии» (БелГИМ) является ведущей организацией в области обеспечения единства измерений, крупнейшим научно-исследовательским, методическим и практическим центром и на протяжении многих лет сохраняет, развивает и совершенствует метрологический потенциал страны [27–29].

Институт ориентирован на качественное выполнение государственных задач, развитие научно-исследовательских работ, усиление деловых связей с промышленностью, расширение международного сотрудничества и всемерную поддержку инновационного развития экономики страны.

Белорусский государственный институт метрологии имеет давнюю историю, которая начинается с 29 февраля 1924 г. – дня основания Белорусской палаты мер и весов. С этого времени в стране начинает интенсивно развиваться метрологическая деятельность. Пройдя многие структурные преобразования, организация приказом Госстандарта от 14.04.1999 № 74 преобразована в Республиканское унитарное предприятие «Белорусский государственный институт метрологии».

Основная задача Белорусского государственного института метрологии – развитие и постоянное совершенствование национальной метрологии, обеспечение высокого научно-технического и организационно-методического уровня выполняемых работ и оказываемых услуг.

Сфера деятельности института охватывает все важнейшие направления современной метрологии – законодательную, теоретическую и промышленную. Она включает: проведение научно-исследовательских работ; разработку и изготовление эталонов и стандартных образцов; испытания, метрологическую аттестацию, поверку и калибровку средств измерений; проведение высокоточных измерений и испытаний продукции; межлабораторных сличений; разработку технических нормативных правовых актов, справочных и методических пособий; сертификацию продукции, услуг, персонала и систем менеджмента; информационное обеспечение (рис. 2.1).

БелГИМ призван разрабатывать новые методы измерения физических величин, новые методики, сами эталоны с учетом новейших достижений науки и техники на современном этапе. На БелГИМ возлага-

ется ведение всей научной документации по эталонам, по их хранению, эксплуатации и т. д. Приоритетным направлением является дальнейшее поддержание эталонной базы на международном уровне, планомерное создание новых эталонов, выполнение Государственной научно-технической программы «Эталоны Беларуси».

Планирование работ по созданию эталонов осуществляет Госстандарт в соответствии с СТБ 8002-93 «Эталоны единиц физических величин». Он же разрабатывает техническое задание на эталон, поручая это БелГИМ. Утверждает эталон Госстандарт по комплекту документов, который состоит из доклада, научно-технического отчета, паспорта эталона, правил хранения и применения эталона, проекта поверочной схемы, представления о назначении ученого хранителя эталона и заключения государственной экспертной комиссии о возможности утверждения эталона.

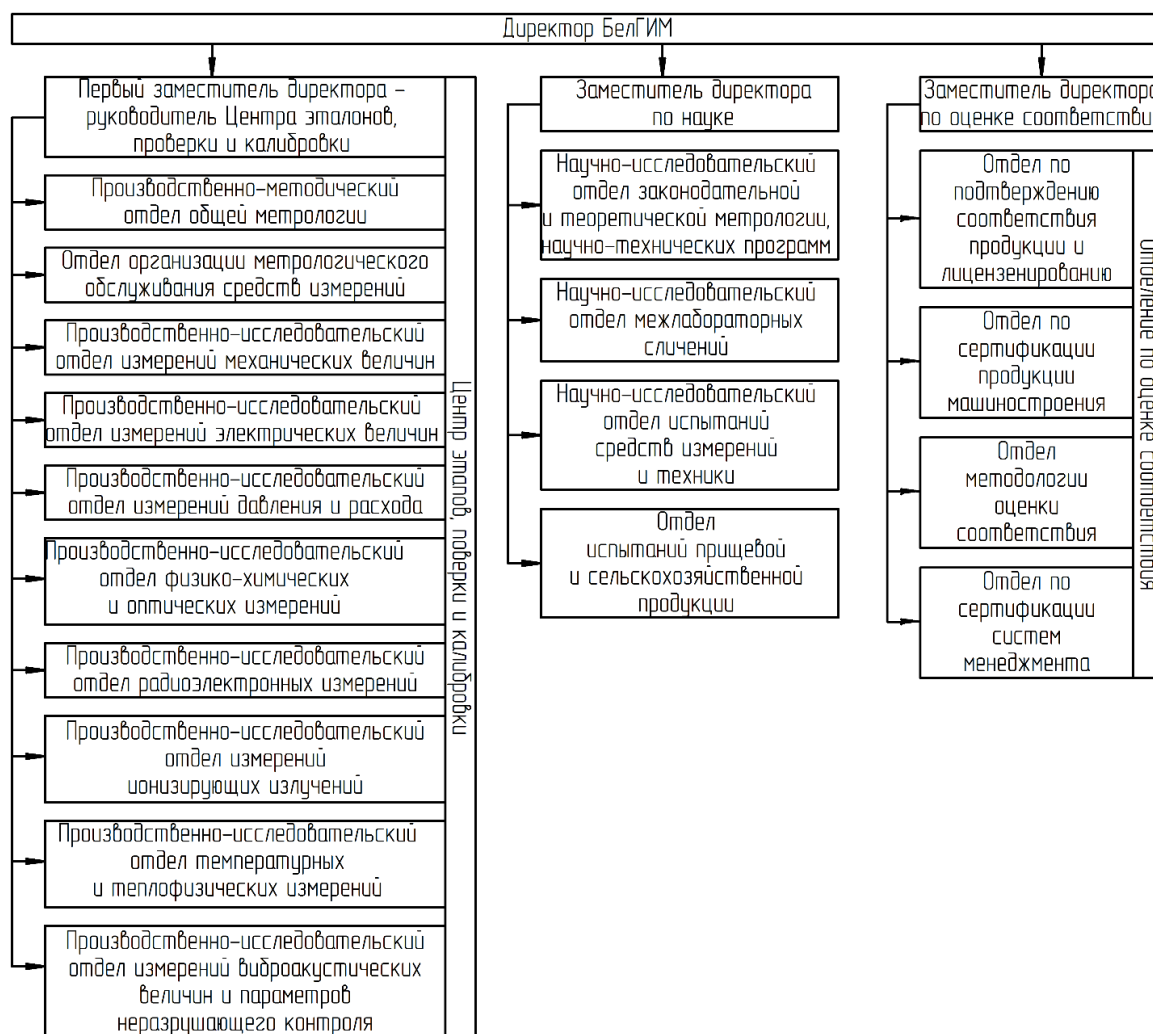


Рисунок 2.2 Структура БелГИМ

Научно-технический отчет по созданию эталона составляется на основании анализа состояния исследований и результатов сличения

национальных эталонов других стран и содержит разделы, отражающие методику, содержание, результаты выполненной работы.

В разделе «Анализ состояния» обосновывается необходимость создания национального эталона, указываются перспективы развития данной области измерения, приводятся данные о существующих и вновь разрабатываемых СИ и метрологических характеристиках.

В разделе «Исследование национальных эталонов других стран» по каждой стране приводятся данные о составе эталона, его принципах действия и схемы (конструкции), основные метрологические характеристики (МХ) (диапазон или номинальные значения ФВ, случайные и систематические погрешности, годовая нестабильность и т. д.), оценки результатов сличения с национальными эталонами: требования к условиям размещения, хранения и использования эталонов и т. п.

Основные полученные результаты по предлагаемой разработке сводят в паспорт, который включает следующие сведения: наименование, состав, основные метрологические характеристики: место и условия хранения, наименование лаборатории или отдела, ответственного за эталоны, время, место и создатели эталона.

Отдельным документом оформляются правила хранения и применения эталонов, которые содержат: требования к условиям размещения, хранения и применения национального эталона; параметры окружающей среды; требования к потребляемой мощности, силе тока, расходу воды, тепла и т. д.; состав сотрудников, необходимых для работы с эталоном; порядок и условия воспроизведе единицы; периодичность сличения эталона с вышестоящим эталоном по поверочной схеме; методику сличения и передачи размера единицы; методику обработки результатов измерений; требования безопасности при работе с эталоном; правила транспортирования.

Утвержденные эталоны подлежат регистрации и учету в Государственном Реестре национальных эталонов Республики Беларусь. При регистрации национальному эталону присваиваем буквенное обозначение НЭ РБ, а исходному эталону – ИЭ РБ; дальше идет порядковый номер регистрации, а затем год утверждения.

Национальные и исходные эталоны являются национальным достоянием страны, а их хранение представляет важнейшую научную и практическую деятельность, которая направлена на изучение и учет всех возможных изменений свойств эталонов и обеспечение неизменности размера воспроизводимой единицы. Учеными хранителями эталона назначаются ведущие в данной области специалисты-метрологи, которые утверждаются Госстандартом. Основные функции ученого хранителя эталона: наблюдение за правильным и неукоснительным соблюдением условий и порядка хранения и применения эталона; обеспечение организации и участие в работах по сличению хранимого эталона с эталонами других организаций и анализ результатов сличения; сбор и си-

стематизация информации о соответствующих работах, которые ведут по эталонам другие страны и составление обзоров с анализом этих работ; участие в исследовании и аттестации эталона и составление ежегодных отчетов о произведенных работах с эталоном, подготовка предложений по совершенствованию эталона и улучшение условия их хранения и применения; решение проблем о замене вспомогательного оборудования; информирование руководства территориального органа, где хранится эталон, обо всех обстоятельствах, создающих опасное изменение размера воспроизводимой величины.

Стандартные образцы (СО) представляют собой специфические образцовые СИ, которые воспроизводят и хранят определенное вещество (материал), его состав и свойства.

СО делятся на СО состава (структуры) и СО свойства. Они применяются при измерении состава и свойств веществ и материалов (как правило, методами сравнения и замещения). Чаще СО используются при градуировке, аттестации и поверке рабочих СИ, которые называются рабочими образцами, а также для аттестации методик использования СИ, контроля правильности результатов испытаний особо ответственных веществ и материалов.

Можно привести ряд характерных примеров использования СО: определение содержания отдельных компонентов (химического состава) в веществах и продуктах; определение здоровья или болезни людей путем сравнения анализа крови (мочи, выдыхаемого воздуха и т. д.) больного с СО крови (мочи, воздуха) здорового человека; допинг-контроль спортсменов на соревнованиях, лошадей на скачках; установление фактов нарушения законов или нормативных документов по содержанию выхлопных газов автомобилей; установление цены продукта в зависимости от содержания определенных компонентов и т. д.

Планирование работ по созданию СО осуществляется согласно СТБ 8005-2000 «Стандартные образцы. Основные положения».

В зависимости от точности, области применения и уровня утверждения (признана) различают три класса СО: межгосударственный стандартный образец; государственный стандартный образец; стандартные образцы предприятия.

Межгосударственный стандартный образец – стандартный образец, созданный в порядке сотрудничества в рамках СНГ, признанный в соответствии с правилами, установленными Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, и применяемый в межгосударственных отношениях и во всех областях народного хозяйства тех стран, которые присоединились к его признанию.

Государственный стандартный образец – стандартный образец, утвержденный Госстандартом, применяемый в областях народного хозяйства Республики Беларусь, включая сферы распространения государственного метрологического контроля и надзора.

Стандартный образец предприятия (организации, юридического лица) – стандартный образец, утвержденный руководителем предприятия и применяемый в соответствии с требованиями нормативных документов предприятия, утвердившего стандартный образец.

СО предназначены для выполнения работ по обеспечению единства и требуемой точности измерений посредством: градуировки и калибровки СИ; метрологической аттестации и поверки СИ; метрологической аттестации методик выполнения измерений; контроля погрешностей методик выполнения измерений в процессе их применения в соответствии с установленными в них алгоритмами, а также для других видов метрологического контроля; определения методами сравнения параметров, характеризующих состав и свойства веществ и материалов.

2.1.5 Международное сотрудничество государственной метрологической службы

Среди основных международных организаций, с которыми взаимодействует Государственная метрологическая служба Республики Беларусь, можно назвать:

- МОЗМ (Международная организация по законодательной метрологии);
- МБМВ (Международное бюро мер и весов);
- МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии);
- ИСО (Международная организация по стандартизации);
- МЭК (Международная электротехническая комиссия);
- ИМЕКО (Международная конфедерация по измерительной технике и приборостроению);
- ИЛАК (Международная организация по аккредитации лабораторий);
- региональные организации:
 - МГС СНГ (Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ);
 - СЕК (Европейский комитет по единым нормам);
 - CENELEC (Европейский комитет по стандартизации в области электротехники);
 - ETSI (Европейский институт стандартизации по телекоммуникациям);
 - ЕВРОМЕТ (Европейская организация по метрологии);
 - КООМЕТ (Евразийское сотрудничество государственных метрологических учреждений).

МОЗМ учреждена на основе межправительственной Конвенции в 1956 г. Россия участвует в ней как правопреемница Советского Союза.

Организация объединяет более 80 государств. Цель МОЗМ – разработка общих вопросов законодательной метрологии, в том числе установление классов точности средств измерений, обеспечение единообразия определения типов и образцов систем измерительных средств, рекомендации по испытаниям с целью установления единообразия метрологических характеристик средств измерений независимо от страны изготовителя, определение порядка поверки и калибровки средств измерений.

Высший руководящий орган МОЗМ – Международная конференция законодательной метрологии (созывается один раз в четыре года). Решения, принятые организацией, носят рекомендательный характер.

Исполнительный орган – Международный комитет законодательной метрологии, сессии которого проводятся ежегодно. Работу комитета и Конференции координирует Международное бюро законодательной метрологии (МБЗМ), которое находится в г. Париже. Бюро издает информационные материалы, ведет фонд документации, занимается пропагандой достижений в области метрологии, проводит взаимный обмен информацией с участниками МОЗМ, а также ежеквартально выпускает «Бюллетень МОЗМ» (на французском языке, официальном для организации).

МОЗМ издает два вида документов: международные документы (МД) и международные рекомендации (МР). Первые носят директивный характер (предназначены для рабочих органов МОЗМ), вторые – рекомендательный (предназначены для стран – членов МОЗМ). МР охватывают следующие вопросы: терминология в области метрологии, требования к метрологическим характеристикам средств измерений, способы выражения погрешностей средств измерений и результатов измерений, требования к метрологической деятельности (испытания, поверка, сертификация, калибровка средств измерений, метрологический контроль и надзор за обеспечением единства измерений и т. д.). МОЗМ сотрудничает со многими международными организациями – МОМВ, МЭК, ИСО, ЮНИДО, ИМЕКО и др.

Цель создания МБМВ – унификация национальных систем единиц измерений физических величин и установление единых фактических эталонов длины и массы (метра и килограмма). Официальный язык организации – французский. Её членами являются около 50 государств мира. МБМВ – первая международная научно-исследовательская лаборатория, которая хранит и поддерживает международные эталоны. Бюро расположено во Франции в г. Севр (близ Парижа).

Главная практическая задача МБМВ – слияние национальных эталонов с международными. Оно координирует деятельность метрологических организаций более, чем 100 государств. Научное направление работы бюро – совершенствование метрической системы измерений, совершенствование международных эталонов, разработка и применение

новых методов и средств точных измерений, координация метрологических исследований в странах-членах.

Программы научной и практической деятельности МБМВ утверждает Генеральная конференция мер и весов – высший орган МБМВ. Генеральная конференция по мерам и весам собирается не реже одного раза в четыре года (на IX Генеральной конференции по мерам и весам в 1960г. была принята Международная система единиц). В промежутках между конференциями работой МБМВ руководит комитет мер и весов, в который входят крупнейшие физики и метрологи мира (18 членов).

В составе Международного комитета мер и весов работают восемь консультативных комитетов, которые готовят материалы и решения для Генеральных конференций. Их названия отражают диапазон деятельности МБМВ: комитет по определению метра, комитет по массе, комитет по определению секунды, комитет по электричеству, комитет по термометрии, комитет по фотометрии, комитет по эталонам для ионизирующих излучений, комитет по единицам физических величин.

В 1958 г. была образована Международная конференция по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО), являющаяся научной консультативной организацией, проводящей международные конгрессы и семинары по актуальным проблемам и задачам развития измерительной и диагностической техники. Конгрессы ИМЕКО созываются раз в три года. Генеральный комитет находится в Венгрии.

В последние годы создаются и региональные международные организации. Так, в 1988 г. западноевропейские государства образовали Европейскую организацию по метрологии (ЕВРОМЕТ). Области деятельности: исследование и разработка национальных эталонов; развитие поверочных служб на высшем метрологическом уровне, необходимом каждому члену организации; методы измерений наивысшей точности. В 1989 г. основано Западноевропейское объединение по законодательной метрологии (ВЕЛМЕТ).

В 1991 г. национальные организации по метрологии стран, входящие ранее в СЭВ, подписали Меморандум о сотрудничестве в области метрологии, в результате чего была создана организация, объединяющая страны Центральной и Восточной Европы – КООМЕТ. В ее работе используется опыт и важнейшие документы по метрологии СЭВ.

2.2. Метрологическая служба предприятия

2.2.1. Задачи и обязанности

Метрологическая служба (МС) предприятия создается приказом директора предприятия (генерального директора объединения, президента акционерного общества) как самостоятельное структурное под-

разделение, возглавляемое главным метрологом предприятия – руководителем МС. Он подчиняется непосредственно главному инженеру или заместителю директора по производству и несёт ответственность за выполнение метрологической службой предприятия возложенных на неё задач [30–36].

В своей деятельности МС руководствуется действующим законодательством Республики Беларусь, межгосударственными стандартами (ГОСТами), стандартами и другими нормативными документами Госстандарта Республики Беларусь, приказами, приказами и распоряжениями руководства предприятия, а также положением о метрологической службе предприятия.

Основные задачи и обязанности МС следующие:

- проведение анализа состояния средств измерений, испытаний на предприятии, разработка на его основе и осуществление мероприятий по совершенствованию метрологического обеспечения, участие в разработке и выполнении заданий, предусмотренных комплексными программами метрологического обеспечения отрасли, организация и проведение поверки и аттестации средств измерений и испытательного оборудования;
- разработка и внедрение методик выполнения измерений, испытаний и контроля, в необходимых случаях – подготовка заданий на их разработку в других организациях;
- внедрение и соблюдение стандартов Республики Беларусь и другой нормативной документации по метрологии, разработка и внедрение стандартов предприятия, регламентирующих нормы точности измерений и испытаний, порядок проведения работ по метрологическому обеспечению;
- проведение метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации, а также контрактов на приобретение новых средств измерений и оборудования;
- организация и(или) осуществление технического обслуживания;
- ремонта и поверки средств измерений и испытаний;
- метрологический контроль за соблюдением методик выполнения измерений, состоянием, применением и хранением средств измерений и испытательного оборудования;
- учет средств измерений и испытаний;
- разработка технических заданий на проектирование и изготовление средств измерений другими предприятиями и организациями;
- разработка для нужд предприятия совместно с другими подразделениями средств измерений, испытаний, контроля;
- выполнение измерений, связанных с разрешением разногласий между подразделениями предприятия;
- участие в проверке технологического оборудования на соответствие установленным нормам точности;

- организация и осуществление подготовки и повышения квалификации работников предприятия, связанных с выполнением измерений;
- содействие органам Госстандарта при осуществлении ими государственного метрологического надзора.

2.2.2 Структура и права метрологической службы предприятия

Опираясь на типовые решения, рекомендованные к внедрению на предприятиях, и используя существующий опыт, можно установить, что организационная структура единой метрологической службы может быть реально представлена тремя вариантами [34–35].

Первый вариант предполагает формирование метрологической службы из основных звеньев (лабораторий, бюро, секторов и т. д.), каждое из которых решает отдельные специфические задачи метрологического обеспечения во всех областях измерений. Построение метрологических органов в этом случае дает возможность говорить о так называемой комплексной системе организации метрологической службы.

Второй вариант предполагает построение метрологической службы из основных звеньев, каждое из которых решает все задачи метрологического обеспечения в пределах одной или нескольких областей измерений. Вероятно, такое построение позволит говорить о «специализированной» системе организации метрологической службы.

Что же касается третьего варианта, то он основывается на комбинации комплексной и специализированной систем, образуя «комбинированную» систему организации метрологической службы.

Каждая из рассмотренных систем обладает определенными достоинствами и недостатками, но их реальная оценка возможна только на основе изучения и выполнения технико-экономического расчета применительно к конкретному предприятию.

Анализ задач метрологического обеспечения показывает, что независимо от того, будет ли метрологическая служба организована в виде отдела или лаборатории, представляет ли она комплексную специализированную или комбинированную системы – задачи метрологического обеспечения решают участки:

- метрологический;
- экспериментально-конструкторский;
- контрольно-технический;
- ремонтно-юстировочный;
- эксплуатационный;
- монтажно-наладочный.

Эти участки при комплексной системе организации являются основными звеньями метрологической службы, в то время как при специализированной системе они входят в основные звенья и охватывают одну или несколько областей измерений. Комбинированная система формируется чаще всего из специализированных контрольно-технических и комплексных звеньев, объединяющих метрологические и экспериментально-конструкторские участки. Ремонтные, эксплуатационные и монтажно-наладочные участки для всех видов средств измерений при такой системе сведены в единое комплексное звено, как правило, мастерскую или цех. На рисунках 2.3 и 2.4 показаны схемы организационной структуры при комплексной и специализированной системах организации метрологической службы, на рисунках 2.5 и 2.6 – структура основных звеньев в том и другом случаях.

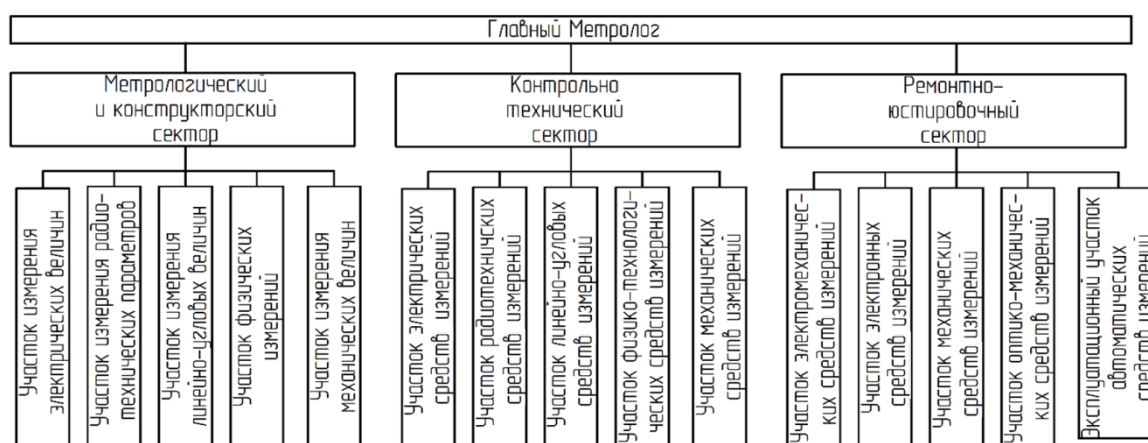


Рисунок 2.3 – Схема организационной структуры комплексной системы организации метрологической службы



Рисунок 2.4 – Схема организационной структуры специализированной системы организации метрологической службы

При комплексной системе в каждом из основных звеньев ведут работы по разным областям измерений, и каждое из этих звеньев решает только часть задач метрологического обеспечения. Это вызывает определенные трудности в управлении метрологическим обеспечением как у руководителей основных звеньев, которые должны решать вопросы во всех областях измерений, так и у руководителей метрологической службы. Последние вынуждены оперативно «увязывать» между основными звеньями решение задач метрологического обеспечения буквально во всех областях измерений. Это нередко ведет к потере «управляемости» основными звеньями и службой в целом со стороны соответствующих руководителей.

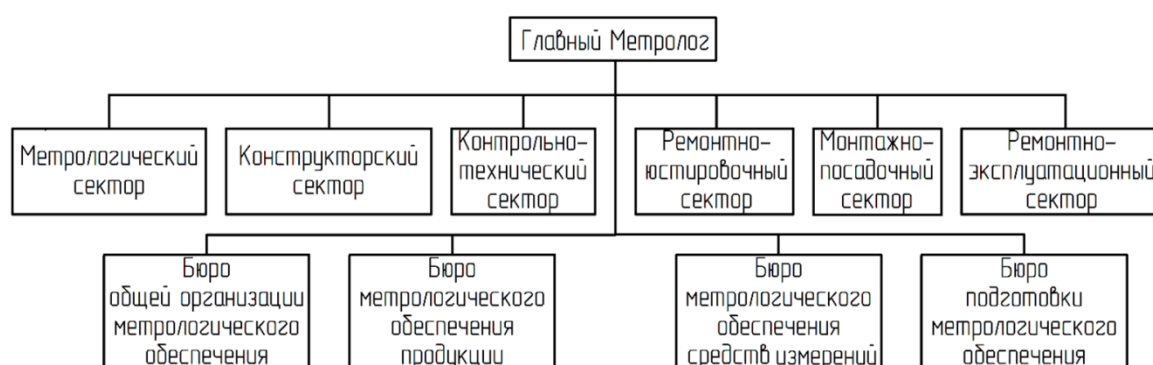


Рисунок 2.5 – Структура основных звеньев комплексной системы организации метрологической службы

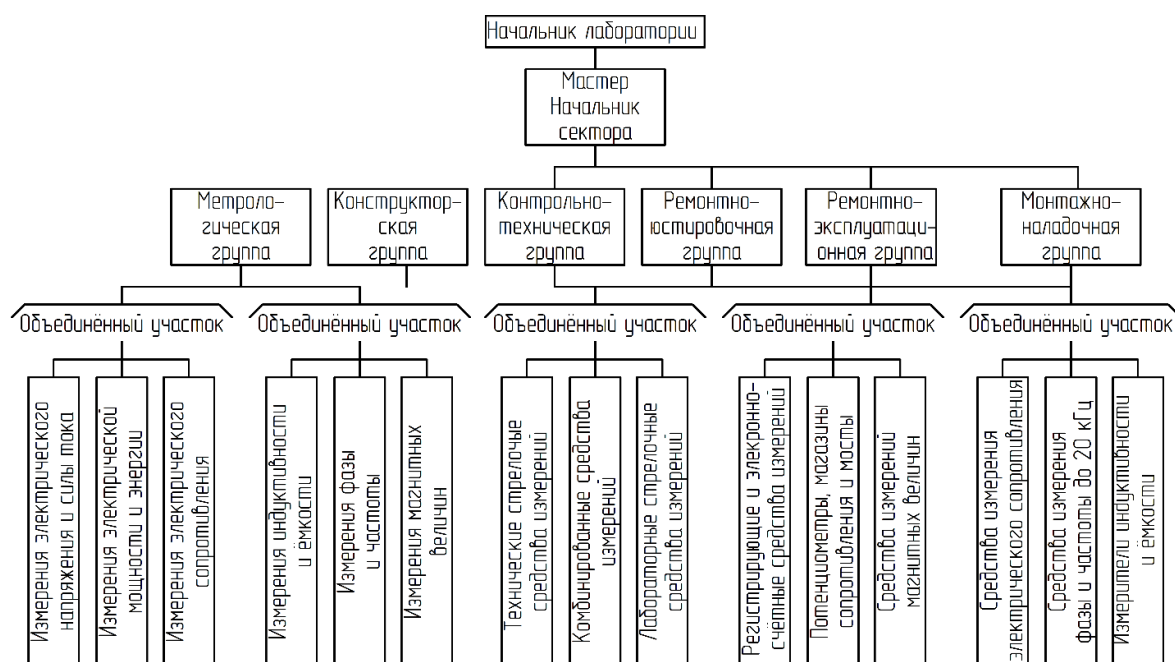


Рисунок 2.6 – Структура основных звеньев специализированной системы организации метрологической службы

Особенность специализированной системы состоит в том, что в метрологическую службу входит ряд основных структурных звеньев, имеющих равные обязанности и права. Каждое из них централизованно, для предприятия в целом, решает весь комплекс задач метрологического обеспечения в своей области измерений. В этом случае руководители основных специализированных звеньев, по существу, являются главными специалистами на предприятии в конкретных областях измерений и несут ответственность за осуществление в этих областях всей научно-технической или «метрологической» политики.

Опыт показывает, что специализированная система является более универсальной, требует меньшее число работников высшей квалификации, каждый из которых имеет возможность быть не только хорошим организатором, но и высококвалифицированным специалистом в своей области. Такая структура более благоприятна для общего управления метрологической службой так как ее руководитель в значительной степени освобождается от оперативной работы и имеет возможность решать наиболее принципиальные вопросы для всей службы.

Выбор и утверждение масштабов метрологической службы как административной единицы, структурных звеньев, численности персонала находится в компетенции руководителя предприятия. Как правило, современные метрологические службы организуются в виде отделов главного метролога, отделов метрологии, центральных или комплексных лабораторий, включающих специализированные лаборатории, секторы, группы и т. д. Основным критерий выбора: характер или вид отрасли, категория предприятия, объем сложности или комплексность задач, решаемых метрологической службой.

На крупных предприятиях МС представляет собой самостоятельное структурное подразделение, осуществляющее все виды деятельности по метрологическому обеспечению (МО). На небольших предприятиях в составе инженерных служб выделяют лицо или лиц, ответственных за МО и организующих выполнение необходимых для предприятия работ в аккредитованной МС или территориальном органе Госстандарта.

МС предприятия имеет право:

- осуществлять метрологический контроль за состоянием и применением СИ, МВИ, соблюдением метрологических норм и правил;
- давать обязательные для подразделений предприятия указания и предписания, направленные на предотвращение, пресечение или устранение нарушений метрологических правил и норм;
- требовать от соответствующих подразделений предприятия обеспечения всем необходимым по заявкам и заказам МС;
- приглашать, по согласованию с главным инженером, специалистов сторонних организаций для решения вопросов по выполнению работ по метрологическому обеспечению производства;

– вносить на рассмотрение руководства предприятия предложения о поощрении работников предприятия за эффективную работу по совершенствованию метрологического обеспечения производства, а также предложения о привлечении к ответственности лиц, виновных в нарушении метрологических норм и правил, в применении неисправных или непроверенных (не аттестованных) в установленном порядке средств измерений;

– ходатайствовать перед квалификационной комиссией и принимать участие в ее работе по вопросам повышения квалификационных разрядов работников МС;

– представлять по поручению руководства предприятия в других организациях по вопросам метрологического обеспечения разработки, производства, испытаний и эксплуатации продукции и в других закрепленных за метрологической службой областях деятельности [30–36].

2.3 Метрологическая экспертиза технической документации

2.3.1 Общие положения

Общая цель метрологической экспертизы технической документации – обеспечение эффективности метрологического обеспечения, выполнение общих и конкретных требований к нему наиболее рациональными методами и средствами [37].

Метрологической экспертизе подвергают техническую документацию: техническое задание; отчеты о НИР, пояснительные записки к техническому (эскизному) проекту, протоколы испытаний; проекты ТНПА; программы, методики испытаний; эксплуатационную и ремонтную документацию; технологические инструкции и технологический регламент; технологические карты различных видов; проектную документацию и др.

Значительную роль в совершенствовании метрологического обеспечения разработки и производства продукции играет метрологическая экспертиза (МЭ) проектов изделий, конструкторской, технологической и нормативной документации, разрабатываемой в отрасли и на предприятиях и содержащей сведения об измеряемых (контролируемых) параметрах, нормах точности, методах, средствах, условиях и процедурах подготовки и проведения измерений, обработки и представления результатов измерений, а также показателях точности измерений.

Метрологическая экспертиза технической документации в соответствии с определением, данным в МИ 1326, – это анализ и оценка технических решений по выбору параметров, подлежащих измерению, установлению норм точности измерений и обеспечению методами и

средствами измерений процессов разработки, изготовления, испытания и применения продукции. Исходя из этого определения, можно заключить, что содержание работ по МЭ концентрируется на трех взаимосвязанных направлениях: 1) выборе номенклатуры (оптимальной) измеряемых (контролируемых) параметров и регламентации требований к их точности; 2) установлении технически и экономически обоснованных норм точности измерений (предельно допускаемых погрешностей); 3) подготовке и проведении измерений такими методами и средствами измерений и в таких условиях, которые гарантируют, что фактическая погрешность получения результата не выходит за границы предельно допускаемой погрешности.

Основные положения и задачи МЭ установлены в МИ 1325 «ГСИ. Метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации. Основные положения и задачи», на основании которых составляются отраслевые документы, устанавливающие правила проведения МЭ в отрасли. В отраслевых документах должны быть установлены конкретные виды технических документов, подвергаемые МЭ, подразделения, проводящие экспертизу, продолжительность МЭ, порядок представления документации на МЭ и другие организационные и методические вопросы.

Рекомендуемый перечень конструкторских и технологических документов, подвергаемых МЭ, приведен в МИ 1325. К таким документам относятся текстовые конструкторские документы (ТУ, пояснительные записки, программы и методики испытаний, расчеты, эксплуатационные и ремонтные документы), чертежи (сборочные, монтажные, габаритные, чертежи деталей), а также различные виды технологических документов (маршрутная и операционная карта, карта эскизов, технологические инструкции и регламенты и другие документы).

2.3.2 Порядок проведения метрологической экспертизы

МЭ может проводиться метрологическими службами предприятий (организаций). Это одна из их функций, регламентированная ГОСТ 1.25. Кроме этого, экспертиза может проводиться конструкторскими, технологическими и другими подразделениями, разрабатывающими документацию, а также службами стандартизации под методическим руководством метрологов и экспертными комиссиями. На практике встречаются различные варианты организации этой работы. При большом объеме документации метрологи-эксперты могут специализироваться по видам документации или по видам измерений. Такая форма проведения МЭ позволяет накапливать и обрабатывать данные о технических решениях и их метрологическом обеспечении как при разработ-

ке, производстве и испытаниях, так и в процессе эксплуатации продукции; об аттестованных методиках выполнения измерений, испытаний и т. п. и способствует повышению авторитета метрологической службы.

Метрологическая экспертиза может проводиться специалистами подразделений – разработчиков документации. Уполномоченные по проведению МЭ проходят специальное обучение, назначаются приказом по предприятию, их деятельность регламентируется стандартами предприятий или инструкциями. В этом случае отдел главного метролога осуществляет методическое руководство (планирование МЭ, консультации, разработка необходимых нормативно-технических и методических материалов), а также периодическую проверку качества проведения МЭ путем повторной проверки документов. Отдел главного метролога может проводить экспертизу наиболее ответственных видов документов (ТЗ, документации на СИ и т. п.).

Конструкторская и технологическая документация предъявляется на МЭ комплектно, в подлинниках (с представленных документов снимаются копии), прошедших все проверки и согласования, предшествующие нормоконтролю. На некоторых предприятиях для облегчения учета внесенных замечаний и предложений метрологическую экспертизу вновь разработанной документации проводят в два этапа: проверка оригиналов (или даже черновиков) с составлением перечня замечаний и предложений и проверка подлинников с визированием документации.

Пометки карандашом, сделанные экспертом (ответственным за проведение МЭ) при проверке документации, сохраняются до визирования подлинников для вновь разработанной документации или до оформления извещений об изменении для действующей документации.

Регистрацию документов, представляемых на метрологическую экспертизу, а также замечаний и предложений, возникших при ее проведении, рекомендуется вести в специальном журнале по форме, установленной в отраслевых НТД. Замечания и предложения желательно оформлять в двух экземплярах: один для эксперта, другой – для разработчика документации.

Документация, прошедшая МЭ без замечаний, а также скорректированная по результатам МЭ, визируется: на поле для подшивки первого или заглавного листа основного конструкторского документа, на титульном листе технологического документа, под подписями разработчиков отчетов по НИР и ОКР и нормативных документов, в графе основных подписей комплекта документов.

В стандарте или другом НТД предприятия следует предусмотреть, что техническая документация, подлежащая МЭ, предъявляется на нормоконтроль только при наличии визы лица, ее проводившего.

Экспертное заключение оформляется по результатам МЭ документации, поступившей от других организаций и предприятий, а также если МЭ проводилась экспертной комиссией, когда требуется оформле-

ние изменений технической документации или разработка мероприятий по повышению эффективности метрологического обеспечения [37].

2.3.3 Основные задачи метрологической экспертизы

К числу основных задач МЭ технической документации (МЭТД) в соответствии с МИ 1325-86 относятся:

- определение оптимальности номенклатуры измеряемых параметров при контроле с целью обеспечения эффективности и достоверности контроля качества и взаимозаменяемости;
- оценка обеспечения конструкцией изделия возможности контроля необходимых параметров в процессе изготовления, испытания, эксплуатации и ремонта изделий (контролепригодности конструкций);
- установление соответствия показателей точности измерений требованиям эффективности и достоверности контроля и взаимозаменяемости;
- установление соответствия показателей точности измерений требованиям обеспечения оптимальных режимов технологических процессов;
- установление полноты и правильности требований к средствам измерений (в том числе нестандартизованным) и методикам выполнения измерений;
- оценка правильности выбора средств измерений (в том числе нестандартизованных) и методик выполнения измерений;
- выявление возможности преимущественного применения унифицированных, автоматизированных средств измерений, обеспечивающих получение заданной точности измерений и необходимой производительности;
- оценка обеспечения применяемыми средствами измерений минимальных трудоемкости и себестоимости контрольных операций при заданной точности;
- установление преимущественного применения стандартизованных или наличия аттестованных методик выполнения измерений;
- оценка соответствия производительности средств измерений производительности технологического оборудования;
- определение целесообразности обработки на ЭВМ результатов измерений, наличия стандартных или специальных программ обработки и соответствия требованиям, предъявляемым к обработке результатов измерений (округление, разрядность и т. п.), а также к формам представления результатов измерений, контроля и испытаний;
- установление правильности наименований и обозначений физических величин и их единиц;

– установление правильности указаний по организации и проведению измерений для обеспечения безопасности труда.

Реализация результатов метрологической экспертизы. На основе замечаний и предложений эксперта разработчики документации вносят в нее изменения в установленном порядке. При выявлении серьезных нарушений составляется план мероприятий по реализации результатов МЭ, который подписывается руководителем разработки, согласовывается с главным метрологом и утверждается главным инженером.

При разногласиях эксперта и разработчика документации вопрос передается на рассмотрение главного метролога и руководителя подразделения, разработавшего документацию. Если и на этом уровне не достигается договоренность, вопрос передается на рассмотрение главного инженера (или его заместителя), который принимает окончательное решение. При этом разработчик документации должен аргументировать свою позицию.

В отдельных случаях, с разрешения главного инженера, можно не учитывать в течение некоторого времени замечания эксперта (например, когда немедленное устранение недостатка остановило бы производство или привело к неоправданным затратам). Однако при этом должно быть запланировано мероприятие, позволяющее через некоторое время устранить выявленный недостаток [37].

2.3.4 Метрологическая экспертиза чертежей деталей

МЭ рекомендуется подвергать сборочные, монтажные, габаритные чертежи, а также чертежи отдельных деталей.

Наиболее распространенными ошибками конструкторов являются:

– невозможность контроля (неконтролепригодность) детали или изделия в связи с особенностями конструкции, неправильным указанием допусков. В отдельных случаях контроль возможен, но требует применения слишком сложных, дорогих СИ или разработки новых, нестандартизованных СИ;

– неправильный выбор измерительных баз;

– несоблюдение соотношений между допусками размера, формы, расположения поверхностей и требованиями к шероховатости поверхности.

Основные задачи МЭ чертежей детали – проверка наличия необходимых и достаточных для контроля размеров, предельных отклонений и других параметров и требований, а также оценка их контролепригодности.

В задачи эксперта-метролога не входит проверка правильности условных обозначений на чертеже, но знать требования государствен-

ных стандартов, регламентирующих соответствующие правила, эксперт-метролог обязан (например, требования ГОСТ 2.308, устанавливающие правила указания допусков формы и расположения поверхностей).

МЭ чертежа детали целесообразно проводить в следующей последовательности.

1. При наличии на чертеже текстовой записи норм точности проверяют правильность терминологии. Особое внимание следует уделять проверке правильности записи требований к допускам формы и расположения поверхности.

До сих пор встречается применение терминов «некруглость», «непараллельность», «нецилиндричность», несмотря на то, что ГОСТ 24642 узаконил термины «отклонение от круглости», «отклонение от параллельности», «отклонение от цилиндричности», «допуск круглости», «допуск цилиндричности» и т. д.

В отдельных случаях в технических требованиях чертежа встречаются не только терминологические, но и смысловые ошибки. Например, непараллельность поверхностей Б и В относительно поверхности Г не более 0,01 мм (рис. 2.7), или размер А (блока концевых мер длины) должен быть параллелен на всей длине детали в пределах 0,025 мм (рис. 2.8).

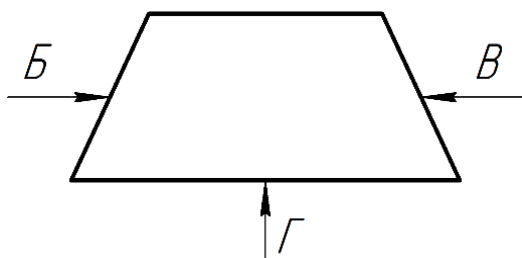


Рисунок 2.7 – Смысловая ошибка

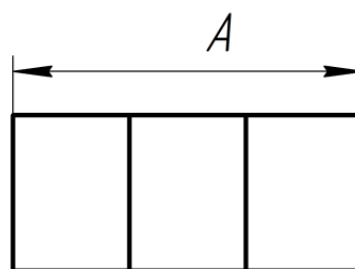


Рисунок 2.8 – Смысловая ошибка

При обнаружении терминологических ошибок необходимо понять действительный смысл требований. В отдельных случаях до получения соответствующих разъяснений от разработчика проведение МЭ нецелесообразно.

2. Выявляют на чертеже размеры, ограниченные допусками, устанавливают необходимость и возможность их контроля с учетом выбора измерительных баз, а также контролепригодности конструкции.

Допуски на чертежах и рекомендуемые посадки должны соответствовать ГОСТ 25346 и ГОСТ 25347.

Под контролепригодностью принимают возможность осуществления контакта измерительных поверхностей СИ с контролируемой поверхностью и выполнения всех относительных перемещений средства и объекта измерений (при контактных методах). При бесконтактных методах измерений – это возможность получения проекционного изображения заданного сечения контролируемой поверхности. Эксперт устанавливает те параметры, контроль которых при заданных нормах точности невозможен, затруднителен, требует привлечения операторов высокой квалификации, разработки новых, нестандартизованных СИ.

Например, контроль координат оси поверхности Б и ее радиуса (рис. 2.9), несмотря на свободные допуски, трудоёмок и требует применения универсального измерительного микроскопа или координатной измерительной машины и привлечения оператора высокой квалификации. В этом случае целесообразно обеспечить необходимую точность технологически.

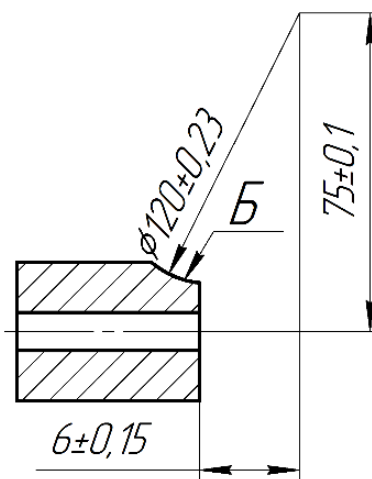


Рисунок 2.9 – Сложность в контроле

При проведении МЭ чертежей эксперт «не выбирает СИ» для контроля того или иного параметра, но он обязан хорошо ориентироваться в вопросах выбора СИ, знать, какие СИ имеются на предприятии. При решении дан-

ного вопроса конструкторами и экспертами используются стандарты предприятий, регламентирующих выбор СИ. Если таких НТД не имеется, при выборе СИ следует руководствоваться ГОСТ 8.051 и РД 50-98.

3. Проверяют взаимную увязку допусков размера, формы, расположения и требований к шероховатости поверхностей. Правила нанесения размеров и предельных отклонений на чертежах установлены в ГОСТ 2.307, а необходимые обозначения допусков формы и расположения поверхностей обозначаются на чертеже знаком в соответствии с таблицей 2.1. Допуски формы Tf и расположения делятся на две группы: ограничиваемые полем допуска на размер и не ограничиваемые этим полем. Если допуски формы и расположения не указаны на чертеже, такие виды отклонений, как отклонения от плоскостности, цилиндричности, круглости, параллельности плоскостей, симметричности и другие, допускаются в пределах поля допуска размера. Контроль допусков геометрии, ограниченных полем допуска размера и не указанных на чертеже, не является обязательным. Однако соблюдение допуска размера должно контролироваться с учетом имеющихся отклонений формы и расположения. Необходимые условия, ограничивающие контроль, следует указывать на чертеже. Если эти условия не соблюдаются, часть допуска формы и расположения остается неконтролируемой. Например,

при длине проходных калибров, меньшей, чем длина соединения, остается неконтролируемым допуск прямолинейности оси на длине соединения.

В тех случаях, когда наибольшие значения допусков формы и расположения, ограниченных полем допуска размера, не обеспечивают служебного назначения деталей, рекомендуется ввести ограничение этих допусков. Такое ограничение бывает необходимым для улучшения технических и эксплуатационных показателей (точность и плавность хода, уровень шума, точность центрирования сопряжений, их прочность, герметичность и пр.). При этом допуск геометрии, в зависимости от относительной геометрической точности, выбранной с учетом служебного

Таблица 2.1 – Обозначения допусков формы и расположения поверхностей

Группа допусков	Вид допуска	Знак
Допуски формы	прямолинейности	
	плоскостности	
	круглости	
	цилиндричности	
	профиля продольного сечения	
Допуски расположения	параллельности	
	перпендикулярности	
	наклона	
	соосности	
	симметричности	
	позиционный	
	пересечения осей	
Суммарные допуски формы и расположения	радиального биения	
	торцового биения	
	биения в заданном направлении	
	полного радиального биения	
	полного торцового биения	
	формы заданного профиля	
	формы заданной поверхности	

назначения детали, может составлять от 25 до 60 % допуска размера.

В соответствии с ГОСТ 24643 рекомендуются следующие уровни относительной геометрической точности: *A* – нормальная ($Tf/Tr \cdot 100 \% = 60 \%$); *B* – повышенная ($Tf/Tr \cdot 100 \% = 40 \%$); *C* – высокая ($Tf/Tr \cdot 100 \% = 25 \%$), где *Tf* – допуск формы; *Tr* – допуск размера.

Если для допусков геометрии используется менее 25 % от допуска размера, относительная геометрическая точность – особо высокая. Например, при изготовлении установочных колец для выборочного контроля колец подшипников на оптиметре используется соотношение $Tf/Tr = 5-7 \%$.

Допуски формы цилиндрических поверхностей, соответствующие уровням *A*, *B*, *C* относительной геометрической точности, составляют примерно 30; 20 или 12 % допуска размера, так как допуск формы огра-

ничивает отклонение радиуса цилиндрической поверхности, а допуск размера – отклонение диаметра.

Выбор допусков формы и расположения, не ограничиваемых полем допуска размера (допуск перпендикулярности, соосности, симметричности, допуск радиального и торцового биения), также целесообразно увязать с допуском размера.

Проверку взаимной увязки допусков формы и расположения поверхностей эксперту следует осуществлять, когда:

- одни допуски включают в себя полностью или частично другие виды допусков (например, отклонение от круглости ограничивается допуском цилиндричности);

- различные виды допусков, независимых один от другого, оказывают совместное воздействие на одни и те же показатели качества изделий.

Если какое-либо отклонение формы или расположения устанавливается несколькими условиями, его следует ограничивать наименьшей из всех ограничивающих величин. Например, отклонение от круглости ограничивается допусками размера, цилиндричности, радиального биения. Если все эти виды допусков заданы, отклонение от круглости должно быть ограничено наименьшим из них.

Если для одних и тех же поверхностей назначаются допуски расположения и формы, рекомендуется, чтобы допуски формы не превышали допусков расположения (например, для цилиндрических поверхностей допуск цилиндричности, а для коротких поверхностей допуск круглости не должны превышать допусков соосности, симметричности, позиционного допуска).

Проверка взаимной увязки допусков и требований к шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности нормируется и контролируется отдельно от допусков размеров, формы и расположения поверхностей. Однако шероховатость поверхности в процессе сборки и эксплуатации изделия может привести к дополнительным отклонениям размера и формы за счет износа микронеровностей при трении или в результате их смятия и сглаживания при запрессовке и под действием нагрузок. Поэтому для каждого допуска размера и формы можно установить наиболее грубый предел допускаемых значений шероховатости.

Наибольшие допускаемые значения параметров шероховатости для различных уровней относительной геометрической точности приведены в таблице 2.2.

При заданных допусках биения T_b (радиального, торцового и в заданном направлении, а также полного радиального, полного торцового) значения параметров Ra и Rz рекомендуется ограничивать исходя из условий: $Ra \leq 0,1T_b$; $Rz \leq 0,4T_b$.

Таблица 2.2 – Наибольшие допускаемые значения параметров шероховатости для различных уровней относительной геометрической точности

Допуск размера по квалитетам	Относительная геометрическая точность	Номинальные размеры, мм			
		до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 120	св. 120
		Значение Ra, мкм не более			
IT3	*	0,2	0,4	0,4	0,8
	A	0,1	0,2	0,2	0,4
	B	0,05	0,1	0,1	0,2
IT4	*	0,4	0,8	0,8	1,6
	A	0,2	0,4	0,4	0,8
	B	0,1	0,2	0,2	0,4
IT5	*	0,4	0,8	1,6	1,6
	A	0,2	0,4	0,8	0,8
	B	0,1	0,2	0,4	0,4
IT6	*	0,8	1,6	1,6	3,2
	A	0,4	0,8	0,8	1,6
	B	0,2	0,4	0,4	0,8
IT7	*	1,6	3,2	3,2	3,2
	A	0,8	1,6	1,6	3,2
	B	0,4	0,8	0,8	1,6
IT8	*	1,6	3,2	3,2	3,2
	A	0,8	1,6	3,2	3,2
	B	0,4	0,8	1,6	1,6
IT9	*	3,2	3,2	6,3	6,3
	A	3,2	3,2	6,3	6,3
	B	1,6	3,2	3,2	6,3
	C	0,8	1,6	1,6	3,2
IT10	*	3,2	6,3	6,3	6,3
	A	3,2	6,3	6,3	6,3
	B	1,6	3,2	3,2	6,3
	C	0,8	1,6	1,6	3,2
IT11	*	6,3	6,3	12,5	12,5
	A	6,3	6,3	12,5	12,5
	B	3,2	3,2	6,3	6,3
	C	1,6	1,6	3,2	3,2
IT12	*	12,5	12,5	25	25
	A	12,5	12,5	25	25
IT13	*	6,3	6,3	12,5	12,5
	B	6,3	6,3	12,5	12,5
IT14	*	12,5	25	50	50
	A	12,5	25	50	50
IT15	*	12,5	12,5	25	25
	B	12,5	12,5	25	25

Примечание. Знак «*» означает случаи, когда допуски формы не указаны на чертеже. При этом для квалитетов от 3 до 8 значения Ra с учетом достижимой шероховатости при тех методах обработки, которые обеспечивают получение соответствующих квалитетов.

4. Поверяют правильность простановки размеров (замкнутые контуры на графах размерных связей) и допусков взаимного расположения (однозначность и достаточность, т. е. поля допусков не должны дублировать друг друга).

5. Проверяют возможность контроля допусков взаимного расположения. При проведении контроля допусков взаимного расположения отклонения формы базовых поверхностей являются составляющими погрешности контроля. К поверхности, выбранной в качестве измерительной базы, должны быть, как правило, предъявлены более высокие точностные требования. Ее длина должна быть по возможности наиболее протяженной.

Неправильный выбор базовых поверхностей – одна из наиболее распространенных ошибок конструкторов, выявляемых при проведении МЭ. Например, при контроле радиального биения $\varnothing 20 (\pm 0,007)$ не ограничена форма базовой поверхности А (рис. 2.10). При установке детали на призмах погрешность измерения только за счет отклонения от круглости базы А может достигать значения: $(0,085 - 0,025)/2 = 30$ мкм, т. е. оказаться равной допуску радиального биения.

При этом эксперт может поставить вопрос о необходимом расширении допуска или об изменении способа его задания. Например, независимый допуск соосности отверстий (рис. 2.11) может быть заменен на зависимый (если не предъявляются никакие другие требования, кроме собираемости деталей). Контроль зависимого допуска значительно быстрее и проще, в данном случае может быть применен калибр.

Зависимый допуск расположения или формы (допуск соосности, симметричности, позиционный) – переменный допуск, минимальное значение которого указывается на чертеже и которое допускается превышать на значение, соответствующее отклонению действительного размера рассматриваемого и(или) базового элемента от наибольшего предельного размера вала или наименьшего предельного размера отверстия. Примерами назначения зависимых допусков могут быть сравнительно грубые допуски (свыше 0,04 мм) на перекос шпоночного паза и оси вала (отверстия), отклонение от соосности относительно базового отверстия (шейки) смежного соосного отверстия (шейки) отклонение от соосности относительно общей оси двух соосных отверстий, если они не являются посадочными для подшипников.

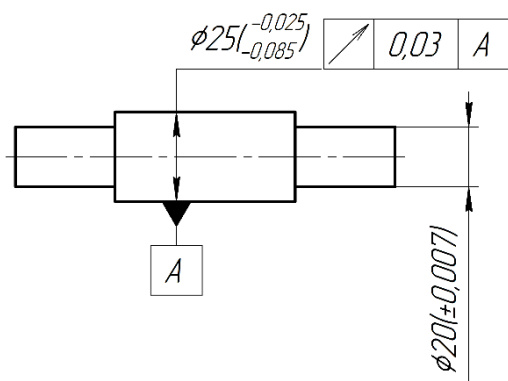


Рисунок 2.10 – Неверное задание допуска биения

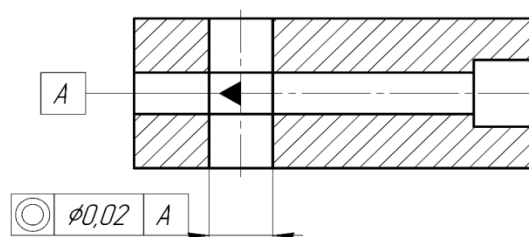


Рисунок 2.11 – Неверное задание допуска соосности

В частном случае размер зависимого допуска $T_{зав}$ может быть равен нулю (отклонения расположения допускаются только за счет недоиспользованных полей допусков размеров (рис. 2.12)). Если диаметры равны соответственно 80 и 55 мм, то $T_{зав} = 0$. В том случае, если они равны 79,88 и 54,88 мм, $T_{зав}$ может достигать 0,24 мм ($T_{зав} = 0 + 0,24 = 0,24$ мм). Поскольку отклонения расположения в большинстве случаев не выявляются при контроле размеров и контролируются либо универсальными СИ, либо комплексными калибрами, зависимые допуски, равные нулю, должны обязательно указываться на чертеже и не могут быть отнесены к числу неуказанных допусков.

Независимый допуск расположения или формы – это допуск, числовое значение которого постоянно для всей совокупности деталей, изготавливаемых по данному чертежу, и не зависит от действительного раз-

мера рассматриваемого или базового элемента. Независимые допуски требуют более сложного контроля. Примеры назначения независимых допусков (сравнительно жестких, менее 0,04 мм) – отклонение от соосности относительно общей оси посадочных отверстий под подшипники или относительно базового посадочного отверстия смежного посадочного (под подшипник) отверстия.

При оценке схем измерения для контроля того или иного допуска расположения целесообразно руководствоваться справочной литературой.

2.3.5 Метрологическая экспертиза сборочных чертежей

Исходя из цели МЭ сборочных чертежей по обеспечению эффективности измерений при контроле взаимосвязанных размеров отдельных деталей, узлов, и сборочных единиц, решается основная задача МЭ сборочных чертежей, сформулированная в МИ 1325-86 – установление соответствия показателей точности измерений требованиям эффективности и достоверности контроля и взаимозаменяемости.

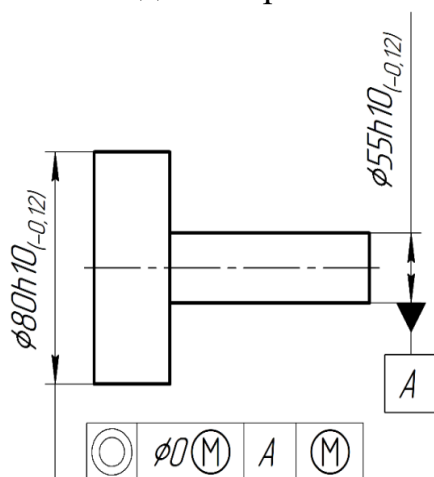


Рисунок 2.12 – Размер независимого допуска

Процедуру проведения МЭ сборочных чертежей можно рекомендовать в следующей последовательности.

1. Устанавливают наличие полноты комплекта документации, в том числе расчетов размерных цепей.

2. Устанавливают соответствие технических требований сборочного чертежа регламентированным в ТУ, а при необходимости это соответствие устанавливается по всем стадиям разработки вплоть до ТЗ.

Необходимость решения вопросов метрологического обеспечения разрабатываемого изделия (возможность и правильность выбора метода и средства измерений) на всех стадиях разработки, начиная от технического предложения до рабочей конструкторской документации, вытекает из требований ГОСТ 2.118 ЕСКД «Техническое предложение», ГОСТ 2.119 ЕСКД «Эскизный проект» и ГОСТ 2.120 ЕСКД «Технический проект». Причем, начиная с эскизного проекта должна быть выявлена необходимость разработки новых средств измерений, составления технических требований, оформления заявок на их разработку и изготовление.

3. Рассматривают обоснование и оценивают оптимальность (необходимость и достаточность, а также полноту) номенклатуры размерных цепей и отдельно измеряемых параметров по всем ступеням подчиненности сборочного чертежа.

Эксперту необходимо иметь ввиду, что обоснование и оценка оптимальности номенклатуры размерных цепей с учетом всех факторов «в их расчетах, влияющих на замыкающие звенья, как правило, увязывают с работами по технологическому контролю конструкторской документации, т. е. в соответствии с требованиями ГОСТ 14.206 «ЕСТПП. Технологический контроль конструкторской документации».

4. Определяют правильность наименований параметров, наличие и обоснование норм точности на параметры, норм точности измерений (испытаний) или требований к достоверности контроля (испытаний).

Особое внимание уделяется таким параметрам, как масса (в соответствии с ГОСТ 2.109 ЕСКД. «Основные требования к чертежам» должна указываться «фактическая масса – масса, определяемая измерением»), толщина и равномерность покрытий, отклонений формы и расположения поверхностей.

5. Проверяют правильность терминологии, наименований и обозначения единиц физических величин, записи числовых значений параметров.

При обнаружении терминологических ошибок уточняют (совместно с разработчиком) действительный смысл излагаемого термина.

6. Проверяют наличие указаний по обеспечению техники безопасности, промышленной санитарии и охране окружающей среды.

7. Проверяют увязку норм точности и технических требований сборочного чертежа с нормами точности чертежей различных ступеней подчиненности, учитывая все факторы, которые оказывают существенное влияние на нормы точности.

Проверяют также правильность проведения и оформления расчетов размерных цепей, при необходимости даются рекомендации по их корректировке, методам обеспечения норм точности и технических требований сборочного чертежа.

8. Устанавливают возможность контроля параметров с установленной нормой точности измерений.

При невозможности или затруднительности контроля выявляют (совместно с разработчиком) обоснованность установленных норм точности, возможность технологического обеспечения норм точности за счет высокой точности технологического процесса или контроля режимов технологического процесса.

9. Проверяют рациональность деления изделия на сборочные единицы и отдельные детали, обеспечивающие их контролепригодность.

10. Оценивают обеспечение максимальной степени совмещения технологических и измерительных баз с конструкторскими, т. е. обеспечение принципа единства баз.

В зависимости от выбора измерительных баз устанавливают правильность простановки размеров и их допусков, необходимость и достаточность простановки допусков формы и расположения поверхностей, а также требований к шероховатости поверхности.

11. Выявляют необходимость проведения специальных метрологических исследований.

12. Устанавливают обеспеченность средствами и методиками выполнения измерений, необходимость разработки нестандартизованных средств измерений и методик выполнения измерений (НСИ и МВИ).

Необходимость разработки НСИ и МВИ устанавливают в тех случаях, если она не установлена на стадии эскизного и технического проектов или на этих стадиях документация не разрабатывалась.

Возможность применения стандартизованных методов контроля проверяют при технологическом контроле конструкторской документации в соответствии с требованиями ГОСТ 14.206.

13. Оценивают экономическую эффективность средств и методов измерений, контроля и испытаний.

14. Устанавливают целесообразность использования средств вычислительной техники для обработки измерительной информации, наличие программ обработки.

2.3.6 Метрологическая экспертиза технологической документации

Основным при МЭ технологической документации является оценка возможности контроля содержащихся в документации норм точности, а также возможности реализации, достаточности и экономической целесообразности методик контроля.

МЭ могут подвергаться следующие виды технологических документов: маршрутная и операционная карты, карта эскизов, технологическая инструкция, карты технологического процесса, типового технологического процесса, типовой операции, технологический регламент.

В технологической документации:

1. Оценивают правильность формы записи контролируемых параметров. Как уже отмечалось, предпочтительной формой записи измеряемых параметров является указание их номинальных значений с допускаемыми отклонениями. В технологических документах нередко параметры указывают вообще без допусков (например, сверлить отверстие $d = 2,5$ мм на глубину $l = 3$ мм), или приводят их в виде экстремальных

значений. Указание параметров в форме «не более» или «не менее» нередко вызывает сомнение, а иногда является неправильным. Например, записано «...величина зазоров между подвижными элементами во всем диапазоне от 0° до 115° должна быть не менее 3 мм» (вероятнее всего, в данном случае имеет значение не только минимальное, но и максимальное значение зазора) или указано значение допустимого потребляемого тока ...» не более 1,2 А» (в данном случае необходимо указать допуск на параметр, так как нулевое значение потребляемого тока свидетельствует о неработоспособности блока, а снижение его до 0,5 А – об отказе одного из подканалов блока).

2. Проверяют обеспеченность методами и средствами измерений всех установленных в данном документе контрольных операций (кроме параметров, обеспечиваемых технологически).

В тех случаях, когда нормируемые параметры не проверяются непосредственно и используются косвенные методы контроля, должны быть проверены наличие и правильность расчета, подтверждающего достаточность и достоверность этих методов.

При необходимости должны быть предусмотрены измерения опасных и вредных факторов, воздействующих на обслуживающий персонал и окружающую среду.

На стандартизованные методики приводят ссылки. Из нестандартизованных МВИ предпочтение следует отдавать аттестованным методикам, показатели точности измерений по которым найдены в результате исследований, выполненных при их метрологической аттестации.

3. Оценивают правильность выбранных методик выполнения измерений, т. е. возможность измерения нормируемых параметров с допускаемой погрешностью, с учетом наличия измерительных баз и доступа к контролируемым поверхностям.

Допускаемые погрешности измерений линейных размеров до 500 мм регламентирует ГОСТ 8.051. Нормы точности измерений больших размеров (более 500 мм), отклонений формы и расположения, параметров шероховатости поверхности, угловых и других величин должны быть регламентированы отраслевыми НТД.

Если допускаемая погрешность измерения не установлена, следует, оценив погрешность измерений, рассчитать вероятности ошибок контроля (для этого могут быть использованы формулы и графики ГОСТ 8.051). Если вероятность ошибок контроля приемлема, выбор МВИ можно считать правильным.

Погрешность измерений оценивают с учетом ее составляющих (погрешностей СИ, температурной погрешности, погрешности, обусловленной взаимодействием СИ и объекта измерения, погрешности, обусловленной отличием свойств объекта от свойств приписываемой ему модели и других) для наиболее неблагоприятных из возможных реализаций свойств СИ, условий и процедуры измерений. Влиянием ше-

роховатости поверхности на погрешность измерений можно пренебречь, если соотношения между параметрами шероховатости Ra и Rz , допуском размера Tr и допуском формы $T\phi$ не ниже рекомендованных в таблице 2.2.

Если эти соотношения не выполняются, эксперт должен потребовать ужесточения требований к шероховатости поверхности.

При оценивании погрешности измерений следует также установить соответствуют ли условия измерения размера или отклонения (со съемом детали со станка или без съема). В противном случае ряд отклонений может остаться неконтролируемым.

При невозможности или затруднительности реализации предусмотренных методик измерений должна быть проверена обоснованность выбора контролируемых параметров и требуемой точности их измерений, рассмотрен вопрос о замене СИ на более точное, о совершенствовании метода и процедуры измерений или увеличении допускаемой погрешности измерения за счет введения производственного допуска.

Введение производственного допуска может привести к увеличению количества неправильно забракованных деталей, поэтому целесообразно, пользуясь ГОСТ 8.051, оценить возможное возрастание ложного брака. Если процент ложного брака оказывается недопустимо большим, должен быть рассмотрен вопрос о повышении точности технологического процесса. Если в технологическом процессе предусматривается использование контрольных автоматов, то следует проверить выполнение требований ГОСТ 8.051 в отношении ужесточения требований к погрешности измерения по сравнению с неавтоматизированными СИ. При наличии рекомендаций по выбору СИ (для линейных измерений такие рекомендации содержатся в РД 50–98-86) проверяют:

- выполнение этих рекомендаций, соблюдение указанных в рекомендациях условий измерений (например, требований к температурному режиму);
- существенность дополнительных погрешностей, зависящих от объекта измерения и не учтенных в рекомендациях.

4. Оценивают полноту и определенность описания операций контроля. Если процедура выполнения измерения достаточно проста и не требует никаких специальных указаний (например, необходимо измерить диаметр вала в любом сечении), достаточно указать только наименование и условное обозначение применяемого СИ. При необходимости должны быть приведены дополнительные указания по последовательности действий при выполнении измерений. В случаях косвенных измерений, следует проверить наличие и правильность приведенной формулы и расчета.

Если по характеру технологического документа (карта технологического процесса, операционная карта) не представляется возможность дать полное описание метода контроля, то на эту контрольную опера-

цию должна быть составлена операционная карта технического контроля или технологическая инструкция.

Проверяя технологическую документацию, обращают внимание на наличие и достаточность требований к условиям измерений. В большинстве случаев требования к условиям измерений задают указанием номера участка (лаборатории, другого помещения, в котором выполняют измерения). Требования, отсутствующие в документации на участок, должны быть заданы непосредственно в технологической документации. Требования, общие для всех или нескольких параметров, допускается выносить в общую часть.

Как правило, в документации должны указываться СИ, выпускаемые в данный момент промышленностью. Эксперт проверяет это, используя каталоги заводов-изготовителей, ограничительные перечни, действующие в пределах отрасли или предприятия. Рабочие условия применения СИ должны соответствовать условиям измерений.

Недопустимо указывать СИ, записывая «весы» или «штангель». Причем, штангенциркуль нередко предлагается не только там, где он не соответствует требованиям точности (измерение допусков порядка 0,1–0,2 мм), но и без учета особенностей конструкции применяемого изделия (например, размер губок штангенциркуля оказывается больше, чем ширина контролируемого паза; штангенциркулем предлагается измерять фаски и др.).

5. Проверяют соответствие производительности измерений производительности технологического оборудования (проверка проводится только при серийном или массовом производстве продукции). При недостаточной производительности метода контроля должны быть рассмотрены возможности применения выборочного статистического контроля, применения полуавтоматических или автоматических измерительных средств или применения параллельных контрольных операций с использованием предусмотренного в технической документации метода контроля.

6. Оценивают экономичность выбранного метода контроля, т. е. обеспечение минимальной трудоемкости контрольных операций при заданной точности. При выборе измерительных средств (для каждого значения допуска изделия и диапазона размеров) необходимо выбрать наиболее дешевое и простое в обращении СИ, при применении которого предъявляются минимальные требования к условиям измерения, требуется меньшая квалификация оператора.

Для изделий серийного и массового выпуска рассматривают целесообразность замены универсальных СИ на специализированные, а для изделий единичного и мелкосерийного производства – замены специализированных СИ на универсальные.

2.3.7 Пример проведения МЭ чертежа

Метрологической экспертизе подлежит чертеж шпинделя, состоящего из ступенчатого вала и диска, приваренного к гладкому концу вала (рис. 2.13) [37].

На чертеже имеются шесть ограниченных допусками размеров, три допуска взаимного расположения поверхностей, семь требований к шероховатости поверхностей. Текстовой записи норм точности нет. Отсутствуют также общие указания, ограничивающие предельные отклонения размеров с неуказанными допусками. Следовательно, можно сделать первое замечание: записать в технических требованиях чертежа предельные отклонения размеров с неуказанными допусками. Кроме того, во втором пункте технических требований указана марка стали 40Х, которая не применяется в сварных конструкциях.

При анализе необходимости и достаточности контролируемых параметров обнаруживаем, что не указана посадка на сопряжение диаметра ступицы вала и диаметра отверстия диска. При отсутствии допусков на эти диаметры невозможно обеспечить собираемость узла, а также избежать перекоса между диском и валом и обеспечить при последующей обработке заданный допуск на взаимное расположение поверхностей.

Анализируя размер $20^{+0,017}_{+0,08}$, замечаем, что он указан с допусками, которые соответствуют прессовой посадке. Это обстоятельство должно быть выяснено у конструктора, и если на эту ступень при последующей сборке будет запрессована какая-либо деталь, должен быть указан допуск торцового биения между этим диаметром и торцом ступени $\varnothing 25^{-0,02}_{-0,072}$.

Замечаем также, что отсутствует канавка для выхода шлифовального круга на поверхности $\varnothing 20^{+0,017}_{+0,08}$. Отсутствует и канавка для выхода шлифовального круга на поверхности $\varnothing 25^{-0,02}_{-0,072}$, но так как на месте этой канавки находится сварочный шов, следует ограничить длину поверхности с заданным жестким допуском.

При рассмотрении требований к шероховатости поверхностей обнаруживаем, что на поверхности $\varnothing 40^{-0,02}_{-0,072}$ указаны два допуска шероховатости ($Ra = 1,25$ мкм и $Ra = 2,5$ мкм), следовательно, один из них необходимо убрать.

По таблице 2.2 проверяем приемлемость соотношений допусков размеров и требований к шероховатости поверхностей. Для нормальной геометрической точности это соотношение составляет $Ra < 0,05 IT$, где IT – допуск соответствующего размера. На 40 назначен допуск $IT = 16$ мкм: $0,05 \cdot 16 = 0,8$ мкм.

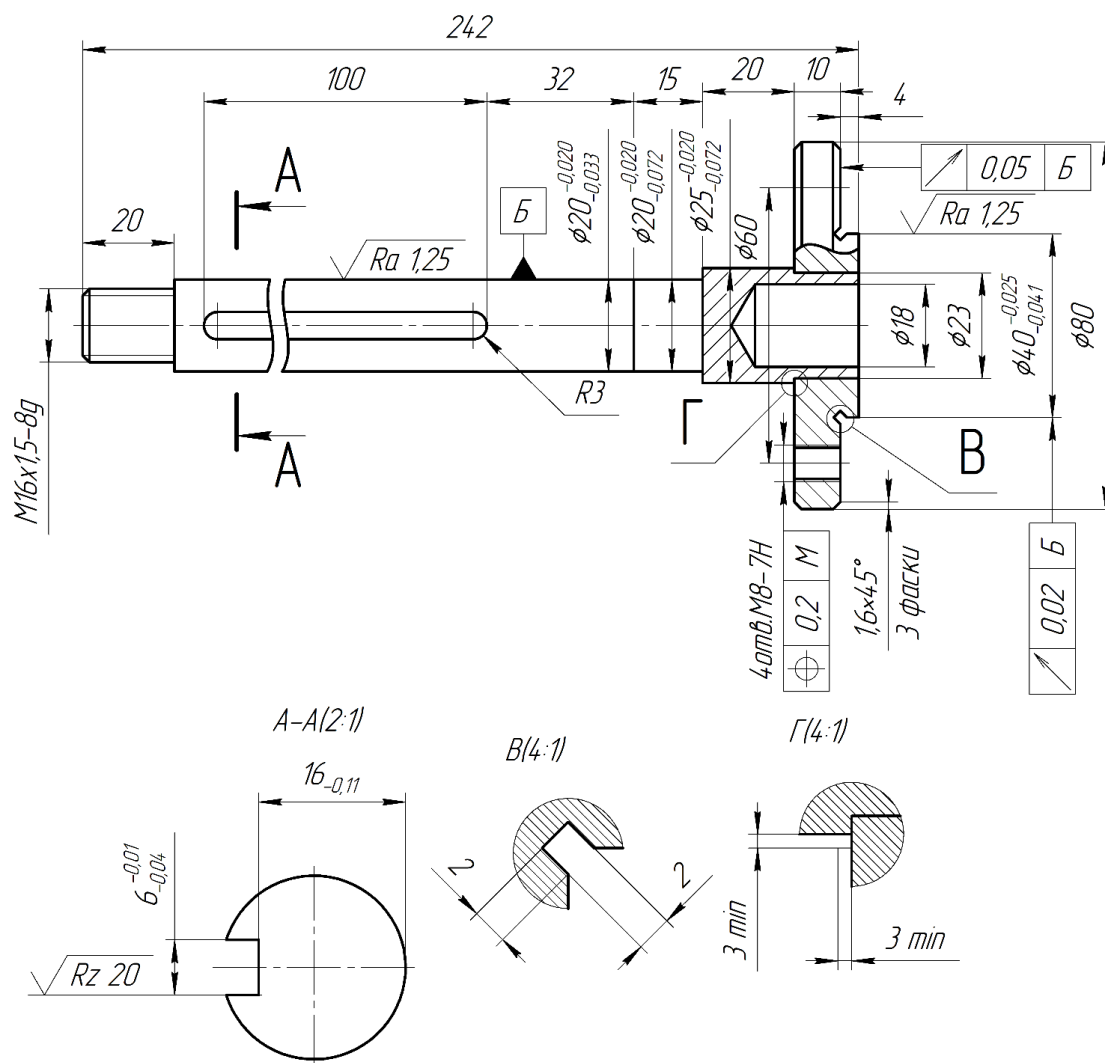


Рисунок 2.13 – Чертеж шпинделя

- 1 – 40-45 HRC_Э; 2 – Допускается изготавливать из стали марок 30 ХГСА, 40Х по ГОСТ 1050; 3 – Сварка ручная дуговая (материалы для сварки – электроды металлические по ГОСТ 3466); 4 – Покрытие химическое оксидное

Ни один из указанных параметров шероховатости нельзя считать достаточным. Для данной поверхности можно выбрать шероховатость $Ra = 0,63$ мкм. Для этой же поверхности указан допуск радиального биения $Tb = 20$ мкм. $Ra \leq 0,1 Tb$ и $0,1 \cdot 20 = 2$ мкм.

Выбранный параметр шероховатости $Ra = 0,63$ мкм для поверхности $40_{-0,041}^{-0,025}$ удовлетворяет этому условию.

Проверяем соотношение $Rz \leq 0,4 Tb$ для торца диска с нормированным торцовым биением, допуск которого составляет $Tb = 50$ мкм.

Должно быть выдержано соотношение $Rz \leq 0,4 \cdot 50 \leq 20$ мкм, в то время как шероховатость этого торца общая для чертежа $Rz = 40$ мкм.

Следовательно, требование к шероховатости этой поверхности заданное конструктором, недостаточно. Необходимо назначить $Rz = 20$ мкм.

Для $\varnothing 25_{-0,072}^{-0,02}$ $IT = 52$ мкм; $Ra = 1,25$ мкм и $0,05 \cdot 52 = 2,6$ мкм.

Назначенное требование к шероховатости можно считать достаточным.

Для $\varnothing 20_{+0,008}^{+0,017}$ $IT = 9$ мкм; $Ra = 1,25$ мкм и $0,05 \cdot 9 = 0,45$ мкм.

Требование к шероховатости недостаточно и должно составлять 0,32 мкм.

Для боковых поверхностей шпоночного паза указана шероховатость $Rz = 20$ мкм. Допуск на ширину паза $IT = 30$ мкм.

Требование к шероховатости недостаточно и его необходимо ужесточить до $Ra = 1,25$ мкм; $Rz \leq 0,2IT$; $Rz = 6$ мкм, откуда $Ra = 1,25$ мкм.

Рассмотрим требования к взаимному расположению поверхностей.

В качестве измерительной базы для контроля торцового и радиального биения выбрана база Б с допуском на диаметр 0,013 мм. Проанализируем возможность контроля радиального биения поверхности $\varnothing 40_{-0,041}^{-0,025}$ и торцового биения плоскости диска.

Наиболее правильным является контроль биения при установке детали на призмах. При этом отклонение от цилиндричности поверхности базы Б окажет влияние на погрешность измерения радиального и торцового биения и проявится в перекосе детали, когда против одной из опор окажется выступ, а против другой – впадина. Так как отклонение от цилиндричности этой поверхности дополнительно не ограничено, оно допустимо в пределах всего поля допуска, т. е. в пределах кольцевой цилиндрической зоны шириной 6,5 мкм. Определим допускаемую погрешность при измерении биения. Ее принимаем равной 0,3 контролируемого допуска. Поскольку погрешность базирования является основной, но не единственной составляющей погрешности измерения, примем ее допускаемую погрешность равной 0,7 допускаемой погрешности измерения:

$$\delta_{\text{баз.рад}} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot 0,02 = 0,0042 \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{баз.торц}} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot 0,05 = 0,0105 \text{ мм}.$$

При контроле радиального биения погрешность базирования может достигать значения отклонения от цилиндричности, умноженного на отношение расстояния от наиболее удаленного базового сечения до контролируемого сечения (~ 220 мм) к расстоянию между опорами (~ 130 мм), $\delta_{\text{баз}} = 6,5 \cdot 220/130 = 11$ мкм.

Погрешность базирования при контроле радиального биения может достигнуть значения, которое больше допускаемого. Для обеспечения необходимой точности контроля следует ввести допуск цилиндричности, равный $4,2 \cdot 130/220 = 2,5$ мкм.

Проверим требование к шероховатости поверхности, которая должна удовлетворять условию $Ra \leq 0,025 IT$; $Ra \leq 0,025 \cdot 13 \leq 0,325$ мкм. Следовательно, установленный допуск шероховатости $Ra = 0,32$ мкм является достаточным.

При контроле торцового биения погрешность базирования может достигать значения отклонения от цилиндричности (2,5 мкм), умноженного на отношение радиуса, на котором контролируется биение (~76 мм), к расстоянию между опорами (~130 мм); $2,5 \cdot 76/130 = 1,5$ мкм, т. е. погрешность базирования меньше допускаемой.

Влияние отклонения от цилиндричности базы B на погрешность измерения торцового биения окажется незначительным.

При контроле правильности обозначения допусков расположения поверхностей отмечаем, что обозначение позиционного зависимого допуска не соответствует ГОСТ 2.308, т. е. размер $\varnothing 60$, определяющий номинальное расположение отверстий, не заключен в рамку и перед числовым значением допуска не стоит символ диаметрального или радиусного выражения.

При рассмотрении контролепригодности параметров устанавливаем, что контроль может быть выполнен универсальными измерительными средствами.

Вызывает сомнение лишь контроль размера 32, определяющего расположение шпоночного паза, который увязан с границей диаметров $\varnothing 20^{+0,017}_{+0,008}$ и $\varnothing 20^{-0,020}_{-0,033}$.

При контроле расстояния шпоночного паза до этой границы ее трудно будет уловить. Кроме того, окончательная обработка этих диаметров будет производиться после нарезки шпоночного паза, поэтому лучше задать его расположение от торца вала.

Требования по однозначности задания допусков взаимного расположения соблюдаются.

2.4 Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятию «система обеспечения единства измерений Республики Беларусь».

2. Перечислите основные цели СОЕИ.

3. Перечислите основные задачи СОЕИ.

4. Что является законодательной основой СОЕИ?

5. Какой орган осуществляет координацию всех видов деятельности в области метрологии, стандартизации, сертификации, аккредитации и калибровки в Республике Беларусь?

6. Каковы функции Госстандарта Республики Беларусь?
7. Изобразите схему структуры Госстандарта Республики Беларусь.
8. В каких городах функционируют региональные метрологические центры Госстандарта Республики Беларусь?
9. Какие виды работ выполняют региональные метрологические центры Госстандарта Республики Беларусь?
10. Для чего нужна и как организована национальная система аккредитации Республики Беларусь?
11. Какие организации составляют основу государственной метрологической службы Республики Беларусь?
12. Перечислите задачи Государственной метрологической службы Республики Беларусь.
13. Какова сфера деятельности БелГИМ?
14. Назовите основную задачу БелГИМ.
15. Изобразите структурную схему БелГИМ.
16. Какие разделы включает научно-технический отчет по созданию эталона?
17. Перечислите основные функции ученого хранителя эталона.
18. Дайте определение понятию «стандартный образец».
19. Приведите примеры стандартных образцов.
20. На какие классы в зависимости от точности, области применения и уровня утверждения делятся стандартные образцы?
21. С какими основными международными организациями взаимодействует Государственная метрологическая служба Республики Беларусь?
22. Дайте краткую характеристику международной организации по законодательной метрологии.
23. Дайте краткую характеристику международному бюро мер и весов.
24. Какова роль международной конференции по измерительной технике и приборостроению?
25. Перечислите основные задачи и обязанности метрологической службы предприятия.
26. Какие Вам известны организационные структуры единой метрологической службы предприятия?
27. Какие участки метрологической службы предприятия решают задачи метрологического обеспечения?
28. Изобразите схему организационной структуры при комплексной системе организации метрологической службы.
29. Изобразите схему организационной структуры при специализированной системе организации метрологической службы.
30. Опишите особенности комплексной и специализированной системы организации метрологической службы.

31. Изобразите структуру основных звеньев в специализированной системе организации метрологической службы.
32. Изобразите структуру основных звеньев в комплексной системе организации метрологической службы.
33. Какие права имеет метрологическая служба предприятия?
34. Дайте определение понятию «метрологическая экспертиза технической документации».
35. На каких направлениях концентрируется содержание работ по метрологической экспертизе?
36. Перечислите перечень конструкторских и технологических документов, подвергаемых метрологической экспертизе.
37. Кто может проводить метрологическую экспертизу?
38. В какой форме должна предъявляться конструкторская и технологическая документация на метрологическую экспертизу?
39. Перечислите основные задачи метрологической экспертизы технической документации.
40. Как реализуются результаты метрологической экспертизы?
41. Какие чертежи подвергаются МЭ?
42. Перечислите наиболее распространенные ошибки конструкторов с точки зрения метролога.
43. Каковы основные задачи МЭ чертежей деталей?
44. Какова последовательность МЭ чертежа детали?
45. Дайте определение понятию «контролепригодность».
46. Приведите примеры ошибок конструктора по выбору баз, выявляемых при проведении МЭ.
47. Какова последовательность проведения МЭ сборочных чертежей?
48. Какова последовательность проведения МЭ технологической документации?

3 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕТРОЛОГИИ

3.1. Физические свойства и величины

3.1.1 Классификация величин

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами. *Свойство* – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним. Свойство – категория качественная. Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины. *Величина* – это свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной [13, 14, 23–26].

Величины разделяются на два вида: реальные и идеальные (рис. 3.1).

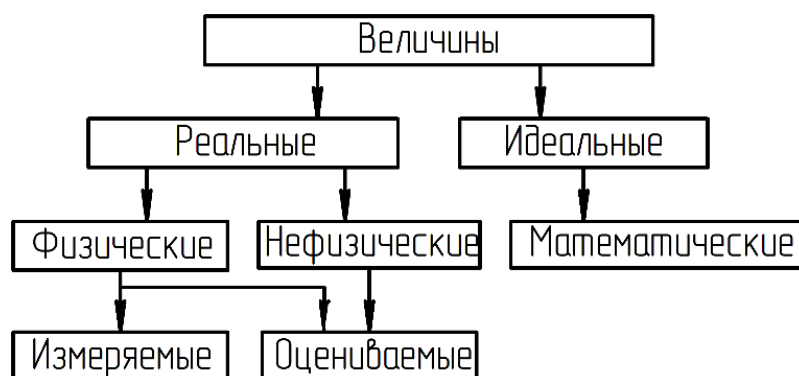


Рисунок 3.1 – Классификация величин

Идеальные величины главным образом относятся к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий. Они вычисляются тем или иным способом.

Реальные величины в свою очередь делятся на *физические* и *нефизические*. Физическая величина в общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических науках. К нефизическим следует отнести величины, присущие общественным (нефизическим) наукам – философии, социологии, экономике и т. п.

Стандарт ГОСТ 16263 трактует *физическую величину*, как одно из свойств физического объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном – индивидуальное для каждого из них. Индивидуальность в количественном отношении понимают в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Таким образом, физические величины – это измеренные свойства физических объектов или процессов, с помощью которых они могут быть изучены.

Физические величины целесообразно разделить на *измеряемые* и *оцениваемые*. Измеряемые ФВ могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования последних является важным отличительным признаком измеряемых ФВ. Физические величины, для которых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только оценены. Под *оцениванием* в таком случае понимается операция приписывания данной величине определенного числа, проводимая по установленным правилам. Оценивание величины осуществляется при помощи шкал. *Шкала величины* – упорядоченная последовательность ее значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений.

Нефизические величины, для которых единица измерения в принципе не может быть введена, могут быть только оценены. Следует отметить, что оценивание нефизических величин не входит в задачи теоретической метрологии.

Для более детального изучения ФВ необходимо классифицировать, выявить общие метрологические особенности их отдельных групп. Возможные классификации ФВ показаны на рисунке 3.2.

По *видам явлений* они делятся на следующие группы:

- *вещественные*, т. е. описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них. К этой группе относятся масса, плотность, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др. Иногда указанные ФВ называют *пассивными*. Для их измерения необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации. При этом пассивные ФВ преобразуются в активные, которые и измеряются;

- *энергетические*, т. е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия. Эти величины называют *активными*. Они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

– характеризующие протекание процессов во времени. К этой группе относятся различного вида спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

По принадлежности к различным группам физических процессов ФВ делятся на пространственно-временные, механические, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые, физико-химические, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

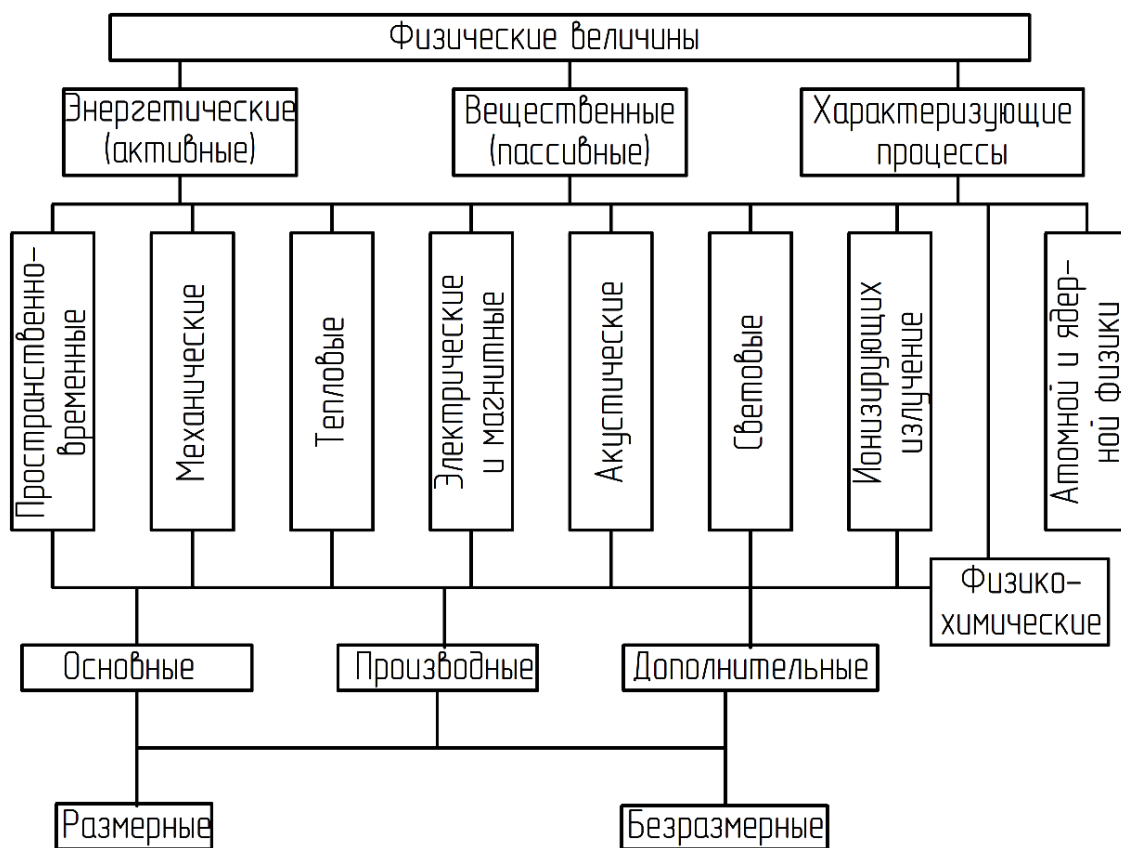


Рисунок 3.2 – Классификация ФВ

По степени условной независимости от других величин данной группы ФВ делятся на основные (условно независимые), производные (условно зависимые) и дополнительные. В настоящее время в системе СИ используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и количества вещества. К дополнительным физическим величинам относятся плоский и телесный углы. Подробно деление ФВ по этому признаку рассмотрено в главе лекции.

По наличию размерности ФВ делятся на размерные, т. е. имеющие размерность, и безразмерные [16–26].

3.1.2 Понятие счета, контроля, единицы величины и измерения

Физические объекты обладают неограниченным числом свойств, которые проявляются с бесконечным разнообразием. Это затрудняет их отражение совокупностями чисел с ограниченной разрядностью, возникающее при их измерении. Среди множества специфических проявлений свойств есть и несколько общих. Установлено для всего разнообразия свойств X физического объекта наличие трех наиболее общих проявлений в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности. Эти отношения в математической логике аналитически описываются простейшими постулатами [23–24].

1. *Отношение эквивалентности* – это отношение, в котором данное свойство X у различных объектов A и B оказывается одинаковым или неодинаковым. Постулаты отношения эквивалентности:

а) дихотомии (сходства и различия): либо $X(A) \approx X(B)$, либо $X(A) \neq X(B)$,

б) симметричности (симметричности отношения эквивалентности): если $X(A) \approx X(B)$, то $X(B) \approx X(A)$;

в) транзитивности по качеству (перехода отношения эквивалентности): если $X(A) \approx X(B)$ и $X(B) \approx X(C)$, то $X(A) \approx X(C)$.

2. *Отношение порядка* – это отношение, в котором данное свойство X у различных объектов оказывается больше или меньше. Постулаты отношения порядка:

а) антисимметричности: если $X(A) > X(B)$, то $X(B) < X(A)$;

б) транзитивности по интенсивности свойства (переход отношения порядка): если $X(A) > X(B)$ и $X(B) > X(C)$, то $X(A) > X(C)$.

3. *Отношение аддитивности* – это отношение, когда однородные свойства различных объектов могут суммироваться. Постулаты отношения аддитивности:

а) монотонности (однонаправленности аддитивности): если $X(A) = X(C)$ и $X(B) > 0$, то $X(A) + X(B) > X(C)$;

б) коммутативности (переместимости слагаемых): $X(A) + X(B) = X(B) + X(A)$;

в) дистрибутивности: $X(A) + X(B) = X(A + B)$;

г) ассоциативности: $[X(A) + X(B)] + X(C) = X(A) + [X(B) + X(C)]$.

В зависимости от проявления наиболее общих отношений эквивалентности, порядка и аддитивности следует различать три вида свойств и величин: $X_{экс}$ – свойства, проявляющие себя только в отношении эквивалентности; $X_{инт}$ – интенсивные величины, проявляющие себя в отношении эквивалентности и порядка; $X_{экс}$ – экстенсивные величины, проявляющие себя в отношении эквивалентности, порядка и аддитивности.

Если свойство проявляет себя только в отношении эквивалентности, то обладающие им объекты могут быть: обнаружены, классифици-

рованы, подвергнуты контролю по классам свойств эквивалентности, отражены соответствующими формальными объектами – числами.

Примером объектов, обладающих свойствами эквивалентности, могут служить, например, виды животных: заяц, медведь и др. Каждая группа таких объектов отличается характерными свойствами, наименованиями и распознается по эквивалентности тем или иным способом.

Свойства, проявляющиеся в отношении эквивалентности, отображаются изоморфно, т. е. взаимнооднозначно в обоих направлениях. При этом данному эмпирическому объекту X_1 , соответствует только данный формальный объект N_1 , например в виде числа из множества натуральных чисел N_n , и наоборот: $X_1 X_{экв} \rightarrow N_1(1 \dots N_n)$. Для отображения числами объектов, которые обладают свойствами, проявляющими себя лишь в отношении эквивалентности, используется *шкала наименований* (рассматривается далее).

Основным информативным параметром совокупности объектов с отношением эквивалентности является их количество, которое определяется путем счета. При счете численность качественно однотипных объектов отображается соответствующим числом из натурального ряда чисел. *Счет* – это процедура определения численности качественно однотипных объектов в данной их совокупности. Для проведения счета необходимо априорно реализовать последовательность теоретических и эмпирических методов, а именно:

- наблюдения за объектом счета;
- абстрагирования от всех свойств объектов, кроме учитываемого;
- анализа и сравнения для выявления отдельного объекта;
- индукции – для установления повторяемости объектов;
- обобщения – для выделения группы общих свойств.

После этого становится возможным применение эмпирико-теоретических методов формализации представлений о множестве объектов в виде ряда целых чисел. Результатом счета является число объектов. Основными характеристиками счета являются достоверность и скорость.

Многие свойства, помимо отношения эквивалентности, проявляют себя и в отношении наличия у них количественной ординаты свойства – интенсивности. При расчленении объекта такие свойства обычно не изменяются и называются *интенсивными величинами*. Путем сравнения интенсивных величин можно определить их соотношение, упорядочить по интенсивности данного свойства. При сравнении интенсивных величин выявляется отношение порядка (больше, меньше или равно), т. е. определяется соотношение между величинами. Примерами интенсивных величин являются твердость материала, запах и др. Интенсивные величины могут быть обнаружены, классифицированы по интенсивности, подвергнуты контролю, количественно оценены монотонно возрастающими или убывающими числами.

На основании понятия «интенсивная величина» вводятся понятия физической величины и ее размера. *Размер физической величины* – количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию ФВ.

Интенсивные величины отображаются путем количественного, главным образом экспертного, оценивания, при котором свойства с большим размером отображаются большим числом, чем свойства с меньшим размером. Интенсивные величины оцениваются при помощи шкал порядка и интервалов, рассмотренных далее.

Объекты, характеризующиеся интенсивными величинами, могут быть подвергнуты контролю. *Контроль* – это процедура установления соответствия между состоянием объекта и нормой. Для реализации процедуры простейшего однопараметрового контроля свойства X необходимы образцовые объекты, которые характеризуют параметры, равные соответственно нижней X_n и верхней X_e границам нормы, и устройство сравнения. Результат контроля Q определяется следующим уравнением:

$$Q = \begin{cases} \text{ниже нормы } (X < X_n) \\ \text{норма } (X > X_n \text{ и } X < X_e) \\ \text{выше нормы } (X > X_e) \end{cases}$$

Если физическая величина проявляется в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности, то она может быть: обнаружена, классифицирована, проконтролирована и измерена. Эти величины, называемые *экстенсивными*, характеризуют обычно физические вещественные или энергетические свойства объекта, например массу тела, электрическое сопротивление проводника и др.

При измерении экстенсивной величины несчетное множество ее размеров отображается на счетное подмножество в виде совокупности чисел Q , которое также должно удовлетворять отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Числа Q – это результаты измерений, они могут быть использованы для любых математических операций. Совокупность таких чисел Q должна обладать следующими свойствами:

1. Для проявления в отношении эквивалентности совокупность чисел Q , отображающая различные по размеру однородные величины, должна быть совокупностью одинаково именованных чисел. Это наименование является единицей ФВ или ее доли. *Единица физической величины* $[Q]$ – это ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице. Она применяется для количественного выражения однородных ФВ.

2. Для проявления в отношениях эквивалентности и порядка число q_1 , отображающее большую по размеру величину $Q_1 > Q_2$, выбирается большим, чем число q_2 , отображающее меньшую по размеру величину.

ну Q_2 . При этом в обоих случаях используется одна единица ФВ. Для выполнения данного условия в качестве искомой совокупности $q_1, \dots, q_n$ выбирают упорядоченное множество действительных чисел с естественным отношением порядка.

3. Для проявления в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности отвлеченное число, равное оценке суммарной измеряемой величины Q , возникающей в результате сложения составляющих однородных величин Q_i , должно быть равно сумме числовых оценок q_i этих составляющих. Сумма именованных чисел Q_i , отражающих составляющие, должна быть равна именованному числу Q , отражающему суммарную величину:

$$q = \sum_{i=1}^n q_i; \quad Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n q_i [Q_i] = q[Q] \text{ при } [Q] = [Q_i].$$

Если реализовано условие $[Q] = [Q_i]$, т. е. имеет место равенство размеров единиц у всех именованных чисел, отражающих суммарную величину Q и ее составляющие Q_i , то в этом случае вводятся следующие понятия:

значение физической величины Q – это оценка ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц;

числовое значение физической величины q – отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной ФВ.

Уравнение

$$Q = q[Q] \tag{3.1}$$

называют *основным уравнением измерения*.

Суть простейшего измерения состоит в сравнении размера ФВ Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$. В результате сравнения устанавливают, что $q[Q] < Q < (q + 1)[Q]$. Отсюда следует, что $q = \text{Int}(Q/[Q])$, где $\text{Int}(X)$ – функция, выделяющая целую часть числа X .

Условием реализации процедуры элементарного прямого измерения является выполнение следующих операций:

- воспроизведение ФВ заданного размера $q[Q]$;
- сравнение измеряемой ФВ Q с воспроизводимой мерой величиной $q[Q]$.

Таким образом, на основе использования общих постулатов эквивалентности, порядка и аддитивности получено понятие прямого измерения, которое может быть сформулировано следующим образом: *измерение* – познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем

физического эксперимента данной ФВ с известной ФВ, принятой за единицу измерения.

Ограниченность числового значения q измеряемой величины Q приводит при отображении к *гомоморфизму*, т. е. к неоднозначности при отображении. Измерение является гомоморфным отображением, так как данному размеру Q в диапазоне от $q [Q]$ до $(q + 1) [Q]$ соответствует только одно значение $Q_0 = q [Q]$, а данному Q_0 – множество размеров Q в указанном диапазоне.

Гомоморфизм вносит вероятностный аспект в отображение не только случайной, но и постоянной величины и является причиной появления неизбежной методической погрешности измерения – погрешности квантования. Эта погрешность возникает из-за принципиального несовершенства измерения как метода отображения непрерывного размера величины числом с ограниченным количеством разрядов [23–24].

3.1.3 Шкалы измерений

В практической деятельности необходимо проводить измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов. Как было показано в предыдущих разделах, некоторые свойства проявляются только качественно, другие – количественно. Разнообразные проявления (количественные или качественные) любого свойства образуют множества, отображения элементов которых на упорядоченное множество чисел или в более общем случае условных знаков образуют *шкалы измерения* этих свойств. Шкала измерений количественного свойства является шкалой ФВ. *Шкала физической величины* – это упорядоченная последовательность значений ФВ, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. Термины и определения теории шкал измерений изложены в документе МИ 2365.

В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений.

1. *Шкала наименований (шкала классификации)*. Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами ФВ. Это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен.

В шкалах наименований, в которых отнесение отражаемого свойства к тому или иному классу эквивалентности осуществляется с использованием органов чувств человека, наиболее адекватен результат, выбранный большинством экспертов. При этом большое значение имеет

правильный выбор классов эквивалентной шкалы – они должны надежно различаться наблюдателями, экспертами, оценивающими данное свойство. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: «не приписывай одну и ту же цифру разным объектам». Числа, приписанные объектам, могут быть использованы для определения вероятности или частоты появления данного объекта, но их нельзя использовать для суммирования и других математических операций.

Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствует понятия нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения. Примером шкал наименований являются широко распространенные атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

2. *Шкала порядка (шкала рангов)*. Если свойство данного эмпирического объекта проявляет себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства, то для него может быть построена шкала порядка. Она является монотонно возрастающей или убывающей и позволяет установить отношение больше/меньше между величинами, характеризующими указанное свойство. В шкалах порядка существует или не существует нуль, но принципиально нельзя ввести единицы измерения, так как для них не установлено отношение пропорциональности и соответственно нет возможности судить во сколько раз больше или меньше конкретные проявления свойства.

В случаях, когда уровень познания явления не позволяет точно установить отношения, существующие между величинами данной характеристики, либо применение шкалы удобно и достаточно для практики, используют условные (эмпирические) шкалы порядка. *Условная шкала* – это шкала ФВ, исходные значения которой выражены в условных единицах. Например, шкала вязкости Энглера, 12-бальная шкала Бофорта для силы морского ветра.

Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками. К таким шкалам, например, относится шкала Мооса для определения твердости минералов, которая содержит 10 опорных (реперных) минералов с различными условными числами твердости: тальк – 1; гипс – 2; кальций – 3; флюорит – 4; апатит – 5; ортоклаз – 6; кварц – 7; топаз – 8; корунд – 9; алмаз – 10. Отнесение минерала к той или иной градации твердости осуществляется на основании эксперимента, который состоит в том, что испытуемый материал царапается опорным. Если после царапанья испытуемого минерала кварцем (7) на нем остается след, а после ортоклаза (6) – не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 6, но менее 7. Более точного ответа в этом случае дать невозможно.

В условных шкалах одинаковым интервалам между размерами данной величины не соответствуют одинаковые размерности чисел,

отображающих размеры. С помощью этих чисел можно найти вероятности, моды, медианы, квантили, однако их нельзя использовать для суммирования, умножения и других математических операций. Определение значения величин при помощи шкал порядка нельзя считать измерением, так как на этих шкалах не могут быть введены единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать *оцениванием*. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным, о чем свидетельствует рассмотренный пример.

3. *Шкала интервалов (шкала разностей)*. Эти шкалы являются дальнейшим развитием шкал порядка и применяются для объектов, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Шкала интервалов состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало – нулевую точку. К таким шкалам относится летоисчисление по различным календарям, в которых за начало отсчета принято либо сотворение мира, либо рождение Христово и т. д. Температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра также являются шкалами интервалов.

На шкале интервалов определены действия сложения и вычитания интервалов. Действительно, по шкале времени интервалы можно суммировать или вычитать и сравнивать, во сколько раз один интервал больше другого, но складывать даты каких-либо событий просто бессмысленно.

Шкала интервалов величины Q описывается уравнением $Q = Q_0 + q[Q]$, где q – числовое значение величины; Q_0 – начало отсчета шкалы; $[Q]$ – единица рассматриваемой величины. Такая шкала полностью определяется заданием начала отсчета Q_0 шкалы и единицы данной величины $[Q]$.

Задать шкалу практически можно двумя путями. При первом из них выбираются два значения Q_0 и Q_1 , величины, которые относительно просто реализованы физически. Эти значения называются *опорными точками*, или *основными реперами*, а интервал $(Q_1 \sim Q_0)$ – *основным интервалом*. Точка Q_0 принимается за начало отсчета, а величина $(Q_1 - Q_0)/n = [Q_0]$ за единицу Q . При этом n выбирается таким, чтобы $[Q]$ было целой величиной [23–24].

Перевод одной шкалы интервалов $Q = Q_{01} + q_1[Q]_1$ в другую $Q = Q_{02} + q_2[Q]_2$ осуществляется по формуле

$$q_1 = \left(q_2 - \frac{Q_{02} - Q_{01}}{[Q]_1} \right) \frac{[Q]_1}{[Q]_2}. \quad (3.2)$$

Пример. Шкала Фаренгейта является шкалой интервалов. На ней Q_0 – температура смеси льда, поваренной соли и нашатыря, Q_1 – температура человеческого тела. Единица измерения – градус Фаренгейта:

$$[Q_F] = (Q_1 - Q_0)/96 = 1^\circ F.$$

Температура таяния смеси льда, соли и нашатыря оказалась равной $32^\circ F$, а температура кипения воды – $212^\circ F$.

На шкале Цельсия Q_0 – температура таяния льда, Q_1 – температура кипения воды. Градус Цельсия $[Q_C] = (Q_1 - Q_0)/100 = 1^\circ C$.

Требуется получить формулу для перехода от одной шкалы к другой.

Формула для перехода определяется в соответствии с выражением (3.2). Значение разности температур по шкале Фаренгейта между точкой кипения воды и точкой таяния льда составляет $212^\circ F - 32^\circ F = 180^\circ F$. По шкале Цельсия этот интервал температур равен $100^\circ C$. Следовательно, $100^\circ C = 180^\circ F$ и отношение размеров единиц

$$\frac{[Q]}{[Q]} = \frac{^\circ F}{^\circ C} = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}.$$

Числовое значение интервала между началами отсчета по рассматриваемым шкалам, измеренного в градусах Фаренгейта ($[Q]_1 = ^\circ F$), равно 32. Переход от температуры по шкале Фаренгейта к температуре по шкале Цельсия производится по формуле

$$t_c = \frac{5}{9}(t_F - 32)$$

При втором пути задания шкалы единица воспроизводится непосредственно как интервал, его некоторая доля или некоторое число интервалов размеров данной величины, а начало отсчета выбирают каждый раз по-разному в зависимости от конкретных условий изучаемого явления. Пример такого подхода – шкала времени, в которой $1c = 9192631770$ периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. За начало отсчета принимается начало изучаемого явления.

4. Шкала отношений. Эти шкалы описывают свойства эмпирических объектов, которые удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности (шкалы второго рода – аддитивные), а в ряде случаев и пропорциональности (шкалы первого рода – пропорциональные). Их примерами являются шкала массы (второго рода), термодинамической температуры (первого рода).

В шкалах отношений существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений, установленная по соглашению. С формальной точки зрения шкала отношений является шкалой интервалов с естественным началом отсчета. К значениям, полученным по этой шкале, применимы все арифметические действия, что имеет важное значение при измерений ФВ.

Шкалы отношений – самые совершенные. Они описываются уравнением $Q = q[Q]$, где Q – ФВ, для которой строится шкала, $[Q]$ – ее единица измерения, q – числовое значение ФВ. Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением $q_2 = q_1[Q_1]/[Q_2]$.

5. *Абсолютные шкалы.* Под абсолютными шкалами понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественное однозначное определение единицы измерения и не зависящие от принятой системы единиц измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, ослабления и др. Для образования многих производных единиц в системе СИ используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал.

Отметим, что шкалы наименований и порядка называют *неметрическими (концептуальными)*, а шкалы интервалов и отношений – *метрическими (материальными)*. Абсолютные и метрические шкалы относятся к разряду линейных. Практическая реализация шкал измерений осуществляется путем стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и, в необходимых случаях, способов и условий их однозначного воспроизведения [23–24].

3.2. Теория единства измерений

3.2.1 Системы физических величин и их единиц

В науке, технике и повседневной жизни человек имеет дело с разнообразными свойствами окружающих нас физических объектов. Эти свойства отражают процессы взаимодействия объектов между собой. Их описание производится посредством физических величин. Для того чтобы можно было установить для каждого объекта различия в количественном содержании свойства, отображаемого физической величиной, в метрологии введены понятия ее размера и значения [15–26].

Размер физической величины – это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина». Например, каждое тело обладает определенной массой, вследствие чего тела можно различать по их массе, т. е. по размеру интересующей нас ФВ.

Значение физической величины – это оценка ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Его получают в результате ее измерения или вычисления в соответствии с основным уравнением измерения $Q = q[Q]$, связывающим между собой значение ФВ Q , числовое значение q и выбранную для измерения единицу $[Q]$. В зависимости от размера единицы будет меняться числовое значение ФВ, тогда как размер ее будет одним и тем же.

Единица физической величины – это ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице, и которая применяется для количественного выражения однородных ФВ. Размер единиц ФВ устанавливается путем их законодательно закреплённого определения метрологическими органами государства.

Важной характеристикой ФВ является ее *размерность* $\dim Q$ – выражение в форме степенного многочлена, отражающее связь данной величины с основными ФВ, коэффициент пропорциональности в котором принят равным единице:

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\eta} \dots$$

где L, M, T, I – условные обозначения основных величин данной системы; $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ – целые или дробные, положительные или отрицательные вещественные числа. Показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, называют *показателем размерности*. Если все показатели размерности равны нулю, то такую величину называют *безразмерной*.

Размерность ФВ является более общей характеристикой, чем определяющее ее уравнение связи, поскольку одна и та же размерность может быть присуща величинам, имеющим разную качественную природу и различающимся по форме определяющего уравнения. Например, работа силы F на расстоянии L описывается уравнением $A_1 = FL$. Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , равна $A_2 = mv^2/2$. Размерности этих качественно различных величин одинаковы.

Над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечение корня. Понятие размерности широко используется:

- для перевода единиц из одной системы в другую;
- для проверки правильности сложных расчетных формул, полученных в результате теоретического вывода;
- при выяснении зависимости между величинами;
- в теории физического подобия.

Описание свойства, характеризуемого данной ФВ, осуществляется на языке других, ранее определенных величин. Эта возможность обу-

славливается наличием объективно существующих взаимосвязей между свойствами объектов, которые, будучи переведенными на язык величин, становятся моделями, образующими в своей совокупности систему уравнений, описывающих данный раздел физики. Различают два типа таких уравнений:

1. *Уравнения связи между величинами* – уравнения, отражающие законы природы, в которых под буквенными символами понимаются ФВ. Они могут быть записаны в виде, не зависящем от выбора единиц измерений входящих в них ФВ:

$$Q = K X^a Y^b Z^g \dots$$

Коэффициент K не зависит от выбора единиц измерений, он определяет связь между величинами. Например, площадь треугольника S равна половине произведения основания L на высоту h : $S = 0,5Lh$. Коэффициент $K = 0,5$ появился в связи с выбором не единиц измерений, а формы самих фигур.

2. *Уравнения связи между числовыми значениями физических величин* – уравнения, в которых под буквенными символами понимают числовые значения величин, соответствующие выбранным единицам. Вид этих уравнений зависит от выбранных единиц измерения. Они могут быть записаны в виде:

$$Q = K_e K X^a Y^b Z^g \dots,$$

где K_e – числовой коэффициент, зависящий от выбранной системы единиц.

Например, уравнение связи между числовыми значениями площади треугольника и его геометрическими размерами имеет вид при условии, что площадь измеряется в квадратных метрах, а основание и высота, соответственно, в метрах и миллиметрах:

$$S = 0,5Lh, \text{ т.е. } K_e = 1; S = 0,5 \cdot 10^{-6} Lh, \text{ т.е. } K_e = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{мм}^2.$$

С помощью уравнений связи между числовыми значениями ФВ формулируются определения одних величин на языке других и указываются способы их нахождения.

Совокупность ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются их функциями, называется *системой физических величин*.

Обосновано, но в общем произвольным образом выбираются несколько ФВ, называемых *основными*. Остальные величины, называемые *производными*, выражаются через основные на основе известных урав-

нений связи между ними. Примерами производных величин могут служить: плотность вещества, определяемая как масса вещества, заключенного в единице объема; ускорение – изменение скорости за единицу времени и др.

В названии системы ФВ применяют символы величин, принятых за основные. Например, система величин механики, в которой в качестве основных используются длина (L), масса (M) и время (T), называется системой LMT . Действующая в настоящее время международная система СИ должна обозначаться символами $LMTIQNJ$, соответствующими символам основных величин: длине (L), массе (M), времени (T), силе электрического тока (I), температуре (Q), количеству вещества (N) и силе света (J).

Совокупность основных и производных единиц ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется *системой единиц физических величин*. Единица основной ФВ является *основной единицей* данной системы. В качестве основных единиц в Республике Беларусь приняты метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и канделла (табл. 3.1).

Производная единица – это единица производной ФВ системы единиц, образованная в соответствии с уравнениями, связывающими ее с основными единицами или же с основными и уже определенными производными. Производные единицы системы СИ, имеющие собственное название, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Основные и дополнительные единицы физических величин системы СИ

Величина			Единица		
			Наименование	Обозначение	
Наименование	Размерность	Рекомендуемое обозначение		русское	международное
Длина	Основные				
	L	l	метр	м	m
Масса	M	m	килограмм	кг	kg
Время	T	t	секунда	с	s
Сила электрического тока	I	I	ампер	А	A
Термодинамическая температура	θ	T	кельвин	К	K
Количество вещества	N	N, ν	моль	моль	mol
Сила света	J	J	канделла	кд	cd
Плоский угол	Дополнительные				
	—	—	радиан	рад	rad
Телесный угол	—	—	стерадиан	ср	sr

Таблица 3.2 – Производные единицы системы СИ, имеющие специальное название

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражения через единицы СИ
Частота	T^{-1}	герц	Гц	s^{-1}
Сила, вес	$LM T^{-2}$	ньютон	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление, механическое напряжение	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Количество электричества	TI	кулон	Кл	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	Тл	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генри	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм	$cd \cdot sr$
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	лк	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Активность радионуклида	T^{-1}	беккерель	Бк	s^{-1}
Поглощенная доза ионизирующего излучения	$L^2 T^{-2}$	грей	Гр	$m^2 \cdot s^{-2}$
Эквивалентная доза излучения	$L^2 T^{-2}$	зиверт	Зв	$m^2 \cdot s^{-2}$

Для установления производной единицы следует:

- выбрать ФВ, единицы которых принимаются в качестве основных;
- установить размер этих единиц;
- выбрать определяющее уравнение, связывающее величины, измеряемые основными единицами, с величиной, для которой устанавливается производная единица. При этом символы всех величин, входящих в определяющее уравнение, должны рассматриваться не как сами величины, а как их именованные числовые значения;
- приравнять единице (или другому постоянному числу) коэффициент пропорциональности K_e , входящий в определяющее уравнение. Это уравнение следует записывать в виде явной функциональной зависимости производной величины от основных.

Установленные таким способом производные единицы могут быть использованы для введения новых производных величин. Поэтому

в определяющие уравнения наряду с основными единицами могут входить и производные, единицы которых определены ранее.

Производные единицы бывают когерентными и неkohерентными. *Когерентной* называется производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице. Например, единицу скорости образуют с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейного и равномерного движения точки: $v = L/t$, где L – длина пройденного пути, t – время движения. Подстановка вместо L и t их единиц в системе СИ дает $v = 1$ м/с. Следовательно, единица скорости является когерентной.

Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от единицы, то для образования когерентной единицы системы СИ в правую часть уравнения подставляют величины со значениями в единицах СИ, дающие после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное единице. Например, если для образования когерентной единицы энергии применяют уравнение $E = 0,5 mv^2$, где m – масса тела, v – его скорость, то когерентную единицу энергии можно образовать двумя путями:

$$E = 0,5(2mv^2) = 0,5(1м / с)^2 = 1 \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = 1 Дж ;$$

$$E = 0,5(2v^2) = 0,5(1кг)(2м / с)^2 = 1 \frac{кг \cdot м^2}{с^2} = 1 Дж .$$

Следовательно, когерентной единицей СИ является джоуль, равный ньютону, умноженному на метр. В усмотренных случаях он равен кинетической энергии тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, или же тела массой 1 кг, движущегося со скоростью $\sqrt{2}$ м/с.

Единицы ФВ делятся на системные и внесистемные. *Системная единица* – единица ФВ, входящая в одну из принятых систем. Все основные, производные, кратные и дольные единицы являются системными. *Внесистемная единица* – это единица ФВ, не входящая ни в одну из принятых систем единиц. Внесистемные единицы по отношению к единицам СИ разделяют на четыре вида:

– допускаемые наравне с единицами СИ, например: единицы массы – тонна; плоского угла – градус, минута, секунда; объема – литр и др. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в таблице 3.3.

– допускаемые к применению в специальных областях, например: астрономическая единица, парсек, световой год – единицы длины в астрономии; диоптрия – единица оптической силы в оптике; электрон-вольт – единица энергии в физике и т. д.;

– временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ, например: морская миля – в морской навигации; карат – единица массы в ювелирном деле и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями;

– изъятые из употребления, например: миллиметр ртутного столба – единица давления; лошадиная сила – единица мощности и некоторые другие.

Таблица 3.3 – Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
	атомная единица массы	а. е. м.	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Плоский угол	градус	$\dots^\circ$	$(\pi/180)$ рад = $1,745329 \dots \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	$\dots'$	$(\pi/10800)$ рад = $2,908882 \dots \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	$\dots''$	$(\pi/648000)$ рад = $4,848137 \dots \cdot 10^{-6}$ рад
	град	град	$(\pi/200)$ рад
Объем	литр	л	10^{-3} м ³
Длина	астрономическая единица	а. е.	$1,45598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)
	световой год	св. год	$9,4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)
	парсек	пк	$3,0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)
Оптическая сила	диоптрия	дптр	1 м^{-1}
Площадь	гектар	га	10^4 м^2
Энергия	электрон · вольт	эВ	$1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)
Полная мощность	вольт · ампер	В · А	–
Реактивная мощность	вар	вар	–

Различают кратные и дольные единицы ФВ. *Кратная единица* – это единица ФВ, в целое число раз превышающая системную или внесистемную единицу. Например, единица длины километр равна 10^3 м, т. е. кратна метру. *Дольная единица* – единица ФВ, значение которой в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы. Например, единица длины миллиметр равна 10^{-3} м, т. е. является дольной.

Приставки для образования кратных и дольных единиц СИ приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Мно- жи- тель	При- ставка	Образование приставки		Мно- жи- тель	При- ставка	Обозначение приставки	
		междуна- родное	русское			между- народное	рус- ское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санتي	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	ni	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^1	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

В системе СИ впервые введено понятие *дополнительных единиц*, к которым отнесены единицы плоского и телесного углов – радиан и стерадиан. Однако определения того, что же следует считать дополнительными единицами, не дано.

В приложении А приведен перевод некоторых единиц, применяемых в Англии и США, в единицы СИ.

При построении или введении новой системы единиц ученые руководствуются только одним единственным принципом – практической целесообразностью, т. е. удобством применения единиц в деятельности человека. В основу этого принципа положены следующие базовые критерии:

- простота образования производных ФВ и их единиц, т. е. приравнивание к единице коэффициентов пропорциональности в уравнениях связи;
- высокая точность материализации основных и производных единиц и передачи их размера нижестоящим эталонам;
- неуничтожаемость эталонов основных единиц, т. е. возможность их воссоздания в случае утраты;
- преемственность единиц, сохранение их размеров и наименований при введении новой системы единиц, что связано с исключением материальных и психологических затрат;
- близость размеров основных и производных единиц к размерам ФВ, наиболее часто встречающихся в практике;
- долговременность хранения основных и производных единиц их эталонами;
- выбор в качестве основных минимального числа ФВ, отражающих наиболее общие свойства материи.

Приведенные критерии вступают в противоречие, поэтому путем соглашения выбирается наиболее выгодный для практики вариант.

3.2.2 Международная система единиц (система СИ)

Единая международная система единиц (система СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. На территории нашей страны система единиц СИ действует с 1 января 1982 г. в соответствии ГОСТ 8.417 «ГСИ. Единицы физических величин». Система СИ возникла не на пустом месте и является логическим развитием предшествовавших ей систем единиц СГС и МКГСС и др.

В настоящее время широко применяются две системы единиц: СИ и СГС (симметричная или гауссова). Система СГС существует более 100 лет и до сих пор используется в точных науках – физике, астрономии. Однако ее все более теснит система СИ – единственная система единиц ФВ, которая принята и используется в большинстве стран мира. Это обусловлено ее достоинствами и преимуществами перед другими системами единиц, к которым относятся:

- универсальность, т. е. охват всех областей науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- когерентность величин;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением;
- упрощение записи формул в физике, химии, а также в технических науках в связи с отсутствием переводных коэффициентов;
- уменьшение числа допускаемых единиц;
- единая система образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах, так как отпадает необходимость в изучении множества систем единиц и внесистемных единиц;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.

Исторически сложилось так, что закономерные научно обоснованные связи были установлены сначала в области геометрии и кинематики, затем динамики, термодинамики и электромагнетизма. Последовательно строились и системы единиц. В связи с этим общего решения всей совокупности уравнений связи можно было избежать, а их решение свести к последовательному определению единиц в соответствующих разделах физики.

В геометрии и кинематике для установления связей между единицами достаточно уравнения

$$v = K_e \frac{dL}{dt}, \quad (3.3)$$

где v – скорость; K_e – коэффициент пропорциональности; L – длина; t – время.

Первоначально (до 1983 г.) в качестве основных были выбраны единицы измерения длины и времени, а в качестве производной – скорость ($n = 1$). В 1983 г. основными были названы единицы измерения времени и скорости, при этом скорости света в вакууме было придано точное, но в принципе произвольное значение $c_0 = 299\,792\,458$ м/с. Длина и ее единица – метр, по существу, стали производными. Однако формально длина в СИ остается основной ФВ и ее единица определяется следующим образом: *метр* – расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долей секунды.

Секунда – 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Коэффициент пропорциональности K_e в уравнении (3.3) равен единице. Если бы в 1983 г. было сохранено существовавшее ранее определение метра («криптоновый») и одновременно постулировано постоянство скорости света, K_e уже нельзя было считать равным единице – он выступал бы как экспериментально определяемая мировая константа.

Для формирования новой физической величины к уравнению (3.1) следует добавить уравнения связи для площади (например, квадрата), объема (например, куба), ускорения и т. д. При добавлении уравнений каждый раз вводится одна новая ФВ и соответственно одно уравнение связи.

При переходе к динамике уравнение (3.3) дополняется уравнениями второго закона Ньютона

$$F = k_1 m a \quad (3.4)$$

и закона всемирного тяготения

$$F = k_2 \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.5)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности; m, m_1, m_2 – масса тел; a – ускорение; r – расстояние между телами.

Оба коэффициента в уравнениях (3.4) и (3.5) можно было бы приравнять $k = 1$, при этом сила и масса стали бы производными физическими величинами. Считая, что $m = m_1 = m_2$, из уравнений (3.3) и (3.4)

получаем $m = ar^2$, т. е. единица массы есть масса такой материальной точки, которая сообщает единичное ускорение любой другой материальной точке, находящейся на единичном расстоянии. Такая производная единица массы имеет размерность $\text{м}^3/\text{с}$ и примерно равна $1,5 \cdot 10^{10}$ кг.

Следует отметить, что точность воспроизведения единицы массы при таком ее определении была бы весьма низкой. Поэтому, принимая во внимание второй, четвертый и пятый критерии выбора единиц ФВ, ввели «лишнюю» основную единицу – килограмм (единицу массы). При этом в одном из законов Ньютона – втором или всемирного тяготения, требовалось сохранить коэффициент пропорциональности. Он был оставлен в менее широко применяемом на практике законе всемирного тяготения. Мировая константа – гравитационная постоянная $\gamma = (6,6720 + 0,041) \cdot 10^{-11} (\text{Н} \cdot \text{м}^2)/\text{кг}^2$. Полученная система единиц ФВ не оптимальна с точки зрения первого критерия, но с точки зрения практического удобства – оптимальна.

Килограмм в настоящее время определяется как масса международного прототипа килограмма, представляющего собой цилиндр из сплава платины и иридия. Следует отметить, что при таком определении килограмма не выполняется третий базовый критерий выбора основных единиц системы ФВ. Эталон килограмма является единственным уничтожимым из всех эталонов основных единиц системы СИ. Он подвержен старению и требует применения громоздких поверочных схем. Современное развитие науки пока не позволяет с достаточной степенью точности связать килограмм с естественными атомными константами. До сих пор килограмм является чисто договорной единицей.

Сила в системе СИ является производной ФВ и измеряется в ньютонах, имеющих размерность $\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$. Другие механические единицы также производные и образуются с помощью соответствующих уравнений связи. Часть их них, имеющих собственное название, приведена в таблице 3.2.

Одна из главных ФВ, используемых при описании тепловых процессов, – *температура* T . Ее единица может быть получена как производная с использованием уже введенных ФВ геометрии и механики на основании одного из следующих уравнений.

Первое из них, называемое законом Менделеева – Клайперона:

$$pV = \frac{m}{M} RT ,$$

где p – давление газа; V , m – соответственно его объем и масса; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная, определяет абсолютную температуру как величину, пропорциональную произведению давления на объем одного моля газа.

Развитие кинетической теории идеальных газов позволило определить температуру как величину, пропорциональную средней кинетической энергии W поступательного движения молекулы идеального газа:

$$W = \frac{3}{2} k_B T ,$$

где k_B – постоянная Больцмана. Закон Стефана – Больцмана связывает температуру с объемной плотностью W_R электромагнитного излучения:

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

где σ – постоянная Стефана – Больцмана. Закон смещения Вина связывает длину волны λ_m такого излучения, на которую приходится максимум излучения, с температурой:

$$\lambda_m = b/T ,$$

где b – постоянная Вина.

В термодинамике показано, что приведенные четыре формулы определяют одну и ту же температуру, которая получила название *термодинамической*. Любой из коэффициентов R , k_B , σ или b , используемых в формулах, можно было бы приравнять к единице. Это обеспечило бы разные размерности температуры как производной единицы. Однако историческое развитие науки и то исключительно важное место, которое занимает температура в современной физике и технике, сделали целесообразным выделение ее в разряд основных величин. В связи с введением «лишней» основной единицы возникает новая фундаментальная константа – постоянная Больцмана. Универсальная газовая постоянная, постоянные Стефана – Больцмана и Вина выражаются через постоянную Больцмана и другие константы.

Температура измеряется в кельвинах. Один кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Следует отметить, что когда погрешность измерения постоянной Больцмана станет меньше погрешности определения термодинамической температуры, появится возможность перейти от термодинамической к энергетической шкале температуры посредством постулирования значения постоянной Больцмана (как это было сделано при переопределении метра через скорость света в вакууме).

Остальные тепловые единицы образуются на основании известных уравнений связи между ними и введенными ранее физическими величинами.

Для описания акустических величин не требуется вводить новые основные величины, следовательно, все используемые в акустике ФВ являются производными.

В физике электромагнитных явлений к уравнениям механики необходимо добавить: уравнение закона Кулона (основной закон электростатики), уравнение связи между электрическим током и электрическим зарядом и уравнение закона Ампера (основной закон электродинамики). В этих уравнениях введены четыре новых физических величины: электрический ток I , электрический заряд q , магнитная проницаемость μ_0, μ и диэлектрическая проницаемость ϵ_0, ϵ . Под μ и ϵ понимаются относительные проницаемости, а под μ_0 и ϵ_0 — абсолютные проницаемости вакуума.

Для получения оптимальной системы электромагнитных единиц достаточно было к трем, выбранным в механике основным единицам, добавить одну электромагнитную, выбрав ее из четырех вновь введенных величин. При выборе учитывался ряд важных моментов. Во-первых, к моменту становления системы СИ в физике, электро- и радиотехнике широко использовались так называемые практические единицы: кулон, ампер, вольт, джоуль и др. Их желательно было сохранить. Во-вторых, необходимо было объединить указанные единицы с механическими и тепловыми кратными и дольными единицами существовавшей системы СГС, создав единую для всех областей науки систему единиц.

В системе СИ за основную единицу выбрана единица абсолютной магнитной проницаемости $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, называемая *магнитной постоянной*. Однако формально основной единицей считается ампер. Это связано с тем, что при выборе основной единицы путем постулирования ее численного значения оказывается невозможным материализовать данную единицу в виде эталона. Поэтому реализация такой единицы осуществляется через какую-либо производную единицу. Так, единица скорости материализуется эталоном метра, а единица магнитной проницаемости — эталоном ампера. В разделе электромагнетизма системы СИ нет мировых констант, поскольку система оптимальна и не содержит «лишней» единицы.

По определению, *ампер* — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Поскольку скорость света в вакууме в системе СИ принята равной 299792458 м/с, то электрическая проницаемость вакуума ϵ_0 , называемая *электрической постоянной*, также будет точной постоянной:

$$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 8,854187187 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Световые измерения, т. е. измерения параметров электромагнитных колебаний с длиной волны от 0,38 до 0,76 мкм, имеют ту особенность, что в них очень большую роль играет ощущение человека, воспринимающего световой поток посредством глаз. Поэтому световые измерения не вполне объективны. Наблюдателя интересует только та часть потока электромагнитных колебаний, которая напрямую воздействует на глаз. В связи с этим обычные энергетические характеристики являются не совсем удобными для описания результатов таких измерений. Между энергетическими и световыми величинами существует однозначная взаимосвязь, и, строго говоря, для проведения измерений световых величин не требуется введения новой основной величины. Однако, учитывая исторически сложившееся к моменту возникновения системы СИ число основных единиц ФВ, а также значительное влияние на результаты световых измерений субъекта измерений – человека, было принято решение ввести единицу силы света – канделлу. *Канделла* – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Проведенные исследования показали, что средний глаз человека имеет наибольшую чувствительность при длине волны около 0,555 мкм, что соответствует частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Эту зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения описывают *абсолютной световой эффективностью*, которая равна отношению светового потока (т. е. оцениваемой нашим глазом мощности излучения) к полному потоку излучения (т. е. к полной мощности электромагнитного излучения). Световая эффективность представляет собой величину, позволяющую переходить от энергетических величин к световым. Она измеряется в люменах, деленных на ватт. При существующем определении канделлы максимальной световой эффективности придано точное значение $K_m = 683 \text{ Лм/Вт}$, тем самым она возведена в ранг фундаментальных констант. В связи с этим, канделла определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной. Остальные световые величины – производные и выражаются через введенные ранее ФВ.

Последняя основная единица системы СИ – моль была дополнительно введена в систему спустя 11 лет после введения первых шести единиц на XIV Генеральной конференции по мерам и весам в 1971 г. *Моль* – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в углероде ^{12}C массой 0,0012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

Введение этой единицы было встречено научной общественностью очень неоднозначно. Дело в том, что при введении моля был допущен ряд отступлений от принципов образования систем единиц физических величин. Во-первых, не было дано четкого и однозначного определения основополагающего понятия «количество вещества». Под количеством вещества можно понимать как массу того или иного вещества, так и количество структурных единиц, содержащихся в данном веществе. Во-вторых, из определения основной единицы неясно, каким образом возможно получение объективно количественной информации о ФВ при помощи измерений.

В этой связи возникает вопрос о функции, выполняемой молем среди основных единиц СИ. Любая основная единица СИ призвана осуществлять две функции. Воспроизведенная в виде эталона она обеспечивает единство измерений не только собственной ФВ, но и всех производных величин, в формировании размерности которых она участвует. С формальных позиций при образовании удельных величин моль входит в их размерность. Тем не менее удельную величину не следует отождествлять с производной ФВ.

Удельные величины отличаются от соответствующих ФВ только количественно. Они представляют тот же качественный аспект измеряемого свойства, только отнесенный либо к единице массы, либо к единице объема, либо в рассматриваемом случае – к молю. Отсюда следует, что моль не выполняет одну из самых главных функций единицы основной ФВ. Не выполняет моль и функций обеспечения единства измерений количества вещества. В большинстве публикаций подчеркивается, что моль является расчетной единицей и эталона для его воспроизведения не существует. Нет также ни одного метода и средства, предназначенного для измерения моля в соответствии с его определением. Все это свидетельствует о том, что следует ожидать исключения моля из числа основных единиц физических величин.

В систему СИ введены две дополнительные единицы – радиан и стерadian.

Радиан – это единица измерения плоского угла – угла между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу. На практике часто используются градус ($1^\circ = 2\pi/360 \text{ рад} = 0,017453 \text{ рад}$), минута ($1' = 1^\circ/60 = 2,9088 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$) и секунда ($1'' = 1'/60 = 1^\circ/3600 = 4,8481 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$). Соответственно $1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 45'' = 57,2961^\circ = (3,4378 \cdot 103)' = (2,0627 \cdot 105)''$.

Стерadian – это единица измерения угла – угла с вершиной в центре сферы, вырезающего на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Во всех системах единиц плоский φ и телесный Ω углы вводятся посредством уравнений

$$\varphi = l/R; \quad \Omega = S/R^2 \quad (3.6)$$

где l – длина дуги, вырезаемой центральным плоским углом φ на окружности радиуса R ; S – площадь, вырезаемая центральным телесным углом на шаре с радиусом R . В соответствии с этими определениями у обоих углов нет размерности в любой системе единиц: $[\varphi] = L/L$; $[\Omega] = L^2/L^2$, т. е. их единицы не зависят от размера основных единиц.

В настоящее время нет устоявшегося мнения о том, к какому типу относятся единицы углов. Некоторые полагают необоснованным введение в систему СИ неопределенного понятия дополнительных единиц. По мнению одних, эти единицы являются производными, определяемыми уравнениями (3.6), с той лишь особенностью, что они оказываются одинаковыми во всех системах единиц. Другие считают единицу плоского угла основной, а единицу телесного угла – производной от нее с размерностью рад². Дальнейшее развитие метрологии покажет, какая из существующих точек зрения окажется истинной.

3.2.3 Понятие о единстве измерений

При проведении измерений необходимо обеспечить их единство. Под *единством измерений* понимается характеристика качества измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизведенных величин, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Понятие «единство измерений» довольно емкое. Оно охватывает *важнейшие задачи метрологии*: унификацию единиц ФВ, разработку систем воспроизведения величин и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью и ряд других вопросов. Единство должно обеспечиваться при любой точности, необходимой науке и технике. На достижение и поддержание на должном уровне единства измерений направлена деятельность государственных и ведомственных метрологических служб, проводимая в соответствии с установленными правилами, требованиями и нормами. На государственном уровне деятельность по обеспечению единства измерений регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) или нормативными документами органов метрологической службы.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все существующие СИ одной и той же величины. Это достигается путем точного воспроизведения и

хранения в специализированных учреждениях установленных единиц ФВ и передачи их размеров применяемым СИ.

Воспроизведение единицы физической величины – это совокупность операций по материализации единицы ФВ с наивысшей в стране точностью посредством государственного эталона или исходного образцового СИ. Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы – это воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру ФВ в соответствии с определением единицы. Оно осуществляется с помощью государственных первичных эталонов. Например, единица массы – 1 килограмм (точно) воспроизведена в виде платиноиридиевой гири, хранимой в Международном бюро мер и весов в качестве международного эталона килограмма. Розданные другим странам эталоны имеют номинальное значение 1 кг. На основании последних международных сличений (1979 г.) платиноиридиевая гиря, входящая в состав Государственного эталона РФ, имеет массу 1,000000087 кг.

Воспроизведение производной единицы – это определение значения ФВ в указанных единицах на основании косвенных измерений других величин, функционально связанных с измеряемой. Так, воспроизведение единицы силы – ньютона – осуществляется на основании известного уравнения механики $F = mg$, где m – масса тела; g – ускорение свободного падения.

Передача размера единицы – это приведение размера единицы ФВ, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их *поверке или калибровке*. Размер единицы передается «сверху вниз» – от более точных СИ к менее точным.

Хранение единицы – совокупность операций, обеспечивающая неизменность во времени размера единицы, присущего данному СИ. Хранение эталона единицы ФВ предполагает проведение взаимосвязанных операций, позволяющих поддерживать метрологические характеристики эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняются регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера.

3.2.4 Эталоны единиц физических величин

Эталон – средство измерений (или комплекс СИ), предназначенное для воспроизведения и(или) хранения единицы и передачи ее раз-

мера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения».

Перечень эталонов не повторяет перечня ФВ. Для ряда единиц эталоны не создаются из-за того, что нет возможности непосредственно сравнивать соответствующие ФВ, например, нет эталона площади. Не создаются эталоны и в том случае, когда единица ФВ воспроизводится с достаточной точностью на основе сравнительно простых средств измерений других ФВ.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются ФВ, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать по крайней мере тремя взаимосвязанными свойствами: *неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью*.

Неизменность – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени, при этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы ФВ (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость – возможность обеспечения сличения с эталоном других СИ, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Различают следующие виды эталонов:

– *первичный* – обеспечивает воспроизведение и хранение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же величины) точностью. Первичные эталоны – это уникальные СИ, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники. Они состав-

ляют основу государственной системы обеспечения единства измерений;

- *специальный* – обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью не осуществима, и служит для этих условий первичным эталоном;

- *государственный* – это первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны. Утверждение проводит главный метрологический орган страны. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Точность воспроизведения единицы должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники. В состав государственных эталонов включаются СИ, с помощью которых воспроизводят и(или) хранят единицу ФВ, контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы, осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран;

- *вторичный* – хранит размер единицы, полученной путем сличения с первичным эталоном соответствующей ФВ. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. В состав вторичных эталонов включаются СИ, с помощью которых хранят единицу ФВ, контролируют условия хранения и передают размер единицы.

По своему метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на следующие:

- *эталон-копия* – предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Он создается в случае необходимости проведения большого числа поверочных работ с целью предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляют собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он не всегда является его физической копией;

- *эталон сравнения* – применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом;

- *эталон-свидетель* – предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель. Его основное назначение – обеспечивать возможность контроля постоянства основного эталона;

– *рабочий эталон* – применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Это самые распространенные эталоны. С целью повышения точности измерений ФВ рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических органах и лабораториях министерств и ведомств.

Погрешности государственных первичных и специальных эталонов характеризуются неисключенной систематической погрешностью, случайной погрешностью и нестабильностью. Неисключенная систематическая погрешность описывается границами, в которых она находится. Случайная погрешность определяется средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений при воспроизведении единицы с указанием числа независимых измерений. Нестабильность эталона задается изменением размера единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, за определенный промежуток времени.

Оценки погрешностей вторичных эталонов характеризуются отклонением размеров хранимых ими единиц от размера единицы, воспроизводимой первичным эталоном. Для вторичного эталона указывается суммарная погрешность, включающая случайные погрешности сличаемых эталонов и погрешности передачи размеров единицы от первичного (или более точного) эталона, а также нестабильность самого вторичного эталона. Суммарная погрешность вторичного эталона характеризуется либо СКО результата измерений при его сличении с первичным эталоном или вышестоящим по поверочной схеме вторичным эталоном, либо доверительной границей погрешности с доверительной вероятностью 0,99.

Передача размеров единиц ФВ от эталонов рабочим мерам и измерительным приборам осуществляется с помощью рабочих эталонов. До недавнего времени в нашей стране вместо термина «рабочие эталоны» использовался термин «образцовые средства измерений», который в большинстве других стран не применяется.

Рабочие эталоны при необходимости подразделяются на разряды 1, 2 и т.д., определяющие порядок их соподчинения в соответствии с поверочной схемой. Для различных видов измерений устанавливается, исходя из требований практики, различное число разрядов рабочих эталонов, определяемых стандартами на поверочные схемы для данного вида измерений.

3.2.5 Эталоны единиц системы СИ

Единица времени – *секунда* впервые определялась через период вращения Земли вокруг оси или Солнца. До недавнего времени секунда равнялась 1/86400 части солнечных средних суток. За средние солнеч-

ные сутки принимался интервал времени между двумя последовательными кульминациями «среднего» Солнца. Однако продолжительные наблюдения показали, что вращение Земли подвержено нерегулярным колебаниям, которые не позволяют рассматривать его в качестве достаточно стабильной естественной основы для определения единицы времени. Средние солнечные сутки определяются с погрешностью до 10^{-7} с. Эта точность совершенно недостаточна при нынешнем состоянии техники.

Проведенные исследования позволили создать новый эталон секунды, основанный на способности атомов излучать и поглощать энергию во время перехода между двумя энергетическими состояниями в области радиочастот. С появлением высокоточных кварцевых генераторов и развитием дальней радиосвязи появилась возможность реализации нового эталона секунды и единой шкалы мирового времени. В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения внешними полями. Данное определение реализуется с помощью цезиевых реперов частоты. *Репер*, или *квантовый, стандарт частоты*, представляет собой устройство для точного воспроизведения частоты электромагнитных колебаний в сверхвысокочастотных и оптических спектрах, основанное на измерении частоты квантовых переходов атомов, ионов или молекул. В пассивных квантовых стандартах используются частоты спектральных линий поглощения, в активных – вынужденное испускание фотонов частицами. Применяются активные квантовые стандарты частоты на пучке молекул аммиака (так называемые молекулярные генераторы) и атомов водорода (водородные генераторы). Пассивные стандарты частоты выполняются на пучке атомов цезия (цезиевые реперы частоты).

До июля 1997 г. государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения времени и частоты определялись ГОСТ 8.129. С 1997 г. он заменен правилами межгосударственной стандартизации ПМГ 18-96 «Межгосударственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты». Государственный первичный эталон единицы времени состоит из комплекса следующих средств измерений:

- метрологических цезиевых реперов частоты, предназначенных для воспроизведения размеров единицы времени и частоты в международной системе единиц;

- водородных стандартов частоты, предназначенных для хранения размеров единиц времени и частоты и одновременно выполняющих функцию хранителей шкал времени. Использование водородных репе-

ров позволяет повысить стабильность эталонов. В настоящее время за период времени от 100 с до нескольких суток она не превышает $(1-5) \cdot 10^{-7}$;

- группы квантовых часов, предназначенных для хранения шкал времени. *Квантовые часы* – это устройство для измерения времени, содержащее генератор, частота которого стабилизирована кварцевым резонатором, и управляемое квантовыми стандартами частоты;

- аппаратуры для передачи размера единицы частоты в оптический диапазон, состоящей из группы синхронизированных лазеров и сверхвысокочастотных генераторов;

- аппаратуры внутренних и внешних сличений, включающей перевозимые квантовые часы и перевозимые лазеры;

- аппаратуры средств обеспечения.

Диапазон значений интервалов времени, воспроизводимых эталоном, составляет $1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^8$ с, диапазон значений частоты $1 - 1 \cdot 10^{14}$ Гц. Воспроизведение единиц времени обеспечивается со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $1 \cdot 10^{-14}$ за три месяца, неисключенная систематическая погрешность не превышает $5 \cdot 10^{-14}$. Нестабильность частоты эталона за интервал времени от 1000 с до 10 суток не превышает $1 \cdot 10^{-15}$

Метр был в числе первых единиц, для которых были введены эталоны. Первоначально в период введения метрической системы мер за первый эталон метра была принята одна десятимиллионная часть четверти длины Парижского меридиана. В 1799 г. на основе ее измерения изготовили эталон метра в виде платиновой концевой меры (метр Архива), представлявший собой линейку шириной около 25 мм, толщиной около 4 мм с расстоянием между концами 1 м.

До середины XX века проводились неоднократные уточнения принятого эталона. Так, в 1889 г. был принят эталон в виде штриховой меры из сплава платины и иридия. Он представлял собой платиноиридиевый брусок длиной 102 мм, имеющий в поперечном сечении форму буквы X, как бы вписанную в воображаемый квадрат, сторона которого равна 20 мм.

Требования к повышению точности эталона длины (платиноиридиевый прототип метра не может дать точности воспроизведения выше 0,1–0,2 мкм), а также целесообразность установления естественного и неразрушимого эталона привели к принятию (1960 г.) в качестве эталона метра длины, равной $1\,650\,763,73$ длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$, атома криптона-86 (криптоновый метр). Этот эталон мог воспроизводиться в отдельных метрологических лабораториях, точность его по сравнению с платиноиридиевым прототипом была на порядок выше.

Дальнейшие исследования позволили создать более точный эталон метра, основанный на длине волны в вакууме монохроматического

излучения, генерируемого стабилизированным лазером. За эталон метра в 1983 г. было принято расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долей секунды. Данное определение метра было законодательно закреплено в декабре 1985 г. после утверждения единых эталонов времени, частоты и длины.

Метр может быть реализован одним из следующих способов, рекомендованных Международным комитетом мер и весов:

1) через длину пути L , проходимого в вакууме плоской электромагнитной волной за измеренный промежуток времени t . Длина L определяется по формуле $L = c_0 t$, где $c_0 = 299\,792\,458$ м/с – скорость света в вакууме. При этом необходимо вносить поправки, учитывающие реальные условия (дифракцию, гравитацию и неидеальность вакуума). Этот вариант используется в государственном первичном эталоне единиц времени, частоты и длины, воспроизводящем метр в диапазоне от нуля до 1 м со средним квадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-9}$ м;

2) через длину волны λ в вакууме плоской электромагнитной волны с известной частотой ν . Эта длина получается из соотношения $\lambda = c_0/\nu$

3) через длину волн в вакууме излучений ряда источников, включенных в специальный список. В нем перечислены рекомендованные источники излучения, указаны частоты и длины волн в вакууме, а также перечислены технические требования, которые необходимо выполнить при создании этих источников, приведены погрешности воспроизведения длин волн и частот.

Во вторичных эталонах и образцовых средствах измерений метр реализуется третьим способом, а именно путем создания He-Ne и аргоновых лазеров, стабилизированных по резонансам насыщенного поглощения в йоде или метане.

Государственная поверочная схема для СИ длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6}$ – 50 м определяется рекомендациями МИ 2060-90.

Другой важной основной единицей в механике является *килограмм*. При становлении метрической системы мер в качестве единицы массы приняли массу одного кубического дециметра чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (4 °С). Изготовленный при этом первый прототип килограмма представляет собой платиноиридиевую цилиндрическую гирю высотой 39 мм, равной его диаметру. Данное определение эталона килограмма действует до сих пор.

Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения массы определяются ГОСТ 8.021. Государственный эталон состоит из комплекса следующих средств измерений:

– национального прототипа килограмма – копии № 12 международного прототипа килограмма, представляющего собой гирю из плати-

ноиридиевого сплава и предназначенного для передачи размера единицы массы гире *R1*;

- национального прототипа килограмма – копии № 26 международного прототипа килограмма, представляющего собой гирю из платиноиридиевого сплава и предназначенного для проверки неизменности размера единицы массы, воспроизводимой национальным прототипом килограмма – копией №° 12, и замены последнего в период его сличений в Международном бюро мер и весов;

- гири *R1* и набора гирь, изготовленных из платиноиридиевого сплава и предназначенных для передачи размера единицы массы эталонам-копиям;

- эталонных весов.

Номинальное значение массы, воспроизводимое эталоном, составляет 1 кг. Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы массы со средним квадратическим отклонением результата измерений при сличении с международным прототипом килограмма, не превышающим $2 \cdot 10^{-3}$ мг.

Эталонные весы, с помощью которых производится сличение эталона массы, с пределами взвешивания от $2 \cdot 10^{-3}$ до 1 кг имеют среднее квадратическое отклонение результата наблюдения на весах от $5 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ мг.

С развитием работ по созданию новых эталонов единиц физических величин, основанных на атомных постоянных, возник вопрос и о связи единицы массы с атомными константами. Следует отметить, что масса любого стабильного атома (например, атома углерода) может быть принята в качестве естественной единицы массы. Все такие атомы (в отличие от изготовленных человеком эталонных гирь) абсолютно идентичны, а время их существования практически совпадает со временем существования Вселенной. Массы макроскопических объектов порядка килограмма могут быть измерены в атомных единицах массы (а. е. м.), если принять во внимание соотношение $1 \text{ кг} = (10^3 \text{ моль}) \cdot N_A \cdot 1 \text{ а. е. м.}$, где N_A – постоянная Авогадро. Для измерения масс порядка килограмма в а. е. м. с погрешностью не более 10^{-8} необходимо с такой же точностью измерять постоянную Авогадро. Однако достигнутая погрешность составляет не менее 10^{-6} и пока не может быть уменьшена доступными способами.

В области термодинамических величин действуют:

- два первичных и один специальный эталоны, воспроизводящие единицу температуры – Кельвин в различных диапазонах: сверхнизкие гелиевые температуры, температуры по инфракрасному и ультрафиолетовому излучениям и переменные температуры водной среды;

- 11 государственных эталонов теплофизики – количества теплоты, удельной теплоемкости, теплопроводности и др.

Измерение температуры с момента изобретения Галилеем в 1598 г. термометра основывались на применении того или иного термометрического вещества, изменяющего свой объем или давление при изменении температуры. Показания термометров такого типа зависели от рода применяемого термометрического вещества и от особенностей и условий его теплового расширения. В середине прошлого века Томсон (Кельвин) показал, что можно установить термодинамическую шкалу, не зависящую от рода термометрического вещества. Данная шкала Кельвина построена на цикле Карно и двух реперных точках. При установлении этой шкалы для сохранения преемственности числового выражения ее со стоградусной шкалой Цельсия (1742 г.) промежуток между точками таяния льда и кипения воды был принят равным 100 °С.

Кельвин и независимо от него Менделеев высказали предложение о целесообразности построения термодинамической шкалы по одной реперной точке. Такая шкала имеет значительные преимущества и позволяет определять температуру точнее. В такой шкале необходимо придать определенное числовое значение единственной экспериментально определяемой точке. Нижней границей температурного интервала будет служить точка абсолютного нуля.

Погрешность воспроизведения точки кипения воды составляет 0,002–0,01 °С, точки таяния льда – 0,0002–0,001 °С. Тройная точка воды, являющаяся точкой равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах, может быть воспроизведена в специальных сосудах с погрешностью не более 0,0002 °С. В 1954 г. было принято решение о переходе к определению термодинамической температуры T по одной реперной точке – тройной точке воды, равной 273,16 К. Таким образом, единицей термодинамической температуры служит кельвин, определяемый как $1/273,16$ часть тройной точки воды. Температура в градусах Цельсия t определяется как $t = T - 273,15$ К. Единицей в этом случае является градус Цельсия, который равен кельвину.

Измерения температуры по термодинамической шкале при ее прямой реализации с помощью газовой термометрии связаны с серьезными трудностями. Поэтому после проведения подготовительных работ в 1968 г. была введена международная практическая температурная шкала (МПТШ-68). Расхождение между температурой, измеренной по этой шкале, и термодинамической температурой находится в пределах существующей в настоящее время точности измерений. Единицами МПТШ-68 являются кельвин и градус Цельсия. Шкала построена на основании ряда воспроизводимых равновесных состояний, которым приписаны определенные значения температур (основные реперные точки), и на эталонных приборах, проградуированных при этих температурах. Эти равновесные состояния и приписанные им значения международной практической температуры являются исходными для воспроизведения кельвина в различных температурных диапазонах. В интервалах

между температурами реперных точек интерполяция осуществляется по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями МПТШ-68. Основные реперные точки реализуются как определенные состояния фазовых равновесий некоторых чистых веществ: водорода, неона, кислорода, воды, цинка, серебра и золота. Эталонным прибором, используемым в области температур от 13,81 до 630,74 °С, является платиновый термометр сопротивления. Для температур 630,74–1064,43 °С эталонным прибором является термopара с электродами из платинородия – платины.

В сентябре 1989 г. на 17-й сессии Консультативного комитета по термометрии была принята международная практическая температурная шкала МТШ-90, которая с 1990 г., заменила МПТШ-68 и предварительную температурную шкалу ПТШ-76. Она определяет кельвин так же, как и МПТШ-68, и сохраняет принцип построения шкалы на основе реперных точек с приписанными им новыми значениями температур, максимально приближенных к термодинамическим. Государственные эталоны единицы температуры соответствуют принципам, заложенным в МПТШ-68 и МТШ-90.

В области измерений электрических и магнитных величин (включая радиотехнические) созданы и функционируют 32 эталона. Они перекрывают не только большой диапазон значений измеряемых величин, но и широкий спектр условий их измерений, прежде всего частоты, достигающей до десятков гигагерц. Основу составляют эталоны, которые наиболее точно воспроизводят единицы и определяют размеры остальных производных единиц. Это государственные первичные эталоны единиц ЭДС, сопротивления и электрической емкости. Первые два из них разработаны недавно и основаны на квантовых эффектах Джозефсона и Холла соответственно.

До последнего времени единицу силы электрического тока – ампер на практике приходилось определять по тем действиям, которые ток оказывал в окружающей среде, например, выделение теплоты при прохождении тока через проводник, осаждение вещества на электродах при прохождении тока через электролит, механические действия тока на магнит или проводник с током. Последнее и было положено в основу эталона ампера (1948 г.), реализованного на токовых весах. Последние представляют собой рычажные равноплечие весы, в которых подвешенная слева подвижная катушка уравнивается грузом, положенным на правую чашку весов. Подвижная катушка входит во вторую неподвижную коаксиально расположенную катушку. При прохождении по этим, последовательно соединенным катушкам постоянного электрического тока, подвижная катушка опускается, поэтому на правую чашку весов следует положить добавочный груз. По его массе и судят о силе электрического тока, проходящего по катушкам. Погрешность воспроиз-

изведения размера единицы электрического тока таким эталоном ампера не превышала $10^{-3}\%$.

В связи с введением в метрологическую практику эталона вольт на основе эффекта Джозефсона и эталона Ома на основе эффекта Холла назначение ампер-весов как средства, необходимого для представления единицы напряжения, утратило смысл, поскольку применение эффекта Джозефсона для аппаратурной реализации, а константы Джозефсона – для воспроизведения единицы напряжения позволили повысить точность воспроизведения единицы тока примерно на два порядка. Новый эталон ампера состоит из двух комплексов. В первом из них заложен принцип установления размера ампера через вольт и ом с использованием квантовых эффектов Джозефсона и Холла, а в другом – через фараду, вольт и секунду с использованием методов электрометрии.

Государственный первичный эталон ампера состоит из аппаратуры, выполненной на основе:

- квантовых эффектов Джозефсона и квантования магнитного потока (эффект Холла), включая меру напряжения, меру электрического сопротивления, сверхпроводящий компаратор тока и регулируемые источники тока;

- использования методов электрометрии, включая входной блок с набором мер постоянной емкости, интегратор, измерительный блок с частотомером, цифровым вольтметром и компаратором.

Основу единства измерений оптико-физических единиц создает государственный первичный эталон единицы силы света – канделлы.

Первоначально эталоны единицы силы света представляли собой свечи, изготавливаемые из определенных материалов. Затем на смену им пришли лампы с жидким горючим, которые обладали лучшими метрологическими характеристиками. В 1921 г. был создан международный эталон силы света – группа постоянно возобновляемых электрических ламп накаливания с угольной нитью. Дальнейшее развитие науки и техники позволило создать (1937 г.) эталон силы света в виде полных излучателей (моделей черного тела) с приписанной яркостью 60 кд/м^2 при температуре затвердевания расплавленной платины.

При таком определении канделлы оставалась неоднозначной связь между световыми и энергетическими величинами. Поэтому в 1979 г. на XVI Генеральной конференции мер и весов было принято новое определение, по которому она воспроизводится путем косвенных измерений.

Единство измерений световых величин обеспечивает ГОСТ 8.023 ГСИ «Государственная поверочная схема для средств измерений световых величин непрерывного и импульсного излучений».

Эталонная база в области измерений параметров ионизирующих излучений насчитывает 14 ГЭ и обеспечивает воспроизведение таких величин, как активность радионуклидов и масса радия, экспозиционная, поглощенная и эквивалентная дозы, поток энергии излучения и др. По-

грешность воспроизведения единиц в этой области составляет доли – единицы процента.

Эталонная база физико-химических измерений состоит из трех государственных эталонов, воспроизводящих единицы молярной доли компонентов в газовых средах, объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов, относительной влажности газов. Система эталонов в этой области наименее развита. Точность измерений также не очень велика и составляет доли процентов.

3.2.6 Понятие поверочной схемы и стандартного образца

Обеспечение правильной передачи размера единиц ФВ во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем. *Поверочная схема* – это нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим СИ с указанием методов и погрешности, и утвержден в установленном порядке.

Поверка – это операция, заключающаяся в установлении пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и контроля их соответствия предъявляемым требованиям. Основной метрологической характеристикой, определяемой при поверке СИ, является его погрешность. Она находится на основании сравнения поверяемого СИ с более точным СИ – рабочим эталоном.

Меры могут быть поверены путем:

- сличения с более точной мерой посредством компарирующего прибора. Сличение мер с помощью компаратора осуществляется методами противопоставления или замещения. Общим для этих методов поверки СИ является выработка сигнала о наличии разности размеров сравниваемых величин. Если подбором образцовой меры этот сигнал будет сведен к нулю, то реализуется нулевой метод измерения;

- измерения воспроизводимой мерой величины измерительными приборами соответствующего класса точности. В этом случае поверка часто называется градуировкой. *Градуировка* – нанесение отметок на шкалу, соответствующих показаниям образцового СИ или же определение по его показаниям уточненных значений величины, соответствующих нанесенным отметкам на шкале рабочего СИ;

- калибровки, когда с более точной мерой сличается лишь одна мера набора или одна из отметок шкалы многозначной меры, а действительные размеры других мер определяются их взаимным сравнением в различных сочетаниях на приборах сравнения и при дальнейшей обработке результатов измерений.

Для ряда областей измерений и в первую очередь для физико-химических измерений чрезвычайно перспективным средством повышения эффективности поверочных работ является применение *стандартных образцов* (СО). *Стандартный образец* – образец вещества (материала) с установленными в результате метрологической аттестации значениями одной или более величин, характеризующими свойство или состав этого вещества (материала).

Стандартные образцы предназначены для обеспечения единства и требуемой точности измерений посредством:

- градуировки, метрологической аттестации и поверки СИ;
- метрологической аттестации методик выполнения измерений;
- контроля показателей точности измерений;
- измерения ФВ, характеризующих состав или свойства веществ и материалов, методами сравнения.

По своему назначению СО исполняют роль мер, однако в отличие от «классических» мер они имеют ряд особенностей. Например, образцы состава воспроизводят значения ФВ, характеризующих состав или свойства именно того материала (вещества), из которого они изготовлены. Стандартные образцы, как правило, не являются изделиями, они реализованы обычно в виде части или порции однородного вещества (материала), причем эта часть является полноценным носителем воспроизводимой единицы ФВ, а не ее части. Эта особенность образцов отражена в требованиях к их однородности по составу и свойствам. Однородность материала, из которого сделан образец, имеет принципиальное значение, в то время как для меры такая характеристика часто является второстепенной.

Стандартные образцы состава и свойств в отличие от мер характеризуются значительным влиянием неинформативных параметров (примесей, структуры материала и др.). При использовании СО очень часто необходимо учитывать функции влияния таких параметров.

В связи с многообразием задач, решаемых с СО, их можно разделить на группы по ряду классификационных признаков. В зависимости от вида аттестуемой характеристики различают:

- *стандартные образцы состава* воспроизводят значения величин, характеризующих содержание определенных компонентов (химические элементы, их изотопы и др.);
- *стандартные образцы свойств* воспроизводят значения величин, характеризующих физические, химические, технические или другие свойства вещества, за исключением величин, характеризующих состав.

В зависимости от сферы действия и области применения определяется уровень утверждения стандартных образцов. По этому признаку они делятся на *государственные, отраслевые и стандартные образцы предприятий* [23–24].

3.3 Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятиям «свойство» и «величина».
2. Как классифицируются величины?
3. Дайте определение понятию «физическая величина».
4. Чем отличаются измеряемые и оцениваемые физические величины?
5. Изобразите схему классификации физических величин.
6. На какие группы по видам явлений делятся физические величины?
7. На какие группы по принадлежности к различным физическим процессам делятся физические величины?
8. На какие группы по степени условной независимости от других величин делятся физические величины?
9. На какие группы по наличию размерности делятся физические величины?
10. Какие Вам известны общие проявления свойств физических объектов?
11. Изложите постулаты отношения эквивалентности.
12. Изложите постулаты отношения порядка.
13. Изложите постулаты отношения аддитивности.
14. Какие Вам известны виды свойств и величин в зависимости от проявления наиболее общих отношений эквивалентности, порядка и аддитивности?
15. Какую последовательность теоретических и эмпирических методов необходимо априорно реализовать для проведения счета?
16. Опишите понятие «интенсивная величина».
17. В чем суть процедуры простейшего однопараметрового контроля свойства?
18. Опишите понятие «экстенсивная величина».
19. Запишите основное уравнение измерения.
20. В чем суть простейшего измерения?
21. Каково условие реализации простейшего измерения?
22. Проиллюстрируйте гомоморфизм операции измерения.
23. Дайте определение понятию «шкала физической величины».
24. Перечислите основные типы шкал измерений.
25. Дайте определение понятию «шкала наименований (шкала классификации)».
26. Дайте определение понятию «шкала порядка (шкала рангов)».
27. Дайте определение понятию «шкала интервалов (шкала разностей)».
28. Дайте определение понятию «шкала отношений».
29. Дайте определение понятию «абсолютная шкала».

30. Чем отличаются понятия «значение», «размер» и «единица» физической величины?
31. Запишите уравнение размерности физической величины.
32. Для чего используется понятие размерности?
33. Запишите уравнения связи между величинами.
34. Запишите уравнения связи между числовыми значениями физических величин.
35. Какими символами обозначается система величин механики?
36. Какими символами обозначается система величин СИ?
37. Какие единицы физических величин приняты в качестве основных в Республике Беларусь
38. Перечислите основные и дополнительные единицы физических величин системы СИ.
39. Приведите примеры когерентных и некогерентных производных физических величин.
40. Дайте определение понятиям «системная» и «внесистемная» единица физической величины.
41. Какие виды внесистемных единиц физических величин вам известны?
42. Перечислите внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ.
43. Назовите множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований.
44. В чем отличие систем единиц физических величин СИ и СГС?
45. Перечислите достоинства системы единиц физических величин СИ.
46. Как образуются системы единиц в области геометрии и кинематики?
47. Каким образом в СИ может быть получена единица физической величины для описания тепловых процессов?
48. Каким образом в СИ может быть получена оптимальная система электромагнитных единиц?
49. Каким образом было принято решение о вводе в СИ единицы силы света?
50. Каким образом было принято решение о вводе в СИ единицы количества вещества?
51. Охарактеризуйте дополнительные величины системы СИ.
52. Что понимается под единством измерений?
53. В чем суть воспроизведения, хранения и передачи единицы физической величины?
54. Какими свойствами должен обладать эталон единицы физической величины?
55. Какие виды эталонов вы знаете?

56. Как классифицируются вторичные эталоны по своему метрологическому назначению?
57. Каким образом в системе СИ определяется единица времени – секунда?
58. Из каких средств измерения состоит государственный первичный эталон единицы времени?
59. Каким образом в системе СИ определяется единица длины – метр?
60. Какими способами, рекомендованными Международным комитетом мер и весов, может быть реализован метр?
61. Каким образом в системе СИ определяется эталон единица массы – килограмм?
62. Из каких средств измерения состоит государственный эталон массы?
63. Какие эталоны действуют в области термодинамических величин?
64. Опишите эталоны в области измерений электрических и магнитных величин.
65. Из какой аппаратуры состоит эталон ампера?
66. Каким образом в системе СИ определяется эталон единицы силы света?
67. Дайте определения понятиям «поверка» и «поверочная схема».
68. Каким образом может осуществляться поверка мер?
69. Дайте определение понятию «стандартный образец».
70. В чем отличие «мер» от «стандартного образца»?
71. Как классифицируются стандартные образцы в зависимости от вида аттестуемой характеристики?

4 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Философский и научный аспекты

Основное понятие метрологии – измерение. Согласно ГОСТ 16263, *измерение* – это нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств. Значимость измерений выражается в трех аспектах: философском, научном и техническом.

Философский аспект состоит в том, что измерения являются важнейшим универсальным методом познания физических явлений и процессов. В этом смысле метрология как наука об измерениях занимает особое место среди остальных наук. Возможность измерения обуславливается предварительным изучением заданного свойства объекта измерений, построением абстрактных моделей как самого свойства, так и его носителя – объекта измерения в целом. Поэтому место измерения определяется не среди первичных (теоретических или эмпирических) методов познания, а среди вторичных (квантитативных), обеспечивающих достоверность измерения. С помощью вторичных познавательных процедур решаются задачи формирования данных (фиксации результатов познания). Измерение с этой точки зрения представляет собой метод кодирования сведений, получаемых с помощью различных методов познания, т. е. заключительную стадию процесса познания, связанную с регистрацией получаемой информации.

Научный аспект измерений состоит в том, что с их помощью в науке осуществляется связь теории и практики. Без измерений невозможна проверка научных гипотез и соответственно развитие науки.

Измерения обеспечивают получение количественной информации об объекте управления или контроля, без которой невозможно воспроизведение всех заданных условий технического процесса, обеспечение высокого *качества* изделий и эффективного управления объектом. Все это составляет *технический аспект* измерений [23–24].

4.2 Измерение и его основные операции

Все измеряемые ФВ можно разделить на две группы:

– непосредственно измеряемые, которые могут быть воспроизведены с заданными размерами и сравнимы с подобными, например длина, масса, время;

– преобразуемые с заданной точностью в непосредственно измеряемые величины, например температура, плотность. Такое преобразование осуществляется с помощью операции измерительного преобразования.

Суть простейшего прямого измерения состоит в сравнении размера ФВ Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$. Условием реализации процедуры прямого измерения является выполнение следующих элементарных операций:

- измерительного преобразования измеряемой ФВ X в другую ФВ Q , однородную или неоднородную с ней;
- воспроизведения ФВ Q_M заданного размера $N[Q]$, однородной с преобразованной величиной Q ;
- сравнения однородных ФВ: преобразованной Q и воспроизводимой мерой $Q_M = N[Q]$.

Измерительное преобразование – операция, при которой устанавливается взаимно однозначное соответствие между размерами в общем случае неоднородных преобразуемой и преобразованной ФВ. Измерительное преобразование описывается уравнением вида $Q = F(X)$, где F – некоторая функция, или функционал. Однако чаще стремятся сделать преобразование линейным $Q = KX$, где K – постоянная величина.

Основное назначение измерительного преобразования – получение и, если это необходимо, преобразование информации об измеряемой величине. Его выполнение осуществляется на основе собранных физических закономерностей. В измерительное преобразование в общем случае могут входить следующие операции:

- изменение физического рода преобразуемой величины;
- масштабное линейное преобразование;
- масштабное-временное преобразование;
- нелинейное или функциональное преобразование;
- модуляция сигнала;
- дискретизация непрерывного сигнала;
- квантование.

Операция измерительного преобразования осуществляется посредством измерительного преобразователя – технического устройства, построенного на определенном физическом принципе и выполняющего одно частное измерительное преобразование. Измерительные преобразователи будут рассматриваться далее.

Воспроизведение физической величины заданного размера – это операция, которая заключается в создании требуемой ФВ, с заданным значением, известным с оговоренной точностью. С наиболее высокой точностью воспроизводятся основные ФВ: длина, масса, время, частота, напряжение и ток.

Средство измерений, предназначенное для воспроизведения ФВ заданного размера, называется мерой.

Сравнение измеряемой ФВ с величиной, воспроизводимой мерой – это операция, заключающаяся в установлении отношения этих величин: $Q > Q_m$, $Q < Q_m$ или $Q = Q_m$. Точное совпадение сравниваемых величин, как правило, не встречается в практике измерений.

Методом сравнения называется совокупность приемов использования физических явлений и процессов для определения соотношения однородных величин. Наиболее часто это соотношение устанавливается по знаку разности сравниваемых величин. Далеко не каждую ФВ можно сравнить при этом с себе подобной. Все ФВ в зависимости от возможности создания разностного сигнала делятся на три группы. К первой группе относятся ФВ, которые можно вычитать и таким образом непосредственно сравнивать без предварительного преобразования. Это – электрические, магнитные и механические величины. Ко второй группе относятся ФВ неудобные для вычитания, но удобные для коммутации, а именно: световые потоки, ионизирующие излучения, потоки жидкости и газа. Третью группу образуют ФВ, характеризующие состояние объектов или их свойств, которые физически невозможно вычитать. К таким ФВ относятся влажность, концентрация веществ, цвет, запах и др.

Параметры сигналов первой группы наиболее удобны для сравнения, второй – менее удобны, а третьей – непосредственно сравнивать невозможно. Однако последние необходимо сравнивать и измерять, поэтому их приходится преобразовывать в другие величины, поддающиеся сравнению.

4.3 Элементы процесса измерений

Измерение – сложный процесс, включающий в себя взаимодействие целого ряда его структурных элементов. К ним относятся: измерительная задача, объект измерения, принцип, метод и средство измерения и его модель, условия измерения, субъект измерения, результат и погрешность измерения. Эти элементы и их взаимосвязи показаны на рисунке 4.1 в виде структурной схемы. Из нее видно, что процесс измерения протекает по двум параллельным ветвям, содержащим соответствующие друг другу элементы, относящиеся к реальности (верхняя ветвь) и ее отражению, или познанию (нижняя ветвь). Элементы обеих ветвей, неразрывно связанных между собой, соответствуют друг другу по типу «реальность – отражение (модель)» [23–24].

Первым начальным элементом каждого измерения является его *задача (цель)*. Задача любого измерения заключается в определении значения выбранной (измеряемой) ФВ с требуемой точностью в заданных условиях. Постановку задачи измерения осуществляет субъект измерения – человек. При постановке задачи конкретизируется объект из-

мерения, в нем выделяется измеряемая ФВ и определяется (задается) требуемая погрешность измерения.

Объект измерения – это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми ФВ. Он обладает многими свойствами ($C_{в1}, \dots, C_{ви}$, см. рис. 4.1) и находится в многосторонних и сложных связях с другими объектами.

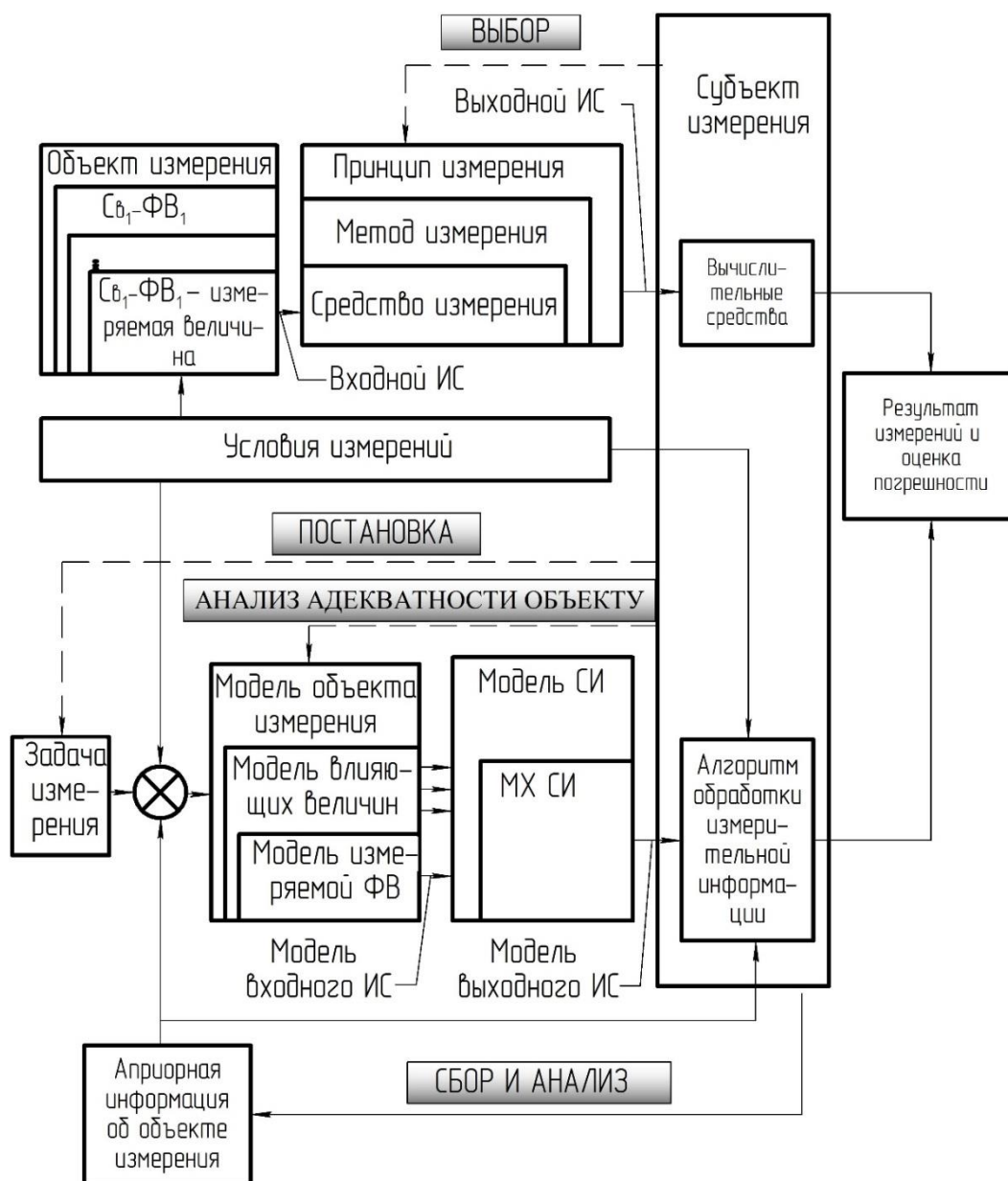


Рисунок 4.1 – Основные элементы процесса измерения:

СИ – средство измерения, *МХ* – метрологические характеристики, *ИС* – измерительный сигнал, *ФВ* – физическая величина, *Св* – свойство.

Субъект измерения – человек принципиально не в состоянии представить себе объект целиком, во всем многообразии его свойств и

связей. Вследствие этого взаимодействие субъекта с объектом возможно только на основе математической модели объекта. *Математическая модель объекта измерения* – это совокупность математических символов (образов) и отношений между ними, которая адекватно описывает интересующие субъекта свойства объекта измерения.

Модель объекта измерения строится до выполнения измерения в соответствии с решаемой задачей на основе априорной информации об объекте и условиях измерения. На рисунке 4.1 это отражено в виде суммирования сведений о цели, условиях измерения и априорной информации об объекте.

Модель объекта измерения должна удовлетворять следующим требованиям:

- погрешность, обусловленная несоответствием модели, объект измерения, не должна превышать 10 % предельно допускаемой погрешности измерения;
- составляющая погрешности измерения, обусловленная нестабильностью измеряемой ФВ в течение времени, необходимого для проведения измерения, не должна превышать 10 % предельно допускаемой погрешности.

Если выбранная модель не удовлетворяет этим требованиям, то следует перейти к другой модели объекта измерений.

Априорная информация, т. е. информация об объекте измерения, известная до проведения измерения, является важнейшим фактором, обуславливающим его эффективность. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерений. При наличии априорной информации об объекте в полном объеме, т. е. при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Указанная информация определяет достижимую точность измерений и их эффективность.

Измеряемая величина определяется как параметр принятой модели, а ее значение, которое можно было бы получить в результате абсолютно точного эксперимента, принимается в качестве истинного значения данной величины. Идеализация, принятая при построении модели объекта измерения, обуславливает несоответствие параметра модели исследуемому свойству объекта. Это несоответствие называют *пороговым*. Обычно на практике из-за трудности оценивания пороговое несоответствие стремятся сделать пренебрежимо малым.

Цель построения модели объекта измерения состоит в выявлении (представлении) конкретной ФВ, подлежащей определению. Собственно следует говорить не о модели объекта измерения в целом, а о модели его измеряемого свойства или измеряемой ФВ.

Модель объекта измерения необязательно должна быть математической. Её характер должен определяться видом и свойствами объекта

измерений, а также целью измерений. Моделью может служить любое приближенное описание объекта, которое позволяет выделить параметр модели (или функционал параметров), являющийся измеряемой величиной и отражающий то свойство объекта измерений, которое необходимо оценить для решения измерительной задачи. Модель должна достаточно хорошо отражать две группы свойств (ФВ) объекта измерений: определяемые при измерении и влияющие на результат измерения.

Основной проблемой моделирования объектов измерений является выбор таких моделей, которые можно считать адекватно описывающими измеряемые величины (свойства) данного объекта. Важно отметить, что адекватность модели обуславливается не только теми свойствами объекта, которые требуется определить в рамках данной измерительной задачи, но и теми, которые могут влиять на результаты измерения искомой величины.

Построение адекватных моделей объектов измерений до настоящего времени является сложной творческой и неформализуемой задачей. Ее решение требует высокой квалификации, опыта и, естественно, инженерной интуиции. При этом зачастую приходится решать две взаимоисключающие задачи: модель должна адекватно отражать все свойства объекта, необходимые для решения измерительной задачи, и в то же время быть по возможности простой и содержать минимум параметров.

В большинстве практических инженерных задач модели объектов измерений достаточно очевидны и, как правило, несложны. Объект измерения характеризуется набором свойств и описывающих их ФВ. На рисунке 4.1 одна из них (i -я) является измеряемой величиной. *Измеряемая величина* – это ФВ, подлежащая определению в соответствии с измерительной задачей. До недавнего времени понятие «физическая величина» считалось достаточным для постановки и решения всех измерительных задач. Однако из-за существенного расширения области применения измерений, усложнения их задач и усиления требований к точности и достоверности в ряде случаев оно перестало удовлетворять потребности в экспериментальном определении различных свойств разнообразных объектов.

При планировании современных измерений требуется введение более конкретных понятий, определяемых целями измерений, чем весьма общего понятия «физическая величина». В настоящее время под измеряемой величиной понимается параметр или функционал параметра модели объекта измерений, отражающий то его свойство, количественную оценку которого необходимо получить в результате измерений. Измеряемая величина всегда имеет размерность определенной ФВ, но представляет собой некоторую ее конкретизацию, обусловленную свойствами объекта измерений, которые связаны с поставленной целью измерений.

Так, например, объект измерения – поршень грузопоршневого манометра. Цель измерения – определение эффективной площади поршня.

Априорная информация состоит в том, что поперечное сечение поршня незначительно отличается от круга. В соответствии с этой информацией в качестве модели поршня принимается прямой цилиндр, поперечное сечение которого близко к кругу. Эффективную площадь поршня в некоторых случаях определяют по среднему диаметру его поперечного сечения. В соответствии с целью измерения в качестве параметра модели – измеряемой величины – принимается средний диаметр поперечного сечения поршня. Значение измеряемой величины в этом случае можно выразит функционалом вида

$$d = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 d(a_i),$$

где $d(a_i)$ – диаметр, имеющий угловую координату $a_i = 30(i-1)$, т. е. функцию аргумента a_i , выраженную в градусах.

Измерительная информация, т. е. информация о значениях измеряемой ФВ, содержится в измерительном сигнале. *Измерительный сигнал* – это сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой ФВ. Он поступает на вход СИ, при помощи которого преобразуется в выходной сигнал, имеющий форму, удобную либо для непосредственного восприятия человеком (субъектом измерения), либо для последующей обработки и передачи. Субъект измерения осуществляет выбор принципа, метода и средства измерений.

Принцип измерения – совокупность физических принципов, на которых основаны измерения, например, применение эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения или эффекта Доплера для измерения скорости.

Метод измерения – это прием или совокупность приемов сравнения измеряемой ФВ с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерения. Метод измерения должен по возможности иметь минимальную погрешность и способствовать исключению систематических погрешностей или переводу их в разряд случайных.

Методы измерения можно классифицировать по различным признакам. Классификация по основным измерительным операциям тесно связана с элементарными СИ, реализующими эти операции. Данная классификация ориентирована на структурное описание средств измерений и поэтому важна для измерительной техники, а также метрологии информационно-измерительных систем.

Для метрологического анализа более важными являются традиционные классификации, основанные на следующих признаках. Первый из них – физический принцип, положенный в основу измерения. По нему

все методы измерений делятся на электрические, магнитные, акустические, оптические, механические и т. д. В качестве второго признака классификации используется режим взаимодействия средства и объекта измерений. В этом случае все методы измерений подразделяются на статические и динамические. Третьим признаком может служить применяемый в СИ вид измерительных сигналов. В соответствии с ним методы делятся на аналоговые и цифровые.

Наиболее разработанной является классификация по совокупности приемов использования принципов и средств измерений. По этой классификации различают *метод непосредственной оценки* и *методы сравнения* (рис. 4.2). Эти устоявшиеся в литературе названия не совсем удачны, поскольку наводят на мысль о возможности измерения без сравнения. Представляется более правильным говорить об опосредованном и непосредственном сравнении с мерой. При этом непосредственным и опосредованным сравнение может быть как во времени, так и в отношении физической природы измеряемых величин.

Сущность метода непосредственной оценки состоит в том, что о значении измеряемой величины судят по показанию одного (прямые измерения) или нескольких (косвенные измерения) средств измерений, которые заранее проградуированы в единицах измеряемой величины или единицах других величин, от которых она зависит. Это наиболее распространенный метод измерения. Его реализуют большинство средств измерений.

Простейшими примерами метода непосредственной оценки могут служить измерения напряжения электромеханическим вольтметром магнитоэлектрической системы.



Рисунок 4.2 – Классификация методов измерения

Другую группу образуют методы сравнения: дифференциальный, нулевой, совпадений, замещения. К ним относятся все те методы, при

которых измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Следовательно, отличительной особенностью этих методов сравнения является непосредственное участие мер в процессе измерения.

При *дифференциальном методе* измеряемая величина X сравнивается непосредственно или косвенно с величиной X_m , воспроизводимой мерой. О значении величины X судят по измеряемой прибором разности $\Delta X = X - X_m$ и по известной величине X_m воспроизводимой мерой. Следовательно, $X = X_m + \Delta X$. При дифференциальном методе производится неполное уравнивание измеряемой величины. Он сочетает в себе часть признаков метода непосредственной оценки и может дать весьма точный результат измерения, если только измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, мало отличаются друг от друга. Например, если разность этих двух величин составляет 1 % и измеряется с погрешностью до 1 %, то тем самым погрешность измерения искомой величины уменьшается до 0,01 % (если не учитывать погрешность меры).

Примером дифференциального метода может служить измерение вольтметром разности двух напряжений, из которых одно известно с большой точностью, а другое представляет собой искомую величину.

Нулевой метод является разновидностью дифференциального метода. Его отличие состоит в том, что результирующий эффект сравнения двух величин доводится до нуля. Это контролируется специальным измерительным прибором высокой точности – нуль-индикатором. В данном случае значение измеряемой величины равно значению, которое воспроизводит мера. Высокая чувствительность нуль-индикаторов, а также выполнение меры с высокой точностью позволяют получить малую погрешность измерения.

Пример нулевого метода – взвешивание на весах, когда на одном плече находится взвешиваемый груз, а на другом – набор эталонных грузов. Другой пример – измерение сопротивления с помощью уравновешенного моста.

Метод замещения заключается в поочередном измерении прибором искомой величины и выходного сигнала меры, однородного с измеряемой величиной. По результатам этих измерений вычисляется искомая величина. Поскольку оба измерения производятся одним и тем же прибором в одинаковых внешних условиях, а искомая величина определяется по отношению показаний прибора, погрешность результата измерения уменьшается в значительной мере. Так как погрешность прибора неодинакова в различных точках шкалы, наибольшая точность измерения получается при одинаковых показаниях прибора.

Пример метода замещения – измерение большого электрического активного сопротивления путем поочередного измерения силы тока, протекающего через контролируемый и образцовый резисторы. Питание цепи при измерениях должно осуществляться от одного и того же

источника постоянного тока. Выходное сопротивление источника тока и измерительного прибора – амперметра должно быть очень мало по сравнению с измеряемыми сопротивлениями.

При *методе совпадения* разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, определяют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Этот метод широко используется в практике неэлектрических измерений. Примером может служить измерение длины при помощи штангенциркуля с нониусом.

Метод измерений реализуется в *средстве измерений* – техническом средстве, используемом при измерениях и имеющем нормированные метрологические свойства (ГОСТ 16263). Такое определение представляется не совсем удачным. Под СИ следует понимать техническое средство, предназначенное для измерений и позволяющее решать измерительную задачу путем сравнения измеряемой величины с единицей или шкалой ФВ.

Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, которые обладают одним из двух признаков:

- вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о размере (значении) измеряемой величины;
- воспроизводят величину заданного (известного) размера.

Объединение технических средств по этим двум признакам сделано только из соображений целесообразности общего метрологического анализа, удобства изложения и регламентации метрологических требований и правил, единых для всех видов СИ.

При использовании СИ весьма важно знать степень соответствия выходной измерительной информации истинному значению определяемой величины. Для ее установления введено правило, по которому требуется нормировать метрологические характеристики всех средств измерений. *Метрологические характеристики* – это характеристики свойств СИ, которые оказывают влияние на результат измерений и его погрешности и предназначены для оценки технического уровня и качества СИ, а также определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений.

Средство измерений входит в обе ветви структуры измерения (см. рис. 4.1). В реальности оно взаимодействует с объектом измерений, в результате чего появляется входной (для СИ) сигнал и отклик на него – выходной сигнал, подлежащий обработке с целью нахождения результата измерения и оценки его погрешности. В области отражений СИ описывается моделью, необходимой для эффективной обработки опытных данных. Эта модель представлена совокупностью его метрологических характеристик.

Средства измерений могут быть элементарными (меры, устройства сравнения и измерительные преобразователи) и комплексными (регистрирующие и показывающие измерительные приборы, системы, измерительно-вычислительные комплексы). Детально СИ рассматриваются далее .

В процессе измерения важную роль играют *условия измерения* – совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерений. *Влияющая величина* – это физическая величина, не измеряемая данным СИ, но оказывающая влияние на его результаты.

Изменение условий измерения приводит к изменению состояния объекта измерения. Это в свою очередь определяет влияние условий измерения на выделенную ФВ и через нее – на измеряемую величину и отклонение значения действительной величины с той, что была определена при формировании измерительной задачи. Влияние условий измерения на СИ проявляется в изменении его метрологических характеристик. При этом та часть погрешности измерения, которая возникает из-за изменения условий, называется *дополнительной погрешностью*.

В соответствии с установленными для конкретных ситуаций диапазонами значений влияющих величин различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений. *Нормальные условия измерений* – это условия, при которых влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значения. *Нормальная область значений влияющей величины* – это область значений, в пределах которой изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности. Нормальные условия измерений задаются в нормативно-технической документации на СИ. При нормальных условиях определяется *основная погрешность* данного СИ. В приложении Б приведены номинальные значения ряда влияющих ФВ при нормальных условиях.

Рабочими называются условия намерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей. *Рабочая область значений влияющей величины* – это область, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность или изменение показаний СИ. *Предельные условия измерений* – это условия, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые СИ может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

Конечной целью любого измерения является его *результат* – значение ФВ, полученное путем ее измерения. Результат измерения представляется именованным или именованным числом. Совместно с результатом измерений при необходимости приводят данные об условиях измерений.

При использовании термина «результат измерения» следует четко указать, к чему он относится: показанию СИ, исправленному или не исправленному результату, и проводилось ли усреднение результатов нескольких измерений. Следует отметить, что *исправленным результатом измерений*, называется полученное с помощью СИ значение величины и уточненное путем введения в него необходимых поправок на действие предполагаемых систематических погрешностей.

Качество измерений характеризуется *точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью*, а также *размером допускаемых погрешностей*. *Точность измерения* – характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности его результата. Точность измерения является величиной качественной. Высокая точность измерения соответствует малым погрешностям и наоборот. Иногда точность количественно оценивают обратной величиной модуля относительной погрешности. Например, если погрешность составляет 0,001, то точность равна 1000. Однако количественная оценка точности широкого распространения не получила.

Достоверность измерений определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах. Данная вероятность называется *доверительной*.

Правильность измерений – это характеристика измерений, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений.

Сходимость результата измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений и в одних и тех же условиях. Сходимость измерений отражает влияние случайных погрешностей на результат измерения.

Воспроизводимость результатов измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенных к одним и тем же условиям.

Количественная близость измеренного и истинного значений измеряемой величины описывается погрешностью результата измерений. *Погрешность* – это отклонение ΔX результата измерения $X_{изм}$ от истинного значения $X_{ис}$ измеряемой величины, определяемое по формуле $\Delta X = X_{изм} - X_{ис}$.

В общем виде погрешность измерения может быть описана исходя из основного уравнения измерения ($Q = q[Q]$). Неидеальность измерительной процедуры, следствием которой является погрешность ре-

зультата измерения ΔQ выражается введением в уравнение погрешностей всех его элементов:

$$Q = Q + \Delta Q = (q + \Delta q)([Q] + \Delta[Q]) = q[Q] + \{\Delta q[Q] + q\Delta[Q] + \Delta q \Delta[Q]\},$$

где Q – результат измерения; $[Q]$ – единица измерения величины; Δq – погрешность нахождения числового значения измеряемой величины; $\Delta[Q]$ – погрешность реализации в данном измерении единицы измеряемой величины.

Истинное значение и результат измерения принадлежат и к ветви реальностей (см. рис. 4.1), и к ветви отражений (моделей). Вследствие принципиальной неадекватности любой модели отражаемой реальности невозможно, оперируя с реальными объектами и СИ в реальных условиях, обеспечить тождественность полученного результата и истинного значения измеряемой величины. Следовательно, принципиально нельзя точно определить погрешность измерения, поскольку в противном случае введением в результат поправки можно найти истинное значение.

Учение о погрешностях измерений и средств измерений является одной из центральных тем в теоретической метрологии. Оно подробно рассмотрено далее.

Результат измерения и оценка его погрешности находятся субъектом измерения с помощью вычислительных средств (ветвь реальности), работающих по определенному алгоритму обработки измерительной информации (модельная ветвь).

Субъект измерения – человек – объединяет в себе обе ветви процесса измерения (реальности и отражения), активно воздействует на него и осуществляет:

- постановку измерительной задачи;
- сбор и анализ априорной информации об объекте измерения;
- анализ адекватности объекту измерения выбранной модели;
- обработку результатов измерений [23–24].

4.4 Основные этапы измерений

Измерение – последовательность сложных и разнородных действий, состоящая из ряда этапов. Первым этапом любого измерения является *постановка измерительной задачи*. Он включает в себя:

- сбор данных об условиях измерения и исследуемой ФВ, т. е. накопление априорной информации об объекте измерения и ее анализ;
- формирование модели объекта и определение измеряемой величины, что является наиболее важным, особенно при решении сложных измерительных задач. Измеряемая величина определяется с помощью

принятой модели как ее параметр или характеристика. В простых случаях, т. е. при измерениях невысокой точности, модель объекта в явном виде не выделяется, а пороговое несоответствие пренебрежимо мало;

- постановку измерительной задачи на основе принятой модели объекта измерения;
- выбор конкретных величин, посредством которых будет найдено значение измеряемой величины;
- формулирование уравнения измерения.

Вторым этапом процесса измерения является *планирование измерения*. В общем случае оно выполняется в следующей последовательности:

- выбор методов измерений непосредственно измеряемых величин и возможных типов СИ;
- априорная оценка погрешности измерения;
- определение требований к метрологическим характеристикам СИ и условиям измерений;
- выбор СИ в соответствии с указанными требованиями;
- выбор параметров измерительной процедуры (числа наблюдений для каждой измеряемой величины, моментов времени и точек выполнения наблюдений);
- подготовка СИ к выполнению экспериментальных операций;
- обеспечение требуемых условий измерений или создание возможности их контроля.

Эти первые два этапа, являющиеся подготовкой к измерениям, имеют принципиальную важность, поскольку определяют конкретное содержание следующих этапов измерения. Подготовка проводится на основе априорной информации. Качество подготовки зависит от того, в какой мере она была использована. Эффективная подготовка является необходимым, но недостаточным условием достижения цели измерения. Ошибки, допущенные при подготовке измерений, с трудом обнаруживаются и корректируются на последующих этапах.

Третий, главный этап измерения – *измерительный эксперимент*. В узком смысле он является отдельным измерением. В общем случае последовательность действий во время этого этапа следующая:

- взаимодействие средств и объекта измерений;
- преобразование сигнала измерительной информации;
- воспроизведение сигнала заданного размера;
- сравнение сигналов и регистрация результата.

Последний этап измерения – *обработка экспериментальных данных*. В общем случае она осуществляется в последовательности, которая отражает логику решения измерительной задачи:

- предварительный анализ информации, полученной на предыдущих этапах измерения;

- вычисление и внесение возможных поправок на систематические погрешности;
- формулирование и анализ математической задачи обработки данных;
- построение или уточнение возможных алгоритмов обработки данных, т. е. алгоритмов вычисления результата измерения и показателей его погрешности;
- анализ возможных алгоритмов обработки и выбор одного из них на основании известных свойств алгоритмов, априорных данных и предварительного анализа экспериментальных данных;
- проведение вычислений согласно принятому алгоритму, в итоге которых получают значения измеряемой величины и погрешностей измерений;
- анализ и интерпретация полученных результатов;
- запись результата измерений и показателей погрешности в соответствии с установленной формой представления.

Некоторые пункты данной последовательности могут отсутствовать при реализации конкретной процедуры обработки результатов.

Задача обработки данных подчинена цели измерения после выбора СИ однозначно вытекает из измерительной задачи и, следовательно, является вторичной. Подробно обработка результатов измерений различных типов рассматриваются далее.

Перечисленные выше этапы существенно различаются по выполняемым операциям и их трудоемкости. В конкретных случаях соотношение и значимость каждого из этапов заметно варьирует. Для многих технических измерений вся процедура измерения сводится к экспериментальному этапу, поскольку анализ и планирование, включая априорное оценивание погрешности, выбор нужных методов и средств измерений осуществляются предварительно, а обработка данных измерений, как правило, минимизируется.

Выделение этапов измерения имеет непосредственное практическое значение – способствует своевременному осознанному выполнению всех действий и оптимальной реализации измерений. Это в свою очередь позволяет избежать серьезных методических ошибок, связанных с переносом проблем одного этапа на другой [16–26].

4.5 Постулаты теории измерений

Как и любая другая наука, метрология строится на основе ряда основополагающих постулатов, описывающих ее исходные аксиомы. Следует отметить, что любая попытка сформулировать исходные положения (постулаты) теории измерений встречает принципиальные за-

труднения. Это связано с тем, что, с одной стороны, постулаты должны представлять собой объективные утверждения, а с другой – предметом метрологии являются измерения, т.е. вид деятельности людей, предпринимаемой ими для достижения субъективных целей. Следовательно, необходимо сформулировать объективные утверждения, которые бы служили фундаментом научной дисциплины, имеющей существенный субъективный элемент.

Первым постулатом метрологии является постулат α : *в рамках принятой модели объекта исследования существует определенная измеряемая физическая величина и ее истинное значение*. Если, например, считать, что деталь представляет собой цилиндр (модель – цилиндр), то она имеет диаметр, который может быть измерен. Если же деталь нельзя считать цилиндрической, например ее сечение представляет собой эллипс, то измерять ее диаметр бессмысленно, поскольку измеренное значение не несет полезной информации о детали. И, следовательно, в рамках новой модели диаметр не существует. Измеряемая величина существует лишь в рамках принятой модели, т. е. имеет смысл только до тех пор, пока модель признается адекватной объекту. Так как при различных целях исследований данному объекту могут быть сопоставлены различные модели, то из постулата α вытекает следствие α_1 : *для данной физической величины объекта измерения существует множество измеряемых величин (и соответственно их истинных значений)*.

Итак, из первого постулата метрологии следует, что измеряемому свойству объекта измерений должен соответствовать некоторый параметр его модели. Данная модель в течение времени, необходимого для измерения, должна позволять считать этот ее параметр неизменным. В противном случае измерения не могут быть проведены. Указанный факт описывается постулатом β : *истинное значение измеряемой величины постоянно*.

Выделив постоянный параметр модели, можно перейти к измерению соответствующей величины. Для переменной ФВ необходимо выделить или выбрать некоторый постоянный параметр и измерить его. В общем случае такой постоянный параметр вводится с помощью некоторого функционала. Примером таких постоянных параметров переменных во времени сигналов, вводимых посредством функционалов, являются средневывпрямленные или среднеквадратические значения. Данный аспект отражается в следствии β_1 : *для измерения переменной физической величины необходимо определить ее постоянный параметр – измеряемую величину*.

При построении математической модели объекта измерения неизбежно приходится идеализировать те или иные его свойства. Модель никогда не может полностью описывать все свойства объекта измерений. Она отражает с определенной степенью приближения некоторые из них, имеющие существенное значение для решения данной измеритель-

ной задачи. Модель строится до измерения на основе априорной информации об объекте и с учетом цели измерения. Измеряемая величина определяется как параметр принятой модели, а его значение, которое можно было бы получить в результате абсолютно точного измерения, принимается в качестве истинного значения данной измеряемой величины. Эта неизбежная идеализация, принятая при построении модели объекта измерения, обуславливает неизбежное несоответствие между параметром модели и реальным свойством объекта, которое называется *пороговым*. Принципиальный характер понятия «пороговое несоответствие» устанавливается постулатом γ : *существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта (пороговое несоответствие измеряемой величины)*. Пороговое несоответствие принципиально ограничивает достижимую точность измерений при принятом определении измеряемой ФВ.

Изменения и уточнения цели измерения, в том числе и такие, которые требуют повышения точности измерений, приводят к необходимости изменять или уточнять модель объекта измерений и переопределять понятие измеряемой величины. Основной причиной переопределения является то, что пороговое несоответствие ранее принятого определения не позволяет повысить точность измерения до уровня требуемой. Вновь введенный измеряемый параметр модели также может быть измерен лишь с погрешностью, которая в лучшем случае равна погрешности, обусловленной пороговым несоответствием. Поскольку принципиально невозможно построить абсолютно адекватную модель объекта измерения, то нельзя устранить пороговое несоответствие между измеряемой ФВ и описывающим ее параметром модели объекта измерений. Отсюда вытекает важное следствие γ_1 : *истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно*.

Модель можно построить только при наличии априорной информации об объекте измерения. При этом чем больше информации, тем более адекватной будет модель и соответственно точнее и правильнее будет выбран ее параметр, описывающий измеряемую ФВ. Следовательно, увеличение априорной информации уменьшает пороговое несоответствие. Данная ситуация отражается в следствии γ_2 : *достижимая точность измерения определяется априорной информацией об объекте измерения*.

Из этого следствия вытекает, что при отсутствии априорной информации измерение принципиально невозможно. В то же время максимально возможная априорная информация заключается в известной оценке измеряемой величины, точность которой равна требуемой. В этом случае необходимости в измерении нет.

В заключение подчеркнем, что приведенные постулаты и их следствия являются лишь одной из попыток построить теоретический фун-

дамент метрологии и их не следует считать истиной в конечной инстанции.

4.6 Классификация измерений

Обоснованная классификация любых объектов представляет собой их условное группирование по заданным признакам, осуществляемое с определенной целью. При различных целях одни и те же объекты могут быть классифицированы по-разному. Классификация не является самоцелью, она диктуется потребностями теории и практики. Целесообразность классификации измерений, т. е. подразделение этого понятия на группы, обуславливается удобством при разработке методик выполнения измерений и обработки результатов. Измерения могут быть классифицированы по ряду признаков.

Наибольшее распространение получила *классификация по общим приемам получения результатов измерений*. Согласно этому признаку, измерения делятся на прямые, косвенные, совместные и совокупные. Целью такого деления является удобство выделения методических погрешностей измерений, возникающих при определении результатов измерений.

Прямыми называются измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно по показаниям СИ. Например, масса, измеряемая при помощи весов, температура – термометром, напряжение – вольтметром.

Косвенные измерения – это измерения, при которых значение измеряемой величины находят на основании известной зависимости между ней и величинами, подвергаемыми прямым измерениям, которые проводились в одинаковых условиях. Такие измерения имеют весьма важное значение для метрологической практики. На их основе, например, устанавливают значения, приписываемые эталонам единиц производных ФВ, исходя из значений единиц основных величин, воспроизводимых первичными эталонами. Широко применяются и менее точные косвенные измерения.

В общем случае зависимость, связывающую измеряемую величину Y и величины $X_1, X_2, \dots, X_n$, подвергаемые прямым измерениям, можно представить в виде

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (4.1)$$

Например, измерение плотности $\rho = m/V$ по результатам прямых измерений массы m и объема V ; измерение активного сопротивления $R = U/I$ по результатам прямых измерений напряжения U и тока I .

По виду функциональной зависимости F различают косвенные измерения:

– с линейной зависимостью
$$Y = \sum_{i=1}^n K_i X_i,$$

где K_i – постоянный коэффициент i -го аргумента;

– с нелинейной зависимостью
$$Y = \prod_{i=1}^n f(X_i),$$

где $f(X)$ – некоторые функции;

– измерения с зависимостями смешанного типа

$$Y = \sum_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^{n_j} f(X_i) \right].$$

Вид связи между Y и X_i определяет методику расчета погрешностей косвенных измерений.

Совокупными называются проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых их искомые значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. *Совместными* называются проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для установления зависимости между ними. Как видно из приведенных определений, эти два вида измерений весьма близки друг к другу. В обоих случаях искомые значения находятся в результате решения системы уравнений, коэффициенты в которых получены путем прямых измерений. Отличие состоит в том, что при совместных измерениях одновременно определяются несколько одноименных величин, а при совокупных – разноименных.

Косвенные, совместные и совокупные измерения объединяются одним принципиально важным общим свойством: их результаты определяются расчетом по известным функциональным зависимостям между измеряемыми величинами и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Различие между этими видами измерений заключается только в виде функциональной зависимости, используемой при расчетах. При косвенных измерениях она выражается одним уравнением в явном виде (4.1), при совместных и совокупных системой неявных уравнений. Поэтому уже неоднократно высказывались мнения о сокращении приведенной выше классификации. Все измерения делят на прямые и косвенные, которые в свою очередь подразделяются на несколько групп, различающихся между собой видом уравнений, представляющих

функциональные зависимости между измеряемыми величинами и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

По *характеристике точности* измерения делятся на равноточные и неравноточные.

Равноточными называются измерения какой-либо ФВ, выполненные одинаковыми по точности СИ и в одних и тех же условиях. Соответственно *неравноточными* называются измерения ФВ, выполненные различными по точности СИ и (или) в разных условиях. Методика обработки результатов равноточных и неравноточных измерений различна.

В зависимости от *числа измерений*, проводимых во время эксперимента, различают *одно- и многократные измерения*. *Однократными* называются измерения, выполненные один раз, к *многократными* относятся измерения одного и того же размера ФВ, следующие друг за другом. Известно, что при числе отдельных измерений более четырех их результаты могут быть обработаны в соответствии с требованиями математической статистики. Это означает, что при *четырёх и более измерениях*, входящих в ряд, измерения можно считать многократными. Их проводят с целью уменьшения случайной составляющей погрешности.

По *отношению к изменению измеряемой величины* измерения делятся на статические и динамические. Целью данной классификации является возможность принятия решения о том, нужно ли при конкретных измерениях учитывать скорость изменения измеряемой величины или нет. Погрешности, вызываемые влиянием скоростей изменения измеряемой величины, называются *динамическими*.

К *статическим* относятся измерения ФВ, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. *Динамические измерения* – это измерения, изменяющейся по размеру ФВ. Признаком, по которому измерение относят к статическому или динамическому, являются динамическая погрешность при данной скорости или частоте изменения измеряемой величины и заданных динамических свойствах СИ. Предположим, что она пренебрежимо мала (для решаемой измерительной задачи). В этом случае измерение можно считать статическим. При невыполнении указанных требований оно является динамическим.

В зависимости от *метрологического назначения* измерения делятся на технические и метрологические. *Технические* измерения проводятся рабочими СИ. *Метрологические* измерения выполняются при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц ФВ для передачи их размера рабочим СИ.

При метрологических измерениях в обязательном порядке учитываются погрешности, а при технических – принимается наперед заданная погрешность, достаточная для решения данной практической задачи. Поэтому при технических измерениях нет необходимости опре-

делять и анализировать погрешности получаемых результатов. Технические измерения являются наиболее массовым видом.

В зависимости от *выражения результатов измерений* последние подразделяются на абсолютные и относительные. Абсолютное измерение основано на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и(или) использовании значений физических констант. Понятие «абсолютное измерение» применяется как противоположное понятию «относительное измерение» и рассматривается как определение величины в ее единицах.

Относительное измерение – это измерение отношения определяемой величины к одноименной. Например: измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве образцовой меры активности. Относительные измерения при прочих равных условиях могут быть выполнены более точно, чем абсолютные, поскольку в суммарную погрешность не входит погрешность меры величины.

4.7 Понятие об испытании и контроле

Испытанием называется экспериментальное определение количественных и(или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, а также моделировании объекта и(или) воздействий (ГОСТ 16504). Экспериментальное определение характеристик свойств объекта при испытаниях может проводиться путем использования измерений, оценивания и контроля.

Объектом испытаний является продукция или процессы ее производства и функционирования. В зависимости от вида продукции и программы испытаний объектом может быть как единичное изделие, так и их партия. Объектом испытания может также быть макет или модель изделия.

Важнейшими признаками любых испытаний являются:

- принятие на основе их результатов определенных решений по объекту испытаний, например, о его годности или забраковке, о возможности предъявления на следующие испытания и т. д.;

- задание требуемых реальных или моделируемых условий испытаний. Под *условиями испытаний* понимается совокупность воздействующих факторов и(или) режимов функционирования объекта при испытаниях. В нормативно-технических документах на испытания конкретных объектов должны быть определены нормальные условия испытаний.

Существует большое число разновидностей испытаний. Они классифицируются по различным признакам. По *назначению* испытания делятся на исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные. По *уровню проведения* различают следующие категории испытаний: государственные, межведомственные и ведомственные. По *виду этапов разработки испытываемой продукции* различают предварительные и приемочные испытания. В зависимости от *вида испытаний готовой продукции* их подразделяют на квалификационные, приемосдаточные периодические и типовые. Определения этих видов испытаний можно найти в ГОСТ 16504 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения».

Целью испытаний следует считать нахождение истинного значения параметра (характеристики), определенного не при тех реальных условиях, в которых он фактически может находиться в ходе испытаний, а в заданных номинальных условиях испытания. Реальные условия испытаний практически всегда отличаются от номинальных, поскольку установить параметры условий испытаний абсолютно точно невозможно. Следовательно, результат испытания всегда имеет погрешность, возникающую не только из-за погрешности определения искомой характеристики, но и из-за неточного установления номинальных условий испытания.

Результатом испытаний называется оценка характеристик свойств объекта, установления соответствия объекта заданным требованиям, данные анализа качества функционирования объекта в процессе испытаний. Результат испытаний характеризуется *точностью* – свойством испытаний, описывающим близость их результатов к действительным значениям характеристик объекта в определенных условиях испытаний.

Между измерением и испытанием существует большое сходство: во-первых, результаты обеих операций выражаются в виде чисел; во-вторых, погрешности и в том, и другом случае могут быть выражены как разности между результатами измерений (испытаний) и истинными значениями измеряемой величины (или определяемой характеристики при номинальных условиях эксплуатации). Однако с точки зрения метрологии между этими операциями имеется значительная разница: погрешность измерения является только одной из составляющих погрешности испытания. Поэтому можно сказать, что испытание – это более общая операция, чем измерение. Измерение можно считать частным случаем испытания, при котором условия испытаний не представляют интереса.

Контроль – это процесс определения соответствия значения параметра изделия установленным требованиям или нормам. Сущность всякого контроля состоит в проведении двух основных этапов. На первом из них получают информацию о фактическом состоянии некоторого

объекта, о признаках и показателях его свойств. Эта информация называется *первичной*. На втором – первичная информация сопоставляется с заранее установленными требованиями, нормами, критериями. При этом выявляется соответствие или несоответствие фактических данных требуемым. Информация об их расхождении называется *вторичной*. Она используется для выработки соответствующих решений по поводу объекта контроля. В ряде случаев граница между этапами контроля неразличима. При этом первый этап может быть выражен нечетко или практически не наблюдаться. Характерным примером такого рода является контроль размера детали калибром, сводящийся к операции сопоставления фактического и предельно допустимого значений параметра.

Контроль состоит из ряда элементарных действий: измерительного преобразования контролируемой величины; операции воспроизведения уставок контроля; операции сравнения; определения результата контроля.

Измерения и контроль тесно связаны друг с другом, близки по своей информационной сущности и содержат ряд общих операций (например, сравнение, измерительное преобразование). В то же время их процедуры во многом различаются:

- результатом измерения является количественная характеристика, а контроля – качественная;
- измерение осуществляется в широком диапазоне значений измеряемой величины, а контроль – обычно в пределах небольшого числа возможных состояний;
- контрольные приборы, в отличие от измерительных, применяются для проверки состояния изделий, параметры которых заданы и изменяются в узких пределах;
- основной характеристикой качества процедуры измерения является точность, а процедуры контроля – достоверность.

Контроль может быть классифицирован по ряду признаков. В зависимости от *числа контролируемых параметров* он подразделяется на *однопараметровый*, при котором состояние объекта определяется по размеру одного параметра, и *многопараметровый*, при котором состояние объекта определяется размерами многих параметров.

По *форме сравниваемых сигналов* контроль подразделяется на *аналоговый*, при котором сравнению подвергаются аналоговые сигналы, и *цифровой*, при котором сравниваются цифровые сигналы.

В зависимости от *вида воздействия на объект* контроль подразделяется на *пассивный*, при котором воздействие на объект не производится, и *активной*, при котором воздействие на объект осуществляется посредством специального генератора тестовых сигналов.

В практике большое распространение получил так называемый *допусковый* контроль, суть которого состоит в определении путем измерения или испытания значения контролируемого параметра объекта и сравнение полученного результата с заданными граничными допусти-

мыми значениями. Частным случаем допускового контроля является поверка средств измерений, в процессе которой исследуется попадание погрешностей средства измерений в допускаемые пределы.

По расположению зоны контролируемого состояния различают допусковой контроль состояний:

- ниже допускаемого значения $X < X_n$;
- выше допускаемого значения $X > X_v$;
- между верхним и нижним допускаемыми значениями $X_n < X < X_v$.

Результатом контроля является не число, а одно из взаимоисключающих утверждений:

- «контролируемая характеристика (параметр) находится в пределах допускаемых значений», результат контроля – «годен»;
- «контролируемая характеристика (параметр) находится за пределами допускаемых значений», результат контроля – «не годен» или «брак».

4.8 Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятию «измерение».
2. В чем суть философского аспекта измерений?
3. В чем суть научного аспекта измерений?
4. В чем суть технического аспекта измерений?
5. Какие элементарные операции нужно выполнить для реализации процедуры прямого измерения?
6. Какие операции в общем случае могут входить в измерительное преобразование?
7. На какие группы в зависимости от возможности создания разностного сигнала делятся физические величины?
8. Перечислите и охарактеризуйте известные Вам элементы процесса измерений.
9. Изобразите структурную схему основных элементов процесса измерения.
10. Каким требованиям должна удовлетворять модель объекта измерения?
11. Дайте определение понятиям «измерительный сигнал», «принцип измерения», «метод измерения».
12. Как классифицируются методы измерения по совокупности приемов использования принципов и средств измерений?
13. В чем суть дифференциального метода измерений?
14. Приведите пример нулевого метода измерений.
15. В чем заключается суть измерения методом замещения?

16. Приведите пример измерения методом замещения.
17. В чем заключается суть измерения методом совпадения?
18. Какими признаками должны обладать средства измерения?
19. Дайте определение понятию «условия измерения».
20. Опишите различие между «нормальными», «рабочими» и «предельными» условиями измерения.
21. Перечислите характеристики качества измерений.
22. Дайте определение понятиям «точность», «достоверность», «правильность», «сходимость» и «воспроизводимость» измерения.
23. Какие действия осуществляет субъект измерения?
24. Перечислите процедуры этапа постановки измерительной задачи.
25. Изложите последовательность этапа планирования измерения.
26. Перечислите процедуры этапа измерительного эксперимента.
27. Изложите последовательность этапа обработки экспериментальных данных.
28. В чем суть первого постулата теории измерения и следствия из него?
29. В чем суть второго постулата теории измерения и следствия из него?
30. В чем суть третьего постулата теории измерения и следствия из него?
31. Как классифицируются измерения по общим приемам получения результатов измерений?
32. Приведите примеры прямых и косвенных измерений.
33. Как различают косвенные измерения по виду функциональной зависимости?
34. Чем совокупные измерения отличаются от совместных?
35. Как классифицируются измерения по характеристике точности?
36. Как классифицируются измерения в зависимости от числа измерений?
37. Как классифицируются измерения по отношению к изменению измеряемой величины?
38. Как классифицируются измерения в зависимости от метрологического назначения?
39. Чем метрологические измерения отличаются от технических?
40. Как классифицируются измерения в зависимости от выражения результатов измерений?
41. Дайте определения понятиям «испытание» и «контроль».
42. Перечислите Важнейшие признаки любых испытаний.
43. По каким признакам классифицируются испытания?
44. В чем заключается сходство и отличие измерений и испытаний?
45. Перечислите отличия процедур измерения и контроля.
46. По каким признакам классифицируется контроль?

5 ПОНЯТИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

5.1 Общие вопросы погрешностей измерения

5.1.1 Классификация погрешностей

Качество средств и результатов измерений принято характеризовать, указывая их погрешности. Введение понятия «погрешность» требует определения и четкого разграничения трех понятий: истинного и действительного значений измеряемой физической величины и результата измерения. *Истинное значение физической величины* – это значение, идеальным образом отражающее свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении. Оно не зависит от средств нашего познания и является той абсолютной истиной, к которой мы стремимся, пытаясь выразить ее в виде числовых значений. На практике это абстрактное понятие приходится заменять понятием «действительное значение». *Действительное значение физической величины* – значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него. *Результат измерения* представляет собой приближенную оценку истинного значения величины, найденную путем измерения [38 – 41].

Понятие «погрешность» – одно из центральных в метрологии, где используются понятия «погрешность результата измерения» и «погрешность средства измерения». *Погрешность результата измерения* – это разница между результатом измерения X и истинным (или действительным) значением Q измеряемой величины:

$$\Delta = X - Q. \quad (5.1)$$

Она указывает границы неопределенности значения измеряемой величины. *Погрешность средства измерения* – разность между показанием СИ и истинным (действительным) значением измеряемой ФВ. Она характеризует точность результатов измерений, проводимых данным средством.

Эти два понятия во многом близки друг к другу и классифицируются по одинаковым признакам.

По *характеру проявления* погрешности делятся на случайные, систематические, прогрессирующие и грубые (промахи).

Заметим, что из приведенного выше определения погрешности никак не следует, что она должна состоять из каких-либо составляющих. Деление погрешности на составляющие было введено для удобства обработки результатов измерений исходя из характера их проявле-

ния. В процессе формирования метрологии было обнаружено, что погрешность не является постоянной величиной. Путем элементарного анализа установлено, что одна ее часть проявляется как постоянная величина, а другая – изменяется непредсказуемо. Эти части называли систематической и случайной погрешностями.

Изменение погрешности во времени представляет собой нестационарный случайный процесс. Разделение погрешности на систематическую, прогрессирующую и случайную составляющие представляет собой попытку описать различные участки частотного спектра этого широкополосного процесса: инфранизкочастотный, низкочастотный и высокочастотный.

Случайная погрешность – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера ФВ, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях. В появлении таких погрешностей (рис. 5.1) не наблюдается какой-либо закономерности, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения. Описание случайных погрешностей возможно только на основе теории случайных процессов и математической статистики.

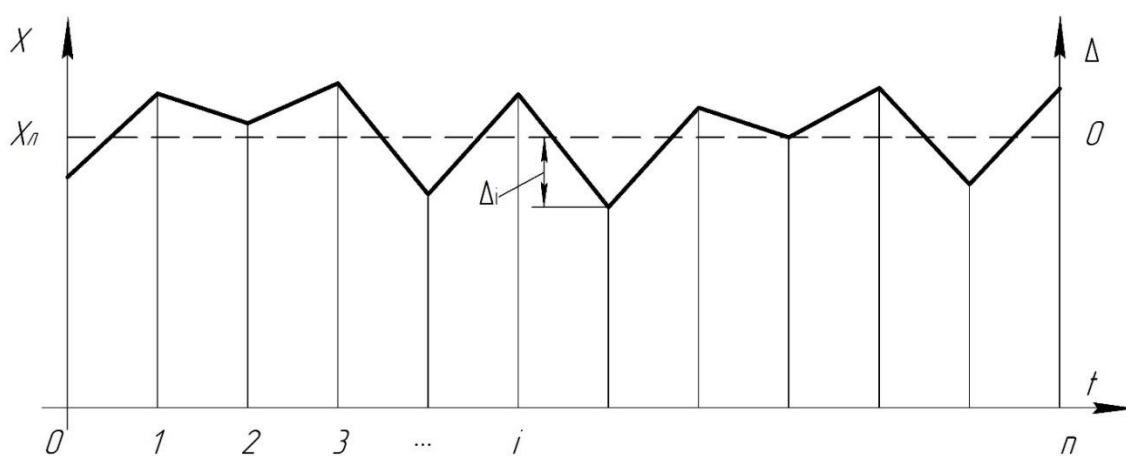


Рисунок 5.1 – Изменение случайной погрешности от измерения к измерению

В отличие от систематических случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений путем введения поправки, однако их можно существенно уменьшить путем увеличения числа наблюдений. Поэтому для получения результата, минимально отличающегося от истинного значения измеряемой величины, проводят многократные измерения требуемой величины с последующей математической обработкой экспериментальных данных.

Большое значение имеет изучение случайной погрешности как функции номера наблюдения i или соответствующего ему момента времени t проведения измерений, т. е. $\Delta = A(t)$. Отдельные значения погрешности являются значениями функции $A(t)$, следовательно, погрешность измерения есть случайная функция времени. При проведении многократных измерений получается одна реализация такой функции. Именно такая реализация показана на рисунке 5.1. Повтор серии измерений даст нам другую реализацию этой функции, отличающуюся от первой, и т. д. Погрешность, соответствующая каждому i -му измерению, является сечением случайной функции $A(t)$. В каждом сечении данной функции можно найти среднее значение, вокруг которого группируются погрешности в различных реализациях. Если через полученные таким образом средние значения провести плавную кривую, то она будет характеризовать общую тенденцию изменения погрешности во времени.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же ФВ. Постоянная и переменная систематические погрешности показаны на рисунке 5.2. Их отличительный признак заключается в том, что они могут быть предсказаны, обнаружены и благодаря этому почти полностью устранены введением соответствующей поправки.

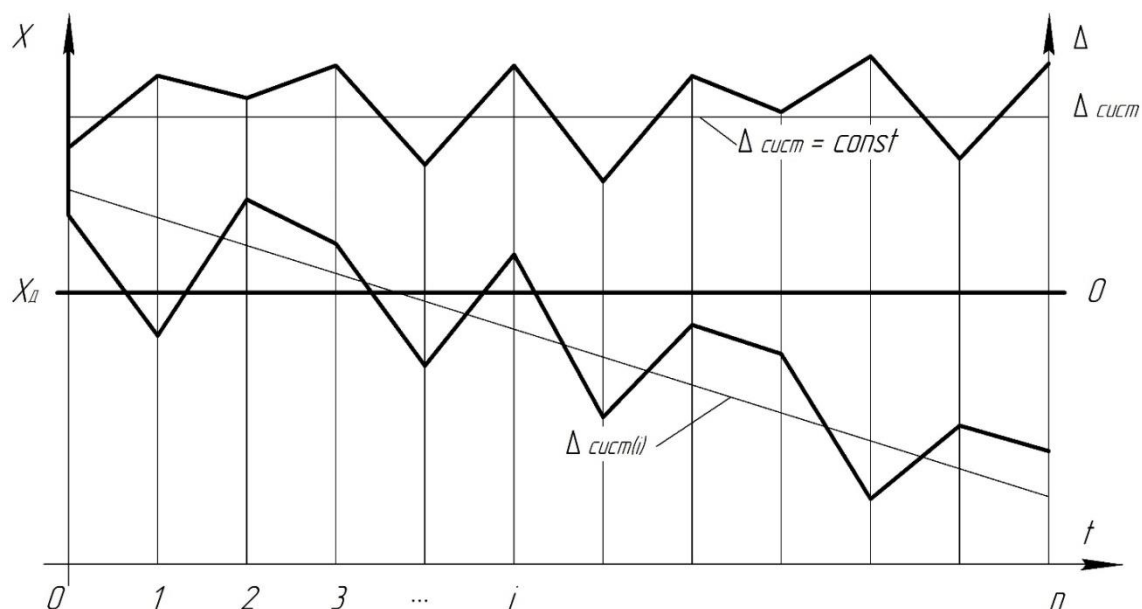


Рисунок 5.2 – Постоянная и переменная систематические погрешности

Некоторые исследователи считают систематическую погрешность специфической, «вырожденной» случайной величиной, обладающей некоторыми, но не всеми свойствами случайной величины, изучаемой в теории вероятностей и математической статистике. Ее свойства, кото-

рые необходимо учитывать при объединении составляющих погрешности, отражаются теми же характеристиками, что и свойства «настоящих» случайных величин: дисперсией (средним квадратическим отклонением) и коэффициентом взаимной корреляции.

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность – это непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Отличительные особенности прогрессирующих погрешностей:

- они могут быть скорректированы поправками только в данный момент времени, а далее вновь непредсказуемо изменяются;

- изменения прогрессирующих погрешностей во времени – нестационарный случайный процесс, и поэтому в рамках хорошо разработанной теории стационарных случайных процессов они могут быть описаны лишь с известными оговорками. Прогрессирующая погрешность – это понятие, специфичное для нестационарного случайного процесса изменения погрешности во времени, оно не может быть сведено к понятиям случайной и систематической погрешностей. Последние характерны лишь для стационарных случайных процессов.

Понятие прогрессирующей погрешности широко используется при исследовании динамики погрешностей СИ и метрологической надежности последних.

Грубая погрешность (промах) – это случайная погрешность результата отдельного наблюдения входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Они, как правило, возникают из-за ошибок или неправильных действий оператора (его психофизиологического состояния, неверного отсчета, ошибок в записях или вычислениях, неправильного включения приборов или сбоев в их работе и др.). Возможной причиной возникновения промахов также могут быть кратковременные резкие изменения условий проведения измерений. Если промахи обнаруживаются в процессе измерений, то результаты, их содержащие, отбрасывают. Однако чаще всего промахи выявляют только при окончательной обработке результатов измерений с помощью специальных критериев, которые рассмотрены ниже.

По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности.

Абсолютная погрешность описывается формулой (5.1) и выражается в единицах измеряемой величины. Однако она не может в полной мере 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 изменений, а при $X = 1$ мм – низкой.

Поэтому и вводится понятие относительной погрешности. *Относительная погрешность* – это отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta/Q = (X - Q)/Q.$$

Эта наглядная характеристика точности результата измерения не годится для нормирования погрешности СИ, так как при изменении значений Q принимает различные значения вплоть до бесконечности при $Q = 0$. В связи с этим для указания и нормирования погрешности СИ используется *еще* одна разновидность погрешности – приведенная.

Приведенная погрешность – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность СИ отнесена к условно принятому значению Q_N , постоянному во всем диапазоне измерений или его части:

$$\gamma = \Delta/Q_N = (X - Q)/Q_N.$$

Условно принятое значение Q_N называют *нормирующим*. Чаще всего за него принимают верхний предел измерений данного СИ, применительно к которым и используется главным образом понятие «приведенная погрешность».

В зависимости от места возникновения различают инструментальные, методические и субъективные погрешности.

Инструментальная погрешность обусловлена погрешностью применяемого СИ. Иногда эту погрешность называют *аппаратурной*.

Методическая погрешность измерения обусловлена:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства, которое определяется путем измерения;
- влиянием способов применения СИ. Это имеет место, например, при измерении напряжения вольтметром с конечным значением внутреннего сопротивления. В данном случае вольтметр шунтирует участок цепи, на котором измеряется напряжение, и оно оказывается меньше, чем было до присоединения вольтметра;
- влиянием алгоритмов (формул), по которым производятся вычисления результатов измерений;
- влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых средств измерения.

Отличительной особенностью методических погрешностей является то, что они не могут быть указаны в нормативно-технической документации на используемое СИ, поскольку от него не зависят, а должны определяться оператором в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен четко различать фактически измеряемую им величину и величину, подлежащую измерению.

Субъективная (личная) погрешность измерения обусловлена погрешностью отсчета оператором показаний по шкалам СИ, диаграммам регистрирующих приборов. Они вызываются состоянием оператора, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эрго-

номическими свойствами СИ. Характеристики личной погрешности определяют на основе нормированной номинальной цены деления шкалы измерительного прибора (или диаграммной бумаги регистрирующего прибора) с учетом способности «среднего оператора», к интерполяции в пределах деления шкалы.

По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины различают погрешности (рис. 5.3):

- *аддитивные*, не зависящие от измеряемой величины;
- *мультипликативные*, которые прямо пропорциональны измеряемой величине;
- *нелинейные*, имеющие нелинейную зависимость от измеряемой величины.

Эти погрешности применяют в основном для описания метрологических характеристик СИ. Разделение погрешностей на аддитивные, мультипликативные и нелинейные весьма существенно при решении вопроса о нормировании и математическом описании погрешностей СИ.

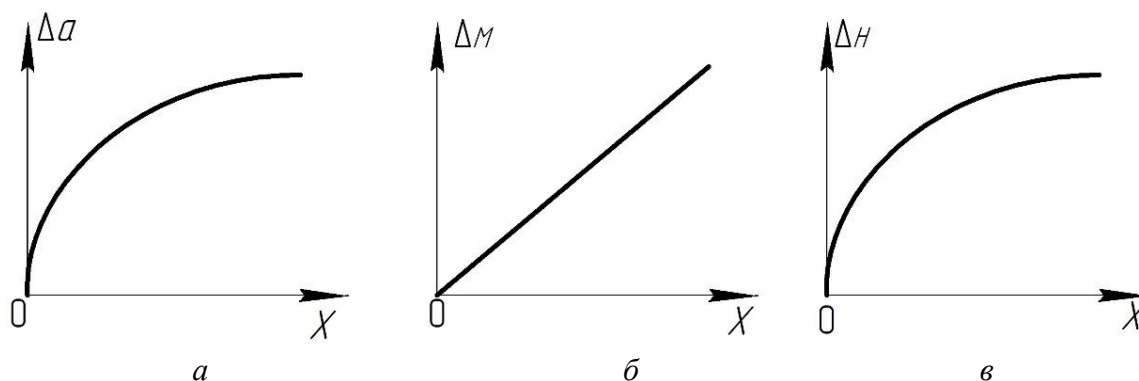


Рисунок 5.3 – Погрешности:

а – аддитивная, б – мультипликативная, в – нелинейная

Примеры аддитивных погрешностей – от постоянного груза на чашке весов, от неточной установки на нуль стрелки прибора перед измерением, от термо-ЭДС в цепях постоянного тока. Причинами возникновения мультипликативных погрешностей могут быть: изменение коэффициента усиления усилителя, изменение жесткости мембраны датчика манометра или пружины прибора, изменение опорного напряжения в цифровом вольтметре.

По влиянию внешних условий различают основную и дополнительную погрешности СИ. *Основной* называется погрешность СИ, определяемая в нормальных условиях его применения. Для каждого СИ в нормативно-технических документах оговариваются условия эксплуатации – совокупность влияющих величин (температура окружающей среды, влажность, давление, напряжение и частота питающей сети и др.), при которых нормируется его погрешность. *Дополнительной* называется по-

грешность СИ, возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин.

В зависимости от влияния характера изменения измеряемых величин погрешности СИ делят на статические и динамические. *Статическая погрешность* – это погрешность СИ применяемого для измерения ФВ, принимаемой за неизменную. *Динамической* называется погрешность СИ, возникающая дополнительно при измерении переменной ФВ и обусловленная несоответствием его реакции на скорость (частоту) изменения измеряемого сигнала.

В связи с приведенными краткими характеристиками различных по природе погрешностей остановимся на попытках ввести некоторые термины, характеризующие результаты измерений, в зависимости от вида погрешностей.

5.1.2 Принципы оценивания погрешностей

Оценивание погрешностей производится с целью получения объективных данных о точности результата измерения. Точность результата измерения характеризуется погрешностью. Погрешность измерения описывается определенной математической моделью, выбор которой обуславливается имеющимися априорными сведениями об источниках погрешности, а также данными, полученными в ходе измерений. С помощью выбранной модели определяются характеристики и параметры погрешности, используемые для количественного выражения тех или иных ее свойств.

Характеристики погрешности принято делить на точечные и интервальные. К *точечным* относятся СКО случайной погрешности и предел сверху для модуля систематической погрешности, к *интервальным* – границы неопределенности результата измерения. Если эти границы определяются как отвечающие некоторой доверительной вероятности, то они называются *доверительными интервалами*. Если же минимально возможные в конкретном случае границы погрешности оценивают так, что погрешность, выходящую за них, встретить нельзя, то они называются *предельными (безусловными) интервалами*.

В основу выбора оценок погрешностей положен ряд принципов. Во-первых, оцениваются отдельные характеристики и параметры выбранной модели погрешности. Это связано с тем, что модели погрешностей, как правило, сложны и описываются многими параметрами. Определение их всех весьма затруднительно, а иногда и невозможно. Кроме этого, в большинстве практических случаев полное описание модели погрешности содержит избыточную информацию, в то время как знание отдельных ее характеристик вполне достаточно для достижения цели

измерения. Во-вторых, оценки погрешности определяют приближенно, с точностью, согласованной с целью измерения. Это обусловлено тем, что погрешности определяют лишь зону неопределенности результата измерения и их не требуется знать очень точно. В-третьих, погрешности оцениваются сверху, поэтому погрешность лучше преувеличить, чем преуменьшить, так как в первом случае снижается качество измерений, а во втором – возможно полное обесценивание результатов всего измерения. В-четвертых, поскольку стремятся получить реалистические значения оценки погрешности результата измерения, т. е. не слишком, завышенные и не слишком заниженные, точность измерений должна соответствовать цели измерения. Излишняя точность ведет к неоправданному расходу средств и времени. Недостаточная точность в зависимости от цели измерения может привести к признанию годным в действительности негодного изделия, к принятию ошибочного решения и т. п.

Оценивание погрешностей может проводится до (априорное) и после (апостериорное) измерения. *Априорное* оценивание – это проверка возможности обеспечить требуемую точность измерений, проводимых в заданных условиях выбранным методом с помощью конкретных СИ. Оно проводится в случаях:

- нормирования метрологических характеристик СИ;
- разработки методик выполнения измерений;
- выбора средств измерений для решения конкретной измерительной задачи;
- подготовки измерений, проводимых с помощью конкретного СИ.

Апостериорную оценку проводят в тех случаях, когда априорная оценка неудовлетворительна или получена на основе типовых метрологических характеристик, а требуется учесть индивидуальные свойства используемого СИ. Такую оценку следует рассматривать как коррекцию априорных оценок.

5.1.3 Округление результатов измерений

Поскольку погрешности измерений определяют лишь зону неопределенности результатов, их не требуется знать очень точно, окончательную запись погрешности измерения принято выражать числом с одним или двумя значащими цифрами. Эмпирически были установлены следующие правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного результата измерения.

1. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются. Если десятичная дробь в числовом зна-

чении результата измерения оканчивается нулями, то нуль отбрасывается только до того разряда, который соответствует разряду погрешности.

Пример. Результат 1,070000, погрешность $\pm 0,001$; результат округляют до 1,070.

2. Если первая (слева направо) из заменяемых нулями и отбрасываемых цифр меньше 5, остающиеся цифры не изменяются.

Пример. Число 148935 (первая из заменяемых нулями цифр равна 3) может быть округлено до 148900; число 575,3455 (первая из отбрасываемых цифр равна 4) – до 575,3.

3. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр равна 5, а за ней не следует никаких цифр или идут нули, то округление производится до ближайшего четного числа, т. е, если последняя цифра в округленном числе четная или нуль, она остается без изменения, если она нечетная, – увеличивается на единицу.

Пример. Число 1234,50 округляют до 1234; число 8765,50 – до 8766; число 43210,500 – до 43210.

4. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр больше 5 или равна 5, но за ней следует значащая цифра, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу.

Пример. Число 6783,6 округляют до 6784, число 5499,7 – до 5500, число 12,34501 – до 12,35.

Третье правило обосновано тем, что вероятность появления четного окончания равна вероятности появления нечетного. В силу этого достигается якобы наибольшая вероятность того, что при арифметических действиях с округленными числами погрешности разных знаков взаимно скомпенсируются.

В настоящее время вместо третьего и четвертого правил предлагается следующее пятое правило.

Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр равна или больше 5, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу.

Причиной изменения правила округления явилось широкое распространение вычислительных машин, построенных на двоичной системе счисления.

Применение правила округления 5 до ближайшего четного числа требует введения одного лишнего числового разряда, что является не только неэкономичным, но в ряде случаев и неоправданным.

5.2 Систематические погрешности

5.2.1 Общие вопросы

5.2.1.1 Классификация систематических погрешностей

В настоящее время, особенно после введения одного из основополагающих метрологических стандартов – ГОСТ 8.009 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений», понятие «систематическая погрешность» несколько изменилось по отношению к определению, данному ГОСТ 16263 «ГСИ. Метрология. Термины и определения». Систематическая погрешность считается специфической, «вырожденной» случайной величиной, обладающей некоторыми, но не всеми свойствами случайной величины, изучаемой в теории вероятностей и математической статистике. Свойства систематической погрешности, которые необходимо учитывать при объединении составляющих погрешности, отражаются такими же характеристиками, что и свойства «настоящих» случайных величин – дисперсией (СКО) и коэффициентом взаимной корреляции [23–24].

Систематическая погрешность представляет собой определенную функцию влияющих факторов, состав которых зависит от физических, конструктивных и технологических особенностей СИ, условий их применения, а также индивидуальных качеств наблюдателя. В метрологической практике при оценке систематических погрешностей должно учитываться влияние следующих основных факторов:

1. **Объект измерения.** Перед измерением он должен быть достаточно хорошо изучен с целью корректного выбора его модели. Чем полнее модель соответствует исследуемому объекту, тем точнее могут быть получены результаты измерения. Например, кривизна земной поверхности может не учитываться при измерении площади сельскохозяйственных угодий, так как она не вносит ощутимой погрешности, однако при измерении площади океанов ею пренебрегать уже нельзя.

2. **Субъект измерения.** Его вклад в погрешность измерения необходимо уменьшать путем подбора операторов высокой квалификации и соблюдения требований эргономики при разработке СИ.

3. **Метод и средство измерений.** Чрезвычайно важен их правильный выбор, который производится на основе априорной информации об объекте измерения. Чем больше априорной информации, тем точнее может быть проведено измерение. Основной вклад в систематическую погрешность вносит, как правило, методическая погрешность.

4. **Условия измерения.** Обеспечение и стабилизация нормальных условий являются необходимыми требованиями для минимизации дополнительной погрешности, которая по своей природе, как правило, является систематической.

Систематические погрешности принято классифицировать по двум признакам. По *характеру изменения во времени* они делятся на постоянные и переменные. *Постоянными* называются такие погрешности измерения, которые остаются неизменными в течение всей серии измерений. Например, погрешность от того, что неправильно установлен ноль стрелочного электроизмерительного прибора, погрешность от постоянного дополнительного веса на чашке весов и т. д. *Переменными* называются погрешности, изменяющиеся в процессе измерения. Они делятся на монотонно изменяющиеся, периодические и изменяющиеся по сложному закону. Если в процессе измерения систематическая погрешность монотонно возрастает или убывает, ее называют *монотонно изменяющейся*. Например, она имеет место при постепенном разряде батареи, питающей средство измерений. *Периодической* называется погрешность, значение которой является периодической функцией времени. Примером может служить погрешность, обусловленная суточными колебаниями напряжения силовой питающей сети, температуры окружающей среды и др. Систематические погрешности могут изменяться и по более сложному закону, обусловленному какими-либо внешними причинами.

По *причинам возникновения* погрешности делятся на инструментальные погрешности; погрешности в результате неправильной установки измерительного устройства; погрешности, возникающие вследствие внешних влияний; погрешности метода измерения (теоретические погрешности); субъективные погрешности.

5.2.1.2 Инструментальные погрешности

Рассмотрим группы систематических погрешностей, отличающиеся одна от другой причинами возникновения.

Инструментальными называют погрешности, причина которых заключается в свойствах применяемых средств измерений. Эти свойства могут вызывать погрешности различного характера.

В общем случае инструментальные погрешности можно разделить на: инструментальные погрешности, являющиеся следствием несовершенства или неправильности технологии изготовления средств измерений; инструментальные погрешности, присущие данной конструкции; инструментальные погрешности, являющиеся следствием износа, старения или неисправности средств измерений.

Инструментальные погрешности, присущие данной конструкции. Одним из характерных источников погрешностей рассматриваемого вида, присущих почти всем средствам измерений, которые имеют подвижные части, является некоторая свобода перемещения этих частей,

помимо движения, соответствующего принципу действия устройства. В зависимости от конструкции узла, в котором возникает такая свобода перемещения, а также от традиций той или иной отрасли приборостроения говорят о наличии «люфта», «зазора», «мертвого», «свободного» или «холостого хода» и т. д.

Еще одной причиной инструментальных погрешностей является трение в сочленениях подвижных деталей приборов.

Так, в средствах измерений, в которых при измерении приходится вращать или перемещать отдельные детали (например, в микрометрах), большое трение затрудняет правильную установку вращаемой детали и может привести к возникновению чрезмерно большого или чрезмерно малого давления на измеряемый объект.

Инструментальные погрешности, являющиеся следствием несовершенства или неправильности технологии изготовления средств измерений. Всем средствам измерений, имеющим шкалу, в большей или меньшей степени присущи погрешности, возникшие в результате неточности нанесения отметок шкалы, так называемые погрешности градуировки. В тех случаях, когда деления шкалы строго равномерны, как, например, в устройствах для измерения длины, отметки на шкалы наносятся механически при помощи соответствующих приспособлений. Несовершенство конструкции, износ или неисправности этих приспособлений могут привести к тому, что некоторые или все отметки окажутся смещенными в ту или иную сторону. При этом в процессе измерения результаты всегда будут содержать одну и ту же погрешность.

Более или менее точные измерительные приборы, шкалы которых неравномерны, градуируют нередко вручную. Процесс градуировки осуществляется следующим образом. Градуируемый измерительный прибор с основанием, подготовленным для нанесения шкалы, и образцовый измерительный прибор, погрешности которого значительно меньше предельно допускаемых для градуируемого, подключают к регулируемому источнику измеряемой величины. Устанавливая различные значения измеряемой величины по показаниям образцового измерительного прибора, одновременно наносят отметки на шкалу градуируемого измерительного прибора. Уже на этом этапе возможно появление погрешностей, например, вследствие того, что исполнитель при нанесении отметки может смотреть не строго перпендикулярно к плоскости шкалы, в результате нанесенная им отметка окажется смещенной влево или вправо от правильного положения (погрешность от параллакса). При градуировке на шкалу наносят только основные отметки, т. е. отметки, против которых ставят числовые значения (называть их «оцифрованными» не рекомендуется).

Промежуточные отметки в соответствии с характером шкалы наносят на глаз или при помощи приспособлений различной степени сложности. На этом этапе возможно появление погрешностей градуи-

ровки вследствие глазомерных ошибок или несовершенства приспособления, недостаточно точно воспроизводящего малые деления шкалы. Эти погрешности опасны тем, что при поверке средств измерений, как правило, ограничиваются сличением их показаний с показаниями образцового измерительного устройства также только на числовых метках.

Таким образом, систематические погрешности на промежуточных отметках могут остаться незамеченными.

Числовые, а иногда и промежуточные отметки при описанном способе градуировки наносят предварительно «вчерне», например, в виде карандашных точек, после чего вычерчивают шкалу тушью или иным способом. На этом этапе может возникнуть дополнительная градуировочная погрешность, например, от того, что при нанесении штриха определенной ширины (а не толщины, как иногда говорят) его середина может оказаться смещенной по отношению к точке, поставленной при градуировке.

Таким образом, возможность появления инструментальных погрешностей в результате градуировки весьма значительна. Принимаются меры к тому, чтобы погрешности градуировки были меньше погрешностей, допускаемых для данного средства измерения, однако в какой-то степени они все же остаются. Их отрицательное влияние становится особенно заметно в процессе эксплуатации средств измерений, когда возрастают другие погрешности, например, вследствие износа деталей, старения материала, нарушения регулировки. Тогда суммарная погрешность может выйти за допускаемые пределы раньше срока естественного износа.

В последнее время стремятся изготавливать печатные шкалы (типографским, фотографическим и другими способами) не только для средств измерений массового выпуска, но и для более точных. В этом случае при конструировании предусматривают способы регулирования средств измерений, позволяющие «подогнать» их показания к шкале. Разумеется, и при этом способе неизбежны градуировочные погрешности.

Инструментальные погрешности, являющиеся следствием износа, старения или неисправности средств измерений. Износ и старение материалов могут быть причиной появления погрешностей, имеющих некоторые характерные особенности. Так, совершенно очевидно, что средства измерений изнашиваются непрерывно и постепенно в процессе эксплуатации со скоростью, зависящей от интенсивности эксплуатации. Следовательно, и погрешности, появляющиеся в результате износа, как правило, возрастают постепенно. Однако рост этот происходит настолько медленно, что в определенный отрезок времени мы можем принимать погрешности, явившиеся следствием износа, постоянными и даже пользоваться соответствующими поправками. Только тогда, когда эти

погрешности достигнут установленного предела, дальнейшее применение данного средства измерений считается недопустимым.

Типичным примером в этом отношении являются гири. Их износ всегда идет в одном направлении – постепенно уменьшается их масса. Характер износа гирь заставляет изготавливать их с положительным запасом массы. Масса новой гири всегда больше номинальной в пределах, допускаемых для данного класса гирь.

Другим примером являются концевые меры длины – плитки. В процессе эксплуатации и при ремонтах их размер постепенно уменьшается. Плитками пользуются до тех пор, пока их размер не достигнет установленного для них предела, после чего их или переводят в другой класс, или переаттестовывают, или, наконец, изымают из применения в качестве мер.

Несколько иначе обстоит дело со старением. Под старением понимают изменение каких-либо свойств материалов с течением времени, а иногда и в зависимости от условий применения или хранения.

Процесс старения может протекать различно. Старение может привести к потере каких-либо свойств, имеющих значение для средства измерений, или к постепенной их стабилизации. Одним из характерных примеров старения второго вида является старение манганина. Манганин – это сплав меди, марганца, никеля и некоторых других компонентов, добавляемых иногда в небольших количествах. Обладая сравнительно большим удельным электрическим сопротивлением, манганин в то же время имеет незначительный температурный коэффициент сопротивления. Термоэлектродвижущая сила (т. э. д. с.), которая возникает в спае манганина с медью при его нагревании, относительно невелика. Благодаря этим качествам манганин широко применяется в электроприборостроении. Однако манганин имеет одно отрицательное свойство – с течением времени его сопротивление хотя и медленно, но изменяется. По истечении двух–трех лет процесс этот практически прекращается и сопротивление изделия из манганина стабилизируется.

Были разработаны приемы искусственного ускорения процесса старения манганина, стабилизации его свойств. Так как полной стабилизации все же достичь не удастся, то для более точных приборов, в которых эта остаточная нестабильность влияет на показания, в первые годы эксплуатации проводят более частые поверки.

В особо ответственных случаях готовое изделие выдерживают годами без применения – до полной стабилизации его свойств, например, катушки сопротивления высшей точности. Во время выдержки ведутся периодические наблюдения за изменением их сопротивления.

Как видим, в данном случае процесс старения обратен процессу износа – с течением времени качество и надежность измерительного устройства улучшаются.

Манганин – не единственный пример старения материала в области измерительной техники. Так, в некоторых концевых мерах длины, изготавливаемых из стали, также была обнаружена тенденция к изменению с течением времени их размеров, причем в сторону увеличения. Это явление называли «ростом» плиток. Меры борьбы с этим явлением те же, что и в отношении манганина – искусственная стабилизация и более частая поверка до наступления надежной естественной стабилизации.

Неисправностей, которые являются или точнее могут являться причиной появления систематических погрешностей, множество. Перечислить их нет никакой возможности. Можно указать на деформации или коррозию деталей измерительного механизма, не прекращающих, но изменяющих характер взаимодействия отдельных его частей. Часто неисправность измерительного устройства является следствием его перегрузки. Перегрузка – механическая, электрическая, тепловая или какая-либо иная – может вызвать устойчивое «остаточное» изменение в материале или в механизме средства измерений и явиться причиной появления или изменения систематической погрешности.

Неисправности, ведущие к появлению небольших систематических погрешностей, гораздо опаснее тех, которые вызывают большие погрешности. Большие систематические погрешности сравнительно быстро обнаруживаются «на глаз», например, по значительному несоответствию результатов измерения ожидаемым. Небольшие систематические погрешности, в два–четыре раза превышающие допускаемые, могут в течение более или менее длительного времени оставаться незамеченными. Такие незамеченные погрешности могут принести огромный вред, особенно при большом числе измерений.

Особую опасность представляет появление или изменение систематических погрешностей в образцовых средствах измерений, применяемых для поверки других средств измерений. Мало того, что каждое средство измерений, поверенное или отградуированное по такому образцовому средству измерений, с самого начала будет нести в себе скрытую погрешность, оно будет передавать эту погрешность всем объектам, которые с его помощью будут измеряться или поверяться. Если вред, приносимый скрытой систематической погрешностью рабочего средства измерений, можно было бы выразить математически, то для выражения вреда, приносимого скрытой систематической погрешностью образцового средства измерений, это выражение следовало бы возвести в квадрат или даже в четвертую степень для случая поверки образцового средства измерений следующего, более низкого, разряда.

Из этого сопоставления роли систематических погрешностей рабочих и образцовых средств измерений наглядно видна важность особой тщательности проведения поверки образцовых средств измерений.

Данный обзор инструментальных погрешностей не является исчерпывающим. Его цель – подсказать читателю необходимость и пути

анализа возможных систематических погрешностей, которые могут внести в результаты измерения применяемые измерительные устройства.

5.2.1.3 Погрешности, возникающие в результате неправильной установки средств измерений

Правильность показаний ряда средств измерений зависит от положения их подвижных частей по отношению к неподвижным. К ним относятся все средства измерений, принцип действия которых в той или иной степени связан с механическим равновесием. Отклонение такого средства измерений от правильного положения может привести к прямому или косвенному искажению его показаний.

Рассмотрим в качестве одного из примеров равноплечие весы. Как известно, коромысло таких весов в средней своей части имеет призму, одно из ребер которой опирается на опору (подушку), укрепленную на станине. При правильном положении весов между ребром призмы и поверхностью подушки образуется линия касания, точнее ряд точек касания, расположенных на одной линии. Эта линия является осью качания подвижной части весов (коромысла с чашками и другими деталями). Некоторый наклон станины весов в плоскости качания подвижной части будет причиной смещения нулевого (начального) положения стрелки. Однако изменение направления наклона станины в ту или иную сторону от плоскости качания коромысла нарушит и точность, и устойчивость показаний. Для наглядности предположим, что станина наклонена в направлении, перпендикулярном к плоскости качания. Нетрудно представить себе, что ребро призмы будет соприкасаться с подушкой не по всей линии, а только в одной из крайних точек ребра. Характер качания коромысла изменится, будет неопределенным и может явиться причиной неправильного взвешивания.

Вредное влияние наклона сказывается и для ряда других средств измерений, таких, в конструкцию которых входит маятник, например, испытательные машины с маятниковым силоизмерителем) или другая подвешенная подвижная часть (например, гальванометры). В грузопоршневых манометрах отклонение цилиндра поршня от вертикального положения ведет к изменению направления вертикальной составляющей действующей силы.

Весы, как и многие другие средства измерений, снабжаются уровнями (отвесами или ватерпасами) для установки их в правильном положении.

Показания многих средств измерений могут искажаться только при заметном на глаз наклоне (5° , 10° и более), поэтому они не снабжаются уровнем. На показания других средств измерений изменение по-

ложения их в пространстве не оказывает никакого влияния. К их числу относятся, например, микрометры, штангенциркули, большинство мер и т. п.

5.2.1.4 Погрешности, возникающие вследствие внешних влияний

Эти погрешности являются следствием неучтенных внешних влияний. Эти влияния не учитываются по разным причинам: вследствие недостаточного знания свойств применяемой аппаратуры, вследствие того, что источник влияющей величины неизвестен оператору. В других случаях недооцениваются силы воздействия известных влияющих величин. Это могут быть тепловые и воздушные потоки, магнитные и электрические поля, изменения атмосферного давления, слишком высокая влажность воздуха, вибрации, часто не ощущаемые человеком, и т. п. Помехи могут создаваться рентгеновскими аппаратами, ионизирующими излучениями и т. п.

Наибольшую опасность представляют величины, действующие непрерывно в течение процесса измерения. Они вносят систематические погрешности, которые могут остаться незамеченными вследствие их неизменности. Изменения в действии влияющей величины, включение или выключение ее источника в течение процесса измерения в большинстве случаев отмечаются по неожиданным изменениям показаний средств измерений. Это всегда побуждает выявить причины изменений и неоднократно повторить измерения.

Влияние окружающей температуры. Окружающая температура может исказить результаты измерения и особенно при неравномерном воздействии на измерительные устройства или на объект измерения.

Источники направленного тепла (или холода) имеются почти повсюду: это печи, радиаторы центрального отопления или просто трубы с горячей водой, проходящие вблизи от места измерения; это окна – источник потока холодного воздуха зимой и теплого летом; расположенная рядом аппаратура, потребляющая значительную энергию, и т. п. Ряд средств измерений изменяет свои показания при одностороннем незначительном нагреве во много раз больше, чем при равномерном нагреве. Так, в точных весах, вследствие нагрева одного из плеч коромысла, появляется или изменяется ранее определенная неравноплечность. Э. д. с. нормального элемента существенно изменяется даже при незначительной разности температур двух его сообщающихся сосудов. Влияние на работу средства измерений может оказывать и неравномерность температурного поля помещения. Для точных измерений и проверок средств измерений часто выделяют сухие подвальные помещения, в которых

температуру в различные времена года удастся поддерживать постоянной или с очень незначительными колебаниями (в пределах 1 °С и меньше). Однако обследование таких помещений показало, что даже при большой устойчивости температуры на одном уровне разность температур у пола и на высоте человеческого роста иногда достигает нескольких градусов. Следовательно, разные части относительно высокого средства измерений или измерительной установки могут иметь различную температуру, что в течение длительного времени остается незамеченным.

Нередко тепло бывает причиной ошибочных измерений, если не учитывать, что тело, перенесенное в помещение с другой температурой, не сразу принимает температуру окружающего воздуха.

Процесс изменения температуры в металлах, находящихся в воздухе, был детально изучен на концевых мерах длины, которые, как известно, изготавливают из стали. Для мер разных размеров и разной точности установлено строго определенное время выдержки, после которой можно проводить измерения. Например, мера 2-го разряда длиной 100 мм должна выдерживаться до измерения при данной температуре не менее 1,5 ч.

Невнимательное отношение к учету влияния температуры окружающего воздуха бывает причиной ошибок и в измерении температуры. Так, влияние температуры окружающего воздуха на столбик ртути в термометре, выступающий над уровнем жидкости, температуру которой измеряют, настолько значительно, что даже при не очень точных измерениях бывает необходимо вносить поправку «на выступающий столбик ртути».

Влияние магнитных и электрических полей. Виды магнитных полей очень разнообразны – от постоянного магнитного поля Земли (нарушаемого магнитными бурями) до переменного магнитного поля, создаваемого близко расположенными электрическими установками и проводами. Влияние магнитного поля на показания измерительного устройства зависит как от принципа действия и конструкции его, так и от напряженности магнитного поля. Особо часто остаются незамеченными магнитные поля, создаваемые скрытыми проводами, например, расположенными за стеной.

Иногда не обращают внимания и на магнитные поля, создаваемые мощными трансформаторами и реостатами цилиндрической формы. Создают магнитные поля и электроизмерительными приборами, которые могут оказывать взаимное влияние, а также влиять на показания других измерительных приборов. Неверно было бы считать, что магнитные поля могут изменять показания только тех средств измерений, действие которых связано с магнитными и электромагнитными явлениями. Магнитное поле может влиять на показания любого средства измере-

ний, имеющего подвижные части из магнитного материала (сталь, никель).

Это влияние может выразиться в намагничивании этих частей и отклонении их от нормального положения под действием постороннего магнитного поля, например, магнитного поля Земли. Сильные магнитные поля могут вызвать намагничивание отдельных деталей и их взаимное притяжение. Достаточно вспомнить карманные и ручные часы. До тех пор, пока их тонкие спиральные пружинки («волоски») не начали изготавливать из антимагнитного материала, часы, попав под действие более или менее сильного магнитного поля, или начинали неверно показывать время, или останавливались совсем вследствие намагничивания пружинки и слипания отдельных ее витков.

В ряде средств измерений и до настоящего времени применяются спиральные пружинки из магнитных материалов и, следовательно, опасность вредного воздействия на них магнитного поля не исключается.

Особенно заметное действие электромагнитное поле оказывает на показания средств измерений в области высоких частот. Но даже при частоте 50 Гц при точных измерениях бывает нелегко освободиться от влияния посторонних полей, а также от вредного действия одних частей измерительной цепи на другие. Помехи возникают в результате влияния не только магнитных и электрических полей. При близком расположении отдельных частей цепи, приборов или проводов, выполняющих различные функции, между ними возникает электрическое поле, или, как ещё говорят, емкостная связь, которая также может исказить результаты измерений.

Вредное влияние магнитных и электрических полей на показания средств измерений возрастает с увеличением частоты переменного тока, создающего эти поля.

Влияние атмосферного давления и влажности воздуха. Атмосферное давление действует на характер протекания многих физических явлений, используемых в измерениях. Например, при более или менее точных измерениях температуры используются так называемые постоянные точки температурной шкалы. Для воспроизведения постоянных точек используют явления кипения и затвердевания (или плавления) ряда чистых химических элементов (кислорода, серы, серебра, золота) и соединений (воды). Известно, что в начале кипения, плавления или затвердевания вещество принимает определенную температуру, которая сохраняется постоянной до тех пор, пока вещество не перейдет в другую фазу (газообразную, жидкую или твердую). Эта температура находится в большой зависимости от атмосферного давления. Если точки затвердевания серы, серебра и других элементов не так уж часто используются в повседневной практике, то точкой плавления льда пользуются довольно часто. Но так как многие при этом не учитывают действитель-

ное атмосферное давление (а также ряд других влияющих факторов), использование явления таяния льда в качестве точки $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ оказывается значительно менее точным, чем это предполагается.

Влажность окружающего воздуха может оказаться причиной появления дополнительных погрешностей, если ее значение выходит за пределы установленных границ. Это влияние в ряде случаев связано с гигроскопичностью материалов, изменяющих свои геометрические размеры, электрическое сопротивление или другие свойства.

5.2.1.5 Погрешности метода измерения или теоретические погрешности

Если подходить строго, то во многих методах измерения можно обнаружить теоретические погрешности, являющиеся следствием тех или иных допущений или упрощений, применения эмпирических формул и функциональных зависимостей. В некоторых случаях влияние таких допущений оказывается незначительным, т. е. намного меньше, чем допускаемые погрешности измерений; в других оно превышает эти погрешности.

Примером погрешностей рассматриваемого вида являются погрешности метода измерений электрического сопротивления при помощи амперметра и вольтметра (рис. 5.4).

Если сопротивление r_x определять по формуле закона Ома $r_x = u/i_a$, где u – падение напряжения, измеренное вольтметром V ; i_a – сила тока, измеренная амперметром A , то в обоих случаях будут допущены теоретические погрешности.

На рисунке 5.4 а сила тока i_a , измеренная амперметром, будет больше силы тока в сопротивлении r_x на значение силы тока i_v в вольтметре, включенном параллельно сопротивлению. Сопротивление r_x , вычисленное с помощью приведенной формулы, окажется меньше действительного.

На рисунке 5.4 б напряжение, измеренное вольтметром V , окажется больше падения напряжения u_x в сопротивлении r_x на значение u_a (падение напряжения на сопротивлении амперметра A). Сопротивление, вычисленное по формуле закона Ома, окажется больше сопротивления r_x на значение r_a (сопротивление амперметра). Поправки в обоих случаях можно легко вычислить, если знать сопротивление вольтметра и амперметра. Поправки можно и не вносить, если они значительно меньше допускаемой погрешности измерения сопротивления r_x , например, если в первом случае сопротивление вольтметра значительно больше r_x , а во втором – значительно меньше r_x .

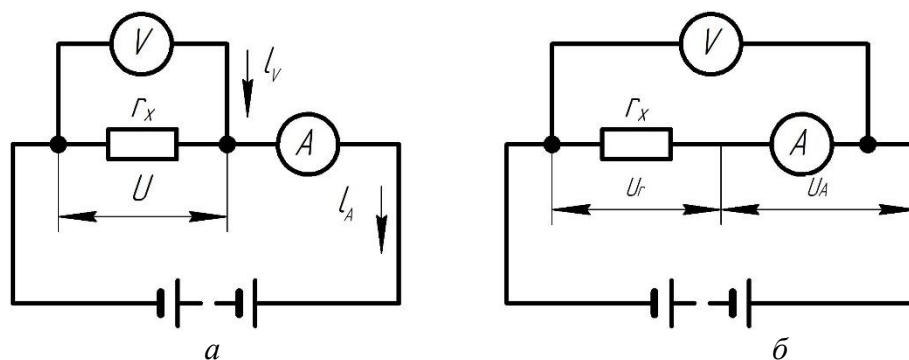


Рисунок 5.4 – Схемы измерения сопротивления:
а – при помощи амперметра, б – вольтметра

Другим примером является следующий. Гири обладают тем или иным объемом в зависимости от материала, из которого они изготовлены. Сила, с которой гиря давит на чашку весов, меньше истинного веса на вес вытесненного ею объема воздуха (по закону Архимеда). Возникающая при этом погрешность невелика, но при точных взвешиваниях с ней приходится считаться. При взвешивании предметов из материала, плотность которого равна плотности материала гирь, указанная погрешность не возникает.

Погрешности метода присущи всем тем методам измерений, которые основаны на данных опытов, быть может многочисленных, но не имеющих строго теоретического обоснования. В этих случаях связь измеряемого явления или свойства с принципом действия средства измерений не имеет строгой, теоретически доказанной зависимости.

Примером таких измерений является измерение твердости различных веществ и, в частности, металлов. Методы определения твердости металлов являются наиболее разработанными. Тем не менее «каждый из применяемых методов измеряет твердость в своих условных единицах и перевод этих единиц из одной шкалы в другую производится приближенно». Объясняется это тем, что для измерения твердости используются различные явления, предположительно характеризующие твердость.

Так, один из методов основан на измерении глубины погружения в испытуемый металл наконечника определенной формы (шарик или призма) под действием определенной силы, прилагаемой известной скоростью (метод Роквелла).

В основу остальных методов определения твердости положено измерение размеров отпечатка, оставленного наконечником, также при определенных условиях (методы Бринелля и Виккерса).

5.2.1.6 Субъективные систематические погрешности

Эти погрешности, как правило, являются следствием индивидуальных свойств человека, обусловленных особенностями его организма или укоренившимися неправильными навыками. Значение субъективной систематической погрешности наглядно показал интересный опыт французского ученого Николо. В проведении опыта участвовали опытный механик, молодой инженер, только кончивший высшее учебное заведение, и начинающий слесарь.

Каждый из них должен был на штангенциркуле с нониусом с ценой деления 0,02 мм установить заданное значение. Правильность установки штангенциркуля каждый раз определяли с помощью более точных приборов. Каждый опыт повторяли 100 раз.

Результаты оказались несколько неожиданными. Среднее арифметическое значение результатов измерений, проведенных опытным механиком, несколько отличалось от действительного, в то же время расхождения между отдельными результатами были очень небольшими. У молодого инженера оно было ближе к действительному, но разброс значений оказался большим. У неопытного слесаря среднее арифметическое значение совпало с действительным, однако разброс был очень большим. Результаты, полученные опытным механиком, казалось бы, должны заслуживать наибольшего доверия, но в выполненных им измерениях при очень хорошей воспроизводимости результатов обнаружилась постоянная устойчивая погрешность, явившаяся вероятнее всего следствием неверных навыков. Такую погрешность невозможно выявить ни путем многократных повторений измерения, ни путем вычисления среднего арифметического. В этом и заключается особая опасность систематических погрешностей.

В возникновении субъективных систематических погрешностей важную роль играет также скорость реакции на полученный сигнал. У разных лиц она различна, но у каждого в течение более или менее продолжительного времени достаточно устойчива. Так, время с момента подачи светового сигнала до момента ответного движения человека у разных лиц колеблется от 0,15 до 0,225 с. Скорость реакции человека на звуковой сигнал составляет 0,082 – 0,195 с.

Известный астроном Бессель сравнил точность определения времени по прохождению звезд, выполненного различными астрономами и им самим. Он установил, что между его данными и данными, полученными другими исследователями, имелись очень большие расхождения, причем довольно постоянные. Бессель пришел к выводу, что причина этих систематических погрешностей заключалась в различных скоростях реакции каждого из наблюдателей.

5.2.2 Учет и оценка погрешностей

5.2.2.1 Устранение источников погрешностей до начала измерения

Именно систематические, а не случайные погрешности бывали неоднократной причиной ошибочных научных выводов, установления ложных физических законов, неудовлетворительных конструкций средств измерений и брака продукции в производстве [38–41].

Способы исключения и учета систематических погрешностей можно разделить на четыре основные группы:

1. Устранение источников погрешностей до начала измерений (профилактика погрешностей).

2. Исключение погрешностей в процессе измерения (экспериментальное исключение погрешностей) способами замещения, компенсации погрешности по знаку, противопоставления, симметричных наблюдений.

3. Внесение известных поправок в результат измерения (исключение погрешностей вычислением).

4. Оценка границ систематических погрешностей, если их нельзя исключить.

Первый способ исключения систематических погрешностей является наиболее рациональным, так как он полностью или частично освобождает от необходимости устранять погрешности в процессе измерения или вычислять результат с учетом поправок. Другими словами, устранение источников погрешностей существенно упрощает и ускоряет процесс измерения.

Под устранением источника погрешностей следует понимать как непосредственное его удаление (например, удаление источника тепла), так и защиту измерительной аппаратуры и объекта измерения от влияния этих источников.

Источники инструментальных погрешностей, присущие данному экземпляру средства измерений, могут быть устранены до начала проведения измерений путем регулировки или ремонта, необходимость в которых устанавливается при поверке. Таким образом, можно сделать вывод, что до начала измерений (одиночных, серии или в течение определенного периода) необходимо поверять средства измерений. Вопрос о целесообразности ремонта или регулировки решается по результатам поверки.

Источники погрешностей, возникающих в результате неправильной установки, во многих случаях можно устранить до начала измерений.

Устранение влияния температуры. Чтобы предупредить появление температурной погрешности, широко применяют так называемое

термостатирование, т. е. обеспечение определенной температуры окружающей среды с теми или иными допускаемыми колебаниями. Термостатируют большие помещения (цеха, лаборатории), небольшие помещения (комнаты, камеры), средства измерений в целом или их отдельные части (катушки сопротивления, нормальные элементы, свободные концы термопар, кварцевые стабилизаторы частоты и т. п.).

В зависимости от жесткости требований, предъявляемых к температурному режиму, применяют различные способы термостатирования.

В первую очередь следует назвать естественное термостатирование, т. е. сохранение неизменной существующей в помещении температуры путем его теплоизоляции. Примером такого термостатирования могут служить некоторые помещения научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) в Санкт-Петербурге. Эти помещения расположены в центре здания и имеют массивные капитальные стены. Вокруг них идут широкие коридоры, образованные вторым рядом капитальных стен, за которыми следуют лабораторные и служебные помещения с наиболее массивными наружными стенами; окна здесь имеют тройные рамы. Батареи радиаторов водяного отопления расположены вдоль наружных стен. Благодаря такому устройству здания в его центральных помещениях сохраняется постоянная температура. Небольшие колебания температуры происходят очень медленно.

Чаще для создания термостатированного помещения используют подвалы, к которым предъявляется ряд требований (отсутствие сырости и т. п.). Чем глубже подвал, тем лучше в нем сохраняется естественное постоянство температуры и в меньшей степени требуется поддерживать ее искусственным путем.

Погружения в землю используются и для термостатирования малых объемов. Так, свободные концы термопар и начала идущих от них медных проводов нередко заключают в небольшие коробки, помещаемые в землю под полом здания.

Далеко не всегда удается естественным путем сохранить необходимый уровень температуры. Чаще прибегают к искусственному поддержанию температуры – подогреву или охлаждению.

При наличии электросети устройство подогревателей не вызывает больших трудностей. Значительно сложнее осуществить регулируемое охлаждение. Поэтому там, где это допускает измерительная аппаратура, стабилизируемый уровень температуры выбирают с таким расчетом, чтобы исключить необходимость охлаждения и пользоваться только подогревателями. Температуру стабилизируют на уровне 30–40 °С и выше.

При малых объемах применяют не только воздушное термостатирование, но и жидкостное, окружая измерительное устройство или измеряемый объект водой, маслом или другой жидкостью, которые суще-

ственно смягчают колебания температуры и облегчают поддержание ее на постоянном уровне.

Таковы в общих чертах пути устранения одного из наиболее опасных источников погрешностей – непостоянства температуры среды, окружающей измерительную аппаратуру и объект.

В настоящее время термостатирование во многих случаях заменяют кондиционированием воздуха. При кондиционировании обеспечивается поддержание на требуемом уровне не только температуры, но и других параметров окружающего воздуха и в первую очередь влажности.

Термостатирование, а также кондиционирование воздуха являются хорошей защитой и от направленного действия тепла. Однако неудачное расположение нагревателей в термостате или в термостатированной комнате, а также отсутствие устройств (мешалок и т. п.), обеспечивающих равномерное распределение тепла по всему объему, может само по себе стать источником погрешностей.

Во многих современных средствах измерений внутри корпуса находятся источники тепла. Например, мощность рассеивания во многих электронных измерительных устройствах достигает 1 кВт и более. Такие устройства до начала измерения, как правило, некоторое время прогревают.

Устранение влияния магнитных полей. Влияние магнитных полей далеко не всегда легко обнаружить. Различна также степень влияния полей на показания различных измерительных приборов. Рассмотрим меры, которые предпринимаются для устранения влияния магнитных полей.

Напряженность магнитного поля Земли невелика, поэтому опасность заметного его воздействия возникает только для приборов, отличающихся повышенной чувствительностью. Единственным средством защиты приборов от влияния магнитного поля Земли является устройство замкнутых и непрерывных экранов из магнитомягких материалов. Магнитные силовые линии должны огибать экранируемое пространство, небольшие разрывы в магнитной цепи экрана (неточно пригнанные стыки его частей) заметно ухудшают эффект экранирования.

В настоящее время экранирование от влияния магнитного поля Земли, а также и от магнитных полей, образованных постоянными и переменными токами, получило широкое распространение. Этому способствовало изобретение магнитомягких сплавов (пермаллой и др.) с большой начальной магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой.

Устройство магнитного экранирования даже при применении пермаллоя сопровождается нежелательными явлениями. Изменяя конфигурацию силовых линий внешнего магнитного поля, экран влияет и

на конфигурацию силовых линий внутреннего («рабочего») магнитного поля, что в ряде случаев влияет на показания средств измерений.

Следует иметь в виду, что экранирование не является полным и внешние магнитные поля все же могут влиять на экранированные измерительные устройства. В стандартах (ГОСТ 1845 и др.) установлены различные категории защиты от влияния внешних магнитных полей.

Несколько легче осуществляется экранирование от электромагнитных полей высокой частоты. В этом случае оказывается возможным и наиболее целесообразным применение материалов, обладающих высокой электропроводностью. Эффект достигается за счет вихревых токов и создаваемых ими встречных электромагнитных полей. К тому же такой экран лучше защищает механизм от электрических полей.

Устранение вредных вибраций и сотрясений. Эти влияния устраняют путем амортизации средства измерений и его деталей.

Для амортизации используют различного рода поглотители колебаний в зависимости от частоты этих колебаний и чувствительности средств измерений к этим влияниям, например, губчатую резину в сочетании с различного рода эластичными подвесами (струны, пружины) и т. п.

Устранение других видов вредных влияний. Влияние таких факторов, как изменение атмосферного давления, простыми средствами не устранимо. В тех случаях, когда соблюдение определенных требований является обязательным, приходится применять барокамеры с регулируемым давлением. Обычно в этих камерах должны одновременно регулировать влажность и температуру. Регулирование давления воздуха в помещениях при кондиционировании требует обязательной герметизации помещения, что существенно усложняет установку.

5.2.2.2 Исключение систематических погрешностей в процессе измерения

Исключение систематических погрешностей в процессе измерения является эффективным путем устранения ряда вредных влияний. При этом нет необходимости применять какие-либо специальные установки и приспособления. Как правило, это те или иные приемы измерений, позволяющие не только исключить погрешность, явившуюся следствием влияния, но и оценить его степень [13–14].

Исключению таким путем поддаются в основном инструментальные погрешности, погрешности от установки и погрешности внешних влияний.

Некоторые постоянные погрешности субъективного характера можно исключить в процессе измерения только путем проведения повторных измерений несколькими лицами.

Характерным для рассматриваемых ниже способов устранения погрешностей в процессе измерения является необходимость проведения повторных измерений, поэтому они применимы в основном при измерениях стабильных параметров и явлений.

Способ замещения является одним из наиболее распространенных способов исключения погрешностей. Он заключается в том, что измеряемый объект заменяют известной мерой, находящейся при этом в тех же условиях, в каких находился он сам. Рассмотрим несколько наиболее типичных примеров применения способа замещения.

Точные взвешивания часто производят по способу Борда, заключающемуся в следующем. На одну чашку весов кладут взвешиваемую массу. Весы приводят в равновесие, накладывая на другую чашку какой-либо груз, который в процессе измерения не изменяется (негигроскопичный, неиспаряющийся и т. п.), например дробь. Когда равновесие достигнуто, взвешиваемую массу снимают и на ее место ставят гири до достижения равновесия. Суммарное значение массы гирь, потребовавшихся для восстановления равновесия, соответствует значению взвешиваемой массы. Таким образом достигается исключение из результата взвешивания погрешности, возникшей из-за неравноплечести весов.

Этот способ усовершенствовал Д. И. Менделеев. На чашку весов, предназначенную для взвешиваемой массы, устанавливают полный комплект гирь и уравнивают весы произвольным грузом. Затем на чашку с гирями помещают взвешиваемую массу и снимают часть гирь для восстановления равновесия. Суммарное значение массы снятых гирь соответствует значению взвешиваемой массы.

Такой вариант способа замещения позволяет не только исключить погрешность от неравноплечести весов, но и сохранить неизменной их чувствительность при взвешивании различных масс. Чувствительность рычажных весов в большей или меньшей степени зависит от нагрузки, вследствие чего постоянная чувствительность может быть обеспечена только при одной нагрузке. В настоящее время выпускаются лабораторные весы, построенные по этому принципу, в которых гири снимаются с помощью рычагов, управляемых снаружи и имеющих шкалы для отсчета значений массы снятых гирь.

Широко используется способ замещения при измерениях электрических параметров – сопротивления, емкости и индуктивности. Порядок проведения измерения в принципе тот же, что и при взвешивании.

Объект, электрическое сопротивление, индуктивность или емкость которого требуется измерить, включают в ту или иную измерительную цепь. В большинстве случаев при этом пользуются нулевыми

методами (мостовые, компенсационные и др.), при которых производится электрическое уравнивание цепи.

После уравнивания вместо измеряемого объекта, не изменяя схемы, включают меру переменного значения: магазин сопротивления, емкости, индуктивности; переменный конденсатор или индуктивность. Изменяя их значение, добиваются восстановления равновесия цепи. В этом случае способ замещения позволяет исключить остаточную неуравновешенность мостовых цепей, влияние на цепь магнитных и электрических полей, взаимные влияния отдельных элементов цепи, а также утечек и других паразитных явлений.

В качестве еще одного примера можно привести определение характеристик источников света путем сличения с образцовыми лампами накаливания при помощи фотометра. В фотометре наблюдают (визуально или при помощи фотоэлементов) два расположенных рядом белых поля, одно из которых освещается исследуемым источником света, а другое – так называемой лампой сравнения. Путем регулирования добиваются одинаковой освещенности обоих полей. Затем на место исследуемого источника света устанавливают образцовую лампу и, не меняя регулировки лампы сравнения, добиваются восстановления равной освещенности обоих полей фотометра. В данном случае способ замещения позволяет исключить влияние разной степени поглощения света в обоих световых каналах фотометра.

Приведенные примеры не исчерпывают возможности использования способа замещения для устранения ряда погрешностей, возникающих при измерениях.

Способ компенсации погрешности по знаку заключается в том, что измерение проводят дважды так, чтобы известная по природе, но неизвестная по размеру погрешность входила в результаты с противоположными знаками. Погрешность исключается при вычислении среднего значения. В алгебраической форме это можно выразить следующим образом.

Пусть x_1 и x_2 – результаты двух измерений; Δ – систематическая погрешность, природа которой известна, но неизвестно ее значение; x_0 – значение измеряемой величины, свободное от данной погрешности.

Тогда

$$x_1 = x_0 + \Delta; \quad x_2 = x_0 - \Delta.$$

Среднее значение равно

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{(x_0 + \Delta) + (x_0 - \Delta)}{2} = x_0. \quad (5.2)$$

Когда с целью повышения точности результата и оценки ее уровня выполняют ряд повторных измерений, то для исключения указанной погрешности необходимо провести обязательно четное число измерений, чтобы все погрешности, положительные по знаку, уравнивались равным числом отрицательных погрешностей. Этот способ применяется ограниченно. Его используют для исключения только таких погрешностей, источники которых имеют направленное действие.

Одним из характерных примеров способа компенсации является исключение погрешности, обусловленной влиянием магнитного поля Земли. Этот способ применяется, если для измерения используют средство измерений, о котором известно (или предполагается), что под действием магнитного поля Земли в его показаниях могут возникнуть погрешности.

Первое измерение можно проводить, когда средство измерений находится в любом положении. Перед тем, как выполнить второе измерение, средство измерений поворачивают в горизонтальной плоскости на 180° . Если в первом случае магнитное поле Земли, складываясь с полем средства измерений, вызывает положительную погрешность, то при повороте его на 180° магнитное поле Земли будет оказывать противоположное действие и вызовет отрицательную погрешность по размеру, равную первой.

Применять способ компенсации погрешности по знаку для исключения погрешностей, вызванных влиянием магнитных полей другого происхождения, можно, но с большей осторожностью. Следует иметь в виду, что поля от источников, даже не очень близко расположенных, неравномерны. Та часть средства измерений, на которую действует магнитное поле, может оказаться расположенной в другой его точке. Погрешность, вызванная влиянием магнитного поля, в этом случае изменится не только по знаку, но и по размеру. Кроме того, постороннее магнитное поле может изменяться во времени. Описываемый способ может быть, безусловно, полезен для обнаружения влияния магнитного поля на средства измерений. Путем неоднократного повторения можно также установить, являются ли эти влияния постоянными и устойчивыми или нет.

Пользуясь способом компенсации погрешности по знаку, можно исключить погрешности, вызванные явлениями гистерезисного характера (магнитный гистерезис в ферромагнитных материалах, механический гистерезис в упругих материалах и т. п.).

Способ противопоставления имеет большое сходство со способом компенсации погрешности по знаку. Он заключается в том, что измерения проводят два раза, причем так, чтобы причина, вызывающая погрешность, при первом измерении оказала противоположное действие на результат второго.

В качестве примера может служить взвешивание на равноплечих весах (способ, предложенный Гауссом для исключения погрешности вследствие остаточной неравноплечести).

При первом взвешивании массу x , помещенную на одну чашку весов, уравнивают гири с общей массой m_u , помещенными на другую чашку.

Тогда

$$x = \frac{l_2}{l_1} m_1, \quad (5.3)$$

где l_2/l_1 – действительное отношение плеч.

Затем взвешиваемую массу перемещают на ту чашку, где находились гири, а гири – на ту, где находилась масса. Так как отношение плеч не точно равно единице, равновесие нарушится, и для уравнивания массы x придется использовать гири с общей массой:

$$m_2 = \frac{l_2}{l_1} x. \quad (5.4)$$

Разделив равенство (5.3) на выражение (5.4), получим

$$x = \sqrt{m_1 m_2}$$

или, если m_1 и m_2 лишь немногим отличаются друг от друга

$$x = \frac{m_1 + m_2}{2}.$$

Это выражение и равенство (5.2) одинаковы. Однако равенство (5.2), получаемое для способа компенсации погрешности по знаку, точно отражает сущность исключения погрешности. В данном же случае формула является приближенной.

Если сравнить оба способа в их математическом выражении, то можно обнаружить, что в способе компенсации погрешности по знаку погрешность, подлежащая исключению, входит в результат в качестве слагаемого (в алгебраическом смысле), а не в виде коэффициента.

Характерная особенность способа противопоставления заключается в том, что он позволяет также определять действительное отношение плеч. Так, если в примере со взвешиванием по способу Гаусса перемножить равенства (5.3) и (5.4), получим

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1}} \approx 1 + \frac{m_2 - m_1}{2m_1}.$$

Основная область приложения способа противопоставления – исключение погрешностей при сравнении измеряемой величины с мерой примерно равного значения.

Способ противопоставления применяется, например, в равноплечих мостах для измерения параметров электрических цепей главным образом при измерении электрического сопротивления на постоянном токе.

Способ симметричных наблюдений применяется для исключения прогрессивной погрешности, являющейся линейной функцией времени (или другой величины). Такая функция может быть изображена в виде графика (рис. 5.2). По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – прогрессивная погрешность. В зависимости от свойств измерительных приборов, прогрессивная погрешность может расти с момента первого измерения. Тогда она появится при втором, третьем и всех последующих измерениях. Однако смещение величины, воспринимаемой прибором, может начаться еще до первого измерения. Тогда результат первого измерения будет уже содержать прогрессивную погрешность.

Способ симметричных наблюдений заключается в том, что измерения производят последовательно через одинаковые интервалы времени. При обработке используют свойство результатов любых двух наблюдений, симметричных относительно средней точки интервала наблюдений.

Это свойство состоит в том, что погрешности результатов любой пары симметричных наблюдений равно погрешности, соответствующей средней точке интервала.

Например, было произведено пять измерений. Они были начаты в момент t_1 (см. рис. 5.5), когда погрешность имела значение τ_1 . Нетрудно показать, что

$$\frac{\tau_1 + \tau_5}{2} = \frac{\tau_2 + \tau_4}{2} = \tau_3.$$

Число измерений может быть и четным.

Тогда

$$\frac{\tau_1 + \tau_6}{2} = \frac{\tau_2 + \tau_5}{2} = \frac{\tau_3 + \tau_4}{2}.$$

При трех измерениях (минимальное число измерений) и при начальной погрешности, равной нулю, вычисления упрощаются.

Рассмотрим пример применения способа симметричных наблюдений при взвешивании по способу Борда (способ замещения), когда первоначальная неравноплечность прогрессивно возрастает.

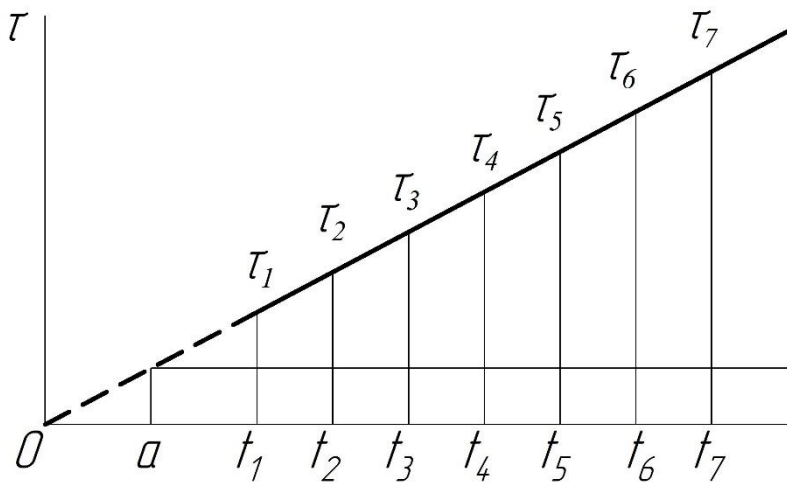


Рисунок 5.5 – График прогрессивной погрешности

Производят четыре взвешивания:

1. Взвешиваемую массу x уравнивают массой z . Пусть по графику (см. рис. 5.5) это соответствует точке t_1 :

$$x = \left(\frac{l_2}{l_1} + \tau_1 \right) z,$$

где l_2/l_1 – отношение плеч данных весов, когда на них не действует причина, вызывающая прогрессивную погрешность.

2. Снимают массу x и уравнивают массу z гирями (общую массу их обозначим m_1). Произойдет это в момент времени t_2 :

$$m_1 = \left(\frac{l_2}{l_1} + \tau_2 \right) z.$$

3. Производят повторное уравнивание так, чтобы отсчет значения массы уравнивающих гирь был выполнен в момент времени t_3 , когда погрешность достигнет значения τ_3 .

В результате общая масса гирь m_2 , уравнивающих массу z , изменится:

$$m_2 = \left(\frac{l_2}{l_1} + \tau_3 \right) z.$$

4. Снимают гири и кладут на чашку взвешиваемую массу x . Так как неравноплечность изменилась и к моменту t_4 погрешность достигла значения τ_4 , для получения равновесия на одну из чашек приходится добавлять некоторую массу в виде гирь, масса которых известна:

$$x \pm m = \left(\frac{l_2}{l_1} + \tau_4 \right) z.$$

Знак «плюс» перед m указывает, что эта масса добавлена на чашку с массой x , знак «минус», – что она добавлена на чашку массой z .

Среднее из результатов первого и четвертого взвешиваний равно:

$$x \pm \frac{m}{2} = \left(\frac{l_2}{l_1} + \frac{\tau_1 + \tau_4}{2} \right) z \quad (5.5)$$

Для второго и третьего взвешиваний:

$$\frac{m_1 + m_2}{2} = \left(\frac{l_2}{l_1} + \frac{\tau_2 + \tau_3}{2} \right) z. \quad (5.6)$$

Так как средние значения погрешностей результатов пар симметричных измерений равны между собой:

$$\frac{\tau_1 + \tau_4}{2} = \frac{\tau_2 + \tau_3}{2}.$$

Правые части равенств (5.5) и (5.6) также равны между собой. Следовательно, и левые части этих равенств также равны

$$\left. \begin{aligned} x \pm \frac{m}{2} &= \frac{m_1 + m_2}{2} \\ x &= \frac{m_1 + m_3 \pm m}{2} \end{aligned} \right| \quad (5.7)$$

Исключенной оказалась не только прогрессивная погрешность, обусловленная изменением неравноплечности, но и постоянная погрешность от неравноплечности ($l_2/l_1 \neq 1$).

Как уже указывалось, одной из причин прогрессивной погрешности электрических измерений может быть постепенное падение напряжения аккумуляторов или батарей, питающих измерительную цепь.

Способом симметричных наблюдений рекомендуют пользоваться тогда, когда возможность существования прогрессивной погрешности

не очевидна. Ряд измерений, проведенных в указанном порядке в сочетании с тем или иным способом исключения постоянной погрешности, позволит выявить и исключить прогрессивную погрешность, если она имеется.

5.2.2.3 Метод рандомизации и графический метод

Метод рандомизации – наиболее универсальный способ исключения неизвестных постоянных систематических погрешностей. Суть его состоит в том, что одна и та же величина измеряется различными методами (приборами). Систематические погрешности каждого из них для всей совокупности являются разными случайными величинами. Вследствие этого при увеличении числа используемых методов (приборов) систематические погрешности взаимно компенсируются.

Для устранения переменных и монотонно изменяющихся систематических погрешностей применяют следующие приемы и методы.

Графический метод. Он является одним из наиболее простых способов обнаружения переменной систематической погрешности в ряду результатов наблюдений и заключается в построении графика последовательности неисправленных значений результатов наблюдений. На графике, через построенные точки, проводят плавную кривую, которая выражает тенденцию результата измерения, если она существует. Если тенденция не прослеживается, то переменную систематическую погрешность считают практически отсутствующей.

5.2.2.4 Специальные статистические методы

К ним относятся способ последовательных разностей, дисперсионный анализ и др. Рассмотрим подробнее некоторые из них [1–26].

Способ последовательных разностей (критерий Аббе). Применяется для обнаружения изменяющейся во времени систематической погрешности и состоит в следующем. Дисперсию результатов наблюдений можно оценить двумя способами: обычным

$$\sigma^2[x] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

и вычислением суммы квадратов последовательных (в порядке проведения измерений) разностей $(x_{i-1} - x_i)^2$

$$Q^2[x] = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2$$

Если в процессе измерений происходило смещение центра группирования результатов наблюдений, т. е. имела место переменная систематическая погрешность, то $\sigma^2[x]$ дает преувеличенную оценку дисперсии результатов наблюдений. Это объясняется тем, что на $\sigma^2[x]$ влияют вариации $\bar{x}$. В то же время изменения центра группирования $\bar{x}$ весьма мало сказываются на значениях последовательных разностей $d_i = x_{i+1} - x_i$ поэтому смещения $\bar{x}$ почти не отразятся на значении $Q^2[x]/\sigma^2[x]$.

Отношение $v = Q^2[x]/\sigma^2[x]$ является критерием для обнаружения систематических смещений центра группирования результатов наблюдений. Критическая область для этого критерия (критерия Аббе) определяется как $P(v < v_q) = q$, где $q = 1 - P$ – уровень значимости, P – доверительная вероятность. Значения v_q для различных уровней значимости q и числа наблюдений n приведены в таблице 5.1. Если полученное значение критерия Аббе меньше v_q при заданных q и n , то гипотеза о постоянстве центра группирования результатов наблюдений отвергается, т. е. обнаруживается переменная систематическая погрешность результатов измерений.

Таблица 5.1 – Значения v_q для различных уровней значимости q и числа наблюдений n

n	v_q при q , равном			n	v_q при q , равном		
	0,001	0,01	0,05		0,001	0,01	0,05
4	0,295	0,313	0,390	13	0,295	0,431	0,578
5	0,208	0,269	0,410	14	0,311	0,447	0,591
6	0,182	0,281	0,445	15	0,327	0,461	0,603
7	0,185	0,307	0,468	16	0,341	0,474	0,614
8	0,202	0,331	0,491	17	0,355	0,487	0,624
9	0,22	0,354	0,512	18	0,368	0,499	0,633
10	0,241	0,376	0,531	19	0,381	0,510	0,642
11	0,260	0,396	0,548	20	0,393	0,520	0,650
12	0,278	0,414	0,564				

Пример. Используя способ последовательных разностей, определить, присутствует ли систематическая погрешность в ряду результатов наблюдений, приведенных во втором столбце таблицы 5.2.

Для приведенного ряда результатов вычисляем: среднее арифметическое $\bar{x} = 154,0/11 = 14$; оценка дисперсии $\sigma^2[x] = 2,58/10 = 0,258$;

значение $Q^2[x] = 4,12/(2 \cdot 10) = 0,206$; критерий Аббе $v = 0,206/0,258 = 0,8$.

Как видно из табл. 5.1, для всех уровней значимости ($q = 0,001$; $0,01$ и $0,05$) при $n = 11$ имеем $v > v_q$, т. е. подтверждается нулевая гипотеза о постоянстве центра группирования. Следовательно, условия измерений для приведенного ряда оставались неизменными и систематических расхождений между результатами наблюдений нет.

Таблица 5.2 – Результаты наблюдений

n	x_i	$d_i = x_{i+1} - x_i$	d_i^2	$v_i = x_i - \bar{x}$	v_i^2
1	13,4	-	-	-0,6	0,36
2	13,3	-0,1	0,01	-0,7	0,49
3	14,5	+ 1,2	1,44	+0,5	0,25
4	13,8	-0,7	0,49	-0,2	0,04
5	14,5	+0,7	0,49	+0,5	0,25
6	14,6	+ 0,1	0,01	+0,6	0,36
7	14,1	-0,5	0,25	+0,1	0,01
8	14,3	+ 0,2	0,04	+0,3	0,09
9	14,0	+ 0,3	0,09	0,0	0,0
10	14,3	+0,3	0,09	+0,3	0,09
11	13,2	-1,1	1,21	-0,8	0,64
Σ 154,0		-0,2	4,12	0,0	2,58

Дисперсионный анализ (критерий Фишера). В практике измерений часто бывает необходимо выяснить наличие систематической погрешности результатов наблюдений, обусловленной влиянием какого-либо постоянно действующего фактора, или определить, вызывают ли изменения этого фактора систематическое смещение результатов измерений. В данном случае проводят многократные измерения, состоящие из достаточного числа серий, каждая из которых соответствует определенным (пусть неизвестным, но различным) значениям влияющего фактора. Влияющими факторами, по которым производится объединение результатов наблюдений по сериям, могут быть внешние условия (температура, давление и т. д.), временная последовательность проведения измерений и т. п.

После проведения N измерений их разбивают на s серий ($s > 3$) по r_j результатов наблюдений ($sn_j = N$) в каждой серии и затем устанавливают, имеется или отсутствует систематическое расхождение между результатами наблюдений в различных сериях. При этом должно быть установлено, что результаты в сериях распределены нормально. Рассеяние результатов наблюдений в пределах каждой серии отражает только случайные влияния, характеризует лишь случайные погрешности измерений в пределах этой серии.

Характеристикой совокупности случайных внутрисерийных погрешностей будет средняя сумма дисперсий результатов наблюдений, вычисленных раздельно для каждой серии, т. е.

$$\sigma_{\text{вс}}^2[x] = \frac{1}{n-s} \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2,$$

где $\bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ji}$; x_{ji} – результат i -го измерения в j -й серии.

Внутрисерийная дисперсия $\sigma_{\text{вс}}^2[x]$ характеризует случайные погрешности измерений, так как только случайные влияния обуславливают те различия (отклонения результатов наблюдений), на которых она основана. В то же время рассеяние $\bar{x}_j$ различных серий обуславливается не только случайными погрешностями измерений, но и систематическими различиями (если они существуют) между результатами наблюдений, сгруппированными по сериям. Следовательно, усредненная межсерийная дисперсия

$$\sigma_{\text{мс}}^2[x] = \frac{1}{s-1} \sum_{j=1}^s n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2,$$

где $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^s n_j \bar{x}_j$ выражает силу действия фактора, вызывающего систематические различия между сериями.

Таким образом, $\sigma_{\text{вс}}^2 / (\sigma_{\text{вс}}^2 + \sigma_{\text{мс}}^2)$ характеризует долю дисперсии всех результатов наблюдений, обусловленную наличием случайных погрешностей измерений, а $\sigma_{\text{мс}}^2 / (\sigma_{\text{вс}}^2 + \sigma_{\text{мс}}^2)$ – долю дисперсии, обусловленную межсерийными различиями результатов наблюдений.

Первую из них называют *коэффициентом ошибки*, вторую – *показателем дифференциации*. Чем больше отношение показателя дифференциации к коэффициенту ошибки, тем сильнее действие фактора, по которому группировались серии, и тем больше систематическое различие между ними.

Критерием оценки наличия систематических погрешностей в данном случае является дисперсионный критерий Фишера $F = \sigma_{\text{мс}}^2 / \sigma_{\text{вс}}^2$. Критическая область для критерия Фишера соответствует $P(F > F_q) = q$.

Значения F_q для различных уровней значимости q , числа измерений N и числа серий s приведены в приложении В, где $k_2 = N - s$, $k_1 = s - 1$. Если полученное значение критерия Фишера больше F_q (при заданных q , N и s), то гипотеза об отсутствии систематических смеще-

ний результатов наблюдений по сериям отвергается, т. е. обнаруживается систематическая погрешность, вызываемая тем фактором, по которому группировались результаты наблюдений.

Пример. Было сделано 38 измерений диаметра детали восемью различными штангенциркулями. Каждым из них проводилось по пять измерений. Внутрисерийная дисперсия равна $0,054 \text{ мм}^2$, межсерийная – $0,2052 \text{ мм}^2$. Определить наличие систематической погрешности измерения диаметра детали.

Расчетное значение критерия Фишера $F = 0,2052/0,054 = 3,8$. Для $s - 1 = 7$, $N - s = 30$ по таблице В.3 приложения В имеем при $q = 0,05$ $F_{0,05} = 2,3$ и при $q = 0,01$ $F_{0,01} = 3,3$. Полученное значение F больше, чем 2,2 и 2,9. Следовательно, в результатах наблюдений обнаруживается наличие систематических погрешностей.

Из всех рассмотренных способов обнаружения систематических

Таблица 5.3 – Критические значения T_q^- и T_q^+ при $q = 0,05$ и $0,01$

n	m	$q = 0,05$		$q = 0,01$	
		T_q^-	T_q^+	T_q^-	T_q^+
8	8	49	87	43	93
	10	53	99	47	105
	15	65	127	56	136
9	9	62	109	56	115
	15	79	146	69	156
10	10	78	132	71	139
	15	94	166	84	176
12	12	115	185	105	195
	15	127	209	115	221
14	14	160	246	147	259
	15	164	256	151	268
15	15	184	282	171	294

погрешностей дисперсионный анализ является наиболее эффективным и достоверным, так как позволяет не только установить факт наличия погрешности, но и дает возможность проанализировать источники ее возникновения.

Критерий Вилкоксона. Если закон распределения результатов измерений неизвестен, то для обнаружения систематической погрешности применяют статистический критерий Вилкоксона.

Из двух групп результатов измерений $x_1, x_2, \dots, x_n$ и $y_1, y_2, \dots, y_m$, где $n \geq m \geq 5$, составляется вариационный ряд, в котором все $n + m$ значений $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m$, располагают в порядке их возрастания и приписывают

им ранги – порядковые номера членов вариационного ряда. Различие средних значений каждого из рядов можно считать допустимым, если выполняется неравенство

$$T_q^- < \sum_{i=1}^n R_i < T_q^+$$

где R_i – ранг (номер) члена x_i , равный его номеру в вариационном ряду; T_q^- и T_q^+ – нижнее и верхнее критические значения для выбранного уровня значимости q . При $m < 15$ эти критические значения определяются по таблице 5.3. При $m > 15$ они рассчитываются по формулам:

$$T_q^- = \frac{n(n+m+1)}{2} - z_p \sqrt{\frac{nm(n+m+1)}{12}};$$

$$T_q^+ = \frac{n(n+m+1)}{2} + z_p \sqrt{\frac{nm(n+m+1)}{12}}$$

где z_p – квантиль нормированной функции Лапласа.

Более полная таблица значений критических значений T_q^- и T_q^+ приведена в рекомендации МИ 2091-90 «ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования».

5.2.2.5 Исключение систематических погрешностей путем введения поправок

В ряде случаев систематические погрешности могут быть вычислены и исключены из результата измерения. Для этого используются поправки. *Поправка* – величина, одноименная измеряемой, которая вводится в результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности. Поправки определяются экспериментально или в результате специальных теоретических исследований. Они задаются в виде таблиц, графиков или формул. Введением одной поправки устраняется влияние только одной составляющей систематической погрешности. Для устранения всех составляющих в результат измерения приходится вводить множество поправок. При этом вследствие ограниченной точности определения поправок случайные погрешности результата измерения накапливаются и его дисперсия увеличивается. Так как поправка известна с определенной точностью, то она характеризуется статистически – средним значением поправки.

В ряде случаев исключение систематических погрешностей оказывается практически невозможным. Прежде всего это относится к методам измерений, систематические погрешности которых недостаточно изучены. Кроме того, есть большая группа средств измерений, систематические погрешности которых изучены, поддаются измерению и определению, однако не могут быть использованы для внесения поправок в результаты измерений. Это – группа интегрирующих средств измере-

ний, чаще всего носящих наименование счетчиков. Вернее, поправки в показания счетчиков можно вносить только в некоторых, очень ограниченных случаях, не характерных для условий их применения и назначения.

5.3 Вопросы для самоконтроля

1. Чем истинное значение физической величины отличается от действительного?
2. Дайте определение понятию «погрешность результата измерения».
3. Дайте определение понятию «погрешность средства измерения».
4. На какие виды делятся погрешности в зависимости от характера проявления?
5. Изобразите график изменения случайной погрешности от измерения к измерению.
6. Каким образом можно уменьшить случайные погрешности?
7. Дайте определение и проиллюстрируйте понятия постоянной и переменной систематической погрешности.
8. Назовите отличительные особенности прогрессирующих (дрейфовых) погрешностей.
9. Дайте определение понятию «грубая погрешность (промах)».
10. Как классифицируются погрешности по способу выражения?
11. Чем друг от друга отличаются абсолютная, относительная и приведенная погрешности?
12. На какие виды делятся погрешности в зависимости от места возникновения?
13. Чем обуславливается методическая погрешность измерения?
14. Чем обуславливается субъективная погрешность измерения?
15. Как классифицируются погрешности по зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины?
16. Проиллюстрируйте понятия аддитивной, мультипликативной и нелинейной погрешности.
17. На какие виды делятся характеристики погрешности?
18. Сформулируйте правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного результата измерения.
19. Влияние каких факторов должно учитываться в метрологической практике при оценке систематических погрешностей?
20. Как классифицируются систематические погрешности по характеру изменения во времени?

21. Как классифицируются систематические погрешности по причинам возникновения?
22. На какие виды делятся инструментальные погрешности?
23. Приведите примеры инструментальных погрешностей, присущих данной конструкции.
24. Приведите примеры инструментальных погрешностей, являющихся следствием несовершенства или неправильности технологии изготовления средств измерений.
25. Охарактеризуйте инструментальные погрешности, являющиеся следствием износа, старения или неисправности средств измерений.
26. Как процессы старения материала влияют на инструментальные погрешности?
27. Приведите примеры погрешностей, возникающих в результате неправильной установки средств измерений.
28. Перечислите известные Вам причины погрешностей, возникающих вследствие внешних влияний.
29. Охарактеризуйте и приведите примеры погрешностей, возникающих под влиянием окружающей температуры.
30. Охарактеризуйте и приведите примеры погрешностей, возникающих из-за влияния магнитных и электрических полей.
31. Охарактеризуйте и приведите примеры погрешностей, возникающих под влиянием атмосферного давления и влажности воздуха.
32. Приведите примеры погрешностей метода измерения или теоретические погрешности.
33. Приведите примеры субъективных систематических погрешностей.
34. Перечислите известные Вам способы исключения и учета систематических погрешностей.
35. Опишите способы устранения влияния температуры на погрешность измерения.
36. Опишите способы устранения влияния магнитных полей на погрешность измерения.
37. Опишите способы устранения вредных вибраций и сотрясений на погрешность измерения.
38. Перечислите известные Вам способы исключения систематических погрешностей в процессе измерения.
39. В чем суть способа замещения для исключения систематических погрешностей в процессе измерения?
40. В чем суть способа компенсации погрешности по знаку для исключения систематических погрешностей в процессе измерения?
41. В чем суть способа противопоставления для исключения систематических погрешностей в процессе измерения?
42. В чем суть способа симметричных наблюдений для исключения систематических погрешностей в процессе измерения?

43. Опишите метод рандомизации и графический метод для исключения систематических погрешностей.
44. Перечислите известные Вам специальные статистические методы для исключения систематических погрешностей.
45. В чем суть критерия Аббе для исключения систематических погрешностей?
46. В чем суть дисперсионного анализ (критерия Фишера) для исключения систематических погрешностей?
47. В чем суть критерия Вилкоксона для исключения систематических погрешностей?
48. В каких случаях невозможно исключить систематические погрешности?

6 СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ. ГРУБЫЕ ПОГРЕШНОСТИ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1 Вероятностное описание случайных погрешностей

6.1.1 Дискретные случайные величины

Вероятность события является количественной оценкой объективной возможности его появления. Вероятность достоверного события равна 1, а вероятность невозможного события – 0. Эти события неслучайные. События, вероятности появления которых больше нуля и меньше единицы, являются событиями случайными.

Определить вероятности подсчетом оказывается возможным лишь в немногих случаях (бросание кубика). Гораздо чаще применяют статистический метод определения вероятности события. Вопросами статистических методов обработки результатов наблюдений занимается математическая статистика, опирающаяся на основные положения теории вероятностей. Дискретной (или непрерывной) случайной величиной называют такую величину, возможные значения которой представляют собой конечную или бесконечную последовательность чисел. Например, возможное число очков при бросании кости, т. е. 1; 2; 3; 4; 5; 6, возможное число попаданий стрелка в цель при ста выстрелах: 0; 1; 2; 3;...; 99; 100; возможное число горошин в одном килограмме: 500; 501; 502; ...; 1998; 1999; 2000 и т. д.

Число возможных выстрелов вообще, а следовательно, и число попаданий, неограниченно; неограниченно и число килограммов гороха вообще и число горошин в 1 кг, но промежутки между значениями дискретных величин не заполнены. При бросании кости не может выпасть $2^{1/2}$ или $3^{1/4}$ очка, как не может быть $4^{1/2}$ выстрела и $2^{1/2}$ попадания и т. д.

Возможные значения непрерывных величин заполняют любой промежуток без каких-либо разрывов или скачков. Например, непрерывными величинами являются длина отрезка линии, промежуток времени, интервал температуры и т. д. Необходимо отметить, что граница между дискретными и непрерывными величинами далеко не так определена, как это может показаться на первый взгляд. Действительно, некоторое количество воды может рассматриваться как величина непрерывная. Но вода состоит из отдельных молекул, и количество ее может отличаться одно от другого только на целое число молекул, т. е. если бы мы могли считать молекулы, количество воды нужно было бы рассматривать как прерывную (дискретную) величину.

Большинство измеряемых величин мы считаем непрерывными. В ряде случаев это связано с недостаточной чувствительностью имеющихся средств измерения, которые не дают возможности проводить измерения путем счета отдельных частиц, как в примере с измерением количества воды. Иногда мы стремимся повысить точность измерения, чтобы в числовом выражении результата измерения получить больше знаков. Если измеряемая величина по своей природе дискретна, то достижимая точность измерения ограничивается размером элементарной частицы данной величины, например, размером молекулы воды. В других же случаях такое повышение точности нам и не требуется.

С другой стороны, непрерывные величины иногда представляют искусственно как дискретные, т. е. изменяющиеся равными ступенями. Эти величины измеряют путем счета этих ступеней. От каждой ступени получают импульс, перемещающий счетчик импульсов на одну единицу. При этом мы продолжаем считать измеряемую величину непрерывной.

Мы можем повышать точность измерения, уменьшая размер ступеней измеряемой величины. Уменьшение размера ступеней возможно до такого положения, когда ступени станут равными элементарным частицам измеряемой величины, т. е. обнаружится природная дискретность величины.

Для полной характеристики дискретной случайной величины необходимо и достаточно знать возможные ее значения и вероятность каждого из этих значений. В примере с игральной костью число очков, выпадающее при бросании, является дискретной случайной величиной. Ниже указано распределение этой величины (табл. 6.1.).

Таблица 6.1 –
Распределение дискретной
случайной величины.

Очки	Вероятность
0	0
1	1/6
2	1/6
3	1/6
4	1/6
5	1/6
6	1/6
7	0

При бросании двух костей одновременно сумма очков может принимать значения от 2 до 12. Вероятность разных значений суммы будет различна. Например, сумма 2 может получиться только при одной комбинации, сумма 3 – при двух (1 + 2, 2 + 1), сумма 4 – при трех (1 + 3, 2 + 2, 3 + 1) и т. д. Как видно из таблицы 6.2, число всех возможных комбинаций равно 36. Соответствующие вероятности появления каждого из возможных значений суммы очков приведены в третьей графе таблицы 6.2.

В общем случае, расположив возможные значения дискретной случайной величины в порядке возрастания и обозначив их через $x_1, \dots, x_n$, а соответствующие им вероятности – через $p_1, \dots, p_n$, получим значения, указанные в таблице 6.3.

Такая таблица, если она охватывает все возможные значения дискретной случайной величины, дает закон распределения последней. Таблица 6.3 называется рядом распределения, который можно представить в виде графика. Предположим, что интервалы между соседними значениями x , т. е. $x_1 - x_2, \dots, x_{n-1} - x_n$ равны между собой. Примем размер этого интервала за единицу и отложим значения x_i на оси абсцисс (рис. 6.1), а по оси ординат – соответствующие значения вероятности p_i . Для наглядности полученные точки соединим отрезками прямых; построенная ломаная носит название многоугольника распределения. Сумма всех ординат кривой равна 1. Мы можем взять любой интервал и определить вероятность того, что значение x лежит в его пределах, просуммировав ординаты графика в пределах заданного интервала. В ряде случаев распределение дискретных случайных величин может быть выражено математически. К ним относятся биномиальное распределение, распределение Пуассона и ряд других.

Таблица 6.2 – Число комбинаций

Сумма очков	Число возможных комбинаций	Вероятность появления данной суммы
2	1	1/36
3	2	2/36 = 1/18
4	3	3/36 = 1/12
5	4	4/36 = 1/9
6	5	5/36
7	6	6/36 = 1/6
8	5	5/36
9	4	4/36 = 1/9
10	3	3/36 = 1/12
11	2	2/36 = 1/18
12	1	1/36
Число всех возможных комбинаций	36	Вероятность проявления любой возможной комбинации $36/36 = 1$, т.е. оно достоверно

Таблица 6.3 – Ряд распределения

x_1	x_2	x_3	x_4	...	x_n
p_1	p_2	p_3	p_4	...	p_n

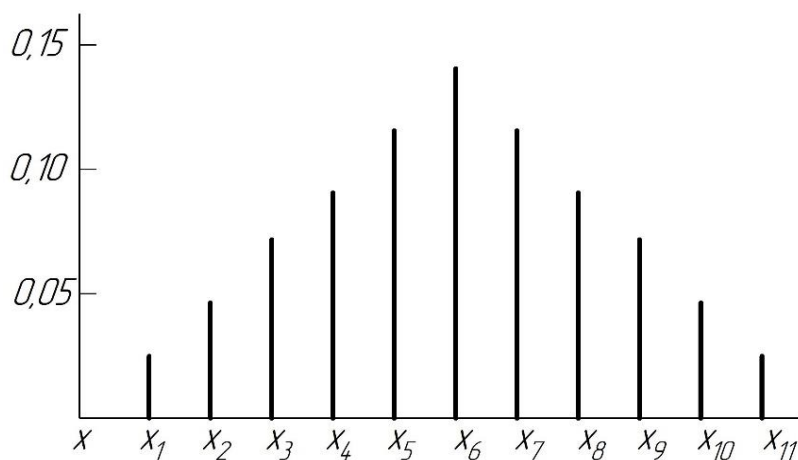


Рисунок 6.1 – График распределения дискретной случайной величины

Построенный на рисунке 6.1 график соответствует приведенному в таблице 6.2 распределению для случая бросания двух игральных костей.

6.1.2 Непрерывные случайные величины

Непрерывные величины характеризуются бесчисленным множеством возможных значений. Составить таблицу всех возможных значений и их вероятностей нельзя, так как число их в любом интервале бесконечно велико. (Напомним, что число геометрических точек в любом отрезке прямой линии бесконечно велико. Это положение нетрудно распространить на любую величину, которую мы изображаем на графике в виде отрезка прямой).

Из сказанного следует, что вероятность любого значения непрерывной величины бесконечно мала. Чтобы выявить распределение вероятностей, рассматривают ряд интервалов значений величины и подсчитывают частоты попадания значений величины на каждый интервал. Статистический ряд графически представляется в виде ступенчатой кривой – гистограммы (рис. 6.2). По оси абсцисс откладываются интервалы, являющиеся основаниями прямоугольников, площади которых равны частотам соответствующих интервалов. Таким образом, высота каждого прямоугольника равна частоте, деленной на длину интервала; лишь при равных интервалах высоты пропорциональны соответствующим частотам. Из способа построения гистограммы следует, что полная площадь ее равна единице.

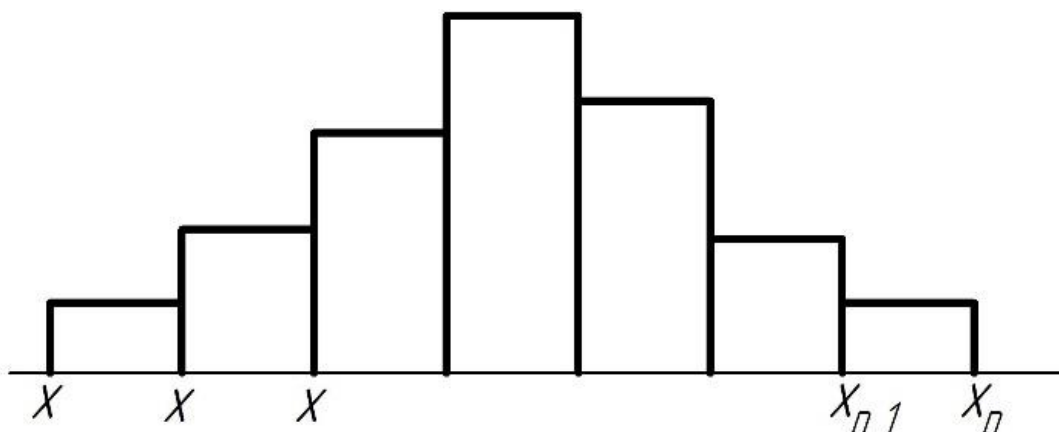


Рисунок 6.2 – Гистограмма распределения вероятности непрерывной случайной величины

Если взять очень малые интервалы, то при уменьшении dx кривая в пределе потеряет ступенчатый характер и перейдет в плавную кривую (рис. 6.3). Такую кривую называют кривой плотности распределения вероятности для данной непрерывной случайной величины, а уравнение, описывающее ее, – законом распределения случайной величины. Ординаты кривой (например, ордината p_k в точке x_k) называется плотностью вероятности в данной точке. Площадь же под всей кривой равна вероятности появления любого из возможных значений, т.е. 1.

Чтобы определить, какова вероятность того, что значение x будет лежать в пределах $x_g - x_f$, определяют площадь, лежащую между вертикалями, проведенными из точек $x_g - x_f$ (заштрихованную площадь на рис. 6.3). Эта площадь пропорциональна плотности вероятности для интервала $x_g - x_f$.

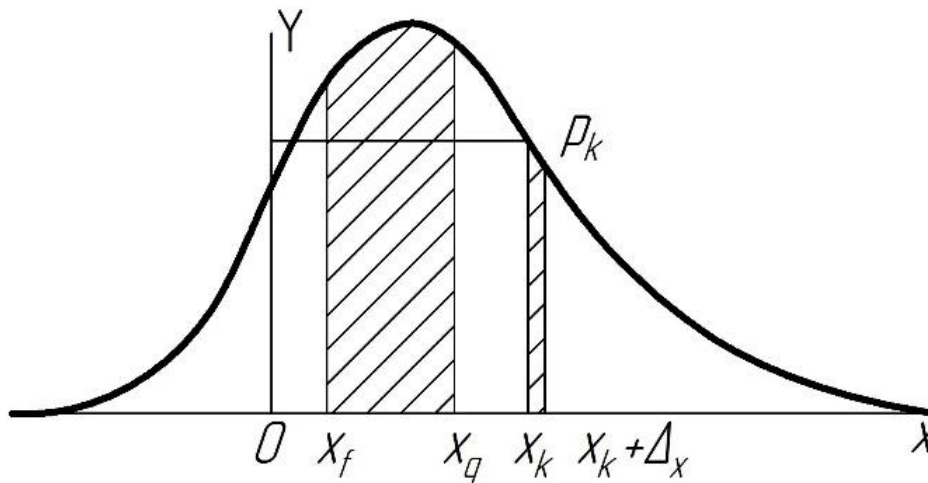


Рисунок 6.3 – Кривая распределения плотности вероятности непрерывной случайной величины

Случайные величины и их вероятности можно изучать статистическим методом, проводя для этой цели большое число наблюдений. Определение таким опытным путем законов распределения случайных величин для всех возможных случаев практически невыполнимо. Поэтому, естественно, потребовалось теоретическим путем найти законы распределения, которые можно ожидать для тех или иных типов случайных величин.

Если на основании теоретических рассуждений и опыта можно предвидеть качественную форму закона распределения той или иной случайной величины, то обычно бывает достаточно провести сравнительно небольшое число наблюдений, чтобы полностью определить его количественно.

Присутствие случайных погрешностей в результатах измерений легко обнаруживается из-за их разброса относительно некоторого зна-

чения. Как уже отмечалось ранее, и результат измерения, и его погрешность с известными оговорками могут рассматриваться как случайные величины.

Наиболее универсальным способом описания случайных величин является отыскание их интегральных или дифференциальных функций распределения. Интегральной функцией распределения $F(x)$ называют функцию, каждое значение которой для каждого x является вероятностью события, заключающегося в том, что случайная величина x_i в i -м опыте принимает значение, меньшее x :

$$F(x) = P\{x_i < x\} = P\{-\infty < x_i \leq x\}$$

График интегральной функции распределения показан на рисунке 6.4. Она имеет следующие свойства:

- неотрицательная, т. е. $F(x) > 0$;
- неубывающая, т. е. $F(x_2) \geq F(x_1)$, если $x_2 \geq x_1$;
- диапазон ее изменения простирается от 0 до 1, т. е. $F(-\infty) = 0$; $F(+\infty) = 1$;
- вероятность нахождения случайной величины x в диапазоне от x_1 до x_2 $P\{x_1 < x < x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$.

Более наглядным является описание свойств результатов измерений и случайных погрешностей с помощью дифференциальной функции распределения, иначе называемой плотностью распределения вероятностей $p(x) = dF(x)/dx$. Она всегда неотрицательна и подчиняется условию нормирования в виде:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1$$

Учитывая взаимосвязь $F(x)$ и $p(x)$, легко показать, что вероятность попадания случайной величины в заданный интервал $(x_1; x_2)$:

$$P\{x_1 < x < x_2\} = \int_{x_2}^{x_1} p(x)dx.$$

Следовательно, рассмотренное выше условие нормирования означает, что вероятность попадания величины x в интервал $[-\infty; +\infty]$ равна единице, т. е. представляет собой достоверное событие.

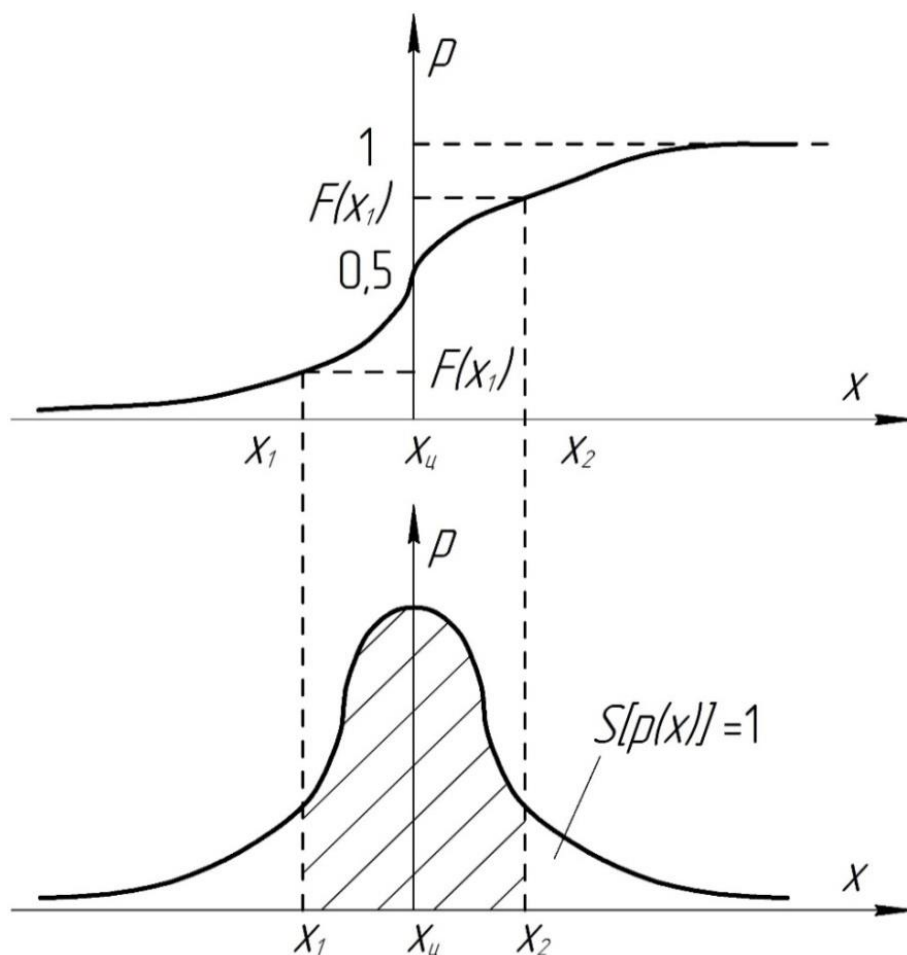


Рисунок 6.4 – Интегральная и дифференциальная функции распределения случайной величины

Из последнего уравнения следует, что вероятность попадания случайной величины x в заданный интервал $(x_1; x_2)$ равна площади, заключенной под кривой $p(x)$ между абсциссами x_1 и x_2 (см. рис. 6.4). Поэтому по форме кривой плотности вероятности $p(x)$ можно судить о том, какие значения случайной величины x наиболее вероятны, а какие наименее.

Результирующая погрешность зачастую складывается из ряда составляющих с различными плотностями распределения $p_1(x)$, $p_2(x)$, ..., $p_n(x)$. В связи с этим возникает задача определения суммарного закона распределения погрешности. Для суммы независимых непрерывных случайных величин x_1 и x_2 , имеющих распределения $p_1(x)$ и $p_2(x)$, он называется композицией и выражается интегралами свертки:

$$p(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(x_1) p_2(z - x_1) dx_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(z - x_2) p_2(x_2) dx_2$$

Графическое определение композиции двух случайных независимых величин показано на рисунке 6.5. Следует отметить, что масштаб всех графиков по вертикали произвольный, и должно выполняться условие: площадь, ограниченная кривой плотности вероятности, равна единице [23–24].

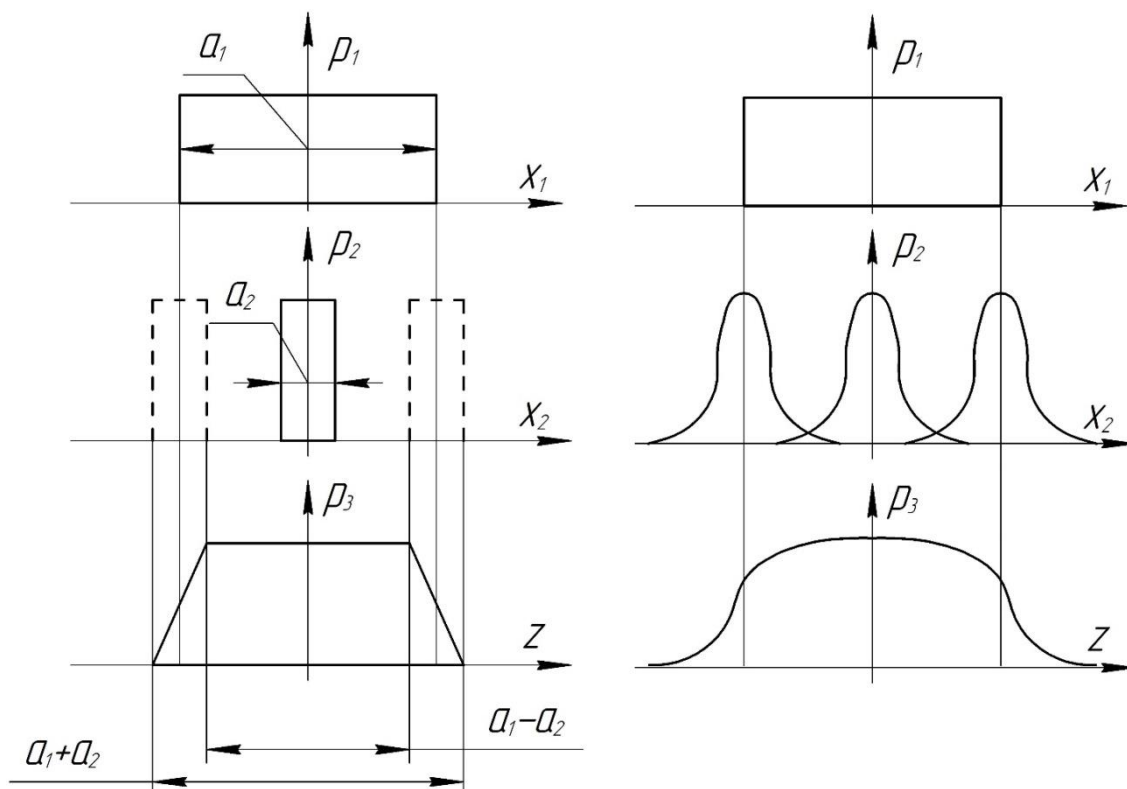


Рисунок 6.5 – Суммирование законов распределений

6.2 Числовые параметры законов распределения

6.2.1 Понятие центра распределения

Как отмечалось выше, функции распределения являются самым универсальным способом описания поведения результатов измерений и случайных погрешностей. Однако для их определения необходимо проведение весьма длительных и кропотливых исследований и вычислений. В большинстве случаев бывает достаточно охарактеризовать случайные величины с помощью ограниченного числа специальных параметров, основными из которых являются:

- центр распределения;
- начальные и центральные моменты и производные от них коэффициенты (математическое ожидание (МО), среднее квадратичное отклонение (СКО), эксцесс, контрэксцесс и коэффициент асимметрии);

– энтропийный коэффициент.

Координата центра распределения показывает положение случайной величины на числовой оси и может быть найдена несколькими способами. Наиболее фундаментальным является центр симметрии, т. е. нахождение такой точки X_M на оси x , слева и справа от которой вероятности появления различных значений случайной величины одинаковы и равны 0,5:

$$F(X_M) = \int_{-\infty}^{X_M} p(x)dx = \int_{X_M}^{+\infty} p(x)dx = 0,5.$$

Точку X_M называют медианой или 50%-ным квантилем. Для ее нахождения у распределения случайной величины должен существовать только нулевой начальный момент.

Можно определить центр распределения как центр тяжести распределения, т. е. такой точки $\bar{X}$, относительно которой опрокидывающий момент геометрической фигуры, огибающей которой является кривая $p(x)$, равен нулю:

$$\bar{X} = m_x = a_1[x] = M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx.$$

Эта точка называется математическим ожиданием. Следует отметить, что у некоторых распределений, например распределения Коши, не существует МО, так как определяющий его интеграл расходится.

При симметричной кривой $p(x)$ в качестве центра может использоваться абсцисса моды, т. е. максимума распределения X_M . Однако существуют распределения, у которых нет моды, например равномерное. Распределения с одним максимумом называются одномодальными, с двумя – двухмодальными и т. д. Те из них, у которых в средней части расположен не максимум, а минимум, называются антимодальными.

Для двухмодальных распределений применяется оценка центра в виде центра сгибов:

$$X_c = (x_{c1} + x_{c2})/2,$$

где x_{c1} , x_{c2} – сгибы, т. е. абсциссы точек, в которых распределение достигает своих максимумов.

Для ограниченных распределений (равномерного, трапецеидального, арксинусоидального и др.) применяется оценка в виде центра размаха:

$$X_p = (x_1 + x_2)/2$$

где x_1 и x_2 – первый и последний члены вариационного ряда, соответствующего распределению.

Разные оценки центра имеют различную эффективность. При статистической обработке экспериментальных данных важно использовать наиболее эффективную из них, т. е. оценку, имеющую минимальную дисперсию. Это связано с тем, что погрешность в определении $X_{\bar{u}}$ влечет за собой неправильную оценку СКО, границ доверительного интервала, эксцесса, контрэксцесса, вида распределения и других, т. е. всех последующих оценок, кроме энтропийных.

Оценки, как правило, пропорциональны числу проведенных измерений, поэтому целесообразно сравнивать различные оценки по числу отсчетов n , необходимому для достижения одинаковой дисперсии оценки. Например соотношение дисперсии определения МО и медианы для распределения Лапласа:

$$D[\bar{X}]/D[X_M] = 2.$$

Следовательно, определение $X_{\bar{u}}$ как X_M в два раза эффективней, чем определение его как $\bar{X}$, поскольку для достижения одной и той же погрешности измерения требуется в два раза меньший объем выборки исходных данных.

Для островершинных распределений с контрэксцессом $k < 0,515$ оценка координаты центра медианой X_M эффективнее, чем оценка МО $\bar{X}$. (Отметим, что для нормального распределения $k = 0,577$.) Для плосковершинных и двухмодальных распределений эффективность оценки центра как медианы X_M падает до нуля. Оценка центра распределения в виде $\bar{X}$ безусловно эффективна лишь для одномодальных распределений, близких к нормальному с контрэксцессом k от 0,515 до 0,645. Для двухмодальных распределений наиболее эффективна оценка центра в виде координаты сгибов X_c , а для ограниченных распределений (равномерного, трапецеидальных, арксинусоидального, кроме треугольного) – в виде центра размаха экспериментальных данных X_p .

При выборе оценки центра распределения помимо ее эффективности необходимо принимать во внимание ее чувствительность к наличию промахов в обрабатываемой совокупности исходных данных. Оценка в виде математического ожидания центра размаха X_p исключительно чувствительна к наличию промахов, так как она определяется по наиболее удаленным от центра наблюдениям, каковыми и являются промахи. Оценка в виде $\bar{X}$ также слабо защищена от влияния промахов. Она ослабляется лишь в $\sqrt{n}$ раз, где n – число наблюдений, в то время как его возможный размер ничем не ограничен. Защищенными от влияния промахов являются лишь квантильные оценки, т. е. медиана X_M и центр сгибов X_c , поскольку они не зависят от координат промахов.

6.2.2 Моменты распределений

Все моменты представляют собой некоторые средние значения, причем если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, то моменты называют начальными, а если от центра распределения, то центральными. Начальные и центральные моменты r -го порядка определяются соответственно по формулам

$$\alpha_r[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^r p(x) dx; \quad \mu_r[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^r p(x) dx.$$

Нулевой начальный момент равен единице. Он используется для задания условия нормирования плотности распределения:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^0 p(x) dx = 1.$$

Также с помощью начального момента нулевого порядка вводится понятие медианы распределения. Первый начальный момент – МО случайной величины:

$$m_x = \alpha_1[x] = M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx.$$

Для результатов измерений оно представляет собой оценку истинного значения измеряемой величины. Начальные и центральные моменты случайной погрешности Δ совпадают между собой и с центральными моментами результатов измерений: $\alpha_r[\Delta] = \mu_r[\Delta] = \mu_r[x]$ поскольку МО случайной погрешности равно нулю. Следует также отметить, что первый центральный момент тождественно равен нулю.

Важное значение имеет второй центральный момент:

$$D[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 p(x) dx,$$

называемый дисперсией и являющийся характеристикой рассеивания случайной величины относительно МО.

Значительно чаще в качестве меры рассеивания используется среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D[x]},$$

имеющее такую же размерность, как и МО. Для примера на рисунке 6.6 показан вид нормального распределения при различных значениях СКО.

Математическое ожидание и дисперсия являются наиболее часто применяемыми моментами, поскольку они определяют важные черты распределения: положение центра и степень разбросанности результатов относительно него. Для более подробного описания распределения используются моменты более высоких порядков.

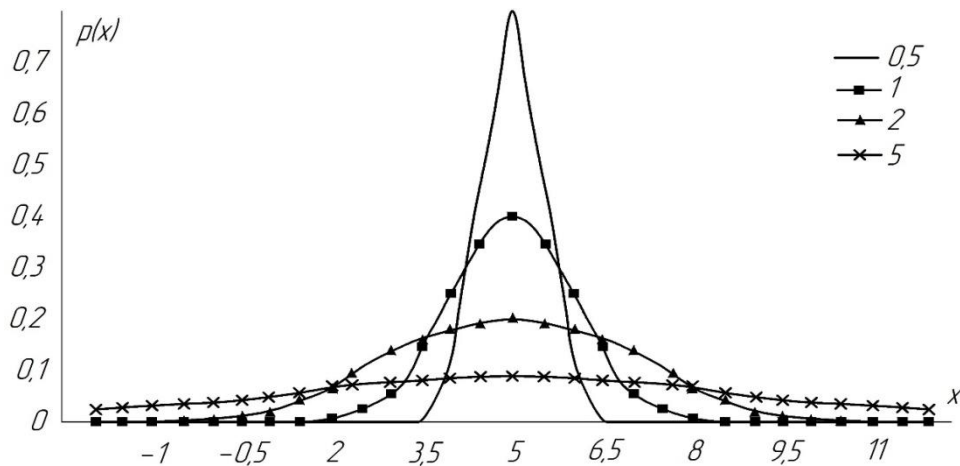


Рисунок 6.6 – Вид нормального распределения при $X_{\mu}=5$ и СКО = 0,5; 1; 2 и 5

Третий центральный момент

$$\mu_3[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^3 p(x) dx$$

служит характеристикой асимметрии, или скошенности распределения. С его использованием вводится коэффициент асимметрии $\nu = \mu_3[X] / \sigma^3$. Для нормального распределения коэффициент асимметрии равен нулю. Вид законов распределения при различных значениях коэффициента асимметрии приведен на рисунке 6.7 а.

Четвертый центральный момент

$$\mu_4[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^4 p(x) dx$$

служит для характеристики плоско- или островершинности распределения. Эти свойства описываются с помощью эксцесса $\varepsilon = \mu_4[X] / \sigma^4 - 3$.

Значения коэффициента ε' лежат в диапазоне от -2 до ∞ . Для нормального распределения он равен 0. Чаще эксцесс задается формулой $\varepsilon = \mu_4[X] / \sigma^4$.

Его значения лежат в диапазоне от 1 до ∞ . Для нормального распределения он равен трем. Вид дифференциальной функции распределения при различных значениях эксцесса показан на рисунке 6.7 б.

Для удобства часто используют контрэксцесс $k = 1/\sqrt{\varepsilon}$.

Значения контрэксцесса лежат в пределах от 0 до 1. Для нормального закона он равен 0,577.

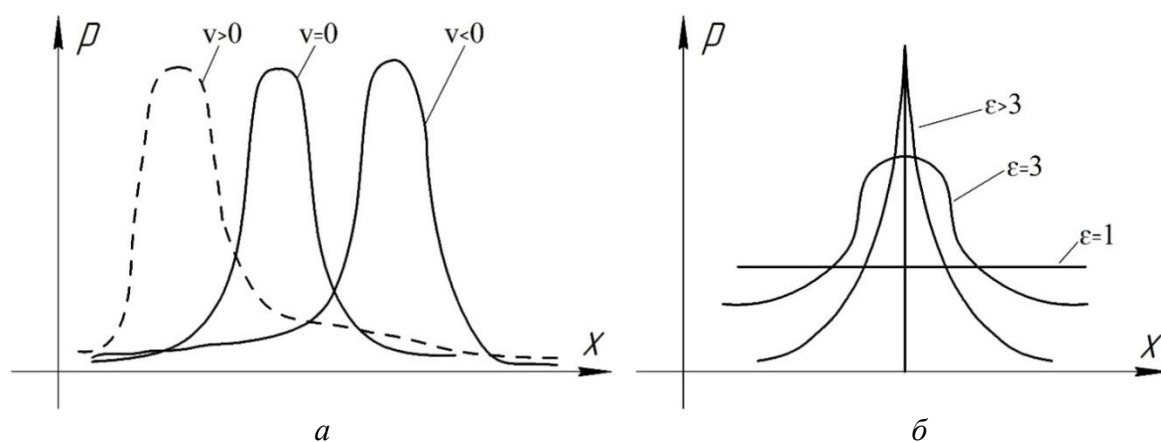


Рисунок 6.7 – Вид дифференциальной функции распределения при различных значениях:
а – коэффициента асимметрии, б – эксцесса

6.2.3 Энтропийное значение погрешности

Развитие теории вероятностей применительно к процессам получения измерительной информации привело к созданию вероятностной теории информации. С точки зрения этой теории смысл измерения состоит в сужении интервала неопределенности от значения, известного до его проведения, до величины d , называемой энтропийным интервалом неопределенности, ставшей известной после измерения. Энтропийный интервал определяется по формуле

$$d = 2\Delta_{\gamma} = e^{H(x/x_d)}.$$

где Δ_3 – энтропийное значение погрешности;

$$H(x/x_d) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln[p(x)] dx - \text{энтропия действительного значения } x$$

измеряемой величины вокруг полученного после измерения значения x_d , т. е. энтропия погрешности измерений; $p(x)$ – плотность распределения вероятности измеряемой величины.

Основное достоинство информационного подхода к описанию измерений состоит в том, что размер энтропийного интервала неопределенности может быть найден строго математически для любого закона распределения. Это устраняет исторически сложившийся произвол, неизбежный при волевом назначении различных значений доверительной вероятности. Например, для нормального распределения $H(x/x_d) = \ln(\sigma\sqrt{2\pi e})$ и $d = \sqrt{2\pi e}\sigma = 4,133\sigma$. Для распределения Симпсона $H(x/x_d) = \ln(\sigma\sqrt{6e})$ и $d = \sqrt{6e}\sigma = 4,04\sigma$.

Соотношение между энтропийным Δ_3 , и средним квадратическим σ значениями погрешности различно для разных законов распределения, и его удобнее характеризовать энтропийным коэффициентом $k = \Delta_3/\sigma$ данного распределения (табл. 6.4)

Таблица 6.4 – Значения коэффициента k для различных законов распределения

Закон распределения	k	Вид распределения	k
Нормальное (Гаусса)	2,07	Равномерное	1,73
Треугольное (Симпсона)	2,02	Арксинусоидальное	1,11
Лапласа	1,93	Дискретное двузначное	0
Стьюдента (число степеней свободы – 4)	1,90	Коши	0

6.3 Основные законы распределения

6.3.1 Общие сведения

Использование на практике вероятностного подхода к оценке погрешностей результатов измерений прежде всего предполагает знание аналитической модели закона распределения рассматриваемой погрешности. Встречающиеся в метрологии распределения достаточно разнообразны. В качестве примера можно привести результаты исследований [23–24] 219 фактических распределений погрешностей, имеющих место при измерении электрических и неэлектрических величин разнообразными приборами. Установлено, что примерно 50 % распределений при-

надлежат к классу экспоненциальных, 30 % являются уплощенными, а остальные 20 % – различными видами двухмодальных распределений.

Множество законов распределения случайных величин, используемых в метрологии, можно классифицировать следующим образом:

- трапецеидальные (плосковершинные) распределения;
- уплощенные (приблизительно плосковершинные) распределения;
- экспоненциальные распределения;
- семейство распределений Стьюдента;
- двухмодальные распределения.

6.3.2 Трапецеидальные распределения

К трапецеидальным распределениям относятся: равномерное, собственно трапецеидальное и треугольное (Симпсона). Равномерное распределение (рис. 6.8 а) описывается уравнением

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < X_{ц}-a, \quad x > X_{ц}+a; \\ 1/2a, & X_{ц}-a \leq x \leq X_{ц}+a. \end{cases}$$

Трапецеидальное распределение (рис. 6.8 б) образуется как композиция двух равномерных распределений шириной a_1 и a_2 (рис. 6.5):

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < X_{ц}-a, \quad x > X_{ц}+a; \\ \frac{x - X_{ц} + a}{a^2 - b^2}, & X_{ц}-a \leq x \leq X_{ц}-b; \\ \frac{1}{a+b}, & X_{ц}-a \leq x \leq X_{ц}+b; \\ \frac{X_{ц} + a - x}{a^2 - b^2}, & X_{ц}+a \leq x \leq X_{ц}+b. \end{cases}$$

Треугольное (Симпсона) распределение (рис. 6.8 в) – это частный случай трапецеидального, для которого размеры исходных равномерных распределений одинаковы: $a_1 = a_2$ (см. рис. 6.5):

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < X_{ц}-a, \quad x > X_{ц}+a; \\ \frac{x - X_{ц} + a}{a^2}, & X_{ц}-a \leq x \leq X_{ц}; \\ \frac{X_{ц} + a - x}{a^2}, & X_{ц} \leq x \leq X_{ц}+a. \end{cases}$$

где $X_{ц}$, a , b – параметры распределения.

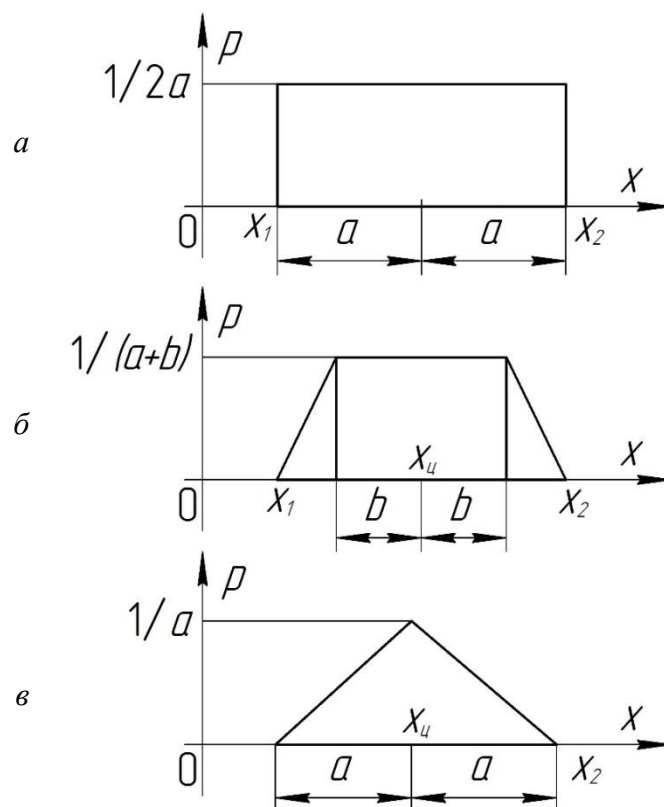


Рисунок 6.8 – Распределения:

а – равномерное; б – трапецидальное; в – треугольное (Симпсона)

Математическое ожидание всех трапецидальных распределений $X_u = (x_1 + x_2)/2$. Медианы из соображений симметрии равны МО. Равномерное и собственно трапецидальное распределения моды не имеют, а мода треугольного равна $1/a$.

Среднее квадратическое отклонение в зависимости от распределения определяется по формуле:

– равномерное $\sigma_p = a/\sqrt{3}$;

– трапецидальное $\sigma = (a/\sqrt{6})\sqrt{1+(a/b)^2} = (\sigma_p/\sqrt{2})\sqrt{1+(a/b)^2}$

– треугольное $\sigma = a/\sqrt{6}$.

Из приведенных уравнений следует, что СКО трапецидальных распределений возрастает в 1,41 раза с ростом параметра b от нуля (треугольное) до a (равномерное). Коэффициент асимметрии всех трапецидальных распределений равен нулю.

Числовые параметры трапецидальных распределений при различных отношениях ширины исходных равномерных распределений приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Значения параметров трапецеидальных распределений

b/a	a ₂ /a ₁	a/σ	ε	κ	k
1	1	1,732	1,8	0,745	1,73
2/3	1/5	2,037	1,9	0,728	1,83
1/2	1/3	2,191	2,016	0,704	1,94
1/3	1/2	2,324	2,184	0,677	2,00
0	1	2,449	2,4	0,645	2,02

Равномерное распределение имеют погрешности: квантования в цифровых приборах, округления при расчетах, отсчета показаний стрелочного прибора, от трения в стрелочных приборах с креплением подвижной части на

кернах или подпятниках, определения момента времени для каждого из концов временного интервала при измерении частоты и периода методом дискретного счета. Суммируясь между собой, эти погрешности образуют трапецеидальные распределения с различными отношениями сторон.

6.3.3 Экспоненциальные распределения

Экспоненциальные распределения описываются формулой

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{x - X_{ц}}{\lambda\sigma}\right|^{\alpha}\right), \quad (6.1)$$

где $\lambda = \sqrt{\Gamma(1/\alpha)/\Gamma(3/\alpha)}$; σ – СКО; α – некоторая характерная для данного распределения константа; $X_{ц}$ – координата центра; $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

В нормированном виде, т. е. при $X_{ц} = 0$ и $\sigma\lambda = 1$,

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\Gamma(1/\alpha)} \exp(-|x|^{\alpha}) = A(\alpha) \exp(-|x|^{\alpha}),$$

где $A(\alpha)$ – нормирующий множитель распределения.

Интегральная функция нормированного экспоненциального распределения описывается выражением

$$F(x, \alpha) = \frac{1}{2} + \frac{\alpha}{2\Gamma(1/\alpha)} \int_{-\infty}^x \exp(-|x|^{\alpha}) dx.$$

Интеграл, входящий в эту формулу, выражается через элементарные функции только при $\alpha = 1/n$, $n = 1; 2; 3; \dots$. При $\alpha = n = 2; 3; 4; \dots$ он может быть рассчитан по приближенным формулам.

Эксцесс и энтропийный коэффициент экспоненциальных распределений соответственно определяются по формулам:

$$\varepsilon = \frac{\Gamma(1/\alpha)\Gamma(5/\alpha)}{[\Gamma(3/\alpha)]^2}; \quad k = \frac{e^{1/\alpha}}{\alpha} \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}.$$

Анализ приведенных выражений показывает, что константа α однозначно определяет вид и все параметры распределений. При $\alpha < 1$ распределение имеет очень пологие спады и по форме близко к распределению Коши. При $\alpha = 1$ получается распределение Лапласа $p(x) = 0,5e^{-|x|}$, при $\alpha = 2$ – нормальное распределение или распределение Гаусса. При $\alpha > 2$ распределения, описываемые формулой (6.1), близки по свойствам к трапецеидальным. При очень больших значениях α формула (6.1) описывает практически равномерное распределение. В таблице 6.6 приведены параметры некоторых из экспоненциальных распределений.

Таблица 6.6 – Значения параметров экспоненциальных распределений

Распределение	α	ε	к	k
Лапласа	1	6	0,408	1,92
Нормальное (Гаусса)	2	3	0,577	2,07
Равномерное	∞	1,8	0.745	1,73

Вид экспоненциальных распределений приведен на рисунке 6.9.

6.3.4 Нормальное распределение (распределение Гаусса)

Наибольшее распространение получил нормальный закон распределения, называемый часто распределением Гаусса:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - X_{ц})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (6.2)$$

где σ – параметр рассеивания распределения, равный СКО; $X_{ц}$ – центр распределения, равный МО. Вид нормального распределения показан на рисунке 6.6.

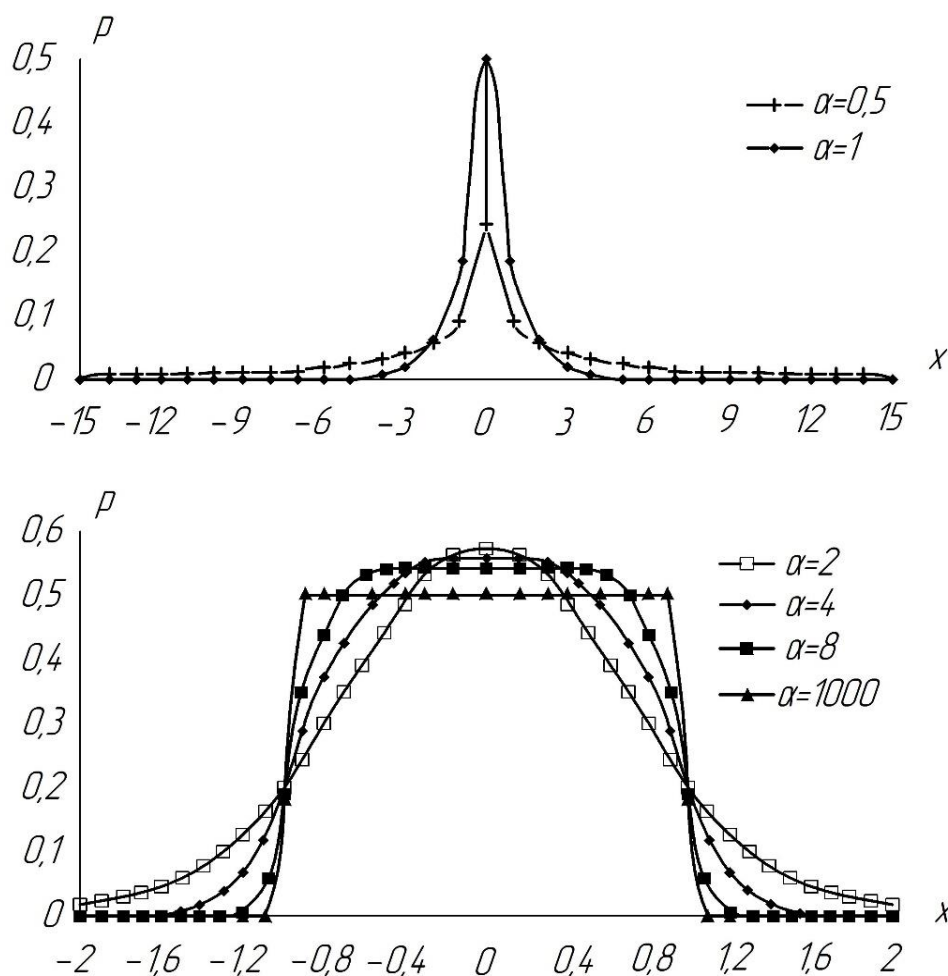


Рисунок 6.9 – Экспоненциальные распределения, определяемые по формуле (6.1) при $\sigma\lambda = 1$ и $X_{ц} = 0$

Широкое использование нормального распределения на практике объясняется центральной предельной теоремой теории вероятностей утверждающей, что распределение случайных погрешностей будет близко к нормальному всякий раз, когда результаты наблюдений формируются под действием большого числа независимо действующих факторов, каждый из которых оказывает лишь незначительное действие по сравнению с суммарным действием всех остальных

При введении новой переменной $t = (x - X_{ц})/\sigma$ из (6.2) получается нормированное нормальное распределение, интегральная и дифференциальная функции которого соответственно равны:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-0,5t^2} dt; \quad p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0,5t^2}.$$

Нормирование приводит к переносу начала координат в центр распределения и выражению абсциссы в долях СКО. Значения инте-

гальной и дифференциальной функций нормированного нормального распределения сведены в таблицы, которые можно найти в литературе по теории вероятностей.

Определенный интеграл с переменным верхним пределом

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-0,5t^2} dt \quad (6.3)$$

называют *функцией Лапласа*. Для нее справедливы следующие равенства: $\Phi(-\infty) = -0,5$; $\Phi(0) = 0$; $\Phi(+\infty) = 0,5$; $\Phi(t) = -\Phi(-t)$. Функция Лапласа используется для определения значений интегральных функций нормальных распределений. Функция $F(t)$ связана с функцией Лапласа формулой $F(t) = 0,5 + \Phi(t)$. Поскольку интеграл в (6.3) не выражается через элементарные функции, то значения функции Лапласа для различных значений t сведены в таблицу (см. приложение В).

6.3.5 Уплотненные распределения

Данные распределения представляют собой композицию равномерного и какого-либо экспоненциального распределения (см. рис. 6.5). Вид одного из них показан на рисунке 6.10. Уплотненные распределения отличаются от экспоненциальных с показателем $\alpha > 2$ тем, что при почти плоской вершине имеют длинные, медленно спадающие «хвосты», в то время как экспоненциальные распределения при $\alpha > 2$ обрываются тем круче, чем более плоской является их вершина.

Основными параметрами, определяющими форму таких распределений, являются:

- показатель относительного содержания в композиции равномерной составляющей $Cr = \sigma_p / \sigma_{экс}$, где σ_p и $\sigma_{экс}$ – СКО равномерного и экспоненциального распределений;

- показатель α экспоненциальной составляющей.

Вес $p = \sigma_{экс}^2 / (\sigma_{экс}^2 + \sigma_p^2)$ относительной дисперсии $\sigma_{экс}^2$ в суммарной дисперсии $(\sigma_{экс}^2 + \sigma_p^2)$, как правило, не превышает 10 %. Однако его влияние на форму кривой $p(x)$ будет значительным. Другая особенность уплотненных распределений: при том же значении эксцесса энтропийный коэффициент у них существенно меньше, чем у экспоненциальных распределений.

6.3.6 Семейство распределений Стюдента

Эти законы описывают плотность распределения вероятности среднего арифметического, вычисленного по выборке из n случайных отсчетов нормально распределенной генеральной совокупности. Распределения Стюдента нашли широкое применение при статистической обработке результатов многократных измерений. Их вид зависит от числа отсчетов n , по которым находится среднее арифметическое значение, поэтому и говорят о семействе законов. В центрированном и нормированном виде они описываются формулой

$$p(x) = \frac{\Gamma[(k+1)/2]}{\sqrt{k\pi} \Gamma(k/2)} (1 + x^2/k)^{-(k+1)/2} = S(x, k),$$

где k – число степеней свободы, зависящее от числа n усредняющих отсчетов: $k = n - 1$. Вид распределения Стюдента для различных значений k показан на рисунке 6.11. При увеличении k распределение Стюдента переходит в распределение Гаусса.

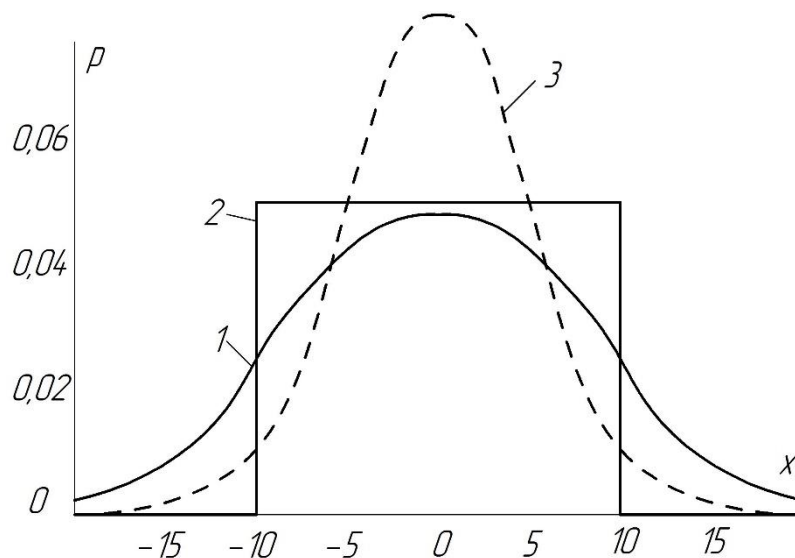


Рисунок 6.10 – Уплощенное распределение:

- 1 – общий вид; 2 – равномерное распределение с СКО, равным $10/\sqrt{3}$;
3 – нормальное распределение с СКО, равным 5

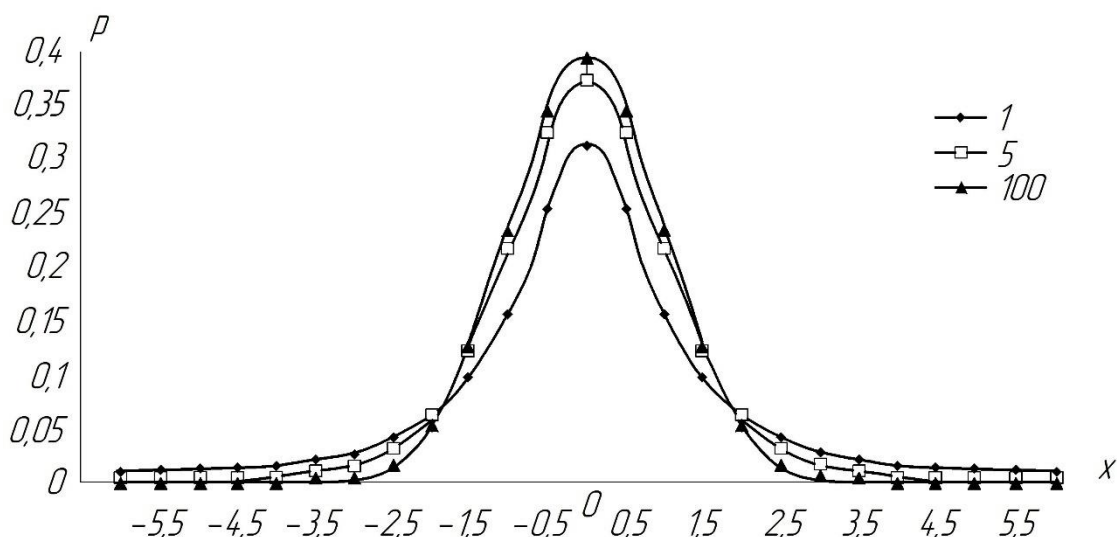


Рисунок 6.11 – Распределение Стьюдента при степенях свободы, равных 1 (распределение Коши), 5 и 100

Для нормированных распределений Стьюдента с $k > 4$ справедливы следующие соотношения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} = \sqrt{\frac{k}{k-2}}; \quad \varepsilon = 3 \frac{n-3}{n-5} = 3 \frac{k-2}{k-4}; \quad \kappa = \sqrt{\frac{k-4}{3(k-4)}}.$$

Значения некоторых параметров для различных степеней свободы приведены в таблице 6.7.

Распределения Стьюдента имеют ряд особенностей:

- при $n \leq 3$ их СКО становится равным бесконечности, т.е. дисперсионная оценка ширины разброса не работает (перестает существовать);
- классический аппарат моментов для оценки формы и ширины

Таблица 6.7 – Значение точечных оценок распределения Стьюдента при различных степенях свободы k

k	ε	κ	Энтропийный коэффициент κ
4	∞	0	1,900
5	9	0,333	1,0972
6	6	0,408	2,005
10	4	0,500	2,047
∞	3	0,577	2,066

распределения Стьюдента с малым числом степеней свободы оказывается не работоспособным, и их ширина и форма могут быть оценены лишь с использованием доверительных и энтропийных оценок. Этим распределение Стьюдента резко отличается от других распределений.

Разновидностью распределения Стьюдента является распределение Коши. Оно важно тем, что ему подчиняется распределение отношения двух

нормально распределенных центрированных случайных величин. Рас-

пределение Коши – это предельное распределение семейства законов Стьюдента с минимально возможным числом степеней свободы, равным $k = 1$ (рис. 6.11):

$$p(x) = \frac{\Gamma(1)}{\sqrt{\pi}\Gamma(1/2)(1+x^2)} = \frac{1}{\pi(1+x^2)}.$$

В общем виде (не нормированном и не центрированном) распределение Коши имеет вид

$$p(x) = \frac{1}{A\pi\left\{1 + \left[(x - X_{ц})/A\right]^2\right\}},$$

где $A, X_{ц}$ – параметры распределения.

Свойства распределения Коши резко отличаются от свойств экспоненциальных распределений, а именно:

- дисперсия и СКО не существуют, так как определяющий их интеграл расходится. Они будут бесконечно увеличиваться при росте числа экспериментальных данных. Оценка ширины распределения может быть произведена только на основе теории информации;

- оценка центра в виде среднего арифметического для распределения Коши неправомерна, так как ее рассеяние $\sigma/\sqrt{n}$ равно бесконечности;

- не существует математического ожидания;

- для определения $X_{ц}$ необходимо использовать медиану;

- эксцесс равен бесконечности, а контрэксцесс равен нулю;

- энтропийное значение погрешности равно $2\pi A$.

6.3.7 Двухмодальные распределения

К двухмодальным распределениям относятся дискретное двузначное, арксинусоидальное и двухмодальные остро- и кругловершинные распределения.

Дискретное двузначное распределение – это распределение, при котором с равными вероятностями встречаются только два значения случайной величины. В центрированном виде (рис. 6.12) оно описывается формулой

$$p(x) = 0,5\delta(x + A) + 0,5\delta(x - A),$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака; $\pm A$ – возможные значения случайной величины.

При дискретном двузначном распределении СКО равно значению параметра A , $\varepsilon = 1$, $\kappa = 1$, $k = 0$

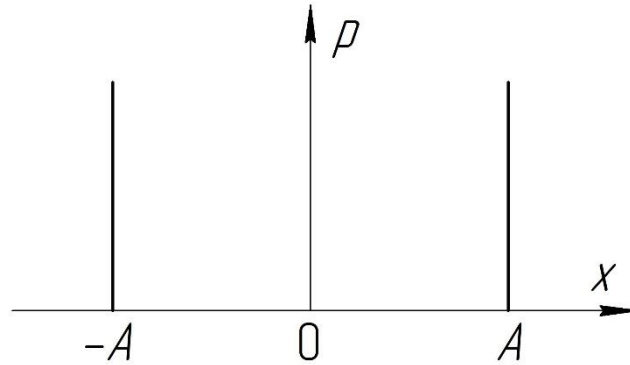


Рисунок 6.12 – Дискретное двузначное распределение

Дискретное двузначное распределение может быть приближенно представлено в виде суммы двух нормальных распределений с одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку МО и при стремлении к нулю их СКО:

$$p(x) = \lim \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-A)^2}{2\sigma^2}} + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x+A)^2}{2\sigma^2}} \right].$$

Арксинусоидальное распределение (рис. 6.13) описывается выражением:

$$p(x) = 1/(\pi\sqrt{A^2 - x^2}),$$

где A – параметр распределения. Его СКО равно $A/\sqrt{2}$, $\varepsilon = 1,5$, $\kappa = 0,816$, $k = 1,11$

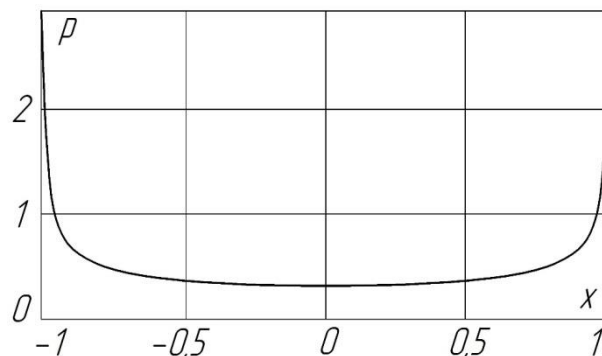


Рисунок 6.13 – Арксинусоидальное распределение при $A = 1$

Остро- и кругловершинные двухмодальные распределения получаются как композиция дискретного двузначного и экспоненциального распределений с различными значениями коэффициента a (рис. 6.14). При $a < 2$ получаются островершинные, при $a > 2$ – кругловершинные распределения.

Основными параметрами таких распределений являются:

- показатель относительного содержания в композиции дискретной составляющей $C_d = \sigma_d / \sigma_{экс} = A / \sigma_{экс}$, где σ_d и $\sigma_{экс}$ – СКО дискретного и экспоненциального распределений. Как правило, $C_d \in (0; 2)$. Чем больше показатель C_d , тем больше провал. При $C_d = 0$ провал на графике распределения отсутствует;

- показатель степени α для экспоненциальных распределений, который обычно лежит в пределах от 0,5 до 2.

Островершинные распределения получаются при использовании некоторых высокоточных цифровых вольтметров, а *кругловершинные* распределения имеют погрешности от механического гистерезиса элементов приборов и датчиков.

6.4 Точечные оценки законов распределения

Рассмотренные выше функции распределения описывают поведение непрерывных случайных величин, т. е. величин, возможные значения которых неотделимы друг от друга и непрерывно заполняют некоторый конечный или бесконечный интервал. На практике все результаты измерений и случайные погрешности являются величинами дискретными. При использовании дискретных случайных величин возникает задача нахождения точечных оценок параметров их функций распределения на основании выборок – ряда значений x_i , принимаемых случайной величиной x в n независимых опытах. Используемая выборка должна быть репрезентативной (представительной), т. е. должна достаточно хорошо представлять пропорции генеральной совокупности.

Оценка параметра называется точечной, если она выражается одним числом. Задача нахождения точечных оценок – частный случай статистической задачи нахождения оценок параметров функции распределения случайной величины на основании выборки. В отличие от самих параметров их точечные оценки являются случайными величинами, причем их значения зависят от объема экспериментальных данных, а закон распределения – от законов распределения самих случайных величин.

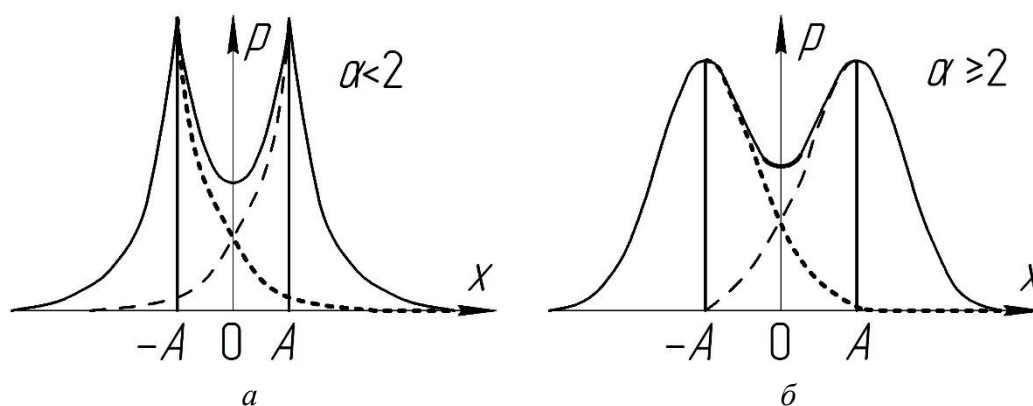


Рисунок 6.14 – Двухмодальные распределения:
а – островершинные, б – кругловершинные

Точечные оценки могут быть состоятельными, несмещенными и эффективными. Состоятельной называется оценка, которая при увеличении объема выборки стремится по вероятности к истинному значению числовой характеристики. Несмещенной называется оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике. Наиболее эффективной считают ту, из нескольких возможных несмещенных оценок, которая имеет наименьшую дисперсию. Требование несмещенности на практике не всегда целесообразно, так как оценка с небольшим смещением и малой дисперсией может оказаться предпочтительнее несмещенной оценки с большой дисперсией. На практике не всегда удастся удовлетворить одновременно все три этих требования, однако выбору оценки должен предшествовать ее критический анализ со всех перечисленных точек зрения.

Наиболее распространенным методом получения оценок является метод наибольшего правдоподобия, который приводит к асимптотически несмещенным и эффективным оценкам с приближенно нормальным распределением. Среди других методов можно назвать методы моментов и наименьших квадратов.

Точечной оценкой *математического ожидания* результата измерений является *среднее арифметическое значение* измеряемой величины

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.4)$$

При любом законе распределения оно является состоятельной и несмещенной оценкой, а также наиболее эффективной по критерию наименьших квадратов.

Точечная оценка *дисперсии*, определяемая по формуле

$$\overline{D}[x] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.5)$$

является несмещенной и состоятельной.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины x определяется как корень квадратный из дисперсии. Соответственно его оценка может быть найдена путем извлечения корня из оценки дисперсии. Однако эта операция является нелинейной процедурой, приводящей к смещенности получаемой таким образом оценки. Для исправления оценки СКО вводят поправочный множитель $k(n)$, зависящий от числа наблюдений n . Он изменяется от $k(3) = 1,13$ до $k(\infty) \approx 1,03$. Оценка среднего квадратического отклонения

$$\bar{\sigma} = S_x = k(n) \sqrt{\overline{D}[x]} = k(n) \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Полученные оценки МО и СКО являются случайными величинами. Это проявляется в том, что при повторениях серий из n наблюдений каждый раз будут получаться различные оценки $\bar{x}$ и $\bar{\sigma}$. Рассеяние этих оценок целесообразно оценивать с помощью СКО S_x и S_σ . Оценка СКО среднего арифметического значения

$$S_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.6)$$

Оценка СКО среднего квадратического отклонения

$$S_\sigma \approx \bar{\sigma}(S_x) = S_x \sqrt{\varepsilon - 1} / (2\sqrt{n})$$

Отсюда следует, что относительная погрешность определения СКО может быть оценена как

$$S_\sigma / S_x = \sqrt{\varepsilon - 1} / (2\sqrt{n}).$$

Она зависит только от эксцесса и числа наблюдений в выборке и не зависит от СКО, т. е. той точности, с которой производятся измерения. Ввиду того, что большое число измерений проводится относительно редко, погрешность определения σ может быть весьма существенной. В любом случае она больше погрешности из-за смещенности оценки, обусловленной извлечением квадратного корня и устраняемой поправочным множителем $k(n)$. В связи с этим на практике пренебрегают

учетом смещенности оценки СКО отдельных наблюдений и определяют его по формуле

$$\bar{\sigma} = S_x = \sqrt{D[x]} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (6.7)$$

т. е. считают $k(n) = 1$.

Иногда оказывается удобнее использовать следующую формулу для расчета оценок СКО отдельных наблюдений и результата измерения:

$$S_x = \sqrt{\frac{n}{n-1} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \right]}. \quad (6.8)$$

Точечные оценки других параметров распределений используются значительно реже. Оценки коэффициента *асимметрии* и *эксцесса* находятся по формулам

$$\bar{\nu} = \frac{1}{nS_x^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3; \quad \bar{\varepsilon} = \frac{1}{nS_x^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4.$$

Определение рассеяния оценок коэффициента асимметрии и эксцесса описывается различными формулами в зависимости от вида распределения.

6.5 Доверительная вероятность и доверительный интервал

Рассмотренные точечные оценки параметров распределения дают оценку в виде числа, наиболее близкого к значению неизвестного параметра. Такие оценки используют только при большом числе измерений. Чем меньше объем выборки, тем легче допустить ошибку при выборе параметра. Для практики важно не только получить точечную оценку, но и определить интервал, называемый доверительным, между границами которого с заданной доверительной вероятностью

$$P\{x_n < x < x_B\} = 1 - q,$$

где q – уровень значимости; x_n, x_B – нижняя и верхняя границы интервала, находится истинное значение оцениваемого параметра.

В общем случае доверительные интервалы можно строить на основе неравенства Чебышева. При любом законе распределения случайной величины, обладающей моментами первых двух порядков, верхняя граница вероятности попадания отклонения случайной величины x от центра распределения $X_{ц}$ в интервал tS_x описывается неравенством Чебышева

$$P\{|x - X_{ц}| \leq tS_x\} \leq 1 - 1/t^2,$$

где S_x – оценка СКО распределения; t – положительное число.

Для нахождения доверительного интервала не требуется знать закон распределения результатов наблюдений, но нужно знать оценку СКО. Полученные с помощью неравенства Чебышева интервалы оказываются слишком широкими для практики. Так, доверительной вероятности 0,9 для многих законов распределений соответствует доверительный интервал $1,6S_x, \dots$. Неравенство Чебышева дает в данном случае $3,16S_x$. В связи с этим оно не получило широкого распространения.

В метрологической практике используют главным образом квантильные оценки доверительного интервала. Под 100%-ным квантилем x_p понимают абсциссу такой вертикальной линии, слева от которой площадь под кривой плотности распределения равна P %. Иначе говоря, квантиль – это значение случайной величины (погрешности) с заданной доверительной вероятностью P . Например, медиана распределения является 50%-ным квантилем $x_{0,5}$.

На практике 25- и 75%-ный квантили принято называть сгибами, или квантилями распределения. Между ними заключено 50 % всех возможных значений случайной величины, а остальные 50 % лежат вне их. Интервал значений случайной величины x между $x_{0,05}$ и $x_{0,95}$ охватывает 90 % всех ее возможных значений и называется интерквантильным промежутком с 90%-ной вероятностью. Его протяженность равна $d_{0,9} = x_{0,95} - x_{0,05}$.

На основании такого подхода вводится понятие квантильных значений погрешности, т.е. значений погрешности с заданной доверительной вероятностью P – границ интервала неопределенности $\pm \Delta_d = \pm (x_p - x_{1-p})/2 = \pm d_p/2$. На его протяженности встречается P % значений случайной величины (погрешности), а $q = (1 - P)$ % общего их числа остаются за пределами этого интервала.

Для получения интервальной оценки нормально распределенной случайной величины необходимо:

- определить точечную оценку МО $\bar{x}$ и СКО S_x случайной величины по формулам (6.4) и (6.7) соответственно;
- выбрать доверительную вероятность P из рекомендуемого ряда значений 0,90; 0,95; 0,99;

– найти верхнюю x_v и нижнюю x_n границы в соответствии с уравнениями

$$F(x_n) = q/2 = 1 - P/2 \text{ и } F(x_v) = 1 - q/2 = 1 + P/2.$$

Значения x_n и x_v определяются из таблиц значений интегральной функции распределения $F(t)$ или функции Лапласа $\Phi(t)$.

Полученный доверительный интервал удовлетворяет условию

$$P\{\bar{x} - z_p S_x / \sqrt{n} < x < \bar{x} + z_p S_x / \sqrt{n}\} = 2F(z_p), \quad (6.9)$$

где n – число измеренных значений; z_p – аргумент функции Лапласа $\Phi(X)$, отвечающей вероятности $P/2$. В данном случае z_p называется квантильным множителем. Половина длины доверительного интервала $D_p = z_p S_x / \sqrt{n}$ называется доверительной границей погрешности результата измерений.

Пример. Произведено 50 измерений величины x . Определить доверительный интервал для МО значения x , если закон распределения нормальный с параметрами $m_x = \bar{x} = 590$, $S_x = 90$ при доверительной вероятности $P = 0,9$.

Так как гипотеза о нормальности закона распределения не противоречит опытным данным, доверительный интервал определяется по формуле 6.9

Отсюда $\Phi(z_p) = 0,45$. Из таблицы, приведенной в приложении В, находим, что $z_p = 1,65$. Следовательно, доверительный интервал запишется в виде

$$590 - 1,65 \cdot 90 / \sqrt{50} < x < 590 + 1,65 \cdot 90 / \sqrt{50} \text{ или } 590 - 21 < x < 590 + 21.$$

Окончательно $509 < x < 611$.

При отличии закона распределения случайной величины от нормального необходимо построить его математическую модель и определять доверительный интервал с ее использованием.

Рассмотренный способ нахождения доверительных интервалов справедлив для достаточно большого числа наблюдений n , когда $\sigma = S_x$. Следует помнить, что вычисляемая оценка СКО S_x является лишь некоторым приближением к истинному значению σ . Определение доверительного интервала при заданной вероятности оказывается тем менее надежным, чем меньше число наблюдений. Нельзя пользоваться формулами нормального распределения при малом числе наблюдений, если нет возможности теоретически на основе предварительных опытов с достаточно большим числом наблюдений определить СКО.

Расчет доверительных интервалов для случая, когда распределение результатов наблюдений нормально, но их дисперсия неизвестна, т. е. при малом числе наблюдений n , возможно выполнить с использованием распределения Стьюдента $S(t, k)$. Оно описывает плотность распределения отношения (дроби Стьюдента):

$$t = \frac{\bar{x} - M[x]}{S_x^-} = \frac{\bar{x} - Q}{S_x^-} = \sqrt{n} \frac{\bar{x} - Q}{S_x},$$

где Q – истинное значение измеряемой величины. Величины $\bar{x}$, S_x и S_x^- вычисляются на основании опытных данных и представляют собой точечные оценки МО, СКО результатов измерений и СКО среднего арифметического значения.

Вероятность того, что дробь Стьюдента в результате выполненных наблюдений примет некоторое значение в интервале $(-t_p; +t_p)$

$$P \left\{ -t_p < \frac{\bar{x} - Q}{S_x^-} < +t_p \right\} = P \left\{ \left| \bar{x} - Q \right| < \frac{t_p S_x}{\sqrt{n}} \right\} = \int_{-t_p}^{+t_p} S(t, k) dt = 2 \int_0^{t_p} S(t, k) dt, \quad (6.10)$$

где k – число степеней свободы, равное $(n - 1)$. Величины t_p (называемые в данном случае коэффициентами Стьюдента), рассчитанные с помощью двух последних формул для различных значений доверительной вероятности и числа измерений, табулированы (см. табл. В.2 в приложении В). Следовательно, с помощью распределения Стьюдента можно найти вероятность того, что отклонение среднего арифметического от истинного значения измеряемой величины не превышает $\Delta_p = t_p S_x^- = t_p S_x$.

В тех случаях, когда распределение случайных погрешностей не является нормальным, все же часто пользуются распределением Стьюдента с приближением, степень которого остается неизвестной. Распределение Стьюдента применяют при числе измерений $n < 30$, поскольку уже при $n = 20, \dots, 30$ оно переходит в нормальное и вместо уравнения (6.10) можно использовать уравнение (6.19). Результат измерения записывается в виде:

$$Q = \bar{x} \pm t S_x / \sqrt{n}; P = P_d,$$

где P_d – конкретное значение доверительной вероятности. Множитель t при большом числе измерений n равен квантильному множителю z_p . При малом n он равен коэффициенту Стьюдента.

Полученный результат измерения не является одним конкретным числом, а представляет собой интервал, внутри которого с некоторой вероятностью P_d находится истинное значение измеряемой величины. Выделение середины интервала $\bar{x}$ вовсе не предполагает, что истинное значение ближе к нему, чем к остальным точкам интервала. Оно может быть в любом месте интервала, а с вероятностью $1 - P_d$ даже вне его.

Пример. Определение величины дало следующие результаты: 1,21; 1,17; 1,18; 1,13; 1,19; 1,14; 1,20 и 1,18. Считая, что систематическая погрешность отсутствует, а случайная распределена по нормальному закону, требуется определить доверительный интервал при значениях доверительной вероятности 0,9 и 0,95. Для решения задачи использовать формулу Лапласа и распределение Стьюдента.

По формулам (6.4) и (6.7) находим оценки среднего арифметического значения и СКО результатов измерений. Они соответственно равны 1,18 и 0,0278. Считая, что оценка СКО равна самому отклонению, находим

$$P\left\{1,18 - z_p \frac{0,0278}{\sqrt{8}} < x < 1,18 + z_p \frac{0,0278}{\sqrt{8}}\right\} = 2\Phi(z_p) = 0,9.$$

Отсюда, используя значения функции Лапласа, приведенные в таблице приложения В, определяем, что $z_p = 1,65$. Для $P = 0,95$ коэффициент $z_p = 1,96$. Доверительные интервалы, соответствующие $P = 0,9$ и $0,95$, равны $1,18 \pm 0,016$ и $1,18 \pm 0,019$.

В том случае, когда нет оснований считать, что СКО и его оценка равны, доверительный интервал определяется на основе распределения Стьюдента:

$$P\left\{\left|\bar{x} - Q\right| < \frac{t_p 0,0278}{\sqrt{8}}\right\} = 2 \int_0^{t_p} S(t, k) dt = 0,9.$$

По таблице приложения В находим, что $t_{0,9} = 1,9$ и $t_{0,95} = 2,37$. Отсюда доверительные интервалы соответственно равны $1,18 \pm 0,019$ и $1,18 \pm 0,023$.

6.6 Грубые погрешности и методы их исключения

6.6.1 Понятие о грубых погрешностях

Грубая погрешность, или промах, – это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Источ-

ником грубых погрешностей нередко бывают резкие изменения условий измерения и ошибки, допущенные оператором. К ним можно отнести:

- неправильный отсчет по шкале измерительного прибора, происходящий из-за неверного учета цены малых делений шкалы;
- неправильная запись результата наблюдений, значений отдельных мер использованного набора, например гирь;
- хаотические изменения параметров питающего СИ напряжения, например, его амплитуды или частоты.

Грубые погрешности, как правило, возникают при однократных измерениях и обычно устраняются путем повторных измерений. Их причинами могут быть внезапные и кратковременные изменения условий измерения или оставшиеся незамеченными неисправности в аппаратуре.

Корректная статистическая обработка выборки возможна только при ее однородности, т. е. в том случае, когда все ее члены принадлежат к одной и той же генеральной совокупности. В противном случае обработка данных бессмысленна. «Чужие» отсчеты по своим значениям могут существенно не отличаться от «своих» отсчетов. Их можно обнаружить только по виду гистограмм или дифференциальных законов распределения. Наличие таких аномальных отсчетов принято называть загрязнениями выборки, однако выделить члены выборки, принадлежащие каждой из генеральных совокупностей, практически невозможно.

Если «свои» и «чужие» отсчеты различаются по значениям, то их исключают из выборки (рис. 6.15 а). Особую неприятность доставляют отсчеты, которые хотя и не входят в компактную группу основной массы отсчетов выборки, но и не удалены от нее на значительное расстояние, – так называемые предполагаемые промахи (рис. 6.15 б). Отбрасывание «слишком» удаленных от центра выборки отсчетов называется цензурированием выборки. Это осуществляется с помощью специальных критериев.

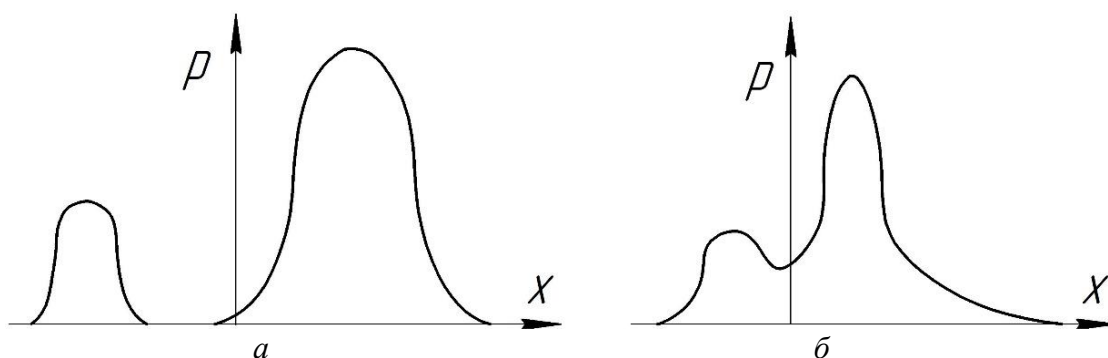


Рисунок 6.15 – Проявление промахов на дифференциальном законе распределения вероятности:

а – явные промахи, б – предполагаемые промахи

6.6.2 Критерии исключения грубых погрешностей

При однократных измерениях обнаружить промах не представляется возможным. Для уменьшения вероятности появления промахов измерения проводят два–три раза и за результат принимают среднее арифметическое полученных отсчетов. При многократных измерениях для обнаружения промахов используют статистические критерии, предварительно определив, какому виду распределения соответствует результат измерений.

Вопрос о том, содержит ли результат наблюдений грубую погрешность, решается общими методами проверки статистических гипотез. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат наблюдения x_i не содержит грубой погрешности, т. е. является одним из значений измеряемой величины. Пользуясь определенными статистическими критериями, пытаются опровергнуть выдвинутую гипотезу. Если это удастся, то результат наблюдений рассматривают как содержащий грубую погрешность и его исключают.

Для выявления грубых погрешностей задаются вероятностью q (уровнем значимости) того, что сомнительный результат действительно мог иметь место в данной совокупности результатов измерений.

Критерий «трех сигм» применяется для результатов измерений, распределенных по нормальному закону. По этому критерию считается, что результат, возникающий с вероятностью $q \leq 0,003$, маловероятен и его можно считать промахом, если $|\bar{x} - x_i| > 3S_x$, где S_x – оценка СКО измерений. Величины $\bar{x}$ и S_x вычисляют без учета экстремальных значений x_i . Данный критерий надежен при числе измерений $n \geq 20 \dots 50$.

Это правило обычно считается слишком жестким, поэтому рекомендуется назначать границу цензурирования в зависимости от объема выборки: при $6 < n < 100$ она равна $4S_x$; при $100 < n \leq 1000$ – $4,5S_x$; при $1000 < n < 10000$ – $5S_x$. Данное правило также применимо только для нормального закона.

В общем случае границы цензурирования $t_{zp} S_x$ выборки зависят не только от объема n , но и от вида распределения. Назначая ту или иную границу, необходимо оценить уровень значимости q , т. е. вероятность исключения какой-либо части отсчетов, принадлежащих обрабатываемой выборке. Для приближенного расчета коэффициента t_{zp} при уровне значимости $q < 1/(n + 1)$:

$$t_{zp} = 1,55 + 0,8\sqrt{\varepsilon - 1} \lg(n/10),$$

где ε – эксцесс распределения.

Данные выражения применимы для:

– кругловершинных двухмодальных распределений с $\varepsilon = 1,5, \dots, 3$, являющихся композицией дискретного двузначного и нормального распределений;

– островершинных двухмодальных распределений с $\varepsilon = 1,5, \dots, 6$, являющихся композицией дискретного двузначного распределения и распределения Лапласа;

– композиций равномерного и экспоненциальных распределений с показателем степени $\alpha = 1/2$ при $\varepsilon = 1,8, \dots, 6$;

– экспоненциальных распределений с $\varepsilon = 1,5, \dots, 6$.

Критерий Романовского применяется, если число измерений $n < 20$. При этом вычисляется отношение $|(\bar{x} - x_i)/S_x| = \beta$ и сравнивается с критерием β_T , выбранным по таблице 6.8. Если $\beta \geq \beta_T$, то результат x_i считается промахом и отбрасывается.

Пример. При диагностировании топливной системы автомобиля результаты пяти измерений расхода топлива составили: 22, 24, 26, 28, 30 л на 100 км. Последний результат вызывает сомнение. Проверяем по критерию Романовского, не является ли он промахом.

Найдем среднее арифметическое значение расхода топлива и его СКО без учета последнего результата, т. е. для четырех измерений. Они соответственно равны 25 и 2,6 л на 100 км.

Поскольку $n < 20$, то по критерию Романовского при уровне значимости 0,01 и $n = 4$ табличный коэффициент $\beta_T = 1,73$. Вычисленное для последнего, пятого измерения $\beta_T = |(25 - 30)/2,6| = 1,92 > 1,73$.

Критерий Романовского свидетельствует о необходимости отбрасывания последнего результата измерения.

Критерий Шарлье используется, если число наблюдений в ряду велико ($n > 20$). Тогда по теореме Бернулли число результатов, превышающих по абсолютному значению среднее арифметическое значение на величину $K_{III} S_x$, будет $n[1 - \Phi(K_{III})]$, где $\Phi(K_{III})$ – значение нормированной функции Лапласа для $X = K_{III}$. Если сомнительным в ряду результатов наблюдений является один результат, то $n[1 - \Phi(K_{III})] = 1$. Отсюда $\Phi(K_{III}) = (n - 1)/n$. Значения критерия Шарлье приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.8 – Значения критерия Романовского $\beta - f(n)$

q	n = 4	n = 6	n = 8	n = 10	n = 12	n = 15	n = 20
0,01	1,73	2,16	2,43	2,62	2,75	2,90	3,08
0,02	1,72	2,13	2,47	2,54	2,66	2,80	2,96
0,05	1,71	2,10	2,27	2,41	2,52	2,64	2,78
0,10	1,69	2,00	2,17	2,29	2,39	2,49	2,62

Таблица 6.9 – Значения критерия Шарлье

N	5	10	20	30	40	50	100
$K_{ш}$	1,3	1,65	1,96	2,13	2,24	2,32	2,58

Пользуясь критерием Шарлье, отбрасывают результат, для значения которого в ряду из n наблюдений выполняется неравенство $|x_i - \bar{x}| > K_{ш} S_x$.

Вариационный критерий Диксона удобный и достаточно мощный (с малыми вероятностями ошибок). При его применении полученные результаты наблюдений записывают в вариационный возрастающий ряд $x_1, x_2, \dots, x_n$ ($x_1 < x_2 < \dots < x_n$). Критерий Диксона определяется как $K_D = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1)$. Критическая область для этого критерия $P(K_D > Z_q) = q$. Значения Z_q приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Значения критерия Диксона

n	Z_q при q равном			
	0,10	0,05	0,02	0,01
4	0,68	0,76	0,85	0,89
6	0,48	0,56	0,64	0,70
8	0,40	0,47	0,54	0,59
10	0,35	0,41	0,48	0,53
14	0,29	0,35	0,41	0,45
16	0,28	0,33	0,39	0,43
18	0,26	0,31	0,37	0,41
20	0,26	0,30	0,36	0,39
30	0,22	0,26	0,31	0,34

Пример. Было проведено пять измерений. Получены следующие данные: 127,1; 127,2; 126,9; 127,6; 127,2. Результат 127,6 существенно (на первый взгляд) отличается от остальных. Проверить, не является ли он промахом.

Составим вариационный ряд из результатов измерений: 126,9; 127,1; 127,2; 127,2; 127,6. Для крайнего члена этого ряда

(127,6) критерий Диксона:

$$K_D = (127,6 - 127,2) / (127,6 - 126,9) = 0,4 / 0,7 \approx 0,57.$$

Как следует из таблицы 6.10, по этому критерию результат 127,6 может быть отброшен как промах лишь на уровне значимости $q = 0,10$.

Применение рассмотренных критериев требует осмотрительности и учета объективных условий измерений. Конечно, оператор должен исключить результат наблюдения с явной грубой погрешностью и выполнить новое измерение. Но он не имеет права отбрасывать более или менее резко отличающиеся от других результаты наблюдений. В сомнительных случаях лучше сделать дополнительные измерения (не взамен сомнительных, а кроме них) и затем привлекать на помощь рассмотренные выше статистические критерии. Кроме рассмотренных критериев, существуют и другие, например критерии Граббса и Шовенэ.

6.7 Основы теории суммирования погрешностей

Определение расчетным путем оценки результирующей погрешности по известным оценкам ее составляющих называется суммированием погрешностей [16–26].

Главной проблемой, возникающей при суммировании, является то, что все составляющие погрешности должны рассматриваться как случайные величины. С точки зрения теории вероятностей они наиболее полно могут быть описаны своими законами распределения, а их совместное действие – соответствующим многомерным распределением. Однако в такой постановке задача суммирования погрешностей практически не разрешима уже для нескольких составляющих, не говоря о нескольких десятках.

Практически приемлемый путь решения данной задачи суммирования погрешностей состоит в отказе от определения и использования многомерных функций распределения составляющих погрешности. Необходимо подобрать для характеристик составляющих такие числовые оценки (СКО, эксцесс и др.), оперируя с которыми можно было бы получить соответствующие числовые оценки результирующей погрешности. При этом следует учитывать, что:

- отдельные составляющие погрешности могут быть коррелированы между собой;
- при суммировании случайных величин их законы распределения существенно деформируются, т. е. форма закона суммы может резко отличаться от формы закона распределения составляющих.

Правила суммирования погрешностей основываются на том, что погрешность по абсолютному значению всегда много меньше самой измеряемой величины. Поэтому изменение погрешности в зависимости от изменения измеряемой величины может быть учтено, если все суммируемые случайные и систематические составляющие погрешности разделить на аддитивные и мультипликативные. Сумма аддитивных составляющих даст значение аддитивной части результирующей погрешности, а сумма мультипликативных составляющих – значение мультипликативной части результирующей погрешности.

В пределах некоторого диапазона изменения, как правило, десятикратного, измеряемой величины, изменение результирующей погрешности может быть с достаточной степенью точности представлено прямой линией или простейшей кривой (парабола, гипербола). Это дает возможность описать результирующую погрешность линейной или нелинейной двухзвенной формулой. При большем изменении измеряемой величины весь диапазон разбивается на участки, для которых и определяются крайние погрешности.

Для устранения влияния деформации формы законов распределения все суммируемые составляющие исходно представляются своими СКО и все операции расчетного суммирования проводятся только над ними. Учет взаимных корреляционных связей между суммируемыми составляющими производится путем использования различных правил суммирования для жестко и слабо коррелированных составляющих.

В результате суммирования СКО составляющих получаются средние квадратические отклонения соответственно аддитивной, мультипликативной или нелинейной составляющих результирующей погрешности. СКО аддитивной составляющей результирующей погрешности будет характеризовать результирующую погрешность в начале диапазона. Сумма СКО аддитивной и мультипликативной составляющих в конце диапазона описывает результирующую погрешность в конце диапазона. Если участков несколько, то суммирование проводится на всех участках, а затем принимается решение о методе описания результирующей погрешности.

Результирующую погрешность необходимо выразить в виде доверительного интервала. Его расчет по полученному СКО является с точки зрения теории самой трудной операцией при суммировании погрешностей. Это связано с тем, что доверительный интервал равен произведению рассчитанного СКО и множителя, зависящего от закона распределения результирующей погрешности. В то же время вся излагаемая методика с самого начала была нацелена на то, чтобы обойтись без точного определения результирующего закона распределения суммы всех составляющих.

Практические правила расчетного суммирования результирующей погрешности состоят в следующем:

1. Для определения суммарного значения СКО должны учитываться корреляционные связи различных составляющих погрешности. В связи с этим исходными данными для более точного расчета должны служить оценки именно всех отдельных составляющих погрешности, а не оценки некоторых суммарных погрешностей.

2. Для каждой составляющей должно быть найдено ее СКО. В большинстве случаев для этого необходимо знание или предположение о виде закона ее распределения.

3. Все суммируемые составляющие разделяются на аддитивные и мультипликативные составляющие, которые суммируются отдельно.

4. Так как в большинстве случаев точное значение коэффициента корреляции r найти невозможно, то все погрешности должны быть условно разделены на:

- сильно коррелированные при $0,7 \leq |r| \leq 1$, для которых считают $r = \pm 1$ в зависимости от знака коэффициента корреляции;
- слабо коррелированные при $0 \leq |r| \leq 0,7$, для которых $r = 0$.

5. Из суммируемых составляющих выделяются группы сильно

коррелированных между собой погрешностей, и внутри этих групп производится алгебраическое суммирование их оценок.

6. После алгебраического суммирования групп сильно коррелированных погрешностей суммарные по группам и оставшиеся вне групп погрешности можно считать некоррелированными и складывать по правилу геометрического суммирования.

Для определения СКО суммарной погрешности при начальном значении измеряемой величины складывают лишь аддитивные составляющие, а для определения СКО погрешности в конце диапазона изменения измеряемой величины – все просуммированные выше составляющие.

7. Для перехода от СКО погрешности к доверительному значению должно быть вынесено суждение о форме закона распределения результирующей погрешности и тем самым выбрано значение квантильного множителя.

Изложенная методика может быть несколько упрощена. Самым сложным в ней являются нахождение СКО всех составляющих по известным их интервальным оценкам и определение интервальной оценки результирующей погрешности по полученному СКО.

В обоих случаях необходимо знание закона распределения погрешностей. Упрощение методики суммирования состоит в том, чтобы сделать эти переходы по возможности более простыми. Один из вариантов состоит в следующем. Согласно центральной предельной теореме, если число суммируемых независимых составляющих достаточно велико (практически при $m \geq 5$) и если среди этих составляющих нет существенно преобладающих над остальными, то результирующий закон распределения близок к нормальному. Однако предположение о близости закона распределения к нормальному без соответствующего анализа достаточно рискованно даже и при большом числе суммируемых составляющих. Тем не менее при недостатке времени и невысоких требованиях к точности получаемого результата предположение о нормальности закона распределения результирующей погрешности вполне возможно. В этом случае доверительный интервал $\Delta = z_p S_\Sigma$, где z_p – квантильный множитель, определяемый через функцию Лапласа; S_Σ – суммарное СКО или его оценка.

Такой прием существенно снижает трудоемкость расчетов, но может вносить весьма значительные ошибки, если реальное распределение сильно отличается от нормального закона. Например, при фактическом арксинусоидальном распределении ошибка может достигать 180 %. Поэтому использовать его надо весьма осмотрительно.

В качестве другого пути упрощения перехода от СКО результирующей погрешности к ее интервальной оценке следует указать возможность использования доверительной вероятности $P_d = 0,9$, при кото-

рой для большой группы различных распределений имеет место соотношение $\Delta = 1,6S_x$

6.8 Вопросы для самоконтроля

1. Приведите примеры дискретных случайных величин.
2. Приведите пример графика распределения дискретной случайной величины.
3. Чем дискретные случайные величины отличаются от непрерывных?
4. Приведите пример графика распределения плотности вероятности непрерывной случайной величины.
5. Дайте определение понятию «интегральная функция распределения».
6. Дайте определение понятию «дифференциальная функция распределения».
7. Какими свойствами обладает интегральная функция распределения?
8. Проиллюстрируйте интегральную и дифференциальную функции распределения.
9. О чем можно судить по форме кривой плотности вероятности?
10. Проиллюстрируйте суммирование законов распределений.
11. Что показывает и как может быть найдена координата центра распределения случайной величины?
12. Определите понятие «первый начальный момент случайной величины».
13. Определите понятие «второй начальный момент случайной величины».
14. Определите понятие «третий центральный момент случайной величины».
15. Определите понятие «четвертый центральный момент случайной величины».
16. Изобразите вид дифференциальной функции распределения при различных значениях коэффициента асимметрии.
17. Изобразите вид дифференциальной функции распределения при различных значениях эксцесса.
18. Дайте определение понятию «энтропийный интервал неопределенности».
19. Какие законы распределения случайных величин используются в метрологии?
20. Перечислите и проиллюстрируйте трапецеидальные распределения случайных величин.

21. Запишите уравнения равномерного, собственно трапецеидального и треугольного (Симпсона) распределений случайных величин.

22. Запишите формулы математического ожидания и среднеквадратического отклонения трапецеидальных распределений случайных величин.

23. Запишите формулу экспоненциальных распределений случайных величин.

24. Проиллюстрируйте экспоненциальные распределения случайных величин.

25. Запишите формулу нормального закона распределения случайных величин.

26. Какими параметрами определяется форма уплощенного распределения?

27. Проиллюстрируйте уплощенное распределение случайной величины.

28. Запишите формулу распределений Стьюдента в центрированном и нормированном виде.

29. Каковы особенности распределения Стьюдента?

30. Чем свойства распределения Коши отличаются от свойств экспоненциальных распределений?

31. Как классифицируются двухмодальные распределения?

32. Проиллюстрируйте дискретное двузначное, арксинусоидальное и двухмодальные остро- и кругловершинные распределения.

33. Запишите выражения для описания арксинусоидального распределения.

34. Перечислите параметры остро- и кругловершинных двухмодальных распределений.

35. Запишите формулы для определения точечных оценок математического ожидания, дисперсии, среднего квадратического отклонения, асимметрии и эксцесса случайной величины.

36. Как можно оценить относительную погрешность определения среднего квадратического отклонения?

37. На основе чего можно строить доверительные интервалы?

38. Какова последовательность получения интервальной оценки нормально распределенной случайной величины?

39. Как производится расчет доверительных интервалов для случая, когда распределение результатов наблюдений нормально, но их дисперсия неизвестна?

40. Как производится расчет доверительных интервалов в тех случаях, когда распределение случайных погрешностей не является нормальным?

41. Дайте определение понятию «грубая погрешность».

42. Перечислите источники грубых погрешностей.

43. Проиллюстрируйте проявление промахов на дифференциальном законе распределения вероятности.

44. Перечислите известные Вам критерии для выявления грубых погрешностей.

45. В чем суть критерия «трех сигм» для выявления грубых погрешностей?

46. В чем суть критерия Романовского для выявления грубых погрешностей?

47. В чем суть критерия Шарлье для выявления грубых погрешностей?

48. В чем суть вариационного критерия Диксона для выявления грубых погрешностей?

49. Какие Вам известны практические правила расчетного суммирования результирующей погрешности?

7 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

7.1 Понятие о средстве измерения

Понятие «средство измерений» является одним из важнейших в теоретической метрологии. ГОСТ 16263 определяет средство измерений как техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства. Такое определение представляется слишком кратким и не раскрывает все стороны этого многогранного понятия. Более удачным является другое: средство измерений – это техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и(или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. Данное определение раскрывает метрологическую сущность средств измерения, заключающуюся в умении хранить (или воспроизводить) единицу ФВ и в неизменности размера хранимой единицы во времени. Первое обуславливает возможность выполнения измерения, суть которого, как известно, состоит в сравнении измеряемой величины с ее единицей. Второе принципиально необходимо, поскольку при изменении размера хранимой единицы ФВ с помощью данного средства измерения нельзя получить результат с требуемой точностью.

Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, которые реализуют одну из двух функций:

- воспроизводят величину заданного (известного) размера – например, гиря – заданную массу, магазин сопротивлений – ряд дискретных значений сопротивления;
- вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о значении измеряемой величины. Показания СИ либо непосредственно воспринимаются органами чувств человека (например, показания стрелочного или цифрового приборов), либо они недоступны восприятию человеком и используются для преобразования другими СИ.

Последняя функция, являющаяся основной, может быть реализована только посредством измерения, составляющие операции которого рассмотрены в главе 4.

7.2 Принципиальная схема СИ

Очевидно, что СИ должны содержать устройства (блоки, модули), которые выполняют эти элементарные операции. Такие устройства называются элементарными средствами измерений. В их число входят измерительные преобразователи, меры и устройства сравнения (компараторы) [23–24].

Измерительный преобразователь – это техническое устройство, построенное на определенном физическом принципе и выполняющее одно частное измерительное преобразование, т. е. операцию преобразования входного сигнала X в выходной X_1 информативный параметр которого с заданной степенью точности функционально связан с информативным параметром входного сигнала и может быть измерен с достаточной степенью точности. Информативным параметром входного сигнала СИ является параметр входного сигнала, функционально связанный с измеряемой величиной и используемый для передачи ее значения или являющийся самой измеряемой величиной.

Мера – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения и(или) хранения физической величины одного (однозначная мера) или нескольких (многозначная мера) размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Устройство сравнения (компаратор) – это средство измерений, дающее возможность выполнять сравнение мер однородных величин или же показаний измерительных приборов.

Обобщенная структурная схема СИ показана на рисунке 7.1. Входным сигналом является измерительный сигнал, один из параметров которого однозначно связан с измеряемой ФВ:

$$X = X\{a_0[\Psi(t)], a_1, a_2, \dots, a_n\},$$

где a_0 – информативный параметр входного сигнала; $\psi(t)$ – измеряемая ФВ; $a_1, a_2, \dots, a_n$ – неинформативные параметры входного сигнала. Неинформативным параметром входного сигнала СИ называется его параметр, не используемый для передачи значения измеряемой величины.

Входной сигнал преобразуется измерительным преобразователем в пропорциональный ему сигнал X_1 . Следует отметить, что преобразователь может отсутствовать, тогда входной сигнал будет подаваться непосредственно на один из входов устройства сравнения. Однако в большинстве случаев он входит в состав СИ.

Сигнал с выхода измерительного преобразователя поступает на первый вход устройства сравнения, на второй вход которого подается известный сигнал с выхода многозначной меры. Роль меры могут выполнять самые разные устройства. Например, при взвешивании на весах

мерой являются гири с известным весом. Во многих простых СИ роль меры выполняют отсчетные шкалы, предварительно проградуированные в единицах измеряемой величины. К таким средствам измерений относятся линейка, термометр, электромеханические вольтметры и др. Значение выходной величины многозначной меры изменяется в зависимости от величины цифрового кода N , который условно считается ее входным сигналом. Изменение кода осуществляется оператором (например, при взвешивании на весах) или автоматически. Так как цифровой код – величина дискретная, то и выходной сигнал меры изменяется ступенями – квантами, кратными единице сравниваемых величин. Например, при измерении температуры обычным бытовым термометром квант равен $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при использовании медицинского термометра он равен $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

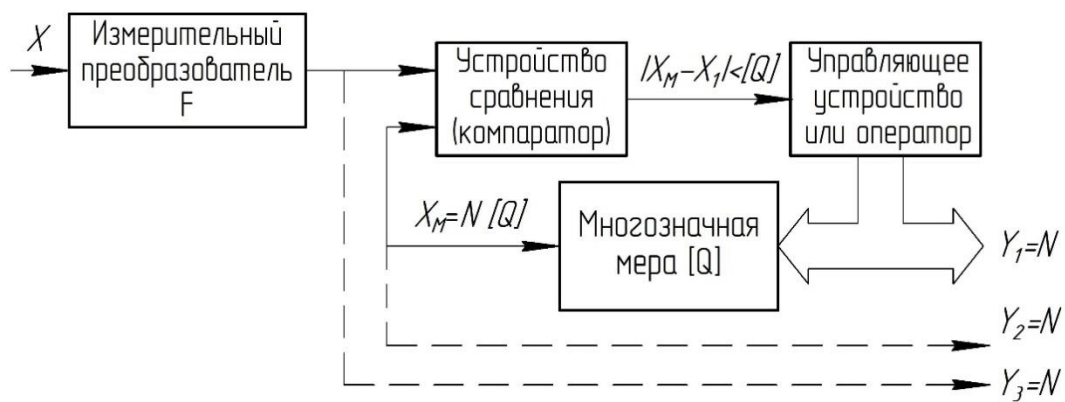


Рисунок 7.1 – Обобщенная структурная схема средства измерения

Сравнение измеряемой и известной величин осуществляется при помощи устройства сравнения. Роль последнего в простейших СИ, имеющих отсчетные шкалы, выполняет человек. Например, при измерении длины тела он сопоставляет ее с многозначной мерой – линейкой и находит количество N квантов меры, равное с точностью до кванта измеряемой длине. Устройство сравнения дает информацию, о том, какое значение выходного сигнала многозначной меры должно быть установлено автоматически или при участии оператора. Процесс изменения прекращается при достижении равенства между величинами X_1 и X_M с точностью до кванта $[Q]$.

Выходным сигналом может служить один из трех сигналов: Y_1 , Y_2 и Y_3 . Если выходной сигнал предназначен для непосредственного восприятия человеком, то его роль выполняет сигнал $Y_1 = N$. В данном случае код N является привычным для человека десятичным кодом.

Если же выходной сигнал СИ предназначен для применения в других СИ, то в качестве него может быть использован любой из трех сигналов: Y_1 , Y_2 и Y_3 . Первый из них при этом является цифровым, как правило, двоичным кодом, который «понимают» входные цифровые

устройства последующих СИ. Аналоговый сигнал Y_2 квантован по уровню и представляет собой эквивалент цифрового кода N , а СИ в этом случае предназначено для воспроизведения физической величины заданного размера и состоит только из одного блока – многозначной меры. Сигнал Y_3 представляет собой измерительное преобразование входного сигнала X , СИ при этом используется только как измерительный преобразователь, а остальные его блоки отсутствуют [23–24].

Таким образом, структурная схема, показанная на рисунке 7.1, описывает три возможных варианта:

- СИ включает все блоки и вырабатывает сигнал Y_1 , доступный восприятию органами чувств человека. Возможно формирование выходных сигналов Y_1 и Y_2 , предназначенных только для преобразования другими СИ;

- СИ состоит только из измерительного преобразователя, выходной сигнал которого равен Y_3 ;

- СИ содержит только меру, выходной сигнал которой равен Y_2 .

В общем случае выходной сигнал $Y(X)$ описывается выражением

$$Y = Y\{b_0[X], b_1, b_2, \dots, b_m, S_1, S_2, \dots, S_L, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k\},$$

где $b_0[X]$ – информативный параметр выходного сигнала, функционально связанный с информативным параметром входного сигнала; $b_1, b_2, \dots, b_m$ – неинформативные параметры выходного сигнала; $S_1, S_2, \dots, S_L$ – параметры СИ, зависящие от его методической и аппаратной реализации; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ – влияющие величины. Неинформативным параметром выходного сигнала СИ называется параметр, не используемый для передачи или индикации значения информативного параметра входного сигнала.

Пример. Рассмотрим структурные элементы аналогового электромеханического амперметра магнитоэлектрической системы, предназначенного для измерения больших значений постоянного тока. Схема его приведена на рисунке 7.2, а. В состав амперметра входят шунт $R_{ш}$ и параллельно подключенный ему электромеханический измерительный преобразователь (ЭМИП) магнитоэлектрической системы. Последний представляет собой закрепленную на оси подвижную легкую измерительную катушку из провода сопротивлением $R_{п}$, через которую протекает ток $I_{п}$. Катушка находится в равномерном магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом. При прохождении тока по катушке происходит поворот рамки [23–24].

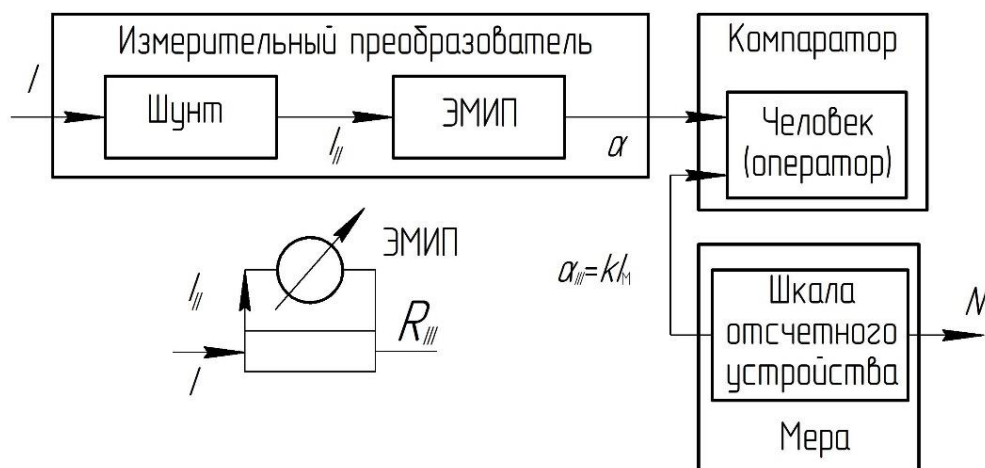


Рисунок 7.2 – Схемы электромеханического амперметра магнитоэлектрической системы:
а – принципиальная, б – структурная

Шунт предназначен для деления измеряемого тока I на малый ток I_{π} , проходящий через ЭМИП, и большой ток $I_{\text{ш}}$, протекающий собственно через шунт. Ток I_{π} прямо пропорционален измеряемому току I :

$$I_{\pi} = IR_{\text{ш}} / (R_{\text{ш}} + R_{\pi});$$

Отсюда следует, что шунт является измерительным преобразователем, который преобразует измеряемый ток I в пропорциональное ему значение тока I_{π} . Преобразованный ток I_{π} поступает на ЭМИП и, проходя через него, вызывает отклонение стрелки на угол α , пропорциональный данному току:

$$\alpha = f(I_{\pi}) = BSwI_{\pi} / W_{\text{уд}} = K_{\text{си}} I_{\pi}, \quad (7.1)$$

где B – магнитная индукция; S – площадь; w – число витков измерительной катушки; $W_{\text{уд}}$ – удельный противодействующий момент. Величины B , S , w и $W_{\text{уд}}$ постоянны и являются параметрами ЭМИП.

Из изложенного видно, что ЭМИП – это измерительный преобразователь, который преобразует ток I_{π} в угол поворота стрелки α . Этот угол затем сравнивается с отметками $\alpha_{\text{ш}}$ на шкале отсчетного устройства амперметра, которые предварительно были нанесены с использованием прецизионной многозначной меры постоянного тока. Шкала с отметками $\alpha_{\text{ш}} = kI_{\text{м}}$, где k – коэффициент пропорциональности, выполняет в рассматриваемом приборе роль многозначной меры (рис. 7.2 б). В качестве устройства сравнения в данном случае выступает человек, который сравнивает угол отклонения стрелки с отметками на шкале. Таким образом, в аналоговом электромеханическом амперметре присутствуют все три составных элемента СИ.

7.3 Статические и динамические характеристики и параметры средств измерений

СИ могут работать в двух режимах: статическом и динамическом. Статический режим – это такой режим работы СИ, при котором изменением величины за время, требуемое для проведения одного измерения, можно пренебречь. В динамическом режиме такое пренебрежение недопустимо, поскольку указанное изменение превышает допустимую погрешность [23–24, 38–41].

Основной характеристикой СИ в статическом режиме является функция (уравнение) преобразования – зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра его входного сигнала. В общем виде она может быть записана в виде

$$Y\{b_0[X], b_1, b_2, \dots, b_m, S_1, S_2, \dots, S_L, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k\} = F\{X\{a_0[\Psi(t)], a_1, a_2, \dots, a_n\}, S_1, \dots, S_L\},$$

где F – некоторый функционал, описывающий ряд определенных математических операций, производимых над входной величиной X .

При разработке СИ стремятся к тому, чтобы обеспечить линейную связь между входной и выходной величинами в упрощенной форме $Y(t) = KX(t)$, где K – коэффициент преобразования. Например, для электромеханического амперметра магнитоэлектрической системы функцией преобразования является линейная зависимость (7.1).

Функция преобразования, представленная в виде формулы, таблицы или графика, используется в рабочих условиях для определения значений измеряемой с помощью СИ величины по известному информативному параметру его входного сигнала.

Различают три вида функций преобразования:

- номинальную F , которая указывается в нормативно-технической документации на данный тип СИ. Она устанавливается для стандартизованных средств измерений массового производства;

- индивидуальную $F_{\text{и}}$, которая принимается для конкретного экземпляра СИ и устанавливается путем экспериментальных исследований (индивидуальной градуировки) этого экземпляра при определенных значениях влияющих величин;

- действительную $F_{\text{д}}$, которая совершенным образом (без погрешностей) отражает зависимость информативного параметра выходного сигнала конкретного экземпляра СИ от информативного параметра его входного сигнала в тех условиях и в тот момент времени, когда эта зависимость определяется (рис. 7.3).

Некоторые СИ обладают вариацией показаний, под которой понимается разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона

измерений при плавном подходе к ней со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Важной характеристикой СИ является его *чувствительность* S – свойство, определяемое отношением изменения ΔY выходного сигнала Y к вызывающему его изменению ΔX входного сигнала X . Различают абсолютную $S = \Delta Y / \Delta X$ и относительную $S = \Delta Y / (\Delta X / X)$ чувствительности.

Наименьшее значение изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение, называется *порогом чувствительности* данного средства измерений.

Существует ряд характеристик и параметров СИ, которые описывают некоторые их свойства безотносительно к режиму работы. К таким относятся *импедансные характеристики* – характеристики, описывающие свойства СИ отбирать или отдавать энергию через свои входные или выходные цепи. Для электрических СИ это прежде всего входные и выходные сопротивления и емкости.

Воздействие влияющих величин на метрологические характеристики СИ описывается *функцией влияния* $\psi(\xi)$ – зависимостью изменения характеристик и параметров от изменения влияющей величины или совокупности влияющих величин $\xi_1, \dots, \xi_n$.

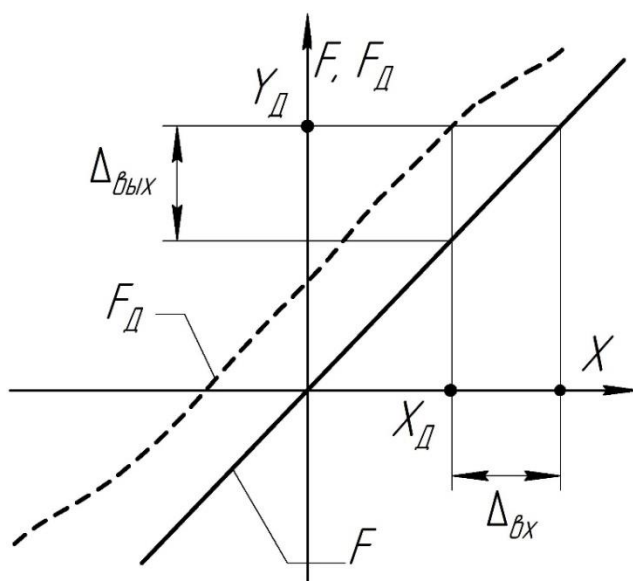


Рисунок 7.3 – Номинальная и действительная функции преобразования

Все рассмотренные выше характеристики являются метрологическими. Кроме них существует большая группа характеристик, называемых неметрологическими. К ним относятся показатели надежности, устойчивости к климатическим и механическим воздействиям, время установления рабочего режима, напряжение питания, потребляемая мощность и др.

В статических режимах выходной сигнал СИ в точности соответствует входному (при условии отсутствия статических погрешностей) и, следовательно, коэффициент преобразования K равен номинальному коэффициенту K_0 во всем диапазоне изменения входной величины $X(t)$. Уравнение преобразования имеет вид

$$Y(t) = K_0 X(t) \quad (7.2)$$

и соответствует идеальному безынерционному линейному преобразованию. Реальные СИ обладают инерционными (динамическими) свойствами, обусловленными особенностями используемых элементов. Это приводит к более сложной зависимости между входным и выходным сигналами. Свойства СИ в динамических режимах, т. е. когда время изменения измеряемой величины сравнимо со временем измерения, описываются совокупностью так называемых динамических характеристик.

Основной из них является *полная динамическая характеристика*, полностью описывающая принятую математическую модель динамических свойств СИ. В качестве нее используют: дифференциальные уравнения; переходную, импульсную переходную, амплитудно-фазовую и амплитудно-частотную характеристики; совокупность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик; передаточную функцию.

Кроме полных характеристик часто используются частные, представляющие собой функционал или параметр полной динамической характеристики. К ним относятся: время реакции, неравномерность АЧХ, время нарастания переходной характеристики и ряд других [23–24].

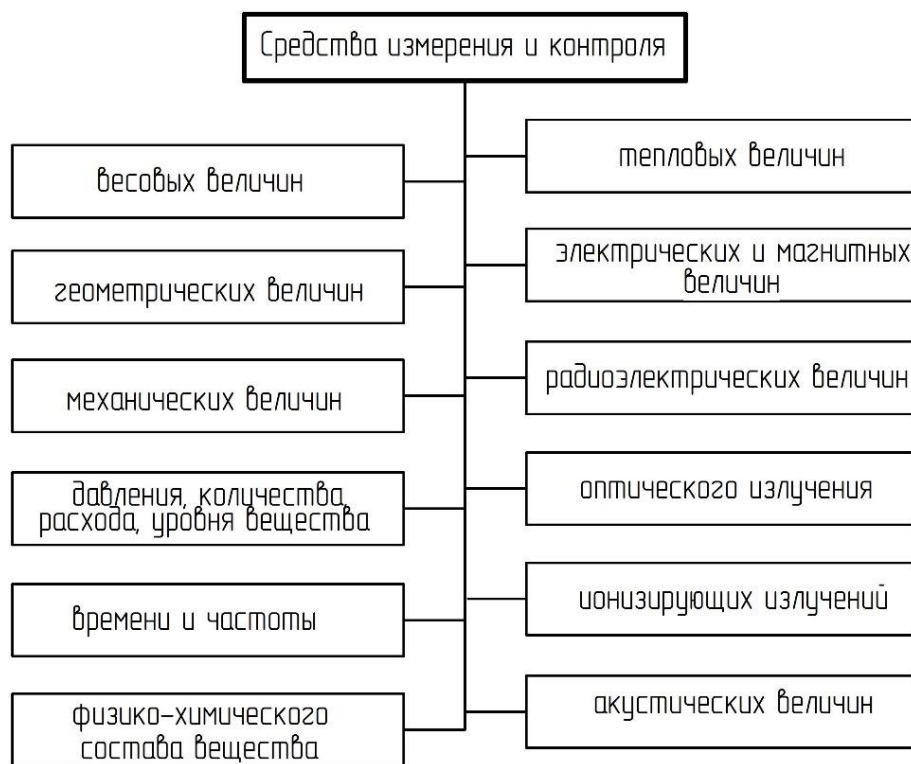
Терминология динамических измерений приведена в рекомендациях МИ 1951-88.

7.4 Классификация средств измерений

Средства измерений классифицируются по весьма разнообразным признакам, которые в большинстве случаев взаимно независимы и в каждом средстве измерений могут находиться почти в любых сочетаниях [42–81].

К числу этих признаков относятся: тип и вид контролируемых физических величин; назначение; число проверяемых параметров при одной установке объекта измерения; принцип действия; способ образования показаний; способ получения числового значения измеряемой величины; точность; условия применения; степень защищенности от внешних магнитных и электрических полей; прочность и устойчивость против механических воздействий и перегрузок; стабильность; чувствительность; пределы и диапазоны измерений; роль, выполняемой в си-

стеме обеспечения единства измерений; уровень автоматизации; уровень стандартизации; отношению к измеряемой физической величине.



В условиях расширяющейся автоматизации технологических процессов обработки деталей, сборки узлов и агрегатов машин, повышения требований к производительности, точности и качеству обработки при массовом производстве машин все большее значение приобретают автоматические средства контроля. Они классифицируются по числу проверяемых параметров, степени автоматизации, способу преобразования измерительного импульса, месту установки в технологическом процессе, воздействию на технологический процесс (рис. 7.5).

По числу проверяемых параметров при одной установке объекта измерения – одномерные и многомерные;

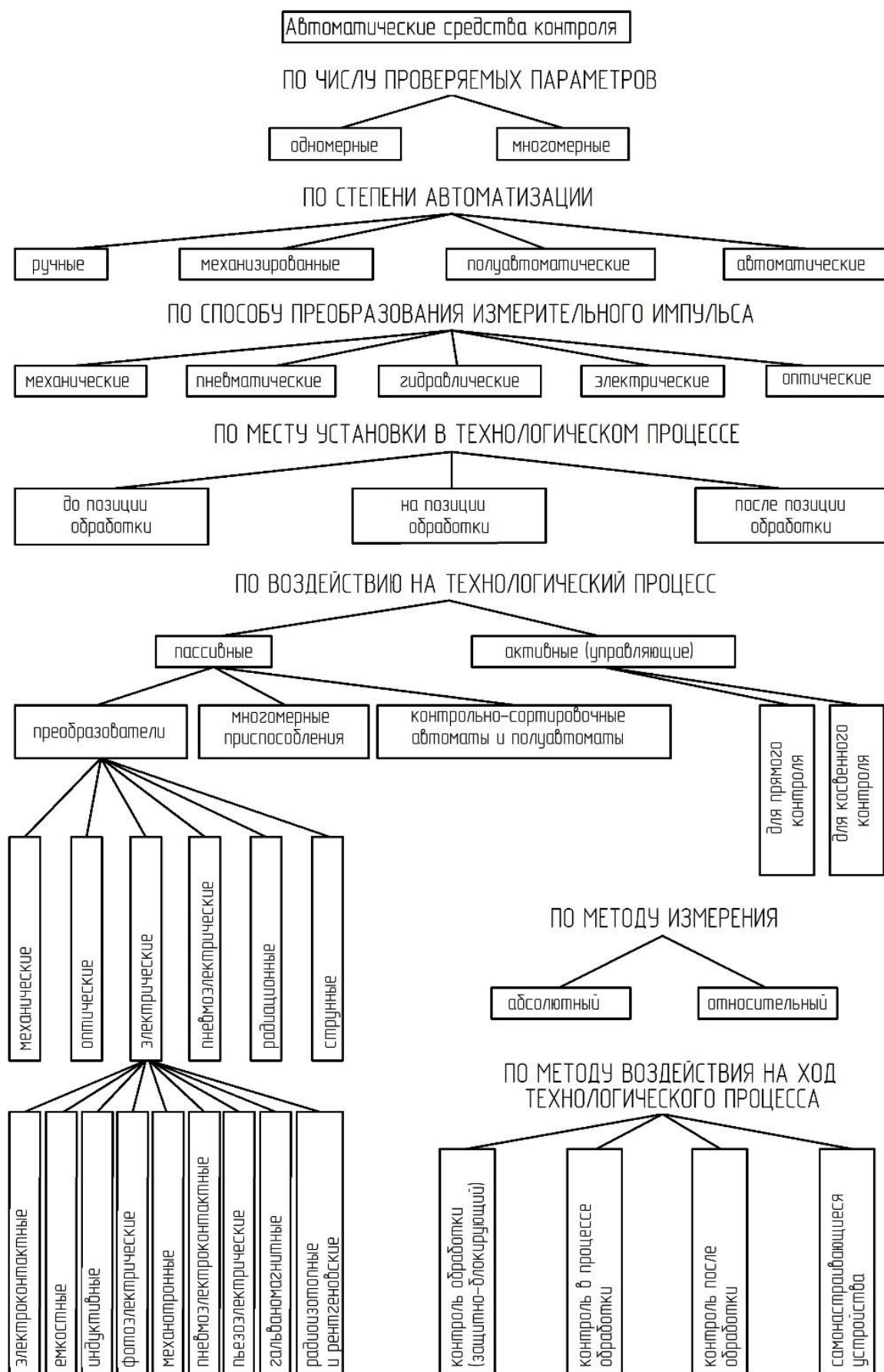


Рисунок 7.5 – Классификация автоматических средств контроля

Ту или иную величину можно измерять при помощи средств измерений, отличающихся одно от другого *принципом действия*. Различия этих принципов связаны с использованием различных физических явлений. Например, для измерения длины применяют механические, оптические, пневматические и электрические устройства. Кроме того, могут быть различными способы использования одного и того же физического явления. Так, различие принципа действия электроизмерительных устройств, в которых используется взаимодействие электрического тока и магнитного потока, заключается в способе получения, форме и характере магнитного потока.

По способу *образования показаний* измерительные приборы можно разделить на три основные группы: показывающие, самопишущие и приборы с наводкой.

Показывающие измерительные приборы, если на них воздействует измеряемая величина, дают показание, не требуя от наблюдателя каких-либо дополнительных операций. Указатель отсчетного устройства перемещается без воздействия человека и наблюдается визуально. Самопишущие измерительные приборы, кроме шкалы и указателя, содержат механизм, записывающий показания прибора и измерения изменяющейся величины в виде диаграммы. Измерительные приборы с наводкой требуют обязательного вмешательства человека, который перемещением тех или иных деталей или подбором мер добивается достижения определенного эффекта обычно приведения к нулю показания нулевого индикатора. По достижении этого положения производится отсчет показаний по отсчетному приспособлению или по сумме подобранных мер.

По способу получения значения измеряемой величины приборы можно разделить на две группы: приборы непосредственной оценки и компарирующие приборы (приборы сравнения).

Для каждого средства измерения устанавливают *границы условий их применения*, имея в виду, что именно в пределах этих границ нормируются и обеспечиваются те их свойства, которые определяют уровень точности их показаний.

Постоянно действующей, влияющей на средства измерений, величиной является магнитное поле Земли. В каждой точке поверхности Земли оно приблизительно постоянно. Магнитное поле Земли и другие магнитные поля влияют на показания ряда средств измерений, принцип действия которых основан на использовании магнитных и электромагнитных явлений. Магнитные поля, возникающие в современных технических устройствах, во много раз сильнее магнитного поля Земли, поэтому от них необходимо защищать даже не очень чувствительные средства измерений. Так как защита от влияния магнитных полей всегда усложняет и удорожает средства измерений, то применяют не только при наличии таких магнитных полей, которые могут повлиять на него.

В зависимости от напряженности магнитных полей используют средства измерений, соответствующим образом защищенные от них. Для электроизмерительных приборов разработана классификация по степени защищенности их от влияния магнитных полей. Введены две категории защищенности: I и II. Категории I соответствует большая степень защищенности (ГОСТ 1845).

На показания измерительных приборов, основанных на использовании электростатических явлений, влияют электрические поля. На степени защищенности от влияния электрических полей также введены категории.

Классификация по прочности и устойчивости против механических воздействий и перегрузок. Существуют внешние явления, воздействие которых не выражается в непосредственном влиянии на показания средств измерений, но они могут явиться причиной порчи и нарушения действий механизма. На средства измерений могут воздействовать вода, другие жидкости и газы, пыль и т. д. От воздействия этих факторов средства измерений защищают кожухами или выполняют их в корпусах из особых материалов с применением защитных покрытий. По степени защиты от внешних воздействий различают средства измерений обыкновенные, пылезащищенные, брызгозащищенные, водозащищенные, герметичные, газозащищенные, взрывобезопасные.

Классификация по стабильности показаний средств измерений. Значения мер или показания измерительных приборов изменяются нередко и без воздействия внешних факторов по истечении более или менее длительного времени. Причиной таких изменений в большинстве случаев являются внутренние структурные изменения материалов, из которых изготовлены основные детали средства измерения. Таким изменениям, называемым старением, в большей степени подвержены сплавы металлов и органические материалы.

По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, СИ делятся на:

- метрологические, предназначенные для метрологических целей – воспроизведения единицы и(или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим СИ;
- рабочие, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Подавляющее большинство используемых на практике СИ принадлежат ко второй группе. Метрологические средства измерений весьма немногочисленны. Они разрабатываются, производятся и эксплуатируются в специализированных научно-исследовательских центрах.

По уровню стандартизации средства измерений подразделяются на:

- стандартизованные, изготовленные в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта;

– нестандартизованные (уникальные), предназначенные для решения специальной измерительной задачи, в стандартизации требований к которым нет необходимости.

Основная масса СИ являются стандартизованными. Они серийно выпускаются промышленными предприятиями и в обязательном порядке подвергаются государственным испытаниям. Нестандартизованные средства измерений разрабатываются специализированными научно-исследовательскими организациями и выпускаются единичными экземплярами. Они не проходят государственных испытаний, их характеристики определяются при метрологической аттестации.

По отношению к измеряемой физической величине средства измерений делятся на: основные – это СИ той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей; вспомогательные – это СИ той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учесть для получения результатов измерения требуемой точности.

7.5 Деление СИ по роли в процессе измерения и выполняемым функциям

Классификация по роли в процессе измерения и выполняемым функциям является основной и представлена на рисунке 7.6. Элементы, составляющие данную классификацию, рассмотрены ниже [23–24].

Элементарные средства измерений предназначены для реализации отдельных операций прямого измерения. К ним относятся меры, устройства сравнения и измерительные преобразователи. Каждое из них, взятое по отдельности, не может осуществить операцию измерения.

Мера – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения и(или) хранения ФВ одного или нескольких размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Операцию воспроизведения величины заданного размера можно формально представить как преобразование цифрового кода N в заданную физическую величину X_m , основанное на единице данной физической величины $[Q]$. Поэтому уравнение преобразования меры запишется в виде $X_m = N[Q]$.

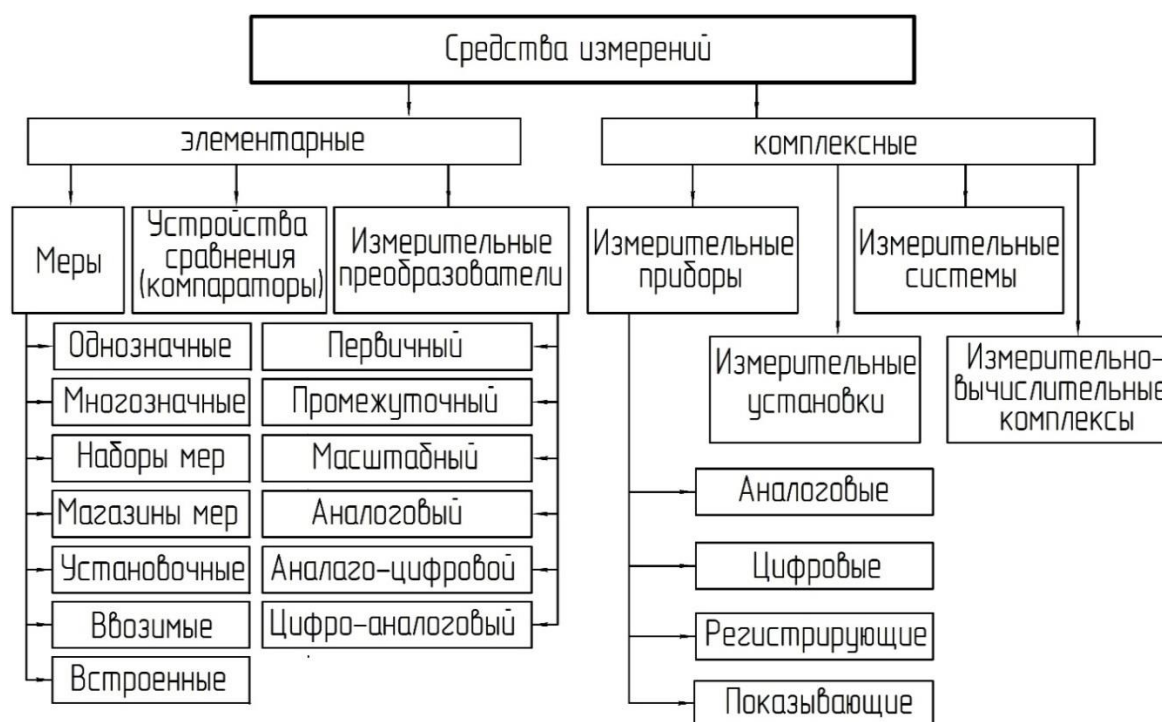


Рисунок 7.6 – Классификация средств измерений по их роли в процессе измерения и выполняемым функциям

Выходом меры является квантованная аналоговая величина X_M заданного размера, а входом следует считать числовое значение величины N (рис. 7.7).

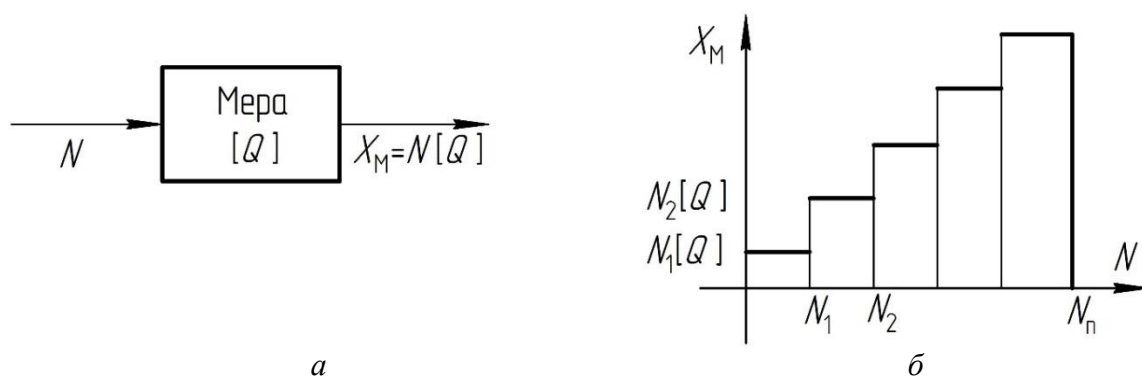


Рисунок 7.7 – Меры и функции преобразования:
а – обозначение меры в структурных схемах, б – функция преобразования многозначной меры

Меры подразделяют на следующие типы:

- *однозначные*, воспроизводящие физическую величину одного размера, например: гиря 1 кг, плоскопараллельная концевая мера 100 мм, конденсатор постоянной емкости, нормальный элемент;
- *многозначные*, воспроизводящие ФВ разных размеров, например: конденсатор переменной емкости, штриховая мера длины.

Кроме этого, различают: *наборы мер, магазины мер, установочные, встроенные и ввозимые меры.*

Степень совершенства меры определяется постоянством размера каждой ступени квантования $[Q]$ и степенью многозначности, т. е. числом N воспроизводимых известных значений ее выходной величины. С *наиболее высокой точностью* посредством мер воспроизводятся основные физические величины: *длина, масса, частота, напряжение и ток.*

Устройство сравнения (компаратор) – это средство измерений, дающее возможность сравнивать друг с другом меры однородных величин или же показания измерительных приборов. Примерами могут служить: рычажные весы, на одну чашку которых устанавливается образцовая гиря, а на другую – поверяемая; градуировочная жидкость для сличения показаний образцового и рабочего ареометров; тепловое поле, создаваемое термостатом для сравнения показаний термометров. Во многих относительно простых СИ роль компаратора выполняют органы чувств человека, главным образом зрение, например, при сравнении отклонения указателя прибора и числа делений, нанесенных на его шкале.

Особенно широкое распространение компараторы получили в современной электронной технике, где они используются для сравнения напряжений и токов.

Степень совершенства компаратора определяется минимально возможным порогом чувствительности $\Delta_{\text{п}}$, а также его быстродействием – временем переключения из одного состояния в другое. У идеального компаратора порог $\Delta_{\text{п}}$ и время переключения равны нулю. В реальном компараторе наличие порога приводит к возникновению аддитивной погрешности.

Измерительный преобразователь (ИП) предназначен для выполнения одного измерительного преобразования. Его работа протекает в условиях, когда помимо основного сигнала X , связанного с измеряемой величиной, на него воздействуют множество других сигналов Z_i , рассматриваемых в данном случае как помехи (рис. 7.8 а).

Важнейшей характеристикой ИП является функция (уравнение) преобразования (рис. 7.8 б), которая описывает статические свойства преобразователя и в общем случае записывается в виде $Y = F(X, Z_i)$.

В подавляющем большинстве случаев стремятся иметь линейную функцию преобразования. Функция $Y(X)$ идеального ИП при отсутствии помех описывается уравнением $Y = kX$. Она линейна, безынерционна, стабильна и проходит через начало координат. Реальная передаточная функция в статическом режиме имеет вид $Y = k(1 + \gamma)X + \Delta_0 + \Delta[F(X)]$ и может отличаться от идеальной смещением нуля Δ_0 , наклоном γ и нелинейной составляющей $\Delta[F(X)]$. *Такие отклонения реальной передаточной функции ИП приводят к возникновению аддитивной, мультипликативной и нелинейной составляющих погрешности.*

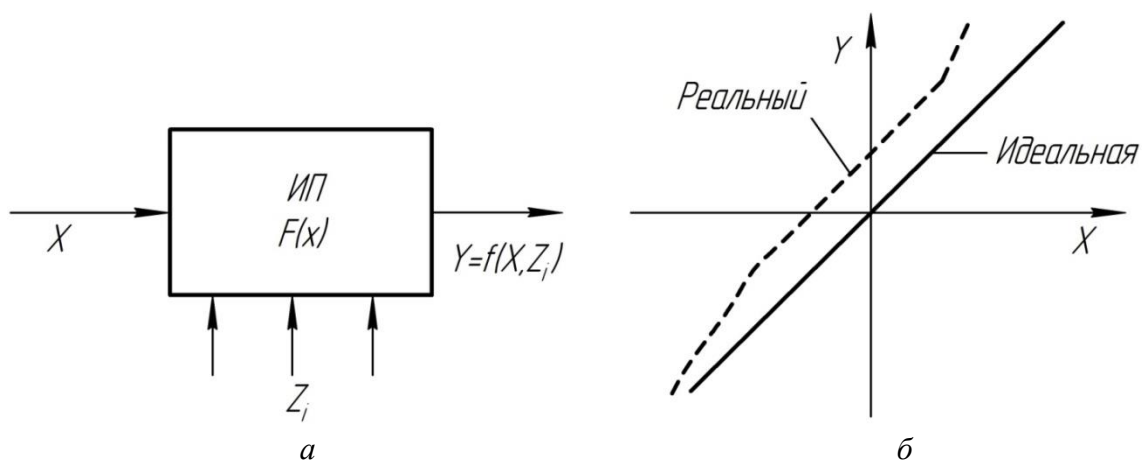


Рисунок 7.8 – Структурная схема:
а – преобразователя, б – его функции преобразования

Измерительные преобразователи классифицируются по ряду признаков. По местоположению в измерительной цепи преобразователи делятся на первичные и промежуточные. Первичный преобразователь – это такой ИП, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т. е. он является первым в измерительной цепи средством измерений. Промежуточные преобразователи располагаются в измерительной цепи после первичного. Зачастую конструктивно обособленные первичные измерительные преобразователи называют датчиками. Например, резистивный датчик перемещения – это первичный преобразователь, в котором перемещение преобразуется в изменение активного сопротивления.

По характеру преобразования входной величины ИП делятся на линейные и нелинейные. Линейный преобразователь – это ИП, имеющий линейную связь между входной и выходной величинами. Их важной разновидностью является масштабный ИП, предназначенный для изменения размера величины или измерительного сигнала в заданное число раз. Его уравнение преобразования имеет вид $Y = kX$, где X , Y – однородные входная и выходная величины; k – постоянный коэффициент передачи. Примерами масштабных преобразователей могут служить усилители, делители напряжения, измерительные трансформаторы напряжения. У нелинейных ИП связь между входными и выходными величинами нелинейная.

По виду входных и выходных величин ИП делятся на:

- аналоговые, преобразующие одну аналоговую величину в другую аналоговую величину;
- аналого-цифровые (АЦП), предназначенные для преобразования аналогового измерительного сигнала в цифровой код;
- цифроаналоговые (ЦАП), предназначенные для преобразования цифрового кода в аналоговую величину.

Структурная схема и передаточные функции АЦП и ЦАП показаны на рисунке 7.9. В качестве входного (для ЦАП) и выходного (для АЦП) кодов, как правило используются параллельные двоичные коды. Входной (для АЦП) и выходной (для ЦАП) величиной чаще всего является напряжение u .

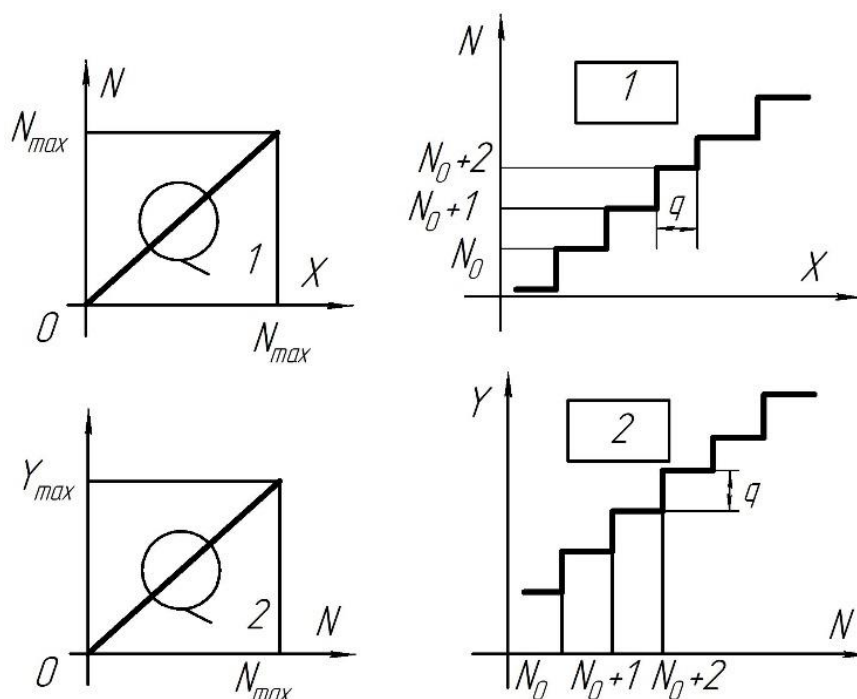


Рисунок 7.9 – Передаточные функции и части передаточных функций АЦП, ЦАП в увеличенном масштабе

Система метрологических параметров преобразователей, отражающая особенности их построения и функционирования приведена в ГОСТ 19480.

Комплексные средства измерений предназначены для реализации всей процедуры измерения. Согласно классификации, по роли в процессе измерения и выполняемым функциям, к ним относятся измерительные приборы и установки, измерительные системы и измерительно-вычислительные комплексы.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне ее изменения и выработки сигнала измерительной информации, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Обобщенная структурная схема измерительного прибора. Данный класс средств измерений включает большое число приборов, различающихся измеряемыми величинами, областью применения, техническими характеристиками, принципом действия, используемой эле-

ментной базой и другими особенностями. Тем не менее все эти приборы имеют некоторые общие черты. Обобщенная структурная схема измерительного прибора показана на рисунке 7.10. Измеряемая ФВ воздействует на устройство преобразования, состоящее из первичного измерительного преобразователя и совокупности элементарных средств измерений. Первичный преобразователь преобразует измеряемую ФВ в другую величину, однородную или неоднородную с ней. Сигнал с выхода преобразователя проходит через совокупность элементарных СИ. В простейших измерительных приборах такая совокупность может отсутствовать. Например, в аналоговых вольтметрах измеряемое напряжение преобразуется в угол поворота стрелки с помощью первичного электро-механического ИП.

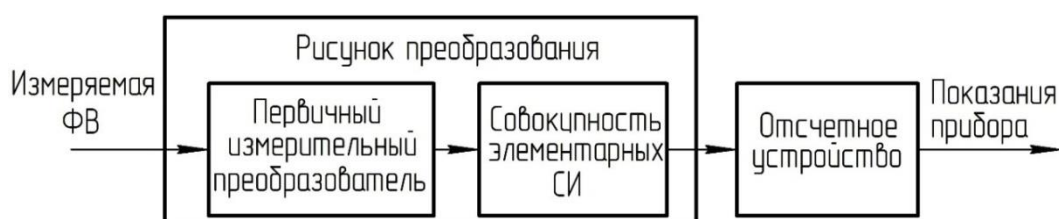


Рисунок 7.10 – Обобщенная структурная схема измерительного прибора

На выходе устройства преобразования формируется сигнал, параметры которого соответствуют входным характеристикам отсчетного устройства.

Отсчетное устройство – это элемент СИ, преобразующий измерительный сигнал в форму, доступную восприятию органами чувств человека. По форме представления показаний отсчетные устройства делятся на аналоговые и цифровые.

Составными частями отсчетного устройства являются *шкала и указатель*. *Шкала* – это часть отсчетного средства, представляющая собой ряд отметок, соответствующих последовательному ряду значений величины вместе со связанной с ними нумерацией. Шкала наносится на прямолинейном участке или дуге окружности. Отметка шкалы – это знак на шкале СИ (черточка, зубец, точка и т. д.), соответствующий некоторому значению ФВ. Для цифровых шкал сами числа являются эквивалентами отметок шкалы. Отметки на шкалах могут быть нанесены равномерно или неравномерно. В связи с этим шкалы называют равномерными и неравномерными. Практически равномерной считается шкала, длины делений которой отличаются не более чем на 30 % и имеют постоянную цену деления. Промежуток между двумя соседними отметками шкалы средства измерений называется *делением шкалы*. *Длиной деления шкалы*, называется расстояние между осями или центрами двух соседних отметок шкалы, измеренное вдоль воображаемой линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы. Длина линии,

проходящей через центры всех самых коротких отметок шкалы СИ и ограниченная начальной и конечной отметками, называется *длиной шкалы*. Линия может быть реальной или воображаемой, кривой или прямой.

Отметка шкалы СИ, у которого проставлено число отсчета, называется числовой отметкой шкалы. Отметки облегчают оператору считывание показаний прибора, которое производится по положению указателя относительно отметок шкалы. Деления шкалы имеют цену. *Цена деления шкалы* – это разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы СИ. Отметки наносятся на шкалу при градуировке прибора, т. е. при подаче на его вход сигнала с выхода образцовой многозначной меры. У части отметок шкалы проставляются числовые значения величины, подаваемой с выхода меры. Эти отметки становятся числовыми.

Указатель – часть отсчетного устройства, положение которого относительно отметок шкалы определяет показания измерительного прибора. Указатель выполняется в виде подвижных стрелок разной формы (клиновидной, ножевидной и др.), луча света, пера самописца и т. п.

Шкала СИ имеет *начальное и конечное значения*. Они соответствуют наименьшему и наибольшему значениям измеряемой величины, которые могут быть отсчитаны по шкале СИ. Например, для медицинского термометра начальное значение шкалы равно 34,3 °С, а конечное – 42 °С.

При измерении с показывающего устройства считывается показание. Каждое СИ характеризуется *диапазоном показаний* и *диапазоном измерений*. *Диапазоном показаний* называется область значений шкалы СИ, ограниченная ее начальным и конечным делениями. Так, для медицинского термометра диапазон показаний составляет 7,7 °С. *Диапазоном измерений* называется область значений ФВ, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ. Значения величины, ограничивающие диапазон снизу и сверху (слева и справа), называются соответственно нижним и верхним *пределами измерений*. Диапазон измерений всегда меньше или равен диапазону показаний.

Для учета всех особенностей многообразных измерительных приборов применяют классификацию по различным признакам. По форме индикации измеряемой величины различают измерительные приборы:

- показывающие, которые допускают только отсчитывание показаний измеряемой величины, например, стрелочный или цифровой вольтметр;

- регистрирующие, предусматривающие регистрацию показаний на том или ином носителе информации, например на бумажной ленте. Регистрация может производиться в аналоговой или цифровой форме. Различают самопишущие и печатающие приборы.

По методу преобразования измеряемой величины различают приборы прямого, компенсационного (уравновешивающего) и смешанного преобразования.

По назначению измерительные приборы делятся на вольтметры, омметры, термометры, гигрометры и т. д.

По форме преобразования используемых измерительных сигналов приборы подразделяют на аналоговые и цифровые.

Аналоговые приборы – это приборы, показания или выходной сигнал которых является непрерывной функцией изменения измеряемой величины.

Цифровые приборы – это приборы, принцип действия которых основан на квантовании измеряемой или пропорциональной ей величины. Показания таких приборов представлены в цифровой форме. Наличие операции квантования приводит к появлению у цифровых приборов специфических свойств, обуславливающих существенные различия в методах выбора, анализа, описания и нормирования метрологических характеристик по сравнению с аналоговыми приборами.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в удобной для непосредственного восприятия наблюдателем форме и расположенная в одном месте.

Измерительную установку, предназначенную для испытания каких-либо изделий, называют испытательным стендом (например, для измерения удельного сопротивления электрических материалов, испытания магнитных материалов).

Измерительную установку с включенными в нее эталонами, применяемую для поверки СИ, называют поверочной установкой (например, установка для поверки вольтметров). Некоторые большие измерительные установки, используемые главным образом в машиностроении, называют измерительными машинами (например, силоизмерительная машина, делительная машина).

Усложнение современного производства, развитие научных исследований привело к необходимости измерять и контролировать одновременно сотни и тысячи различных физических величин. Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и обработке больших объемов информации стала одной из причин появления таких СИ, как измерительные системы. **Измерительные системы** – это совокупность функционально объединенных средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической

обработки, передачи и(или) использования в автоматических системах управления. Примерами могут служить системы, развернутые на крупных предприятиях и предназначенные для контроля технологического процесса производства какого-либо изделия, например, производства стали, электроэнергии и т. п.

В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на измерительные, контролирующие, управляющие. По числу измерительных каналов системы подразделяются на одно-, двух-, трех- и многоканальные.

Важной их разновидностью являются *информационно-измерительные системы* (ИИС), предназначенные для представления измерительной информации в виде, необходимом потребителю. Наиболее перспективным методом разработки и производства ИИС является метод агрегатно-модульного построения из сравнительно ограниченного набора унифицированных, конструктивно законченных узлов или блоков. Связь между блоками системы и их совместимость устанавливается посредством стандартных интерфейсов. Под интерфейсом понимается совокупность механических, электрических и программных средств, позволяющих объединять блоки в единую систему. Структура ИИС довольно разнообразна и существенно зависит от решаемых задач.

Важной разновидностью ИИС является *измерительно-вычислительные комплексы* (ИВК) – функционально объединенная совокупность средств измерений, компьютеров и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения конкретной измерительной задачи. Основными признаками принадлежности средства измерений к ИВК являются: наличие процессора или компьютера; программное управление средствами измерений; наличие нормированных метрологических характеристик; блочно-модульная структура, состоящая из технической (аппаратной) и программной (алгоритмической) подсистем.

Техническая подсистема должна содержать СИ электрических величин (измерительные компоненты), средства вычислительной техники (вычислительные компоненты), меры текущего времени и интервалов времени, средства ввода-вывода цифровых и аналоговых сигналов с нормированными метрологическими характеристиками.

В программную подсистему ИВК входят системное и общее прикладное программное обеспечение (ПО), в совокупности образующие математическое обеспечение ИВК. Системное ПО представляет собой совокупность программного обеспечения компьютера, используемого в ИВК, и дополнительных программных средств, позволяющих работать в диалоговом режиме; управлять измерительными компонентами; обмениваться информацией внутри подсистем комплекса; проводить диагностику технического состояния. Программное обеспечение представляет собой взаимодополняющую, взаимодействующую совокупность подпрограмм, реализующих: типовые алгоритмы эффективного представ-

ления и обработки измерительной информации, планирования эксперимента и других измерительных процедур; архивирование данных измерений; метрологические функции ИВК (аттестация, поверка, экспериментальное определение метрологических характеристик и т. п.).

Большое значение имеет эффективное и наглядное построение экранных форм и управляющих элементов, называемых интерфейсом пользователя, обеспечивающих взаимодействие оператора с компьютером. Эффективность интерфейса заключается в быстром, насколько это возможно, развитии у пользователей простой концептуальной модели взаимодействия с комплексом. Другими важными характеристиками интерфейса являются его конкретность и наглядность, что обеспечивается с помощью последовательно раскрываемых окон, раскрывающихся вложенных меню и командных строк с указанием функциональных, «горячих» клавиш.

Измерительно-вычислительные комплексы предназначены для выполнения таких функций, как: осуществление прямых, косвенных, совместных или совокупных измерений физических величин; управление процессом измерений и воздействием на объект измерений; представление оператору результатов измерений в требуемом виде.

Для реализации этих функций ИВК должен обеспечивать: восприятие, преобразование и обработку электрических сигналов от первичных измерительных преобразователей; управление средствами измерения и другими техническими компонентами, входящими в состав ИВК; выработку нормированных сигналов, являющихся входными для средств воздействия на объект; оценку метрологических характеристик и представление результатов измерений в установленной форме.

По назначению ИВК делятся на *типовые, проблемные и специализированные*. Типовые комплексы предназначены для решения широкого круга типовых задач автоматизации измерений, испытаний или исследований независимо от области применения. Проблемные комплексы разрабатываются для решения специфичной для конкретной области применения задачи автоматизации измерений. Специализированные ИВК предназначены для решения уникальных задач автоматизации измерений, для которых разработка типовых и специализированных комплексов экономически нецелесообразна.

Основными составными частями комплекса являются:

- компьютер с периферийными устройствами, подключенными к нему, в том числе и посредством компьютерной сети;
- программное обеспечение, представляющее собой совокупность взаимосвязанных программ, написанных на алгоритмических языках разного уровня;
- интерфейс, организующий связь технических устройств ИВК с компьютером;
- формирователь испытательных сигналов, которыми воздей-

ствуют на объект измерения с целью получения измерительных сигналов; сигнал вырабатывается с помощью последовательно соединенных ЦАП и преобразователя «напряжение – испытательный сигнал»;

– измерительные каналы (ИК), предназначенные для преобразования в цифровой код заданного числа сигналов; практически в любом случае ИК содержит аналоговый измерительный (АИП) и аналого-цифровой (АЦП) преобразователи [23–24].

7.6 Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование

При использовании СИ принципиально важно знать степень соответствия информации о измеряемой величине, содержащейся в выходном сигнале, ее истинному значению. С этой целью для каждого СИ вводятся и нормируются определенные метрологические характеристики (МХ). *Метрологические характеристики* – это характеристики свойств средства измерений, оказывающие влияние на результат измерения и его погрешности. Характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называются нормируемыми, а определяемые экспериментально – действительными. Номенклатура МХ, правила выбора комплексов нормируемых МХ для средств измерений и способы их нормирования определяются стандартом ГОСТ 8.009 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

Метрологические характеристики СИ позволяют:

– определять результаты измерений и рассчитывать оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерения в реальных условиях применения СИ;

– рассчитывать МХ каналов измерительных систем, состоящих из ряда средств измерений с известными МХ;

– производить оптимальный выбор СИ, обеспечивающих требуемое качество измерений при известных условиях их применения;

– сравнивать СИ различных типов с учетом условий применения.

При разработке принципов выбора и нормирования средств измерений необходимо придерживаться ряда положений, изложенных ниже.

1. Основным условием возможности решения всех перечисленных задач является наличие однозначной связи между нормированными МХ и инструментальными погрешностями. Эта связь устанавливается посредством математической модели инструментальной составляющей погрешности, в которой нормируемые МХ должны быть аргументами. При этом важно, чтобы номенклатура МХ и способы их выражения были оптимальны. Опыт эксплуатации различных СИ показывает, что целесообразно нормировать комплекс МХ, который, с одной стороны, не

должен быть очень большим, а с другой – каждая нормируемая МХ должна отражать конкретные свойства СИ и при необходимости может быть проконтролирована.

2. Нормирование МХ средств измерений должно производиться исходя из единых теоретических предпосылок. Это связано с тем, что в измерительных процессах могут участвовать СИ, построенные на различных принципах.

3. Нормируемые МХ должны быть выражены в такой форме, чтобы с их помощью можно было обоснованно решать практически любые измерительные задачи и одновременно достаточно просто проводить контроль СИ на соответствие этим характеристикам.

4. Нормируемые МХ должны обеспечивать возможность статистического объединения, суммирования составляющих инструментальной погрешности измерений. В общем случае она может быть определена как сумма (объединение) следующих составляющих погрешности:

- $\Delta_0(t)$ – обусловленной отличием действительной функции преобразования в нормальных условиях от номинальной, приписанной соответствующими документами данному типу СИ. Эта погрешность называется основной;

- Δ_{cj} – обусловленной реакцией СИ на изменение внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала относительно их номинальных значений. Эта погрешность называется дополнительной;

- Δ_{din} – обусловленной реакцией СИ на скорость (частоту) изменения входного сигнала. Эта составляющая, называемая динамической погрешностью, зависит и от динамических свойств средств измерений, и от частотного спектра входного сигнала;

- Δ_{int} – обусловленной взаимодействием СИ с объектом измерений или с другими СИ, включенной последовательно с ним в измерительную систему. Эта погрешность зависит от характеристик и параметров входной цепи СИ и выходной цепи объекта измерений.

Таким образом, инструментальную составляющую погрешности СИ можно представить в виде:

$$\Delta = \Delta_0(t) * \sum_{j=1}^L \Delta_{cj} * \Delta_{din} * \Delta_{int} ,$$

где * – символ статистического объединения составляющих.

Первые две составляющие представляют собой статическую погрешность СИ, а третья – динамическую. Из них только основная погрешность определяется свойствами СИ. Дополнительная и динамическая погрешности зависят как от свойств самого СИ, так и от некоторых других причин (внешних условий, параметров измерительного сигнала и др.).

Требования к универсальности и простоте статистического объединения составляющих инструментальной погрешности обуславливают необходимость их статистической независимости – некоррелированности. Однако предположение о независимости этих составляющих не всегда верно.

Выделение динамической погрешности СИ как суммируемой составляющей допустимо только в частном, но весьма распространенном случае, когда СИ можно считать линейным динамическим звеном и когда погрешность является весьма малой величиной по сравнению с выходным сигналом. Динамическое звено считается линейным, если оно описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Для СИ, являющихся существенно нелинейными звеньями, выделение в отдельно суммируемые составляющие статической и динамической погрешностей недопустимо.

5. Нормируемые МХ должны быть инвариантны к условиям применения и режиму работы СИ и отражать только его свойства. Выбор МХ необходимо осуществлять так, чтобы пользователь имел возможность рассчитывать по ним характеристики СИ в реальных условиях эксплуатации.

6. Нормируемые МХ, приводимые в нормативно-технической документации, отражают свойства не отдельно взятого экземпляра СИ, а всей совокупности СИ данного типа, т. е. являются номинальными. Под типом понимается совокупность СИ, имеющих одинаковое назначение, схему и конструкцию и удовлетворяющих одним и тем же требованиям, регламентированным в технических условиях. Метрологические характеристики отдельного СИ данного типа могут быть любыми в пределах области значений номинальных МХ. Отсюда следует, что МХ средства измерений данного типа должна описываться как нестационарный случайный процесс.

Математически строгий учет данного обстоятельства требует нормирования не только пределов МХ как случайных величин, но и их временной зависимости (т. е. автокорреляционных функций). Это приведет к чрезвычайно сложной системе нормирования и практической невозможности контроля МХ, поскольку при этом он должен был бы осуществляться в строго определенные промежутки времени. Вследствие этого принята упрощенная система нормирования, предусматривающая разумный компромисс между математической строгостью и необходимой практической простотой. В принятой системе низкочастотные изменения случайных составляющих погрешности, период которых соизмерим с длительностью межповерочного интервала, при нормировании МХ не учитываются. Они определяют показатели надежности СИ, обуславливают выбор рациональных межповерочных интервалов и других аналогичных характеристик. Перечень нормируемых МХ делится на шесть основных групп (рис. 7.11).

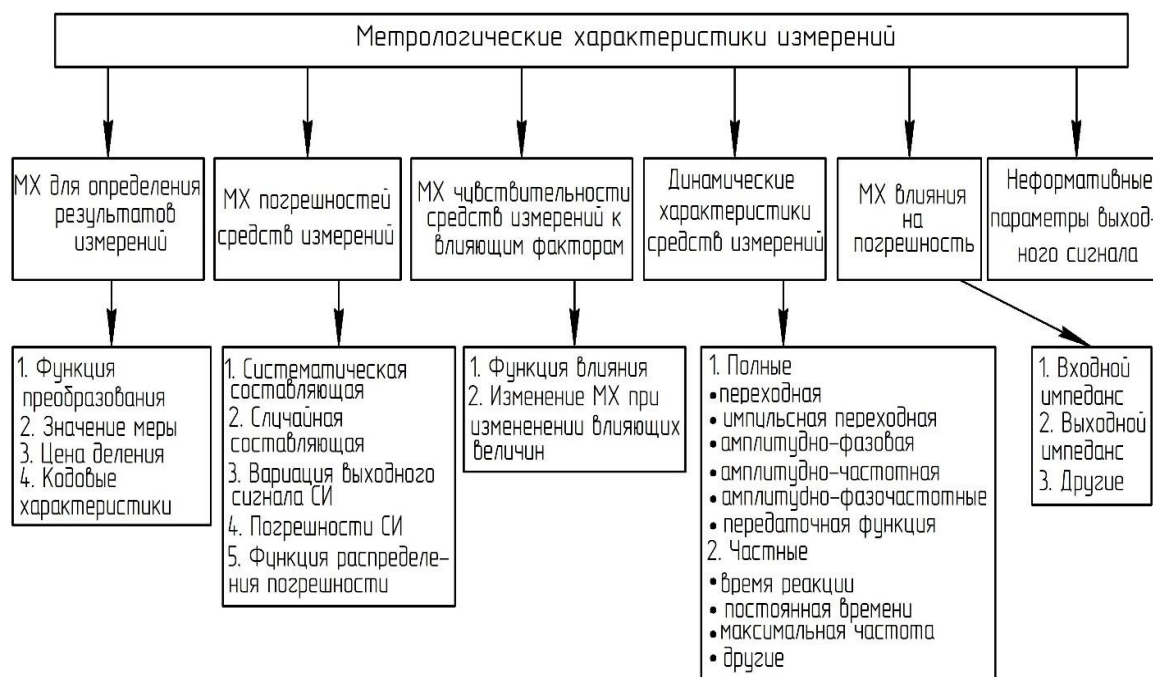


Рисунок 7.11 – Номенклатура метрологических характеристик СИ

Вопросы выбора МХ достаточно детально регламентированы в ГОСТ 8.009, где приведены характеристики, которые должны нормироваться для названных выше групп СИ. Приведенный перечень может корректироваться для конкретного средства измерений с учетом его особенностей и условий эксплуатации. Важно отметить, что не следует нормировать те МХ, которые оказывают несущественный по сравнению с другими вклад в инструментальную погрешность. Определение того, важна ли данная погрешность или нет, производится на основе критериев существенности, приведенных в ГОСТ 8.009.

Расчет погрешности средств измерений по нормированным метрологическим характеристикам в силу ее случайности сводится к нахождению интервала, в котором она находится с заданной вероятностью. Определение интервала осуществляется в три этапа.

На первом этапе вычисляются математическое ожидание и дисперсия каждой из четырех составляющих погрешности. Для основной погрешности вид расчетных формул зависит от того, какие МХ нормированы. Для определения характеристик дополнительной погрешности необходимо знать не только нормированные функции влияния $\psi(\zeta)$, но и статистические характеристики влияющих величин ζ . От того, какие характеристики в реальных условиях применения СИ известны, зависит достоверность получаемых оценок инструментальной составляющей. Математическое ожидание и дисперсия динамической погрешности могут быть оценены путем анализа формул, выражающих связь значений погрешностей с параметрами измеряемого сигнала и нормированными динамическими характеристиками СИ. Расчет характеристик динамиче-

ских погрешностей является одним из самых сложных при определении инструментальной погрешности. Отдельные его аспекты подробно рассмотрены в руководящем документе РД 50-453-84 «Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета».

На втором этапе производится оценка инструментальной погрешности Δ_{inst} , обусловленной взаимодействием СИ с объектом измерений. Она существенным образом зависит от характера этого взаимодействия и вида импедансной характеристики.

После определения характеристик всех ее составляющих производится расчет таких же характеристик инструментальной погрешности путем сложения найденных математических ожиданий и дисперсий соответственно.

На третьем этапе производится оценка интервала, в котором с доверительной вероятностью P находится инструментальная погрешность измерения:

$$M[\Delta_{ins}] - K\sqrt{D[\Delta_{ins}]} \leq \Delta_{ins} \leq M[\Delta_{ins}] + K\sqrt{D[\Delta_{ins}]},$$

где $M[\Delta_{ins}]$, $D[\Delta_{ins}]$ – математическое ожидание и дисперсия инструментальной погрешности; K – коэффициент, зависящий от вида закона распределения инструментальной погрешности и заданной доверительной вероятности. Его выбор в каждом случае является в большей мере произвольным. Если декларируется нормальный закон распределения результирующей инструментальной погрешности, то велика вероятность неоправданного увеличения интервальной оценки. При выборе равномерного закона возможно уменьшение надежности получаемой оценки. Коэффициент K является не чем иным, как таким же множителем. Его можно рассчитать по формуле $K = 5(P - 0,5)$ при $0,8 < P < 1$, определить по графику зависимости $K(P)$, приведенному в РД 50-453-84. Следует отметить, что наиболее распространенным является значение коэффициента $K = 2$, что соответствует доверительной вероятности 0,96.

В заключение отметим, что рекомендовать конечное число расчетных формул, применимых при оценке инструментальной погрешности при различных условиях, видах и методиках измерений, не представляется возможным. В каждом конкретном случае необходимо учитывать все существенные влияющие факторы [23–24].

7.7 Классы точности средств измерений

Характеристики, введенные ГОСТ 8.009, наиболее полно описывают метрологические свойства СИ. Однако в настоящее время в эксплуатации находится достаточно большое число СИ, метрологические характеристики которых нормированы несколько по-другому, а именно на основе классов точности. Класс точности – это обобщенная характеристика СИ, выражаемая пределами допускаемых значений его основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности не является непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим СИ, поскольку погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т. д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ данного типа. Общие положения деления средств измерений по классу точности устанавливает ГОСТ 8.401.

Классы точности СИ устанавливаются в стандартах или технических условиях. Средство измерений может иметь два и более класса точности. Например, при наличии у него двух или более диапазонов измерений одной и той же физической величины ему можно присваивать два или более класса точности. Приборы, предназначенные для измерения нескольких физических величин, также могут иметь различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей. Выбор формы представления зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения СИ.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливаются по одной из формул: $\Delta = \pm a$ или $\Delta = \pm(a + bx)$, где x – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале; a, b – положительные числа, не зависящие от x . Первая формула описывает чисто аддитивную погрешность (рис. 7.12 а), а вторая – сумму аддитивной и мультипликативной погрешностей (рис. 7.12, в). В технической документации классы точности, установленные в виде абсолютных погрешностей, обозначают, например, «Класс точности М», а на приборе – буквой «М». Для обозначения используются прописные буквы латинского алфавита или римские цифры, причем меньшие пределы погрешностей должны соответствовать буквам, находящимся ближе к началу алфавита, или меньшим цифрам.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяются по формуле $\gamma = \Delta/x_N = \pm p$, где x_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ; p – отвлеченное положительное

число, выбираемое из ряда значений: $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \times 10^n$; $n = 1; 0; -1; -2; \dots$

Нормирующее значение x_N устанавливается равным большему из пределов измерений (или модулей) для СИ с равномерной, практически равномерной или степенной шкалами и для измерительных преобразователей, если нулевое значение выходного сигнала находится на краю или вне диапазона измерений.

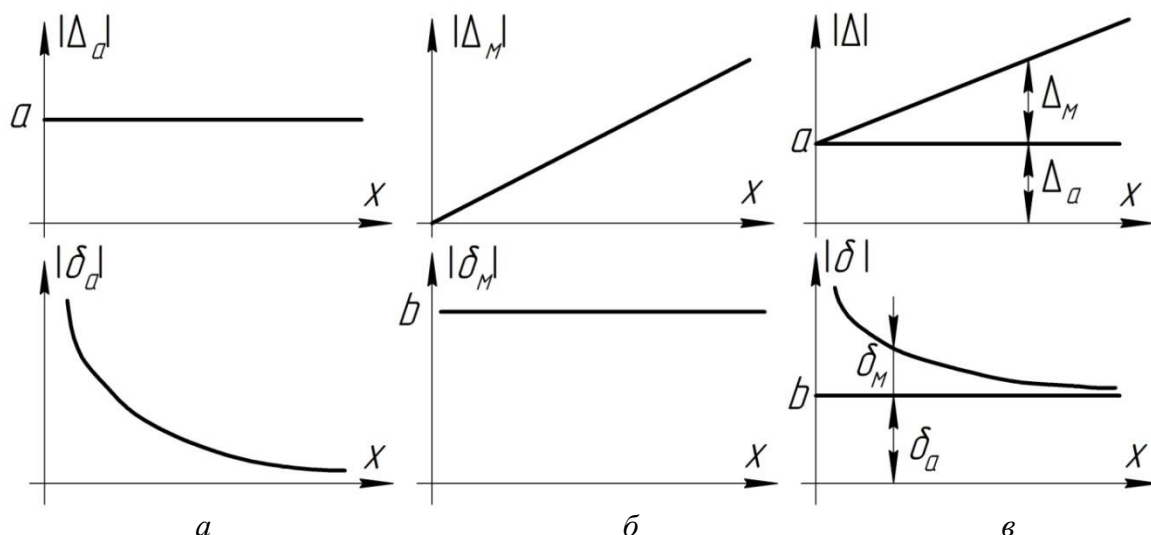


Рисунок 7.12 – Погрешности в абсолютной и относительной формах:
а – аддитивная, б – мультипликативная, в – суммарная

Для СИ, шкала которых имеет условный нуль, x_N равно модулю разности пределов измерений. Например, для вольтметра, термоэлектрического термометра с пределами измерений 100 и 600 °С, нормирующее значение равно 500 °С. Для СИ с заданным номинальным значением x_N устанавливают равным этому значению.

Для приборов с существенно неравномерной шкалой x_N принимают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины, а на средстве измерений класс точности условно обозначают, например, в виде значка $\surd^{0,5}$, где 0,5 – значение числа p . В остальных рассмотренных случаях класс точности обозначают конкретным числом p , например 1,5. Обозначение наносится на циферблат, щиток или корпус прибора.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности определяются по формуле $\delta = \Delta/x = \pm q$, если $\Delta = \pm a$. Значение постоянного числа q устанавливается так же, как и значение числа p . Класс точности на прибор обозначается в виде $\textcircled{0,5}$, где 0,5 – конкретное значение q .

В случае, если абсолютная погрешность задается формулой $\pm(a + bx)$, пределы допускаемой относительной основной погрешности

$$\delta = \Delta/x = \pm[c + d(|x_k/x| - 1)], \quad (7.3)$$

где c, d – отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда: $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \times 10^n$; $n = 1; 0; -1; -2$ и т. д.; x_k – больший (по модулю) из пределов измерений. При использовании формулы (7.3) класс точности обозначается в виде «0,02/0,01», где числитель – конкретное значение числа c , знаменатель – числа d . В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности определяют по более сложным формулам либо в виде графика или таблицы.

В стандартах или технических условиях на СИ указывается минимальное значение x_0 , начиная с которого применим принятый способ выражения пределов допускаемой относительной погрешности. Отношение x_k/x_0 называется динамическим диапазоном измерения.

Предел допускаемой дополнительной погрешности $\Delta_{дси}$ может указываться в виде:

- постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;
- отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;
- зависимости предела $\Delta_{дси}$ от влияющей величины (предельной функции влияния);
- функциональной зависимости пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Пример. Отсчет по равномерной шкале прибора с нулевой отметкой и предельным значением 50 А составил 25 А. Пренебрегая другими видами погрешностей, оценить пределы допускаемой абсолютной погрешности этого отсчета при условии, что класс точности прибора равен: 0,02/0,01; ③; 0,5.

1. Для прибора с классом точности 0,02/0,01, согласно формуле (7.3), при $x = 25A$, $x_k = 50A$, $c = 0,02$, $d = 0,01$ (учитывая, что относительная погрешность выражается в процентах) получим

$$\Delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{50A}{25A} - 1 \right) \right] \frac{25A}{100\%} = \pm 0,0075A.$$

2. Для прибора класса точности ③

$$\Delta = \pm(100\%)/x; \quad \Delta = \pm 25A(0,5\%)/100 = \pm 0,125A.$$

3. Для прибора класса точности 0,5, учитывая, что нормирующее значение x_N равно пределу измерения 50 А, получаем:

$$\gamma = \pm(100 \%) \Delta / x_N; \quad \Delta = \pm 50 \text{ А} (0,5 \%) / 100 = \pm 0,25 \text{ А}.$$

7.8 Основы выбора средств измерений

Правильный выбор средств измерений является необходимым условием получения достоверной измерительной информации. Поэтому основное внимание при выборе средств измерений для решения заданной измерительной задачи уделяют обеспечению необходимой точности измерений в динамическом и частотном диапазонах изменения измеряемых параметров технических устройств. Одновременно учитывают и условия, в которых планируется использовать средства измерений, а также допустимую продолжительность измерений.

При анализе условий, в которых будут проводиться измерения, определяются:

- уровни механических воздействий на средства измерений (вибрации, удары, линейные ускорения и т. п.);
- значения климатических факторов (температура, влажность, атмосферное давление);
- наличие активно разрушающей среды, к воздействию которой не приспособлен измерительный прибор (агрессивные газы и жидкости, грибки);
- наличие сильных магнитных и электрических полей и защиты от них у выбираемых средств измерений.

В простых измерительных задачах, заключающихся в определении значений параметров несложных устройств, вопросы выбора и применения средств измерений решают, как правило, эвристически, на основе практического опыта. В этом случае рекомендации носят общий характер и сводятся к необходимости проверки следующих условий:

- средства измерений должны обеспечивать измерение параметров устройств с необходимой точностью, быстродействием, в заданном диапазоне значений измеряемой физической величины, в определенных условиях окружающей среды (при фиксированном уровне внешних воздействующих факторов);
- средства измерений должны быть приемлемыми по стоимости, эргономическим, массогабаритным и другим характеристикам.

Однако усложнение технических устройств, необходимость точного определения значений тысяч и десятков тысяч параметров привело к тому, что для метрологического обеспечения эксплуатации сложных технических комплексов и систем потребовались многие сотни средств измерений. В связи с усложнением технических устройств, повышением

уровня автоматизации и ростом их значения в народном хозяйстве возросла ответственность решений, принимаемых на основе измерительной информации и, как следствие, увеличилась цена допускаемых ошибок. Вследствие этого большую значимость приобрел правильный выбор средств измерений для метрологического обеспечения эксплуатации сложных технических комплексов и систем.

Рационально выбрать средства измерений эвристическими методами практически невозможно, поскольку во внимание принимается не только требуемые точность, быстродействие, диапазон измерений, но и надежность, стоимость, периодичность поверки средств измерений, стойкость их к внешним воздействующим факторам и др. Эти параметры определяют качество измерений, поэтому средства измерений выбирают с учетом их влияния на надежность находящегося в эксплуатации устройства.

Первоначально определяют типы средств измерений, пригодные по своему функциональному назначению, диапазонам измеряемых физических величин, стойкости к внешним воздействующим факторам, массогабаритным характеристикам для решения измерительных задач, возникающих при метрологическом обеспечении эксплуатации технического устройства. После того как выбраны измерительные приборы, пригодные для указанных в измерительной задаче условий, необходимо правильно оценить, какой из них обладает наименьшей избыточностью по точностным характеристикам. Стремление произвести измерение с большей, чем это необходимо, точностью приводит к удорожанию измерений. В то же время снижение требований к точности ухудшает достоверность результатов измерений и обесценивает их. Выбор прибора, не имеющего точностной избыточности, позволяет, как правило, обеспечить меньшие затраты на измерения. Известные подходы к выбору средств измерений по точности основаны на рассмотрении двух различных случаев их использования:

- для измерения параметров устройств;
- для контроля параметров.

В первом случае задача сводится к выбору такого средства измерений, с помощью которого достигается значение предела суммарной погрешности измерения параметров Δ_ϕ , не превышающее требуемое Δ_{mp} :

$$\Delta_\phi \leq \Delta_{mp}. \quad (7.4)$$

Во втором случае средства измерений выбираются из условия, что вероятности ложного α_{01} и(или) необнаруженного отказа β_{01} контролируемого параметра не должны превышать допустимых значений:

$$\alpha_{01} \leq \alpha_{01}^D; \quad \beta_{01} \leq \beta_{01}^D, \quad (7.5)$$

где $\alpha_{01}^D; \beta_{01}^D$ – допустимые значения условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов.

Следовательно, задаваясь значениями условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов, можно устанавливать требования к погрешностям измерений параметров и на этой основе выбирать приемлемые по точности средства измерений. Задача выбора измерительного прибора сводится при этом к определению соотношения между требуемым пределом допускаемой погрешности измерений и допуском на контролируемый параметр.

Исходными данными, необходимыми при выборе средств измерений по точности, являются:

- состав измеряемых и контролируемых параметров устройства;
- значения допусков на отклонения контролируемых параметров и допустимые значения суммарной погрешности определения значений измеряемых параметров;
- допускаемые значения условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов для каждого из контролируемых параметров;
- законы распределения отклонений контролируемых параметров от своих номинальных значений.

При выборе средств измерений для контроля параметров надо рассчитать допускаемое значение суммарной погрешности измерений

$$\Delta_{mp} = |\delta_u| R, \quad (7.6)$$

где $|\delta_u|$ – абсолютное значение ширины поля допуска на результат измерения контролируемого параметра; R – допускаемое соотношение между погрешностью измерений и отклонением значений контролируемого параметра от номинала.

Значение R определяется отдельно по заданным допускаемым значениям условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов с учетом законов распределения погрешностей измерений и значений контролируемого параметра.

На практике не всегда известны исходные данные, необходимые для решения задачи выбора средств измерений по точности: часто отсутствует информация о законах распределения контролируемых параметров и погрешности измерений, а имеются лишь сведения о ширине поля допуска на контролируемый параметр. В таких случаях средства измерений выбирают по коэффициенту точности K_T , характеризующему отношение ширины поля допуска на контролируемый параметр δ_n к пределу суммарной погрешности измерений:

$$K_T = \delta_n / \Delta \quad (7.7)$$

так, чтобы обеспечить значение коэффициента точности больше допустимого. В зависимости от важности контролируемого параметра требуемое значение K_m выбирается в различных пределах.

При этом необходимо ориентироваться на определенную, лучше всего стандартизованную или аттестованную методику измерения соответствующей физической величины или параметра устройства. При отсутствии таких методик следует рассмотреть возможность выбора средств измерений из числа допущенных к применению соответствующими рекомендательными и ограничительными перечнями.

Выбор средств измерений складывается из следующих этапов:

- сбор исходных данных;
- определение первоначальной совокупности средств измерений;
- расчет требуемой точности измерений;
- выбор конкретного средства измерений из первоначальной совокупности.

Сбор исходных данных необходим для четкой постановки измерительной задачи, т. е. для выявления состава характеристик и условий проведения измерений. Исходные данные включают:

- состав измеряемых и контролируемых параметров, диапазоны изменения их значений и частот;
- значения допусков на отклонения контролируемых параметров и допустимые значения суммарной погрешности измерений параметров (δ_n , $\Delta_{тр}$);
- допустимые значения условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов α_{01} и β_{01} для каждого контролируемого параметра и значения доверительных вероятностей P_3 для измеряемых параметров;
- допустимая продолжительность измерения параметров.

Наряду с этим определяются особенности подключения средств измерений к объекту, допустимая продолжительность измерений, возможные ограничения массогабаритных, стоимостных и надежности характеристик средств измерений. При анализе условий, в которых будут проводиться измерения или измерительный контроль, определяются:

- уровни механических нагрузок (вибраций, ударов, линейных ускорений);
- климатические условия (температура, влажность, атмосферное давление);
- наличие или отсутствие активно разрушающей среды, в которой будут эксплуатироваться средства измерений или их элементы (агрессивные газы и жидкости, высокая температура, высокое напряжение и т. д.);
- наличие электрических и магнитных помех (полей).

Перечисленные исходные данные позволяют выявить совокупность средств измерений, из которой и будет произведен выбор прибо-

ра, необходимого для измерения или измерительного контроля конкретного параметра. При этом выбранные средства измерений должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать требуемым уровнем безотказности, необходимым техническим ресурсом и гарантийным сроком службы;
- обеспечивать простоту, удобство и безопасность применения, технического обслуживания и ремонта;
- иметь минимальные габариты, массу и стоимость;
- обладать необходимым быстродействием.

Устойчивость средств измерений к внешним воздействующим факторам должна быть такой, чтобы обеспечивалась их нормальная работа в условиях измерения (измерительного контроля) параметров.

После выбора первоначальной совокупности средств измерений необходимо рассчитать требуемые значения точности измерений.

Выбор прибора для измерений параметров устройств базируется на следующих исходных данных: состав, диапазоны значений ($x_1 \dots x_n$) и частот измеряемых параметров, допустимые значения суммарной погрешности измерений ($\Delta_{\text{мр}}$).

При измерениях параметра требование к точности обычно формулируется следующим образом: предел суммарной погрешности измерений параметра выбранным средством не должен превышать допустимого значения погрешности измерений, т. е.

$$\Delta_{\phi} \leq \Delta_m, \quad (7.8)$$

где Δ_{ϕ} – предел суммарной погрешности измерений параметра с помощью выбранного средства измерений; Δ_m – допустимое значение погрешности результата измерений параметра.

Суммарная погрешность измерений является функцией трех составляющих:

$$\delta = f(\delta_m, \delta_l, \delta_u), \quad (7.9)$$

где δ_m – методическая погрешность измерений; δ_l – субъективная погрешность, обусловленная ограниченными психофизиологическими возможностями оператора; δ_u – погрешность прибора (средства измерений).

Задача выбора средств измерений решается в предположении, что

$$\delta_m + \delta_l \ll \delta_u.$$

Методика выбора сводится к следующему:

1. По известному верхнему пределу динамического диапазона измеряемого параметра x_n с учетом допустимого значения суммарной по-

грешности измерений Δ_{mp} определяется конечное значение диапазона измерений

$$x_k \geq |x_e| + |\Delta_{mp}|$$

2. Оценивается ориентировочное значение требуемого класса точности K_{Imp} :

$$K_{Imp} \leq (\Delta_{mp}/x_k)100 \%. \quad (7.10)$$

Если вычисленное значение K_{Imp} не совпадает со значением, указанным в ГОСТ 8.401, его доводят до ближайшего соответствующего значения K_{Imp} в сторону более высокого класса точности.

3. По значениям K_{Imp} и x_k на основании анализа существующих методов измерения, характера измеряемого параметра, а также условий эксплуатации средства измерений предварительно выбирается конкретный измерительный прибор.

4. Для выбранного прибора и соответствующей стандартной или аттестованной методики измерений определяется фактическое значение предела суммарной погрешности Δ_ϕ .

В общем случае погрешность средства измерений обусловлена следующими составными частями: основной погрешностью δ_o ; дополнительной погрешностью $\delta_{доп}$ за счет влияния внешних факторов; динамической погрешностью $\delta_{дин}$; энергетической погрешностью $\delta_{эн}$.

В соответствии с ГОСТ 8.009 систематическую и случайную составляющие погрешностей этих частей оценивают на основании нормируемых метрологических характеристик средств измерений.

5. Полученное значение Δ_ϕ сравнивают с допустимым пределом Δ_{mp} :

- если $\Delta_{mp} \geq \Delta_\phi$, то прибор выбран правильно;
- если $\Delta_{mp} < \Delta_\phi$, то следует взять прибор ближайшего к ранее выбранному более высокому классу точности и выполнить операции п. 4.

Если нет средства измерений выбранного типа и предела измерений, но более высокой точности, следует выбрать другой, более точный метод измерения.

Рассмотрим пример выбора средств для измерений силы постоянного тока электроустановки. Исходными данными для решения этой задачи являются:

- номинальное значение тока $I_n = 15 \text{ A}$;
- допускаемое отклонение $S = \pm 1,5 \text{ A}$;
- условия эксплуатации: температура $10...40 \text{ }^\circ\text{C}$, влажность $65 + 15 \%$, напряженность внешнего магнитного поля менее 80 A/м ; допустимое значение погрешности измерений $\Delta_{mp} = 0,45 \text{ A}$.

Для выбора измерительного прибора:

а) определяем нормирующее значение $x_N = x_k$. Ближайшим к значению 15 А для амперметров является верхний предел 20 А, поэтому полагаем $x_N = 20$ А;

б) вычисляем ориентировочное значение требуемого класса точности по формуле (7.10):

$$K_{Imp} = ((0,45)/20)100 = 2,25.$$

Принимаем $K_{Imp} = 1,5$;

в) исходя из необходимости измерения постоянного тока и заданных условий проведения измерений, выбираем амперметр типа М340 класса точности 1,5 с верхним пределом 20 А и группой эксплуатации Б;

г) находим предел суммарной погрешности прибора

$$\Delta_\phi = \pm\sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_1^2 + \Delta_2^2},$$

где Δ_0 – предел абсолютной основной погрешности прибора; Δ_1 – предел абсолютной дополнительной температурной погрешности; Δ_2 – предел абсолютной дополнительной погрешности за счет внешнего магнитного поля.

При определении Δ_1 примем во внимание, что согласно ГОСТ 1845 изменение показателей амперметра М340, вызванное отклонением температуры на 10 °С от нормальной (20 + 5 °С), не превышает 1,8 % верхнего предела, поэтому $\Delta_1 = \pm(1,8 \cdot 20)/100 = \pm 0,36$ А.

Для приборов типа М340 согласно ГОСТ 1845 изменение показаний из-за влияния внешнего магнитного поля напряженностью 40 А/м не превышает 2,5 % верхнего предела измерений, поэтому для напряженности 80 А/м:

$$\Delta_2 = \pm 2,5 \cdot 20 \cdot 80 / 100 \cdot 400 = \pm 0,1 \text{ А.}$$

Таким образом,

$$\Delta_\phi = \pm\sqrt{(20 \cdot 1,5 / 100)^2 + 0,36^2} = \pm 0,48 \text{ А}$$

Сравнение значения предела суммарной погрешности прибора (0,48 А) с требуемой (0,45 А) указывает на необходимость перейти к прибору более высокого класса точности (1,0). Для амперметра этого класса

$$\Delta_\phi = \pm\sqrt{(20 \cdot 1 / 100)^2 + 0,36^2 + 0,1^2} = \pm 0,42 \text{ А,}$$

т. е. этот прибор является оптимальным с точки зрения точности и стоимости.

Исходными данными для **выбора измерительного прибора для допускового контроля параметров** являются:

- состав, номинальные значения и диапазоны значений $x_n, \dots, x_6$, а также частотные диапазоны контролируемых параметров;
- допустимые значения вероятностей ложного α_{o1}^D и необнаруженного β_{o1}^D отказов для каждого контролируемого параметра;
- границы поля допуска на значения контролируемых параметров.

При выборе средства измерений для контроля параметра устройства предел допускаемых погрешностей измерений Δ_{mp} определяют, исходя из заданных значений условных вероятностей ложного и необнаруженного отказов. При гауссовских законах распределения значений контролируемого параметра и погрешности измерений, равенстве контрольных и технических (отказовых) допусков α_{o1} и β_{o1} вычисляют следующие отношения:

$$r = \sigma_y / \sigma_x, \quad (7.11)$$

$$k_{1(2)} = \delta_{n1(2)} / \sigma_x, \quad (7.12)$$

где σ_x – среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра; σ_y – среднее квадратическое отклонение погрешности измерений указанного параметра; $\delta_{n1(2)}$ – половина ширины поля допуска на контролируемый параметр от номинального значения параметра до левой (правой) границы поля допуска.

Значения α_{o1} и β_{o1} для разных значений r и k приведены на номограммах (рис. 7.13).

Порядок выбора средства измерений заключается в следующем:

1. На основе известных значений $\delta_{n1(2)}$ и σ_x для контролируемого параметра по формуле (7.12) вычисляют значения k_1 и k_2 .

2. При симметричных допусках ($k_1 = k_2$) на рисунке 7.13 выбирают номограмму, соответствующую вычисленному значению $k_{1(2)}$, и по ней определяют минимальное значение r , при котором

$$\alpha_{o1} \leq \alpha_{o1}^D. \quad (7.13)$$

Затем эту же операцию выполняют для неравенства

$$\beta_{o1} \leq \beta_{o1}^D. \quad (7.14)$$

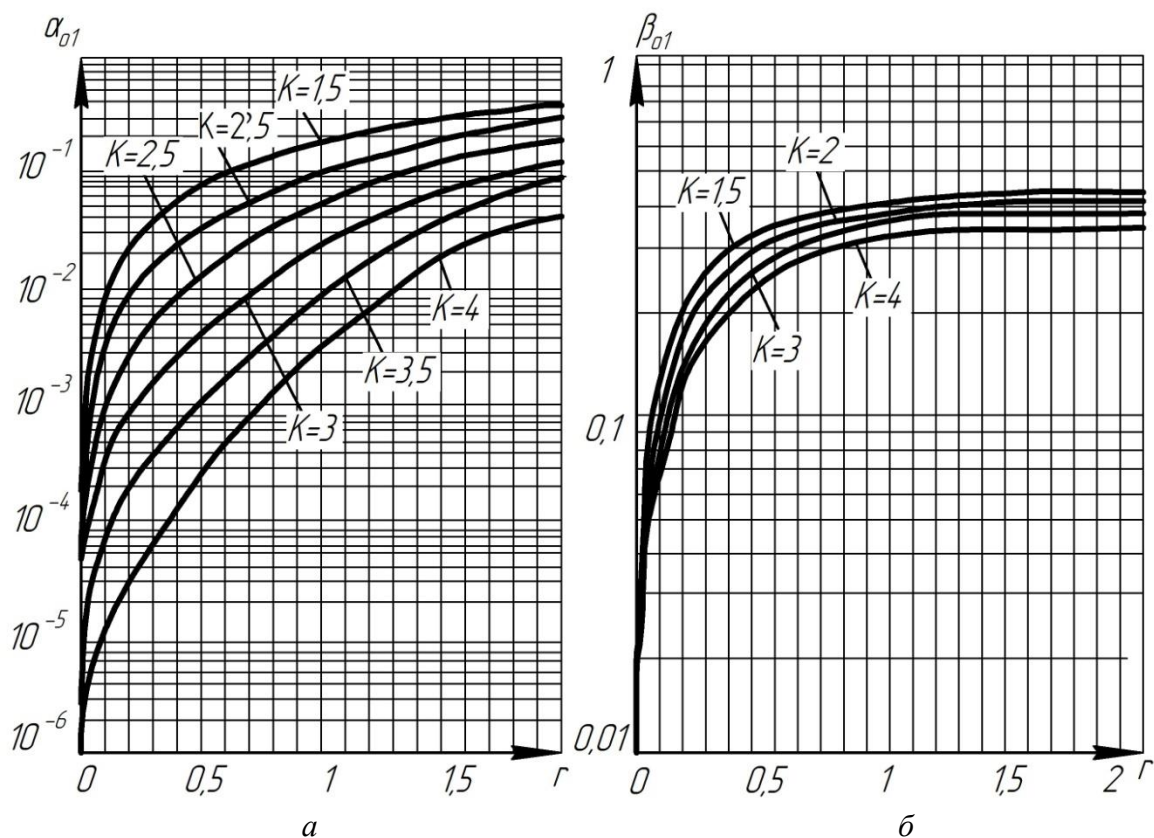


Рисунок 7.13 – Значения условных вероятностей отказов для различных r и K при симметричных допусках на контроле:
а – ложного, б – необнаруженного

Из полученных двух значений r выбирают наименьшее и используют его для определения допустимого среднего квадратического значения погрешности измерений: $\sigma_y^D = \sigma_x / r_{\text{наим}}$. Аналогичным образом поступают при одностороннем допуске, при этом пользуются номограммами, в которых $k_2 = +\infty$.

3. Определяют предел допускаемого значения погрешности измерений параметра

$$\Delta_{\text{тр}} = (2 \dots 3)\sigma_y^D,$$

причем числовой коэффициент принимают равным 2 при доверительной вероятности $P_3 = 0,95$ и 3 – при доверительной вероятности $P_3 = 0,997$.

4. Значение $\Delta_{\text{тр}}$ сравнивают с фактическим значением предела погрешности измерений, достигаемой с помощью первоначально выбранного прибора; при $\Delta_{\text{тр}} > \Delta_{\text{ф}}$ считают, что прибор выбран правильно; при $\Delta_{\text{тр}} \leq \Delta_{\text{ф}}$ следует выбрать прибор более высокого класса точности.

Для иллюстрации рассмотрим выбор средства измерений для контроля напряжения постоянного тока электроустановки. Известны следующие исходные данные:

- номинальное напряжение $U = 12\text{В}$;
- допускаемое отклонение напряжения от номинального значения $\delta_{н1(2)} = \pm 1\text{В}$;
- закон распределения значений контролируемого параметра гауссовский со средним квадратическим отклонением $\sigma_x = 0,7\text{ В}$;
- допускаемые значения условных вероятностей ложного отказа $\alpha_{oi}^A = 0,02$ и необнаруженного отказа $\beta_{oi}^A = 0,01$;
- измерения следует производить в диапазоне температур $+10 \dots +25\text{ }^\circ\text{С}$, при влажности $65 \pm 15\%$ и напряженности внешнего магнитного поля $75 \dots 100\text{ А/м}$.

Средство измерений выбирают следующим образом:

- а) по формуле (7.12) определяют значение $k_1 = -k_2 = \pm 1/0,7 = 1,4$;
- б) на номограмме на рисунке 7.13 а выбирают минимальное значение $r = 0,2$, при котором $\alpha_{oi} \leq \alpha_{oi}^A$;
- в) на номограмме на рисунке 7.13 б выбирают минимальное значение $r = 0,17$, при котором $\beta_{oi} \leq \beta_{oi}^A$;
- г) наименьшее из полученных значений $r = 0,17$ используют для определения допустимого среднего квадратического значения погрешности измерений $\sigma_y^A = 0,7 \cdot 0,17 = 0,12\text{В}$;
- д) находят предел допускаемого значения погрешности измерений параметра $\Delta_{тр} = 3 \cdot 0,12 = 0,36\text{ В}$ (для доверительной вероятности $P_3 = 0,997$);
- е) вольтметры имеют ближайший к значению 12 В верхний предел измерения 15 В . Поэтому ориентировочная приведенная погрешность в процентах от предела измерения $K_{Птр} = 100 \cdot 0,36/15 = 2,4$.

Принимают $K_{Птр} = 1,5$. Отсюда следует, что наиболее приемлемым является вольтметр постоянного тока магнитоэлектрической системы типа М4200/1 класса точности 1,5 с верхним пределом измерения 15 В ;

- ж) предел допускаемой абсолютной основной погрешности выбранного прибора $\Delta_0 = 1,5 \cdot 15/100 = 0,225\text{ В}$.

Нормальные температурные условия для этого прибора $(20 \pm 5)\text{ }^\circ\text{С}$, отклонение рабочей температуры от нормальной $(15 - 10)\text{ }^\circ\text{С} = 5\text{ }^\circ\text{С}$. В соответствии с ГОСТ 1845 для этого типа прибора дополнительная температурная погрешность не должна превышать $0,8\%$ на каждые $10\text{ }^\circ\text{С}$, поэтому $\Delta_1 = 0,4 \cdot 15/100 = 0,06\text{ В}$; дополнительная погрешность за счет магнитного поля в соответствии с указанным ГОСТом $\Delta_2 = (1 \cdot 15)/(100 \cdot 4) = 0,0375\text{ В}$;

- з) предел фактической суммарной погрешности измерений

$$\Delta_\phi = \pm \sqrt{0,225^2 + 0,06^2 + 0,0375^2} = 0,236\text{В};$$

и) поскольку $\Delta_{\phi} < \Delta_{\text{тр}}$, то выбранный прибор обеспечивает в заданных условиях требуемую точность измерения напряжения [13,14,35].

7.9 Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятию «средство измерений».
2. Назовите функции, которые реализует средство измерений.
3. Изобразите обобщенную структурную схему средства измерений.
4. Опишите принцип действия любого средства измерения.
5. Запишите формулу, описывающую суть входного сигнала средства измерения.
6. Запишите формулу, описывающую суть выходного сигнала средства измерения.
7. Перечислите возможные варианты структурных схем средств измерений в зависимости от входящих элементов.
8. Приведите пример средства измерений с описанием его структуры.
9. Дайте определение понятию «функция преобразования».
10. Запишите общий вид функции преобразования, характеризующий средство измерения в статическом режиме.
11. Какие Вам известны виды функций преобразования?
12. Дайте определение понятиям «чувствительность» и «порог чувствительности» средства измерения.
13. Для чего используются импедансные характеристики средств измерения?
14. Перечислите известные Вам метрологические и неметрологические характеристики средств измерения.
15. Какие математические модели используются для описания динамических характеристик средств измерений?
16. Перечислите признаки классификации средств измерений.
17. Как классифицируются средства измерений и контроля в зависимости от типа физических величин?
18. По каким признакам классифицируются автоматические средства контроля?
19. Как классифицируются средства измерений по уровню стандартизации?
20. Как классифицируются средства измерения по роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений?
21. Дайте характеристику элементарным средствам измерений.
22. На какие типы подразделяются меры?
23. Как работают компаратор и измерительный преобразователь?

24. Изобразите структурную схему преобразователя.
25. На какие типы делятся измерительные преобразователи по виду входных и выходных величин?
26. Изобразите структурные схемы цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей.
27. Приведите обобщенную структурную схему измерительного прибора.
28. Чем измерительный прибор отличается от элементарного средства измерения?
29. Дайте определение понятиям: «отсчетное устройство», «шкала», «указатель», «длина деления шкалы», «длина шкалы», «цена деления шкалы», «указатель», «предел измерений», «диапазон измерений», «диапазон показаний измерительного прибора».
30. Как различают измерительные приборы по форме индикации измеряемой величины?
31. Назовите отличия измерительной установки от измерительного прибора.
32. Дайте определение понятиям «измерительная установка» и «измерительная система».
33. Чем измерительная установка отличается от измерительной системы?
34. Перечислите и охарактеризуйте разновидности измерительных систем.
35. В чем отличие между измерительно-вычислительными комплексами и информационно-измерительными системами?
36. Перечислите признаки принадлежности средства измерений к измерительно-вычислительному комплексу.
37. Как классифицируются измерительно-вычислительные комплексы по назначению?
38. Перечислите основные составные части измерительно-вычислительных комплексов.
39. Для чего используются метрологические характеристики средств измерений?
40. Каких положений следует придерживаться при разработке принципов выбора и нормирования средств измерений?
41. В каком виде можно представить инструментальную составляющую погрешности средства измерения?
42. Приведите номенклатуру метрологических характеристик средств измерений.
43. Опишите этапы определения интервала погрешности средств измерений по нормированным метрологическим характеристикам.
44. По каким формулам определяются пределы допускаемой абсолютной основной погрешности средства измерения?

45. По какой формуле определяются пределы допускаемой приведенной основной погрешности средства измерения?

46. Проиллюстрируйте аддитивную, мультипликативную и суммарную погрешности в абсолютной и относительной формах.

47. По какой формуле определяются пределы допускаемой относительной основной погрешности?

48. Оцените пределы допускаемой абсолютной погрешности отсчета (30 А) по равномерной шкале прибора с нулевой отметкой и предельным значением 100 А при условии, что класс точности прибора равен: 0,02/0,01; 0,5; 0,5.

49. Что при выборе средства измерения определяется при анализе условий, в которых будут проводиться измерения?

50. На чем основаны известные подходы к выбору средств измерений по точности?

51. Что является исходными данными, необходимыми при выборе средств измерений по точности?

52. Из каких этапов складывается процесс выбора средств измерений?

53. Что включают исходные данные необходимые для четкой постановки измерительной задачи?

54. Что определяется при анализе условий, в которых будут проводиться измерения?

55. Какими требованиями должны удовлетворять выбранные средства измерений?

56. Изложите методику выбора средств измерения.

57. Что является исходными данными для выбора измерительного прибора для допускового контроля параметров?

58. Каков порядок выбора измерительного прибора для допускового контроля параметров?

8 УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В МАШИНОСТРОЕНИИ

8.1 Классификация средств и методов измерения и контроля геометрических величин в зависимости

Как было отмечено в главе 7, средства измерений классифицируются по весьма разнообразным признакам, которые в большинстве случаев взаимно независимы, и в каждом средства измерений могут находиться почти в любых сочетаниях. К числу признаков классификации средств и методов измерения геометрических величин относятся: вид измеряемых геометрических величин; принцип действия; назначение; число проверяемых параметров при одной установке объекта измерения; способ образования показаний; способ получения числового значения измеряемой величины; точность; условия применения; степень защищенности от внешних магнитных и электрических полей; прочность и устойчивость против механических воздействий и перегрузок; стабильность; чувствительность; пределы и диапазоны измерений; роль, выполняемая в системе обеспечения единства измерений; уровень автоматизации; уровень стандартизации; отношение к измеряемой физической величине.

На рисунке 8.1 представлена общая схема классификации средств измерения и контроля по виду измеряемых геометрических величин, а на рисунке 8.2 приведена схема классификации универсальных измерительных инструментов и приборов, применяемых для измерения геометрических величин в машиностроении по принципу их действия .



Рисунок 8.1 – Классификация средств измерения и контроля по виду измеряемых геометрических величин

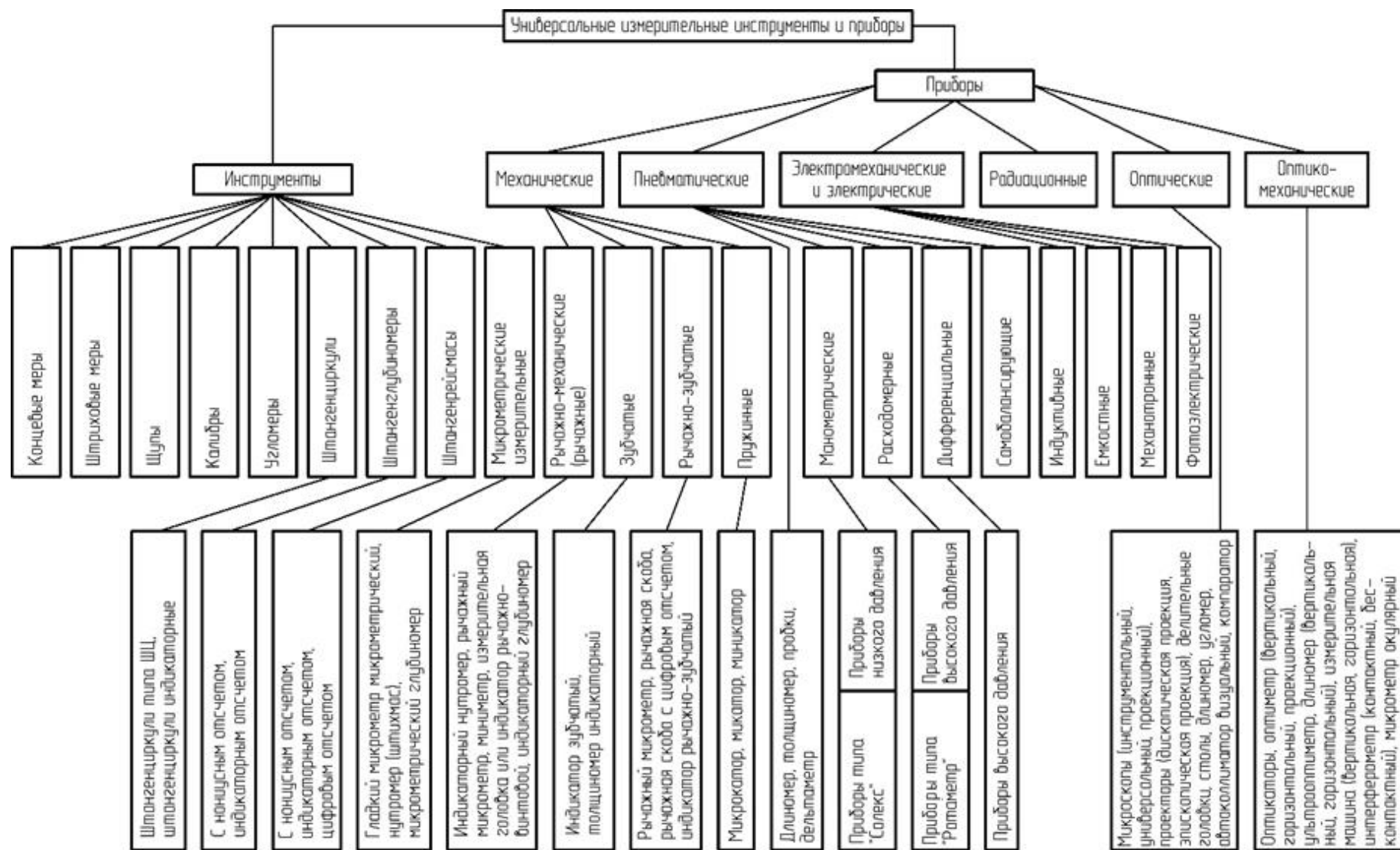


Рисунок 8.2 – Классификация универсальных измерительных инструментов и приборов

8.2 Основные измерительные инструменты и приборы в машиностроении

8.2.1 Плоскопараллельные концевые меры длины

К основным измерительным инструментам и приборам в машиностроении относят (рис. 8.2): 1) меры длины концевые плоскопараллельные; 2) меры длины штриховые; 3) щупы; 4) калибры; 5) штангенинструменты; 6) микрометрические инструменты; 7) рычажно-механические приборы (индикаторы часового типа, измерительные головки с рычажно-зубчатой передачей, головки высокой точности, нутромеры, микрометры рычажные и др.); 8) Оптико-механические и оптические приборы (оптиметры, длиномеры оптические, измерительные машины, измерительные микроскопы, проекционные приборы, катетометры, сферометры и др.); 9) пневматические, электромеханические, электрические и радиационные приборы [42–81].

Меры длины концевые плоскопараллельные (ГОСТ 9038) предназначены для передачи размеров от эталона до изделия. Это основное назначение концевых мер длины осуществляется путем применения их для хранения и передачи единицы длины, поверки и градуировки различных мер и средств измерений, поверки калибров, а также для определения размеров изделий и приспособлений, точных разметочных и координатно-расточных работ, наладки станков и инструментов и т. д.

В соответствии с ГОСТ 9038 концевые меры длины имеют форму прямоугольного параллелепипеда с двумя плоскими взаимно параллельными измерительными поверхностями (рис. 8.3 а).

За размер плоскопараллельной концевой меры длины принимается ее *срединная длина* l (рис. 8.3 б), которая определяется длиной перпендикуляра, проведенного из середины одной из измерительных поверхностей меры на противоположную измерительную поверхность. Значения сторон a и b в сечении мер определяются в зависимости от номинального размера срединной.

Номинальный размер срединной длины наносится на каждой мере.

Концевые меры изготавливаются следующих классов точности: 00; 01; 0; 1; 2; 3 – из стали; 00; 0; 1; 2 и 3 – из твердого сплава. (Класс 00 – самый точный.)

Концевые меры комплектуют в различные наборы по их числу и размерам номинальной длины. В наборах от № 1 до № 19 число мер составляет от 2 до 112. В специальных наборах: № 20 – 23 меры, № 21 – 20 мер, № 22 – 7 мер.

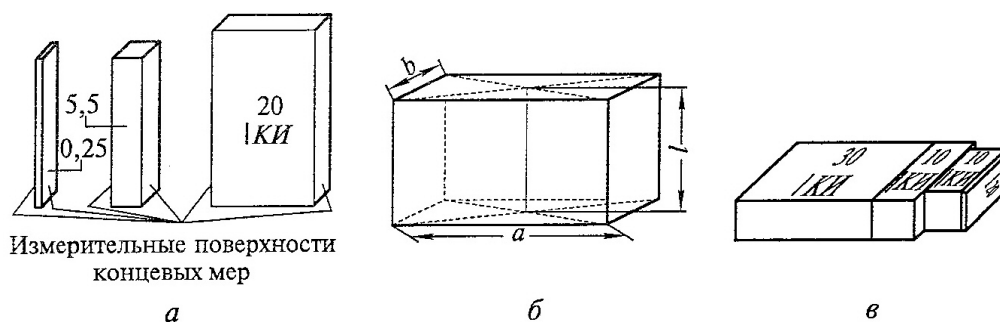


Рисунок 8.3 – Плоскопараллельные концевые меры длины:
а – внешний вид, б – характерные размеры, в – притираемость мер

Номинальные размеры и градация размеров мер длины, а также комплектация их в наборы осуществляются таким образом, чтобы можно было из минимального числа мер составить блок любого размера до третьего десятичного знака. В соответствии с этим в наборах концевых мер принята следующая градация: 0,001; 0,01; 0,1; 0,5; 1; 10; 25; 50 и 100 мм. Номинальные значения длины мер колеблются от 1,005 до 100 мм. Так, набор из 112 концевых мер содержит: одну меру размером 1,005 мм; 51 меру от 1 до 1,5 мм через 0,01 мм; 5 мер от 1,6 до 2 мм через 0,1 мм; одну меру 0,5 мм; 46 мер от 2,5 до 25 мм через 0,5 мм и 8 мер от 30 до 100 мм через 10 мм.

Класс точности набора определяется низшим классом отдельной меры, входящей в набор. К каждому набору прилагается паспорт, в котором указываются номинальная длина каждой меры и отклонение.

В зависимости от погрешности измерения длины мер (от погрешности аттестации) и отклонения их от плоскостности и параллельности концевые меры разделяют на пять разрядов: 1, 2, 3, 4, 5 (для 1-го разряда определена наименьшая погрешность аттестации). Величины погрешностей приводятся в аттестате меры.

При использовании концевых мер, для которых установлен разряд, размер блока плиток определяют не только по номинальным значениям мер, но и учитывают действительные отклонения, приведенные в аттестате.

Одно из основных свойств концевых мер длины, обеспечивающее их широкое применение, – это *притираемость*, т. е. способность прочно сцепляться между собой при прикладывании или надвигании одной меры на другую (рис. 8.3 в). Сцепление (адгезия) мер вызывается молекулярными силами сцепления при наличии тончайшей пленки смазки между ними (0,05 ... 0,1 мкм). Усилие сдвига одной меры относительно другой в этом случае составляет не менее 30 ... 40 Н, а для новых концевых мер эта величина возрастает в 10 ... 20 раз. Концевые меры из стали должны выдерживать 500 притираний при вероятности безотказной ра-

боты 0,8, а концевые меры из твердого сплава – 30 000 притираний при вероятности 0,9.

При составлении блока требуемого размера из концевых мер руководствуются следующим правилом. Блок заданного размера необходимо составлять из возможно меньшего числа мер. Вначале следует выбирать концевые меры, позволяющие получить тысячные доли миллиметра, затем сотые, десятые и, наконец, целые миллиметры. Например, для получения блока размером 28,495 мм необходимо из набора № 1 взять концевые меры в следующей последовательности: $1,005 + 1,49 + 8 + 20 = 28,495$ мм. Минимальное число концевых мер в блоке, с одной стороны, повысит точность блока (уменьшается суммарная погрешность размера блока), а с другой – повысит надежность блока от разрушения. Число концевых мер в блоке не должно превышать пяти штук.

Материалом, из которого изготавливают концевые меры длины, чаще всего бывает сталь с температурным коэффициентом расширения $(11,5 \pm 0,1)10^{-6}$ мм на 1°C при изменениях температуры от 10 до 30°C . Это хромистые стали 20ХГ, ХГ, ШХ15, Х. Твердость измерительных поверхностей – не менее HRC 62. Иногда концевые меры изготавливают из твердого сплава ВК6М с температурным коэффициентом расширения $3,6 \cdot 10^{-6}$ мм на 1°C . Это позволяет повысить износостойкость концевых мер в 10...40 раз по сравнению со стальными, однако из-за разности температурных коэффициентов твердого сплава и стали могут возникнуть значительные погрешности измерения.

Шероховатость измерительных поверхностей концевых мер длины для обеспечения хорошей притираемости и высокой износостойкости установлена в пределах не более 0,063 мкм по критерию *Rz*. Шероховатость нерабочих поверхностей – *Ra* 0,63 мкм.

Средний срок сохраняемости концевых мер из стали – не менее одного года, а из твердого сплава – не менее двух лет.

Благодаря свойству концевых мер притираться они являются универсальными и широко применяемыми средствами измерения и контроля. Область применения концевых мер еще более расширяется при использовании их совместно с принадлежностями.

Для измерения внутренних диаметров (рис. 8.4 а), наружных размеров, при разметке (рис. 8.4 б) и других работах концевые меры применяются совместно со специальными принадлежностями: боковиками (рис. 8.4 в); державками (струбцинами); основаниями; стяжками, предназначенными для скрепления блоков, размером более 100 мм; зажимными сухарями, служащими для крепления стяжками блоков концевых мер с боковиками (рис. 8.4 г).

Кроме перечисленных выше деталей в набор принадлежностей могут быть включены трехгранная линейка и плитки с рисками.

8.2.2 Меры длины штриховые. Щупы

К штриховым мерам относятся брусковые меры длины, измерительные линейки и рулетки. Брусковые штриховые меры применяются в качестве шкал приборов и станков, а также как образцовые меры длины при поверке рабочих мер длины. Изготавливаются шесть классов точности с номинальными размерами от 100 до 4000 мм. *Измерительные линейки и рулетки* относятся к штриховым мерам и предназначены для измерения размеров изделий 14...17 квалитетов точности прямым методом. Конструкции линеек однотипны. Они представляют собой металлическую полосу шириной 20...40 мм и толщиной 0,5...1,0 мм, на широкой поверхности которой нанесены деления. Линейки изготавливаются с одной или двумя шкалами с верхними пределами измерений 150, 300, 500 и 1000 мм и ценой деления 0,5 или 1 мм. Линейки с ценой деления 1 мм могут иметь на длине 50 мм от начала шкалы полумиллиметровые деления.

Допускаемые отклонения действительной общей длины шкалы линеек от номинального значения находятся в пределах $\pm (0,10...0,20)$ мм в зависимости от общей длины шкалы, а отдельных подразделений – не более $\pm (0,05...0,10)$ мм.

Поверку линеек, т. е. определение погрешности нанесения штрихов, производят по образцовым измерительным линейкам. Погрешность такого сравнения не превышает 0,01 мм.

Рулетки, предназначенные для измерений в машиностроении, подразделяются на рулетки в закрытом корпусе (тип РЗ) с длиной шкалы 2, 5, 10, 20, 30, 50 м и ценой деления 1 или 10 мм, самосвертывающиеся (тип РС) и желобчатые (тип РЖ) с длиной шкалы 1 и 2 м при цене деления 1 мм.

Щупы представляют собой пластины с параллельными измерительными плоскостями, предназначенные для проверки величин зазоров между поверхностями. Изготавливаются двух классов точности длиной 100 и 200 мм. Щупы длиной 100 мм поставляются отдельными пластинами и наборами, включающими различные номинальные размеры пластин [52–53].

8.2.3 Контроль калибрами

Гладкие цилиндрические изделия. Калибры применяются для контроля размеров от 0,1 до 3150 мм изделий 1–11-го классов точности (размеры менее 0,1 мм и более 3150 мм и изделия классов точности

02–09 проверяются универсальными измерительными средствами) [52–53, 78].

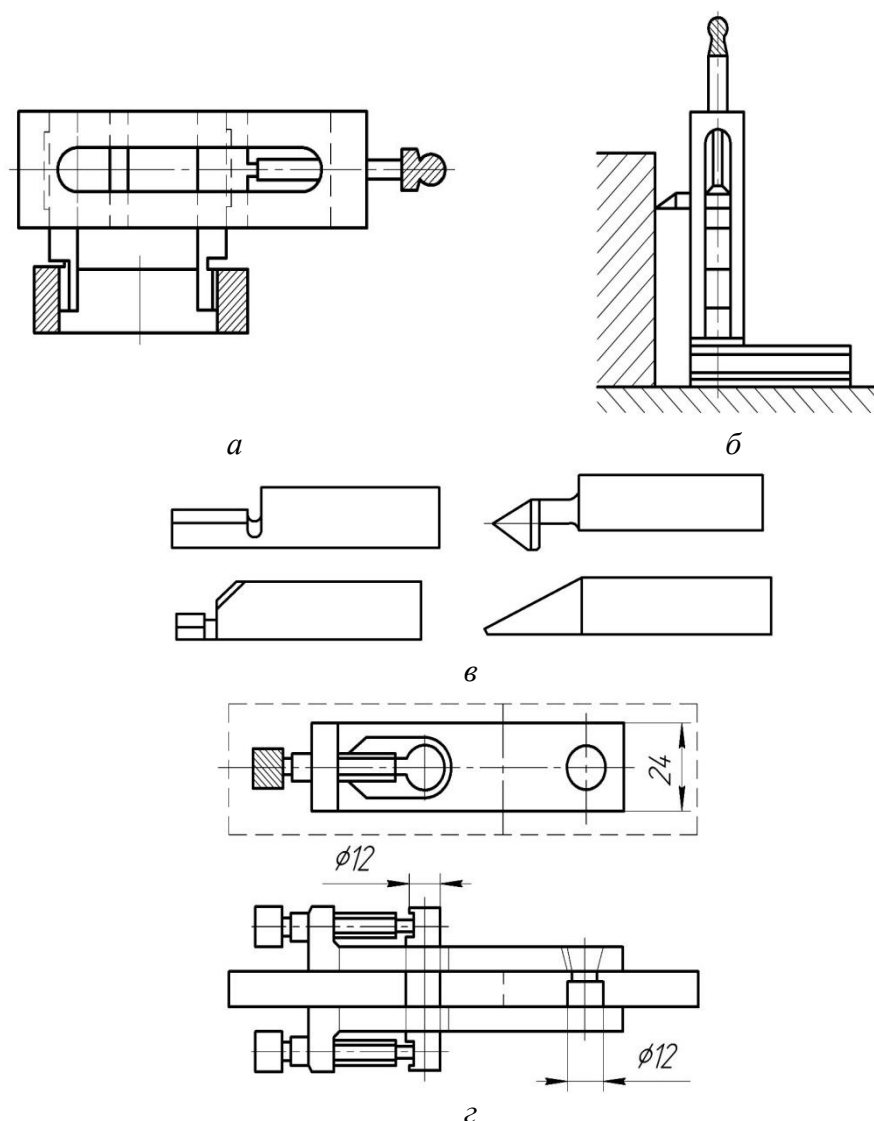


Рисунок 8.4 – Принадлежности для концевых мер:

а – измерение внутреннего диаметра, б – измерение наружных размеров, в – боковики, г – зажимные сухари

По конструктивным признакам различают калибры нерегулируемые (жесткие), регулируемые, односторонние и двусторонние, скобы, полные и неполные пробки, нутромеры и др. Конструкции калибров-пробок приведены на рисунке 8.5: 1 – двусторонние пробки с разрезными втулками и цилиндрическими вставками диаметром от 0,1 до 0,95 мм; 2 – двусторонние пробки с цилиндрическими вставками диаметром от 0,3 до 6 мм; 3 – проходные и непроходные пробки с цилиндрическими вставками диаметром от 0,3 до 6 мм; 4 – двусторонние пробки со вставками (с коническим хвостовиком) диаметром св. 3 до 50 мм; 5 – двусторонние с неполными непроходными вставками (с ко-

ническим хвостовиком) диаметром св. 6 до 50 мм (для контроля отверстий 1–3-го классов точности); 6 – проходные и непроходные полные и неполные (для контроля отверстий 1–3-го классов точности) пробки со вставками (с коническим хвостовиком) диаметром св. 50 до 75 мм; 7 – проходные и непроходные полные и неполные (для контроля отверстий 1–3-го классов точности) пробки с насадками диаметром св. 50 до 100 мм; 8 – штампованные проходные и непроходные пробки с насадками диаметром св. 50 до 100 мм; 9 – штампованные пробки проходные диаметром св. 100 до 160 мм и непроходные – св. 75 до 160 мм; 10 – неполные пробки проходные диаметром св. 100 до 300 мм, непроходные диаметром св. 75 до 300 мм; 11 – неполные пробки проходные и непроходные с накладками диаметром св. 160 до 360 мм; 12 – односторонние листовые пробки диаметром св. 50 до 250 мм (для контроля отверстий 3-го и более грубых классов точности); 13 – нутромеры непроходные сферические диаметром св. 100 до 360 мм.

Пробки, оснащенные твердым сплавом, предназначены для контроля отверстий 1–5-го классов точности. Конструкции калибров-скоб приведены на рисунке 8.6: 1 – скобы составные односторонние и двусторонние для диаметров от 1 до 6 мм; 2 – скобы листовые двусторонние для диаметров от 3 до 10 мм; 3 – скобы листовые односторонние для диаметров от 3 до 260 мм; 4 – скобы листовые односторонние со сменными губками для диаметров св. 100 до 360 мм; 5 – скобы штампованные для диаметров св. 10 до 180 мм; 6,7 – скобы листовые односторонние и двусторонние для длин св. 300 до 500 мм; 8 – скобы регулируемые двухпредельные для диаметров до 340 мм.

По назначению калибры делят на:

- а) рабочие калибры (Р-ПР и Р-НЕ), применяемые для проверки размеров изделий рабочими и ОТК завода-изготовителя;
- б) приемные калибры (П-ПР и П-НЕ) – для проверки размеров изделий представителями заказчика;
- в) контрольные калибры (контркалибры, К-РП, К-П, К-НЕ, К-И) – для контроля размеров рабочих и приемных калибров или для установки регулируемых скоб.

Размеры глубин и высот уступов. При выборе допусков на размеры глубин и высот уступов необходимо использовать 4–9-й классы точности и лишь в случаях особой необходимости прибегать к более точным классам.

В условиях серийного и массового производства контроль этих размеров надлежит вести с помощью предельных калибров.

Основными методами контроля являются; «метод световой щели», или «на просвет»; методы «надвигания», «осязания», «по рискам».

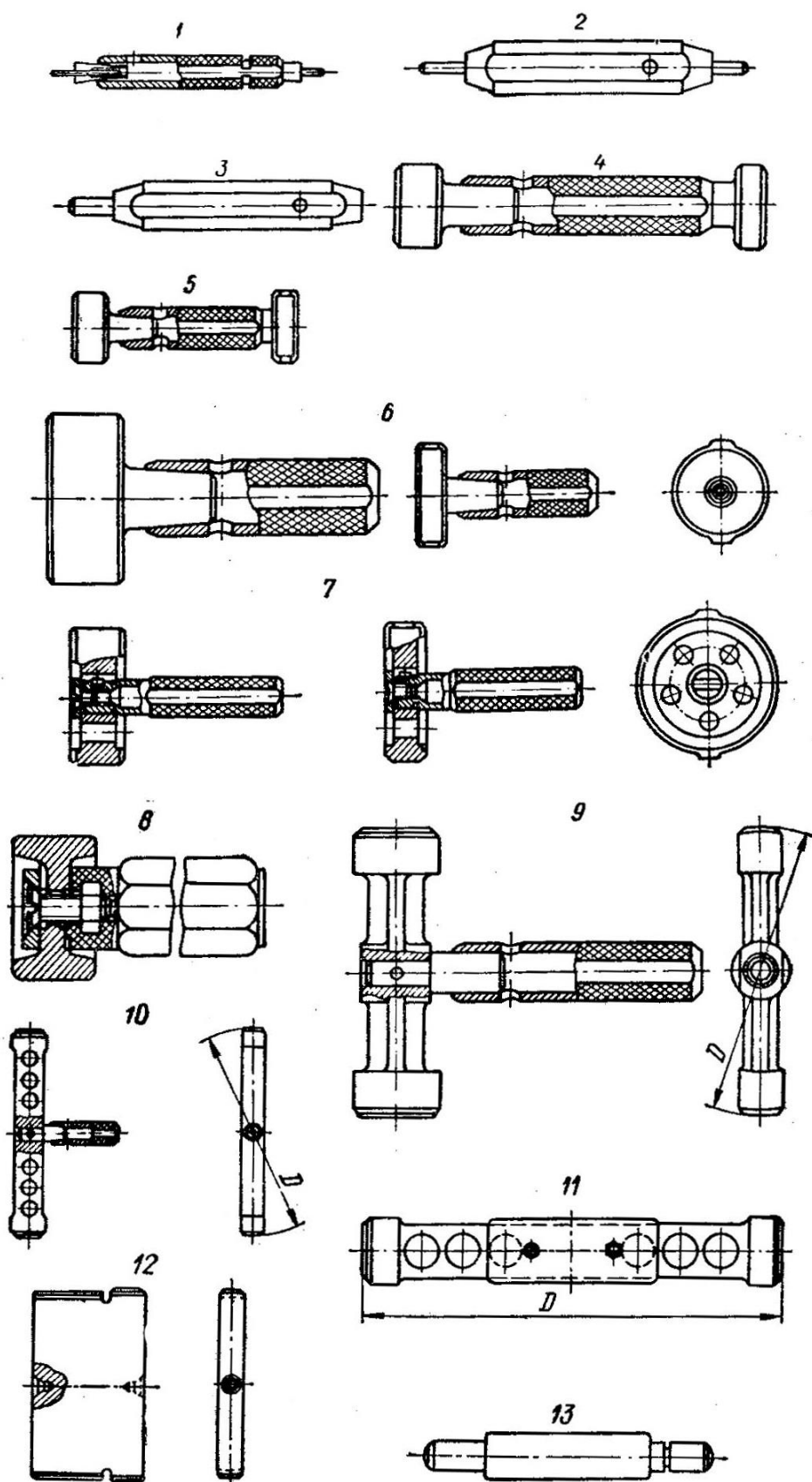


Рисунок 8.5 – Конструкция и типы калибров для контроля размеров внутренних цилиндрических поверхностей

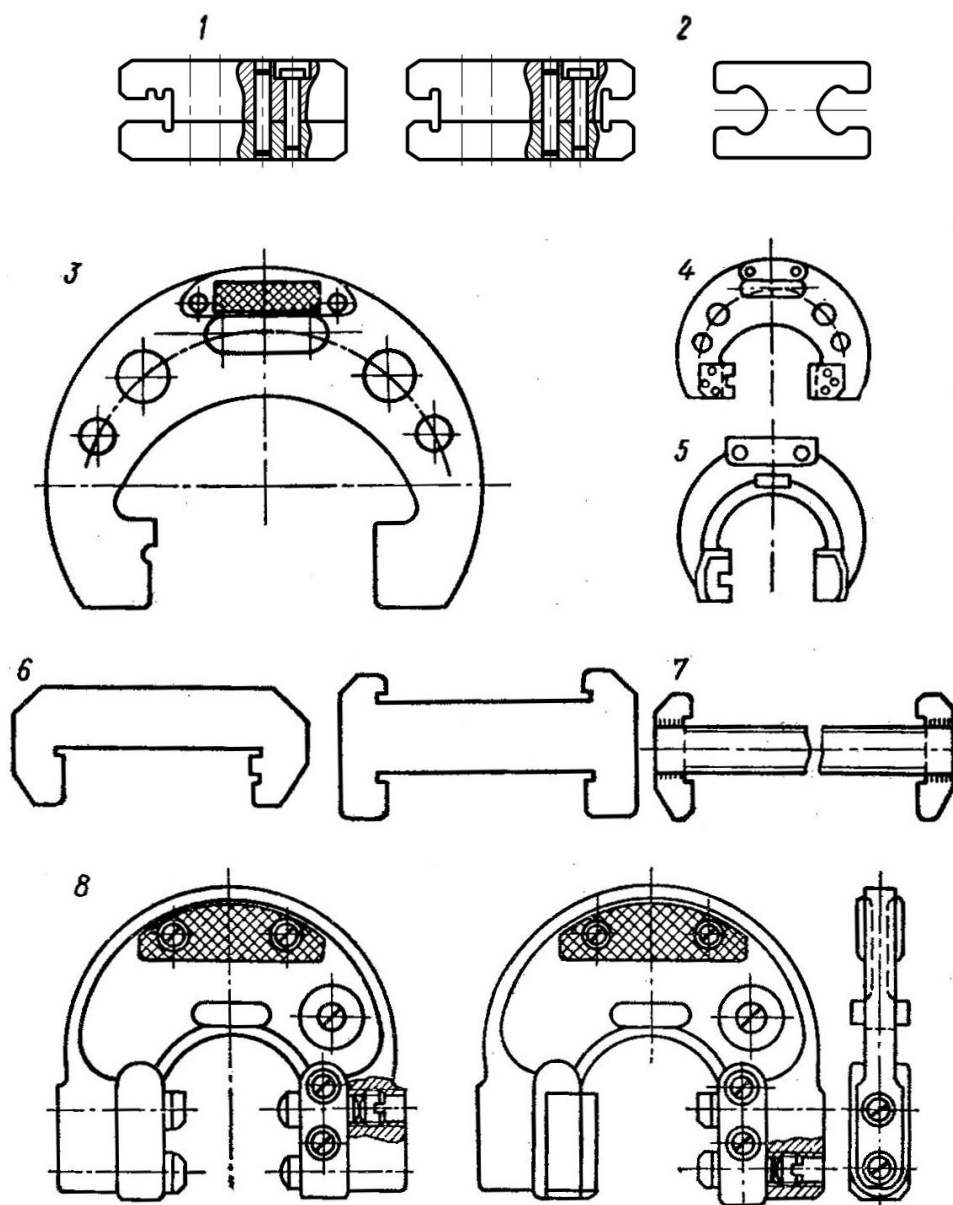


Рисунок 8.6 – Конструкция и типы калибров для контроля размеров наружных цилиндрических поверхностей

От выбранного метода зависят и средства контроля, основные разновидности которых приведены на рисунке 8.7.

Предельные стороны калибров по рисункам 8.7 а–е обозначаются буквами Б (большая) и М (меньшая) в отличие от обозначений ПР и НЕ, принятых для калибров пробок и скоб.

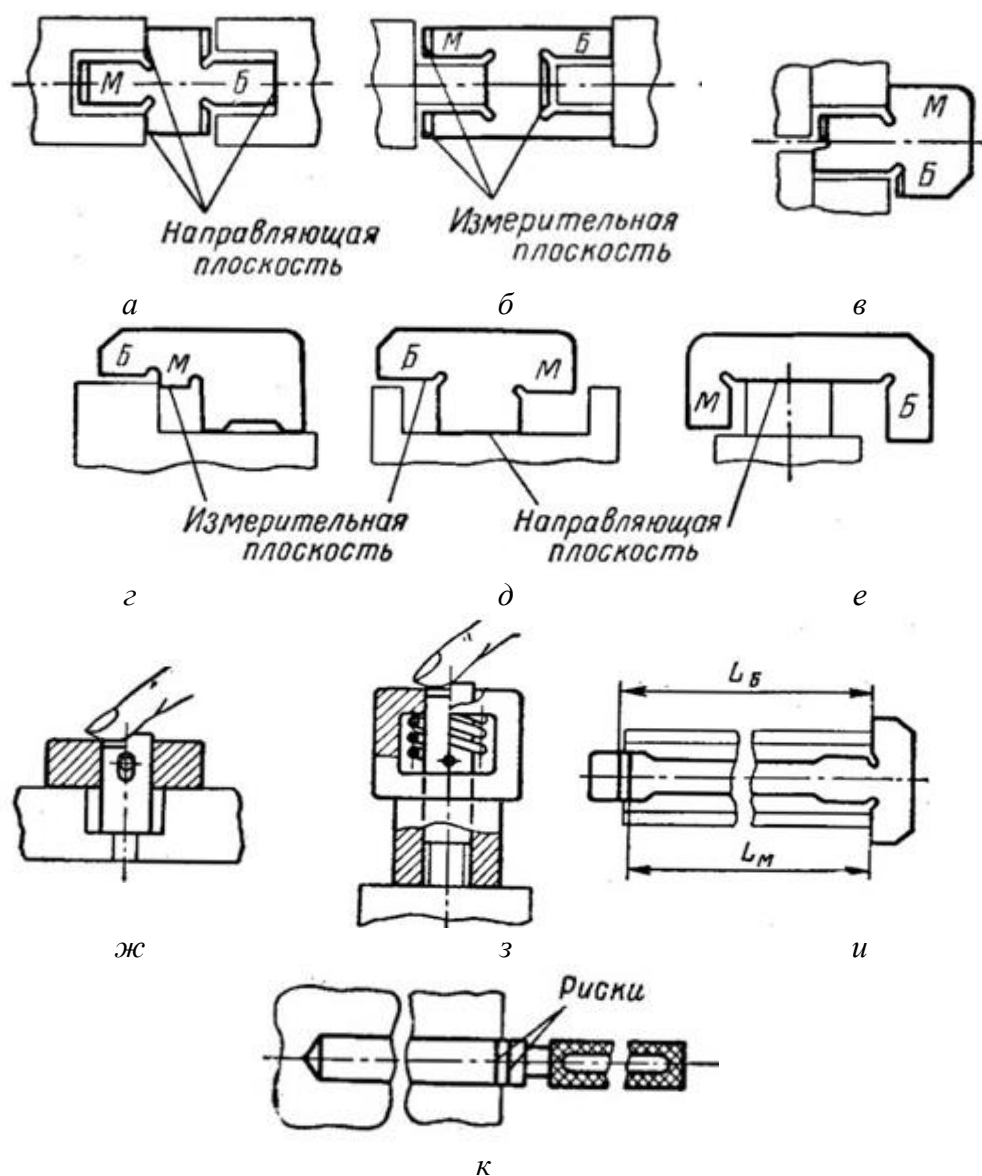


Рисунок 8.7 – Конструкция и типы калибров для контроля размеров глубин и высот уступов:

а, б, в – предельные калибры, применяемые при контроле методом «световой щели», или «на просвет»; г, д, е – калибры для контроля методом «надвижения»; ж, з – калибры для контроля методом «осязания»; и, к – для контроля «по рискам»

Каждая из сторон калибра (Б и М) должна иметь одну лезвиеподобную грань для уменьшения погрешностей контроля вследствие неровностей на обработанных поверхностях и плоскую грань, которая улучшает условия оценки величины просвета (рис. 8.7 а–в).

Кроме предельных рабочих калибров Б и М предусматриваются приемные калибры П-Б и П-М, предназначенные для проверки правильности размеров изделий представителями заказчика. При этом раз-

меры калибров П-Б и П-М близки соответственно наибольшему и наименьшему предельным размерам изделия.

В тех случаях, когда контроль «на просвет» неприемлем, рекомендуется контроль методом «надвигания» с применением калибров (рис. 8.7 г, д, е) или ступенчато-стержневых (рис. 8.7 ж, в). При контроле размеров уступов плоских деталей, обработанных на соответствующих станках или слесарной обработкой, удобны калибры, изображенные на рисунке 8.7 г, д, а при контроле уступов на точеных деталях – калибры, показанные на рисунке 8.7 ж, з. Калибры, изображенные на рисунке 8.7 ж, к, удобны при контроле размеров глубин соответствующих деталей.

Калибрами по методу «световой щели» контролируются допуски не менее 0,04 мм у тонкошлифованных деталей и не менее 0,06 мм при более грубой обработке. Минимальные допуски изделий, контролируемых ступенчато-стержневыми калибрами, составляют 0,03 мм, контролируемых по «ощущению» – 0,01 мм и рисочными калибрами – порядка нескольких десятых миллиметра.

Расчет калибров приводится в специальной литературе [78].

Для контроля резьб используются резьбовые калибры.

8.2.4 Штангенинструмент и микрометрические инструменты

Штангенинструмент предназначен для абсолютных измерений линейных размеров наружных и внутренних поверхностей, а также для воспроизведения размеров при разметке деталей [52–53].

К нему относятся штангенциркули (рис. 8.8), штангенглубиномеры и штангенрейсмасы. Основными частями штангенинструментов являются штанга-линейка с делениями шкалы 1 мм и перемещающаяся по линейке шкала-нониус. По шкале-линейке отсчитывают целое число миллиметров, а по нониусу – десятые и сотые доли миллиметра.

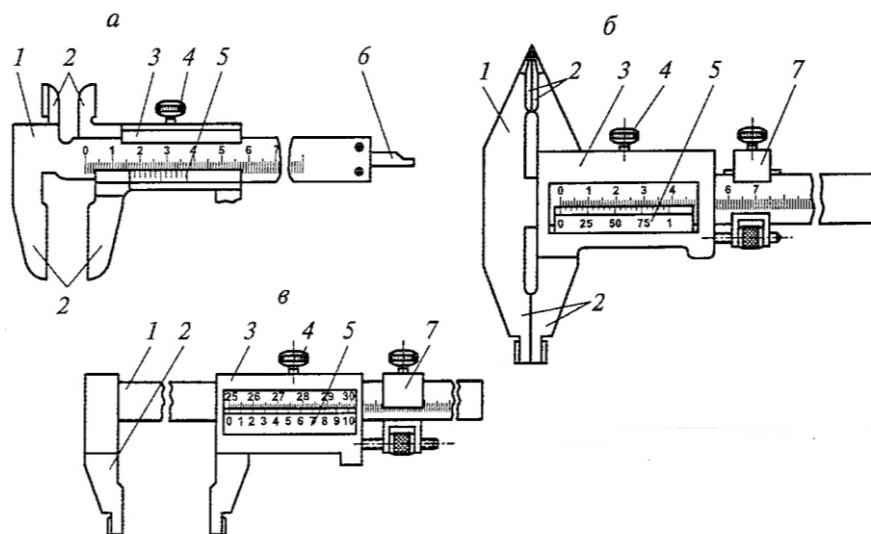
Для отсчета с помощью нониуса сначала определяют по основной шкале целое число миллиметров перед нулевым делением нониуса. Затем добавляют к нему число долей по нониусу в соответствии с тем, какой штрих шкалы нониуса ближе к штриху основной шкалы.

Основные типы нониусов (I–IV) представлены на рисунке 8.9.

Основными характеристиками нониуса являются величина отсчета по нониусу (цена деления нониуса) a и модуль нониуса y , которые определяются по следующим формулам:

$$a = i/n, y = (1 + i)/(ni),$$

где i – цена деления основной шкалы, мм; n – число делений нониуса; l – длина шкалы нониуса мм.



1 – штанга-линейка; 2 – измерительные губки; 3 – рамка; 4 – винт зажима рамки;
5 – нониус; 6 – линейка глубиномера; 7 – рамка микрометрической подачи

Рисунок 8.8 – Конструкция штангенциркулей:
а – типа ШЦ-I; б – типа ШЦ-II; в – типа ШЦ-III

Наибольшее распространение получили нониусы с точностью отсчета 0,1; 0,05; 0,02 мм. ГОСТ 166 предусматривает изготовление и использование трех типов штангенциркулей: ШЦ-I с ценой деления 0,1 мм, ШЦ-II с ценой деления 0,05 мм и ШЦ-III с ценой деления 0,05 и 0,1 мм. Кроме того, на заводах применяют ранее изготовленные штангенциркули с ценой деления нониуса 0,02 мм, а также индикаторные штангенциркули с ценой деления индикатора 0,1; 0,05; 0,02 мм. По основной линейке с неподвижными губками перемещается рамка с подвижными измерительными губками. Для плавного перемещения рамки по штанге-линейке предусмотрено микрометрическое устройство, состоящее из хомутика, зажима и гайки микрометрической подачи. На подвижной рамке установлен стопорный винт.

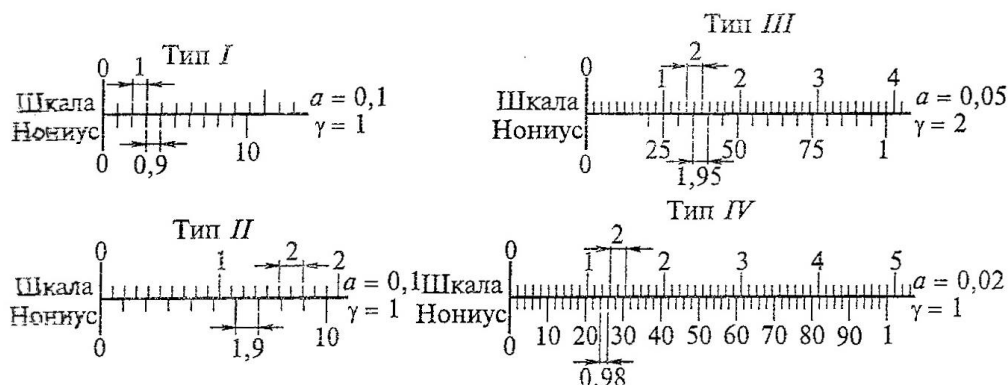


Рисунок 8.9 – Типы нониусов

В штангу индикаторного штангенциркуля (рис. 8.10) вмонтирована зубчатая рейка 2, по которой перемещается зубчатое колесо 3 индикатора, закрепленного на рамке 1. Перемещение зубчатого колеса передается на стрелку индикатора, показывающую единицы, десятые и сотые доли миллиметра. В настоящее время самыми «передовыми» являются штангенциркули с цифровой индикацией.

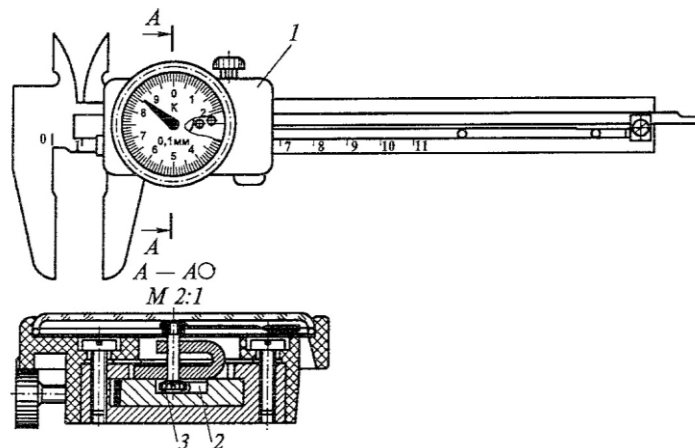


Рисунок 8.10 – Конструкция индикаторного штангенциркуля:

1 – рамка; 2 – зубчатая рейка; 3 – зубчатое колесо

Штангенглубиномеры (ГОСТ 162) (рис. 8.11) принципиально не отличаются от штангенциркулей и применяются для измерения глубины отверстий и пазов. Рабочими поверхностями штангенглубиномеров являются торцовая поверхность штанги-линейки и база для измерений – нижняя поверхность основания. Для удобства отсчета результатов измерений, повышения точности и производительности контрольных операций в некоторых типах штангенглубиномеров вместо нониусной шкалы предусматривается установка индикатора часового типа с ценой деления 0,05 и 0,01 мм.

Штангенрейсмасы (ГОСТ 164) (рис. 8.12) являются основными измерительными инструментами для разметки деталей и определения их высоты. Они могут иметь дополнительный соединительный узел для установки измерительных головок параллельно или перпендикулярно плоскости основания. Конструкция и принцип действия штангенрейсмаса принципиально не отличаются от конструкции и принципа действия штангенциркуля. На заводах применяются штангенрейсмасы с индикаторным и цифровым отсчетом показаний. В первом случае вместо нониусной шкалы на подвижной рамке устанавливается индикатор часового типа с ценой деления 0,05 или 0,01 мм, а во втором – зубчатое колесо ротационного фотоэлектрического счетчика импульсов, которое находится в зацеплении с зубчатой рейкой, нарезанной на штанге при-

бора. За один оборот зубчатого колеса счетчик дает 1000 импульсов, которые передаются цифровому показывающему или записывающему устройству. Погрешность измерения в этом случае может не превышать 10 ... 15 мкм [42–81].

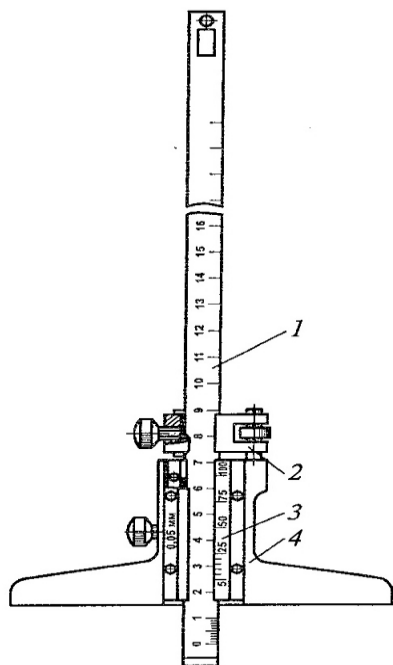


Рисунок 8.11 –
Штангенглубиномер:
1 – штанга-линейка;
2 – рамка
микрометрической
поддачи; 3 – нониус;
4 – основание

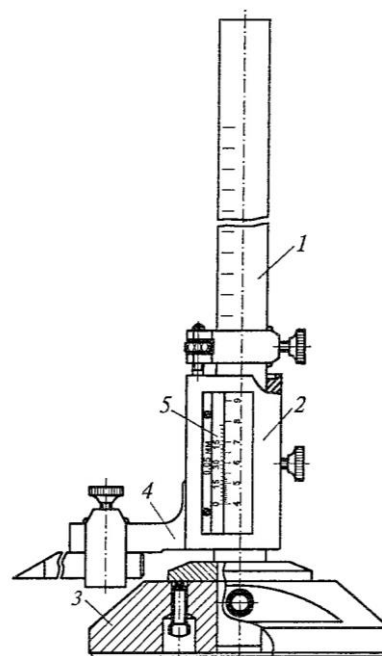


Рисунок 8.12 –
Штангенрейсмас:
1 – штанга-линейка;
2 – рамка; 3 – основание;
4 – державка; 5 – нониус

Угломеры с нониусом (ГОСТ 5378) предназначены для измерения угловых размеров и разметки деталей с точностью до 2'. Для измерения углов от 0 до 90° (рис. 8.13 а) на подвижную линейку 5 устанавливается добавочный угольник 4. Измерение углов от 90 до 180° производится без добавочного угольника 4 (рис. 8.13 б). Порядок отсчета на угловом нониусе угломера аналогичен отсчету на линейном нониусе штангенциркуля.

Микрометрические инструменты предназначены для абсолютных измерений наружных и внутренних размеров, высот уступов, глубин отверстий и пазов и т. д. К ним относятся гладкие микрометры (рис. 8.14); микрометры со вставками, микрометрические глубиномеры; микрометрические нутромеры.

Принцип действия этих инструментов основан на использовании винтовой пары (винт-гайка) для преобразования вращательного движе-

ния микрометрического винта в поступательное. Основными частями микрометрических инструментов являются: корпус, стержень, внутри которого с одной стороны имеется микрометрическая резьба с шагом 0,5 мм, а с другой – гладкое цилиндрическое отверстие, обеспечивающее точное направление перемещения винта. На винт установлен барабан, соединенный с трещоткой, обеспечивающей постоянное усилие измерения (для микрометрических нутромеров трещотка не устанавливается). Стопор служит для закрепления винта в нужном положении.

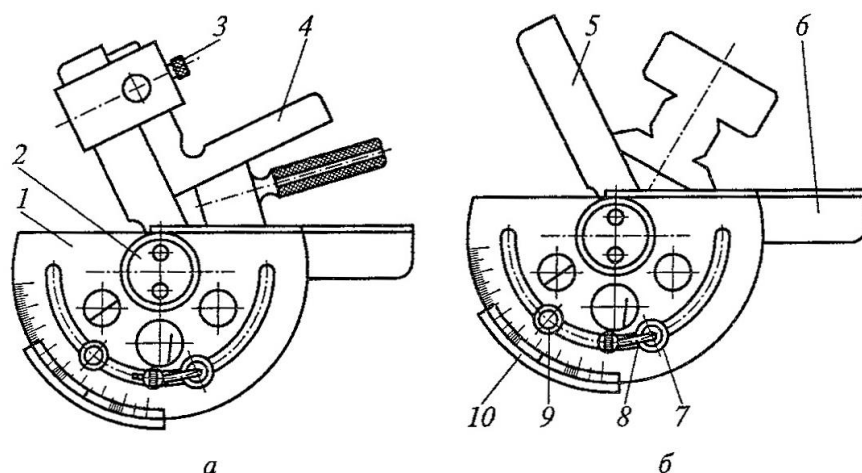
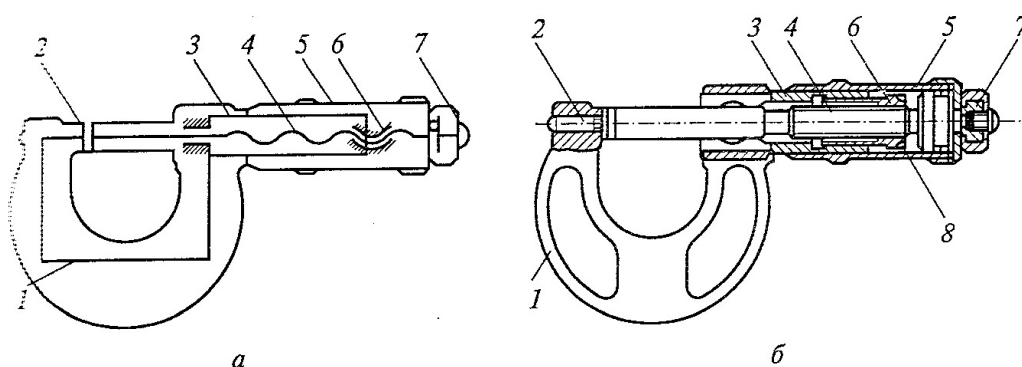


Рисунок 8.13 – Конструкция угломера с нониусом:

- 1 – полудиск; 2 – зажимной винт; 3 – винт зажима угольника;
4 – добавочный угольник; 5 – подвижная линейка; 6 – неподвижная линейка; 7 и 8 – устройство для микрометрической подачи;
9 – стопорный винт; 10 – нониус



- 1 – корпус; 2 – неподвижная пятка; 3 – стержень; 4 – микрометрический винт;
5 – барабан; 6 – гайка микрометрической пары; 7 – устройство стабилизации усилия измерений (трещотка); 8 – контргайка

Рисунок 8.14 – Гладкий микрометр:

- а – кинематическая схема; б – принципиальная схема;

Отсчетное устройство микрометрических инструментов состоит из двух шкал: продольной и круговой. По продольной шкале отсчитывают целые миллиметры и 0,5 мм, по круговой шкале – десятые и сотые миллиметра.

Гладкие микрометры типа МК (ГОСТ 6507) (см. рис. 8.14) выпускаются с различными пределами измерения: от 0 до 300 мм с диапазоном показаний шкалы 25 мм, а также 300...400, 400...500 и 500...600 мм.

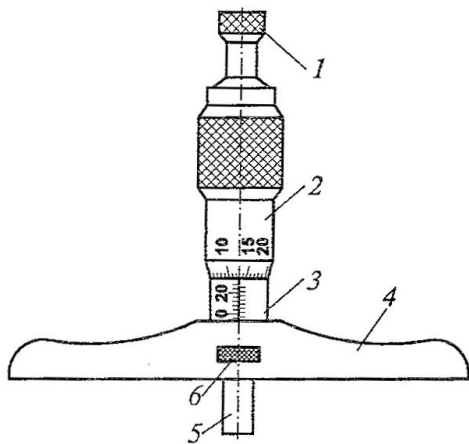


Рисунок 8.15 –
Микрометрический глубиномер:

- 1 – трещотка; 2 – барабан;
- 3 – стембель; 4 – траверса;
- 5 – подвижная пятка;
- 6 – гайка фиксации

Предельная погрешность микрометров зависит от верхних пределов измерения и может составлять от ± 3 мкм для микрометров МК-25 до ± 50 мкм – для микрометров МК-500. Выпускаются микрометры с цифровым отсчетом всего результата измерения. Отсчетное устройство в таких микрометрах действует по механическому принципу.

Микрометрический глубиномер (ГОСТ 7470) (рис. 8.15) предназначен для абсолютных измерений глубин отверстий, высот выступов и т. д. Он имеет стембель 3, закрепленный на траверсе 4, с помощью гайки фиксации 6. Одной измерительной поверхностью является нижняя плоскость траверсы 4, другой – плоскость микрометрического винта, соединенного с подвижной пяткой 5. Микровинт вращается трещоткой 1, соединенной с барабаном 2. В комплект микрометрического глубиномера входят установочные меры с плоскими измерительными торцами.

Микрометрический нутромер (ГОСТ 10) (рис. 8.16) предназначен для абсолютных измерений внутренних размеров. При измерении измерительные наконечники приводят в соприкосновение со стенками проверяемого отверстия. Микрометрические нутромеры не имеют трещоток, поэтому плотность соприкосновения определяется на ощупь. Установка нутромера на нуль выполняется либо по установочному кольцу, либо по блоку концевых мер с боковиками, устанавливаемых в струбцину.

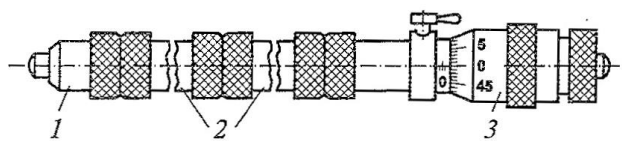


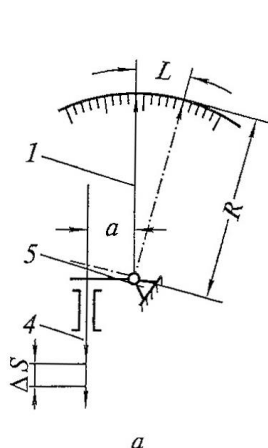
Рисунок 8.16 – Микрометрический нутромер:
1 – неподвижный наконечник; 2 – удлинитель;
3 – микрометрическая головка

Микрометрические нутромеры типа НМ выпускают с пределами измерений 50...75, 75...175, 75...600, 150...1250, 800...2500, 1250...4000, 2500...6000 и 4000...10000 мм. При необходимости увеличения пределов измерений используются удлинители [42–81].

8.2.5 Средства измерения и контроля с механическим преобразованием

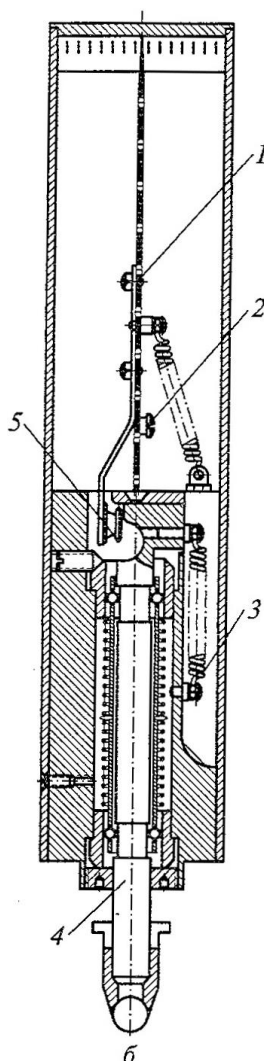
Средства измерения и контроля с механическим преобразованием основаны на преобразовании малых перемещений измерительного стержня в большие перемещения указателя (стрелки, шкалы, световые лучи и т. д.). В зависимости от типа механизма они делятся на рычажно-механические (рычажные), зубчатые, рычажно-зубчатые, пружинные и пружинно-оптические [42–81].

Рычажно-механические приборы применяют главным образом для относительных измерений, проверки радиального и торцового биения, а также для контроля отклонений формы деталей (отклонение от круглости – овальность, огранка; отклонение от цилиндричности – конусность, бочкообразность, седлообразность; отклонение от плоскостности – вогнутость, выпуклость и др.). К приборам с рычажной передачей относятся миниметры, конструкция которых основана на применении неравноплечего рычага (рис. 8.17 а). Конструктивное оформление миниметров весьма разнообразно. Наиболее широко применяются миниметры с ножевыми опорами, одна из конструкций которого показана на рисунке 8.17 б [52–53].



- 1 – указательная стрелка; 2 – регулировочный винт; 3 – пружина; 4 – измерительный стержень; 5 – опорный нож

Рисунок 8.17 – Миниметр: а – схема рычага, б – конструкция миниметра



Измерительный стержень 4 перемещается по шариковым направляющим. Опорный конец указа-

тельной стрелки 1 имеет вид вилки, опирающейся своими концами-ножами на призматические подушки, закрепленные на корпусе миниметра. Опорный нож 5 контактирует с плоской подушкой, закрепленной на торце стержня.

Регулировочный винт 2 служит для регулировки передаточного отношения, т. е. установки малого плеча a (см. рис. 8.17 а) – расстояния между опорными ножами. Измерительное усилие в миниметре создается пружиной 3.

Недостатки конструкции миниметров (быстрый износ ножей и призм, малые пределы измерения по шкале, значительная измерительная сила, инерционность) ограничивают их применение в машиностроении.

К рычажно-механическим приборам относятся индикаторные нутромеры (рис. 8.18). Они предназначены для относительных измерений отверстий от 3 до 1000 мм. Они состоят из корпуса 11, отсчетного устройства 5 (индикатор), подвижного (измерительного) стержня 13 и неподвижного (регулируемого) стержня 9, равноплечего (Г-образного) рычага 8, центрирующего мостика 15 и подвижного штока 2. При измерении отверстия стержень 13, перемещаясь в направлении, перпендикулярном оси отверстия, поворачивает Г-образный рычаг 8 вокруг оси и перемещает на ту же величину шток 2 и измерительный наконечник индикатора 5. Перемещение стрелки индикатора указывает на отклонение действительного размера проверяемого отверстия от размера настройки нутромера. Установка индикатора на нуль осуществляется либо по установочному кольцу, либо по блоку концевых мер с боковиками, которые зажимаются в державке.

Промышленность выпускает индикаторные нутромеры с ценой деления 0,01 (ГОСТ 868) и нутромеры с ценой деления 0,001 и 0,002 мм.

В производственных условиях и измерительных лабораториях для абсолютных измерений нашли широкое применение индикаторы или индикаторные измерительные головки с зубчатой передачей.

Индикаторы часового типа (ГОСТ 577) (рис. 8.19), являющиеся типовыми представителями приборов с зубчатой передачей, содержат стержень 4 с нарезанной зубчатой рейкой 6, зубчатые колеса 2, 3, 5 и 7, спиральную пружину 1, стрелку 8. Возвратно-поступательное перемещение измерительного стержня 4 преобразуется в круговое движение стрелки 8.

Один оборот стрелки соответствует перемещению измерительного стержня на 1 мм. Целые миллиметры отсчитываются по шкале при помощи стрелки 9. Шкала прибора имеет 100 делений, цена деления индикатора равна 0,01 мм.

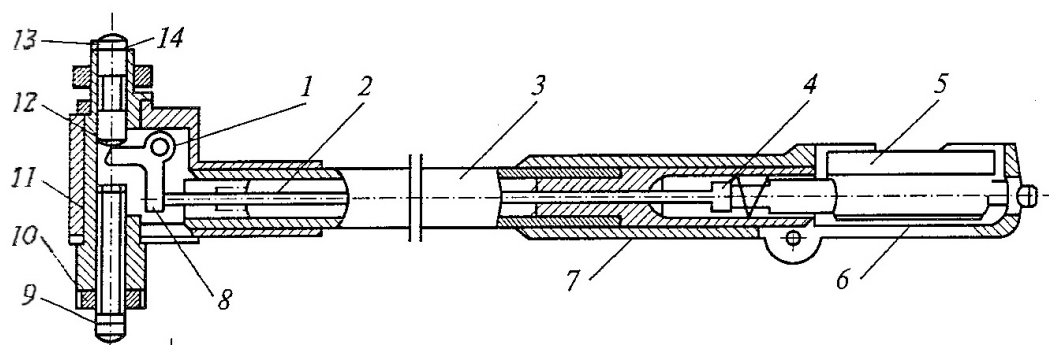
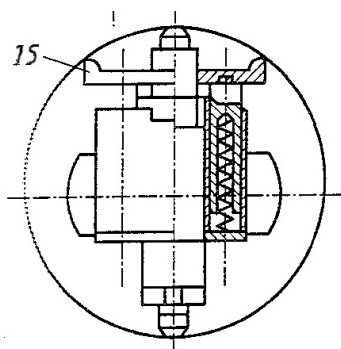


Рисунок 8.18 – Конструкция индикаторного нутромера:

1 – ось вращения рычага;
 2 – шток; 3 – трубка;
 4 – пружина; 5 – отсчетное устройство (индикатор);
 6 – предохранительный кожух;
 7 – теплоизоляционная рукоятка; 8 – Г-образный рычаг; 9 – неподвижный (регулируемый) стержень;
 10 – контргайка; 11 – корпус;
 12 – шарик; 13 – подвижный (измерительный) стержень;
 14 – риска; 15 – центрирующий мостик



Индикаторы часового типа выпускают двух классов точности (0 и 1) в двух модификациях: индикаторы типа ИЧ с перемещением измерительного стержня параллельно шкале и индикаторы типа ИТ с перемещением измерительного стержня перпендикулярно шкале. Выпускаются также индикаторы часового типа с цифровым (электронным) отсчетом.

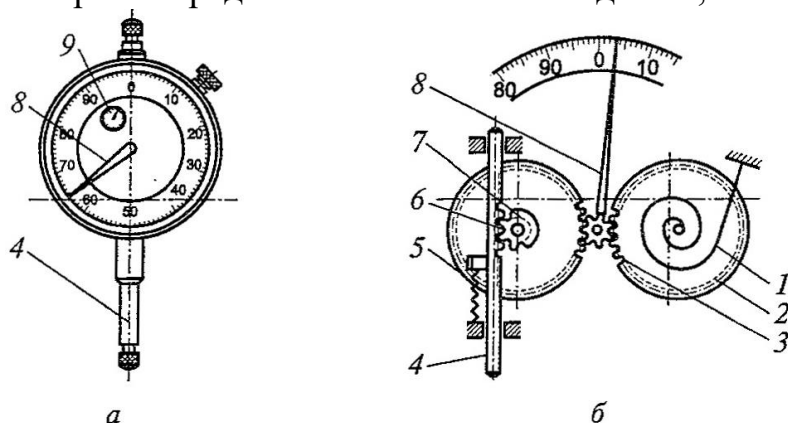
ГОСТ 16497 предусматривает изготовление индикаторов линейных размеров со статистической обработкой результатов измерений, построенных на основе конструкции индикаторов часового типа по ГОСТ 577. Они предназначены для механизации вычислений при измерительных и контрольных операциях.

Типы статистических индикаторов:

– СИС – статистический индикатор средних арифметических, предназначенный для определения среднего арифметического в выборке. Индикатор имеет две стрелки: действительных размеров и средних арифметических;

– СИМ – статистический индикатор медиан, предназначенный для определения положения медианы в выборке. Индикатор имеет три

стрелки: стрелку текущих размеров и две дополнительные стрелки, по которым определяется положение медианы;



1 – спиральная пружина; 2, 3, 5 и 7 – зубчатое колесо;
4 – стержень; 6 – зубчатая рейка; 8 и 9 – стрелка

Рисунок 8.19 – Индикатор часового типа:

а – внешний вид, б – схема

– СИР – статистический индикатор размахов, предназначенный для определения разности между наибольшим и наименьшим значениями. Индикатор имеет три стрелки: стрелку текущих размеров и две дополнительные, каждая из

которых, будучи отклоненной, фиксирует одно из предельных отклонений – наименьшее и наибольшее. Величина размаха определяется по расстоянию между дополнительными стрелками, выраженному в делениях шкалы;

– СИБ – статистический индикатор брака, предназначенный для определения количества деталей вне поля допустимых наибольших и наименьших отклонений. Индикатор имеет три стрелки: две стрелки размера показывают значения положительных и отрицательных отклонений, третья стрелка показывает число размеров (деталей), находящихся вне поля допуска;

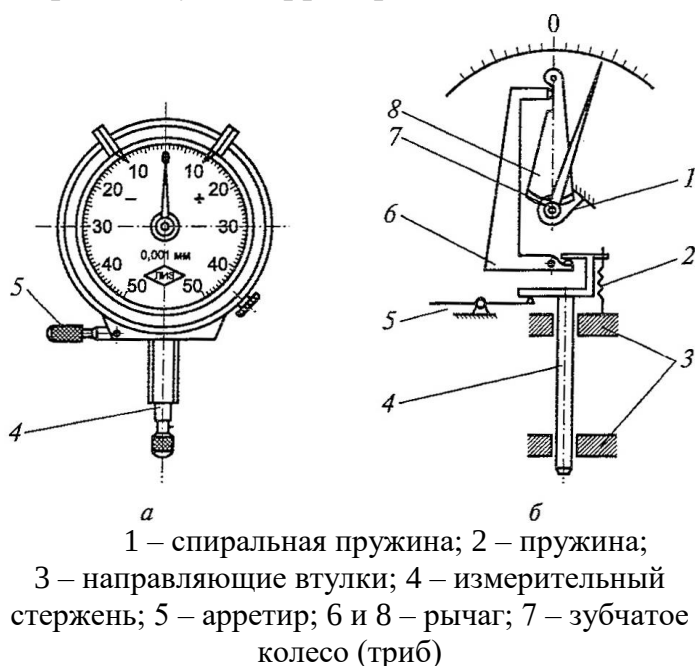
– СИГ – статистический индикатор группировок, предназначенный для определения суженного допуска, а также их суммы и разности. Индикатор имеет три стрелки: текущих размеров и количеств положительных и отрицательных отклонений;

– СИД – статистический индикатор дисперсий, предназначенный для определения значений дисперсий и среднего квадратического отклонения в выборке. Индикатор имеет стрелки средних арифметических, средних квадратических отклонений и дисперсий.

К приборам с рычажно-зубчатой передачей относятся рычажно-зубчатые измерительные головки, рычажные скобы, рычажные микрометры и т. д. Эти приборы предназначены для относительных измерений наружных поверхностей.

Рычажно-зубчатые измерительные головки (рис. 8.20) отличаются от индикаторов часового типа наличием наряду с зубчатой передачей рычажной системы, позволяющей увеличить передаточное число механизма и тем самым повысить точность измерений. При перемещении измерительного стержня 4 в двух точных направляющих втулках 3 поворачивается рычаг 6, который воздействует на рычаг 8, имеющий

на большом плече зубчатый сектор, входящий в зацепление с зубчатым колесом (трибом) 7. На оси триба установлена стрелка с втулкой, связанная со спиральной пружиной 1, выбирающей зазор. Измерительное усилие создается пружиной 2. Для арретирования измерительного стержня служит арретир 5.



1 – спиральная пружина; 2 – пружина;
3 – направляющие втулки; 4 – измерительный
стержень; 5 – арретир; 6 и 8 – рычаг; 7 – зубчатое
колесо (триб)

Рисунок 8.20 – Рычажно-зубчатая
измерительная головка:

а – внешний вид, б – схема

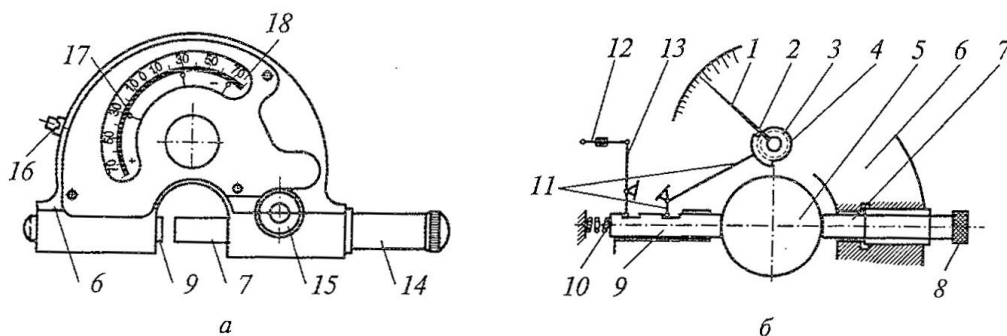
измерения подвижная пятка 9, перемещаясь, воздействует на измерительный рычаг 11, зубчатый сектор которого поворачивает зубчатое колесо 4 и стрелку 1, неподвижно закрепленную на его оси. Спиральная пружина 3 постоянно прижимает зубчатое колесо к зубчатому сектору, устраняя таким образом зазор. Микровинт для настройки 8 служит для установки прибора на нуль по блоку концевых мер. Промышленность выпускает также рычажные скобы с цифровым отсчетом измеряемой величины в миллиметрах, десятых и сотых долях миллиметра.

Рычажные микрометры (ГОСТ 4381) аналогичны рычажным скобам и отличаются от них лишь наличием микрометрической головки для отсчета измеряемой величины в миллиметрах, десятых и сотых долях миллиметра. Для измерения наружных размеров до 100 мм предусмотрены микрометры типа МР с отсчетным устройством, встроенным в корпус. Микрометры типа МРЗ предназначены для измерения длины общей нормали зубчатых колес, а микрометры типа МРИ – для измерения наружных размеров свыше 100 и до 2000 мм.

Многооборотные головки с ценой деления 0,001 и 0,002 мм (ГОСТ 9696) применяются в тех случаях, когда требуется высокая точность и большой диапазон измерения.

ГОСТ 5584 предусматривает выпуск рычажно-зубчатых индикаторов с ценой деления 0,01 мм с изменяемым положением измерительного рычага относительно корпуса.

В рычажных скобах (ГОСТ 11098) (рис. 8.21) в процессе



- 1 – стрелка; 2 – зубчатый сектор; 3 – спиральная пружина; 4 – зубчатое колесо;
 5 – объект измерения; 6 – корпус; 7 – неподвижная (регулируемая) пятка;
 8 – микровинт для настройки; 9 – подвижная пятка; 10 – пружина;
 11 – измерительный рычаг; 12 – стержень арретира; 13 – рычаг арретира;
 14 – предохранительный чехол; 15 – гайка фиксатора; 16 – кнопка арретира;
 17 – шкала; 18 – указатель предела действительных отклонений

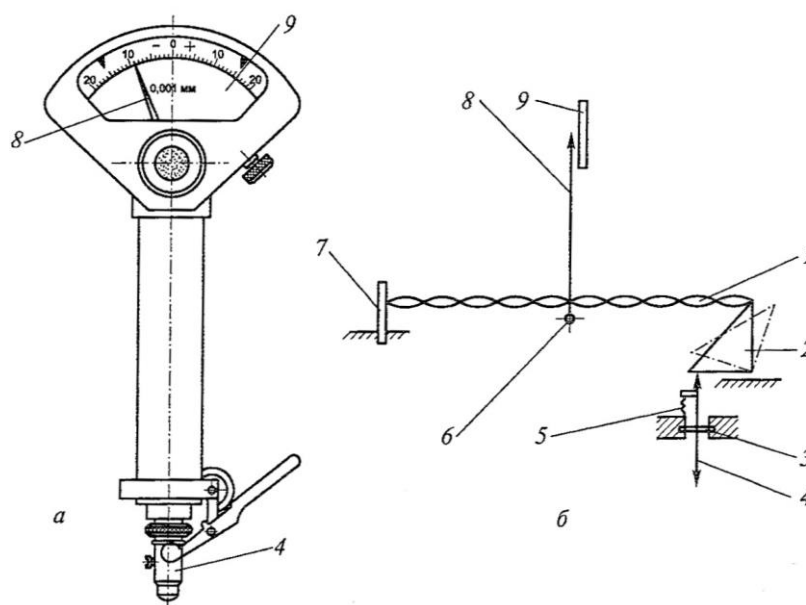
Рисунок 8.21 – Рычажная скоба (пассаметр):

а – внешний вид, б – схема

К приборам с пружинной передачей относятся измерительные пружинные головки (ГОСТ 6933), малогабаритные измерительные головки (микаторы ГОСТ 14712) и рычажно-пружинные измерительные головки бокового действия (миникаторы ГОСТ 14711). Эти приборы предназначены для относительных измерений размеров, проверки отклонений деталей от правильной геометрической формы с высокой точностью, а также для проверки и наладки средств активного контроля.

Приборы этого типа построены по принципу использования в передаточных механизмах упругих свойств скрученной фосфористой бронзовой ленты шириной $0Д...0,2$ и толщиной $0,008...0,015$ мм.

Измерительные пружинные головки (рис. 8.22) обладают значительными преимуществами перед другими типами подобных приборов: высокой чувствительностью, малой силой измерения, незначительной погрешностью обратного хода, высокой надежностью механизма. Основные недостатки этих головок: неудобство отсчета показаний по слишком тонкой стрелке и наличие вибраций стрелки, что увеличивает ошибки измерений. В измерительной пружинной головке пружинная бронзовая лента 1 относительно стрелки 8 закручена в разные стороны и правым концом прикреплена к пружинному угольнику 2, а левым концом – к плоской пружине 7.



1 – пружинная бронзовая лента; 2 – пружинный угольник; 3 – мембрана;
4 – измерительный стержень; 5 – пружина; 6 – противовес; 7 – плоская пружина;
8 – стрелка; 9 – шкала

Рисунок 8.22 – Измерительная пружинная головка:
а – внешний вид, б – схема

При перемещении измерительного стержня 4 поворачивается угольник 2, что приводит к растяжению пружинной бронзовой ленты 1 и повороту прикрепленной к ней в середине стрелки относительно шкалы 9. Стрелка сбалансирована с помощью противовеса 6. Сила измерения создается пружиной 5. Измерительный стержень 4 подвешен к корпусу головки на мембране 3 и пружинном угольнике 2.

Измерительные пружинные головки изготавливают в следующих исполнениях: ИГП – с нормальным измерительным усилием, ИГПУ – с уменьшенным измерительным усилием, ИГПР – с регулируемым измерительным усилием, ИГПГ – герметизированные, ИГПВ – виброустойчивые.

Микаторы и миникаторы имеют аналогичный пружинный механизм и принцип действия их не отличается от принципа действия микророкатора [52–53].

8.2.6 Средства измерения и контроля с оптическим и оптико-механическим преобразованием

Оптико-механические измерительные приборы находят широкое применение в измерительных лабораториях и в цехах для измерения

размеров калибров, плоскопараллельных концевых мер длины, точных изделий, а также для настройки и проверки средств активного и пассивного контроля. Эти приборы основаны на сочетании оптических схем и механических передач. К оптико-механическим измерительным приборам относятся: пружинно-оптические измерительные головки (оптикаторы), оптиметры, ультраоптиметры, длиномеры, измерительные машины, интерферометры и ряд других приборов [42–81].

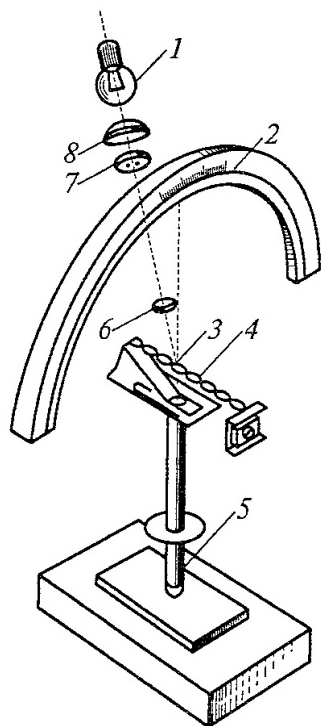


Рисунок 8.23 – Оптикатор:
1 – лампочка; 2 – шкала;
3 – зеркальце; 4 – скручен-
ная бронзовая лента; 5 –
измерительный стержень;
6 – объектив; 7 – метка; 8 –
конденсатор

кой оптиметра, и вертикальной или горизонтальной стойки. В зависимости от вида стойки оптиметры подразделяют на вертикальные (например, ОВО-1, или ИКВ) (рис. 8.24 а) и горизонтальные (например, ОГО-1, или ИКГ) (рис. 8.24 б). Суще-

Оптикатор (ГОСТ 10593) (рис. 8.23) построен на том же принципе, что и микрокатор, но лишен основных его недостатков. На скрученной бронзовой ленте 4 закреплено зеркальце 3, которое отражает на шкалу 2 изображение штриха метки 7. Штриховая метка, освещаемая через конденсор 8 лампочкой 1, проектируется объективом 6 на зеркальце, находящееся в его фокусе. При перемещении измерительного стержня 5 и раскручивании ленты по шкале перемещается изображение штрихового указателя. Отражаемый от зеркальца луч света отклоняется на угол, вдвое больший при одинаковом угле раскручивания среднего сечения ленты. Чувствительность оптикатора в два раза больше, чем чувствительность микрокатора, а погрешность в пределах всей шкалы не превышает 0,4 мкм [52–53].

Оптиметр (ГОСТ 5405) состоит из измерительной головки, называемой труб-

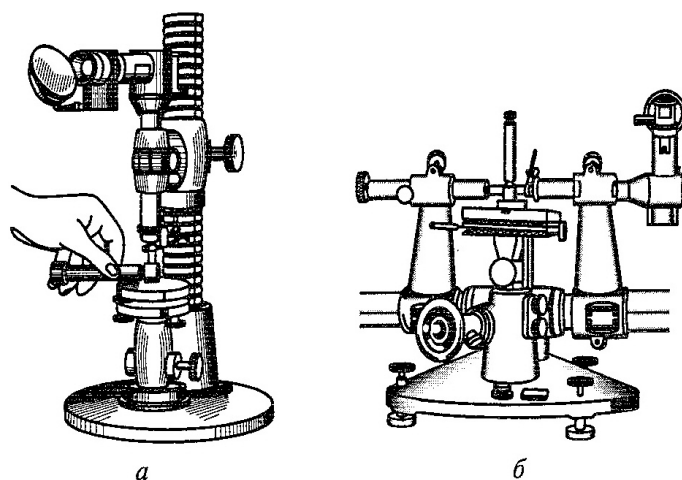
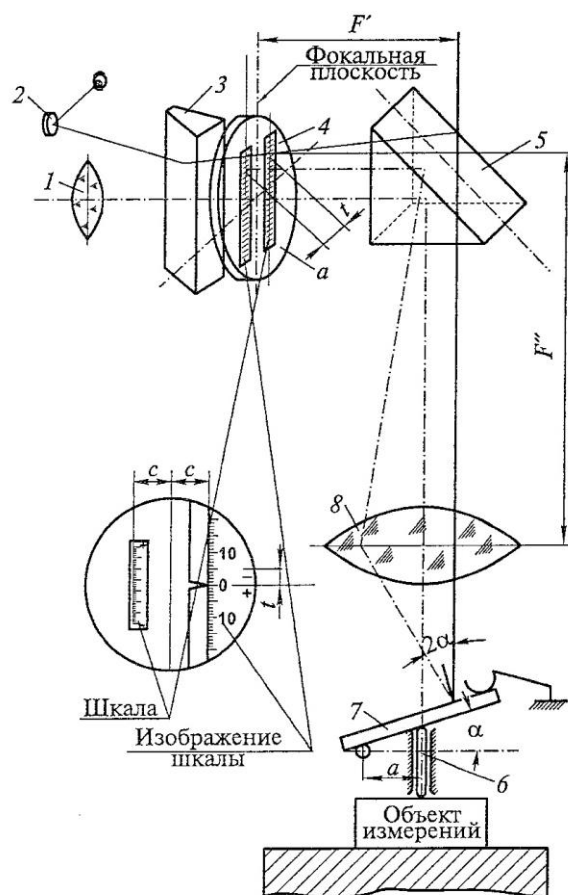


Рисунок 8.24 – Оптиметр:
а – вертикальный; б – горизонтальный

ствуют горизонтальные и вертикальные проекционные оптиметры (ОГЭ-1 или ОВЭ-02). У последних отсчет результата измерения производится по шкале, проецируемой на экран. Вертикальные оптиметры предназначены для измерений наружных размеров деталей, а горизонтальные – для измерения как наружных, так и внутренних размеров.

В оптической схеме оптиметров использованы принципы автоколлимации и оптического рычага.

Принцип действия трубки оптиметра показан на рисунке 8.25. Лучи от источника света направляются зеркалом 2 в щель трубки и, преломляясь трехгранной призмой 3, проходят через шкалу, имеющую



200 делений, нанесенных на плоскость стеклянной пластинки 4. Пройдя шкалу, луч попадает на призму полного отражения 5 и, отразившись от нее под прямым углом, направляется на объектив 8 и зеркало 7. Качающееся зеркало пружиной прижимается к измерительному стержню 6. При перемещении стержня 6, опирающегося на измеряемую деталь, зеркало 7 поворачивается на угол α вокруг оси, проходящей через центр опорного шарика, что вызывает отклонение отраженных от зеркала 7 лучей на угол 2α . Отраженный пучок лучей объективом превращается в сходящийся пучок, который дает изображение шкалы. При этом шкала смещается в вертикальном направлении относительно неподвижного

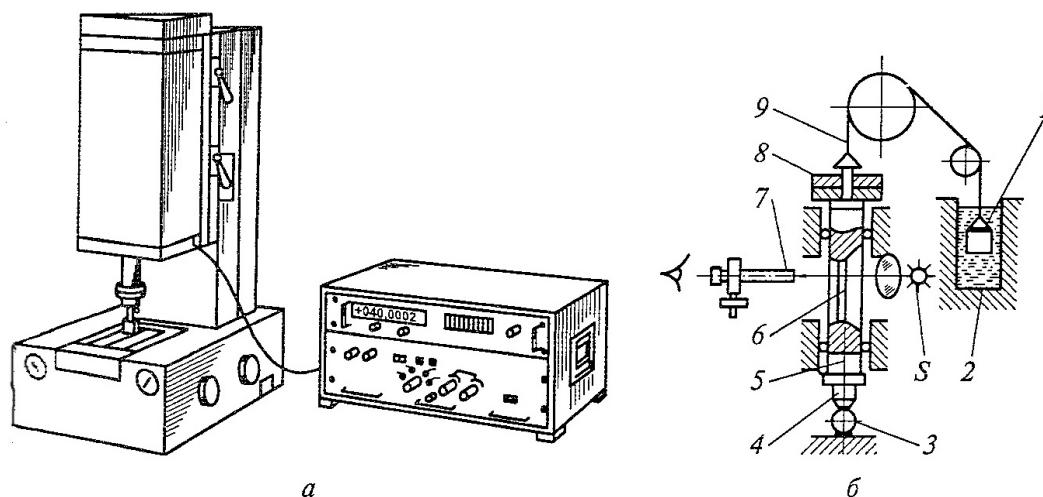
Рисунок 8.25 – Оптическая схема оптиметра:

- 1 – окуляр; 2 – зеркало; 3 – трехгранная призма; 4 – стеклянная пластинка;
- 5 – призма полного отражения;
- 6 – измерительный стержень; 7 – зеркало поворотное; 8 – объектив

ного указателя на некоторую величину, пропорциональную измеряемому размеру. Изображение шкалы наблюдается в окуляр 1, как правило, одним глазом, что утомляет контролера. Для обеспечения отсчета

на окуляр надевают специальную проекционную насадку, на экране которой можно наблюдать изображение шкалы обоими глазами.

Оптический дальномер (ГОСТ 14028) (рис. 8.26 а) состоит из измерительной головки и вертикальной или горизонтальной стойки. Схема работы дальномера показана на рисунке 8.26 б. Конструкция дальномера соответствует принципу Аббе, т. е. основная шкала является продолжением измеряемой детали 3. В пинולי 5 закреплен измерительный наконечник 4, входящий в соприкосновение с измеряемой деталью 3. Сила тяжести пинולי 5 уравновешена противовесом 1, который перемещается внутри масляного демпфера 2. Пиноль 5 соединена с противовесом стальной лентой, перекинутой через блоки, причем измерительная сила дальномера определяется разностью масс пинולי 5 и противовеса 1. Эта сила регулируется с помощью грузовых шайб 8. Отсчеты по стеклянной шкале 6, освещаемой источником света S, производят с помощью отсчетного микроскопа 7 со спиральным нониусом.



- 1 – противовес; 2 – масляный демпфер; 3 – измеряемая деталь; 4 – измерительный наконечник; 5 – пиноль; 6 – стеклянная шкала; 7 – отсчетный микроскоп; 8 – грузовые шайбы; 9 – стальная лента; 10 – источник света

Рисунок 8.26 – Оптический вертикальный дальномер:
а – общий вид; б – схема работы

В настоящее время все большее распространение получают дальномеры с цифровым отсчетом, на табло которых высвечивается непосредственно измеряемый размер.

Интерферометры относятся к весьма точным оптико-механическим приборам. Они применяются в основном для проверки концевых мер длины, размеров и формы особо точных изделий и основаны на использовании явления интерференции световых волн. Интерферометры для линейных измерений делятся на контактные (ИКПВ – вертикальные, ИКПГ – горизонтальные) и бесконтактные. Контактные

интерферометры имеют одинаковые интерференционные трубки с возможностью регулирования цены деления от 0,05 до 0,2 мкм.

В трубке интерферометра (рис. 8.27) свет от лампы 1 направляется конденсором 2 через диафрагму 3 на разделительную полупрозрачную

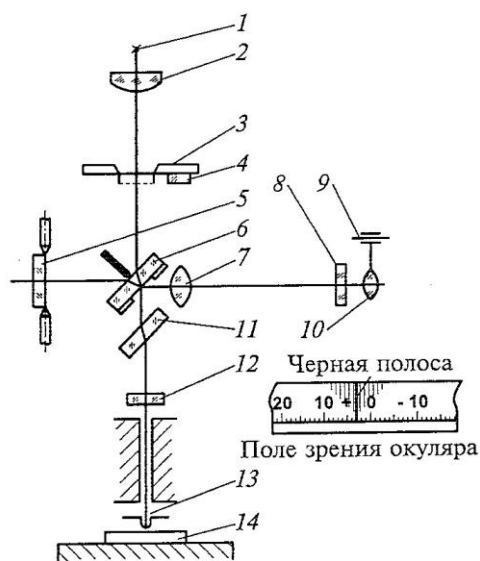


Рисунок 8.27 – Схема трубки интерферометра:

1 – лампа; 2 – конденсатор; 3 – диафрагма; 4 – шторка; 5 – поворотное зеркало; 6 – полупрозрачная пластина; 7 – объектив; 8 – сетка; 9 – механизм перемещения окуляра; 10 – окуляр; 11 – компенсатор; 12 – зеркало; 13 – измерительный

пластину 6. Часть лучей, пройдя через полупрозрачную пластину 6 и компенсатор 11, отразится от зеркала 12, закрепленного на верхнем конце измерительного стержня 13, и через компенсатор 11 вновь вернется к полупрозрачной пластине 6. Другая часть пучка света, отразившись от рабочей поверхности разделительной полупрозрачной пластины 6, попадает на поворотное зеркало 5 и после отражения также возвратится к полупрозрачной пластине 6. Таким образом, на рабочей поверхности полупрозрачной пластины 6 обе части пучка света интерферируют при небольшой разности хода. Объек-

тив 7 проектирует интерференционную картину полос равной толщины в плоскость сетки 8. Интерференционные полосы и нанесенную на сетку шкалу наблюдают через окуляр 10. Интерференционные полосы равной толщины образуются в результате поворота зеркала 5 на небольшой угол относительно поверхности зеркала 12. При освещении белым светом на фоне шкалы видна одна черная (ахроматическая) полоса и по обе стороны от нее несколько окрашенных полос убывающей интенсивности. Черная полоса служит указателем при отсчетах по шкале, имеющей по 50 делений в обе стороны от нуля, который смещается пропорционально перемещению измерительного стержня 13.

Вертикальный контактный интерферометр (рис. 8.28) имеет жесткое литое основание 4 и стойку 3. По направляющей стойки может перемещаться с помощью кремальеры 2 кронштейн 1, несущий трубку интерферометра 10. На хомуте трубки 9 закреплен теплозащитный экран 8. Стол 7 можно перемещать в вертикальном направлении винтом микроподачи 6 и стопорить в установленном положении винтом 5.

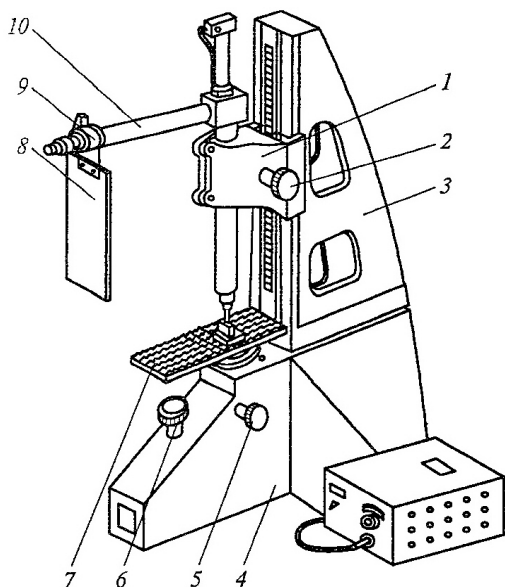


Рисунок 8.28 – Вертикальный контактный интерферометр:

- 1 – кронштейн; 2 – кремальера;
3 – стойка; 4 – основание; 5 – винт;
6 – винт микроподачи; 7 – стол;
8 – теплозащитный экран; 9 – хомут
трубки; 10 – трубка интерферометра

полупрозрачной пластиной 3 делится на два потока. Один направляется на неподвижное зеркало 2 и, отразившись от него, возвращается к пластине 3. Другой, проходящий сквозь пластину 3, попадает на неподвижное зеркало 8. Отразившись от неподвижного зеркала 8 и V-образного рефлектора 4, пучок возвращается к пластине 3, где интерферирует с первым пучком.

При помощи лазерных интерферометров проверяют двух- или трехкоординатные измерительные машины, микроскопы, прецизионные станки и другие точные механизмы.

Современные тенденции в применении классических интерферометрических схем состоят в фиксации интерферограмматричными фотоприёмниками с последующем вводом пространственных

В последнее время начали выпускаться бесконтактные лазерные интерферометры с цифровым отсчетом. Они позволяют измерять абсолютным методом детали больших размеров (до 60 м и более) с высокой производительностью и точностью. Цена деления таких приборов составляет от 0,1 до 0,01 мкм; погрешность измерения составляет 0,5 мкм на 1 м. Схема одной из конструкций бесконтактного лазерного интерферометра представлена на рисунке 8.29.

Поступающий от источника лазерного луча 1 пучок света

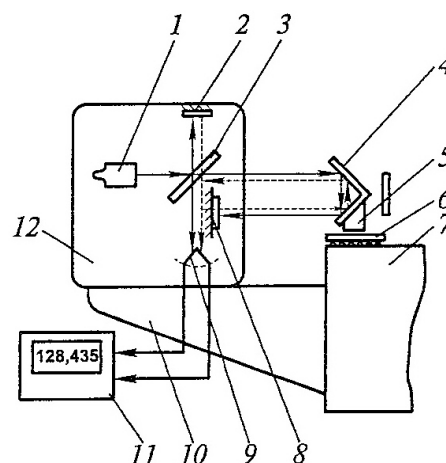


Рисунок 8.29 – Схема бесконтактного лазерного интерферометра:

- 1 – источник лазерного луча;
2 – неподвижное зеркало;
3 – пластина; 4 – V-образный
рефлектометр; 5 – основание
рефлектометра; 6 – измери-
тельный стол; 7 – основание
измерительного стола; 8 –
неподвижное зеркало;
9 – приемник; 10 – основание;
11 – показывающий прибор;
12 – корпус

распределений интенсивности в ЭВМ и автоматизированной обработке зафиксированных цифровых изображений. Среди методов, используемых в лазерных измерительных системах, особого внимания заслуживают методы *голографической интерферометрии*. Эти методы сочетают в себе такие достоинства, как бесконтактное и одновременное получение информации о состоянии всех точек наблюдаемой поверхности, использование в процессе измерения естественной меры длины световой волны, известной с метрологической точностью, высокое пространственное разрешение, определяемое разрешением оптических систем и в пределе соизмеримое с длиной волны, и др. Лазерные измерительные системы, основанные на использовании методов оптической голографии, называются голографическими измерительными системами (ГИС).

При создании ГИС, реализующих методы голографической интерферометрии, возникает ряд проблем как методического, так и аппаратного характера. К первым из них относятся выявление закономерностей, связывающих свойства интерферограмм с исследуемыми физическими явлениями, разработка новых методов определения исследуемых характеристик, создание простых и надежных методов обработки и расшифровки голографических интерферограмм, совершенствование методик их получения и разработка необходимого математического обеспечения. Существенной также является задача исследования метрологических характеристик как отдельных звеньев, так и ГИС в целом. К проблемам аппаратного характера относятся проектирование специальных источников когерентного излучения, голографических установок, обеспечивающих реализацию всех методов регистрации и восстановления голограмм, разработка устройств ввода изображений в ЭВМ, способных передать информацию с требуемой точностью, и т. п.

Оптические измерительные приборы нашли применение в измерительных лабораториях для абсолютных и относительных измерений бесконтактным методом различных изделий сложного профиля (резьб, шаблонов, кулачков, фасонных режущих инструментов) и малых габаритных размеров, для точных измерений длин, углов, радиусов. Эти приборы построены на оптических схемах. К наиболее распространенным оптическим измерительным приборам относятся: микроскопы (инструментальный, универсальный, проекционный), проекторы, оптические длиномеры и угломеры, делительные головки, столы и др.

Инструментальные и универсальные микроскопы предназначены для абсолютных измерений углов и длин различных деталей в прямоугольных и полярных координатах. В соответствии с ГОСТ 8074 выпускают микроскопы с микрометрическими измерителями двух типов: типа А – без наклона головки и типа Б – с наклоном головки. У микроскопов ИМ 100х50, А; ИМ 150х50, Б предусмотрен отсчет по шкалам микрометрических головок 25 мм и применение концевых мер длины, тогда

как микроскопы ИМЦ 100х50, А; ИМЦ 150х50, А; ИМ 150х50, Б; ИМЦЛ 160х80, Б оснащены цифровым отсчетом.

Универсальные измерительные микроскопы (ГОСТ 14968) отличаются от инструментальных большим диапазоном измерений и повышенной точностью. В них вместо микрометрических измерителей применены миллиметровые шкалы с отсчетными спиральными микроскопами.

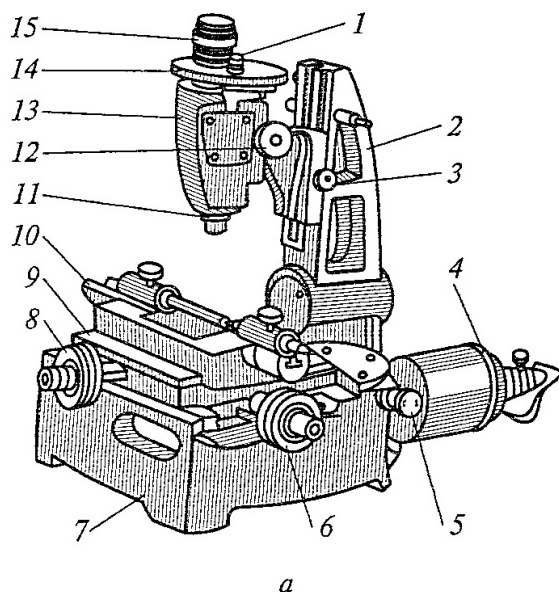
Несмотря на конструктивные различия инструментальных и универсальных микроскопов принципиальная схема измерения во всех микроскопах общая – визирование различных точек контролируемой детали, перемещаемых для этого по взаимно перпендикулярным направлениям, и измерение этих перемещений посредством отсчетных устройств. Для обеспечения лучшего визирования микроскопы снабжают сменными объективами различной степени увеличения.

В качестве примера рассмотрим конструкцию (рис. 8.30 а) и принцип измерения микроскопа инструментального модели ММИ. На массивном чугунном основании 7 в двух взаимно перпендикулярных направлениях на шариковых направляющих 10 перемещается измерительный стол 9 с помощью микрометрических винтов 6 и 8. Для отсчета перемещений на гильзе, скрепленной с метрической гайкой, имеется миллиметровая шкала I (рис. 8.30, б), а на барабане, связанном с микрометрическим винтом, – круговая шкала II с 200 делениями (на рис. 8.30 б показание микрометра равно 29,025). Объектив 11 с тубусом 15 установлен на кронштейне 13, который перемещается в вертикальном направлении по стойке 2. Стойка 2 с помощью маховика 5 может наклоняться у микроскопов типа Б в обе стороны для установки микроскопа под углом подъема измеряемой резьбы. Имеется лампа подсветки 4. Маховик 12, перемещающий кронштейн 13, служит для фокусировки микроскопа, причем установленное положение фиксируется винтом 3. Для точного фокусирования микроскопа вращают рифленое кольцо 14, при этом тубус 15 смещается по цилиндрическим направляющим кронштейна. К верхней части тубуса крепится сменная угломерная окулярная головка с визирным микроскопом 1 и отсчетным устройством.

Оптическая схема микроскопа представлена на рисунке 8.30 в. Измеряемая деталь АБ рассматривается через объектив ОБ микроскопа. Изображение детали АБ получается действительным, обратным и увеличенным.

Глаз наблюдателя через окуляр ОК видит мнимое, обратное и еще раз увеличенное окуляром изображение детали А2Б2.

Оптические линейки (ГОСТ 24703) предназначены для определения отклонений от прямолинейности и плоскостности поверочных линеек, плит, а также направляющих поверхностей станков, образующих валов.



- 1 – визирный микроскоп; 2 – стойка; 3 – винт;
 4 – лампа подсветки; 5 и 12 – маховик;
 6 и 8 – микрометрический винт; 7 – основание;
 9 – измерительный стол; 10 – шариковые направляющие; 11 – объектив; 13 – кронштейн;
 14 – кольцо; 15 – тубус;

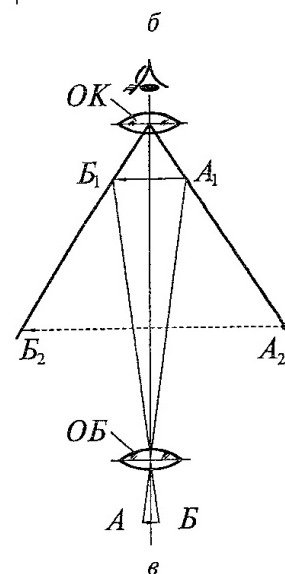
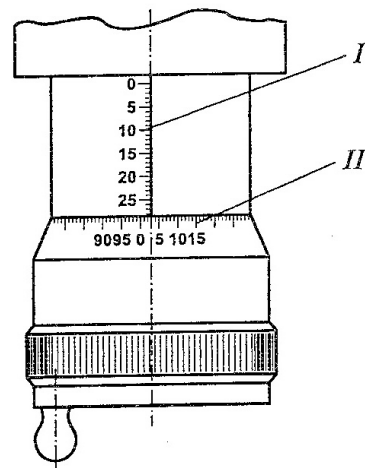


Рисунок 8.30 – Микроскоп инструментальный модели ММИ: а – общий вид; б – отсчетное устройство, в – оптическая схема;
 I – миллиметровая шкала; II – круговая шкала

Существуют следующие типы оптических линеек: ОЛ – контактные с визуальной системой отсчета, ОЛА – контактные с автоматической регистрацией, ОЛБ – бесконтактные, ОЛУ – универсальные с контактным и бесконтактным методами измерений.

Схема оптической линейки представлена на рисунке 8.31. Прибор основан на измерении отклонений точек контролируемой поверхности от воображаемой прямой – оптической оси. Линейка 5 (тонкостенная труба с оптической системой) устанавливается на две опоры 4. Она имеет сквозной шлиц, вдоль которого перемещается измерительная каретка 3 с щупом 2, касающимся контролируемой поверхности. Для определения отклонений точек поверхности необходимо совмещать видимые на экране визирный штрих 7 и бифиляр 6 и снимать отсчеты по барабану микрометра 1.

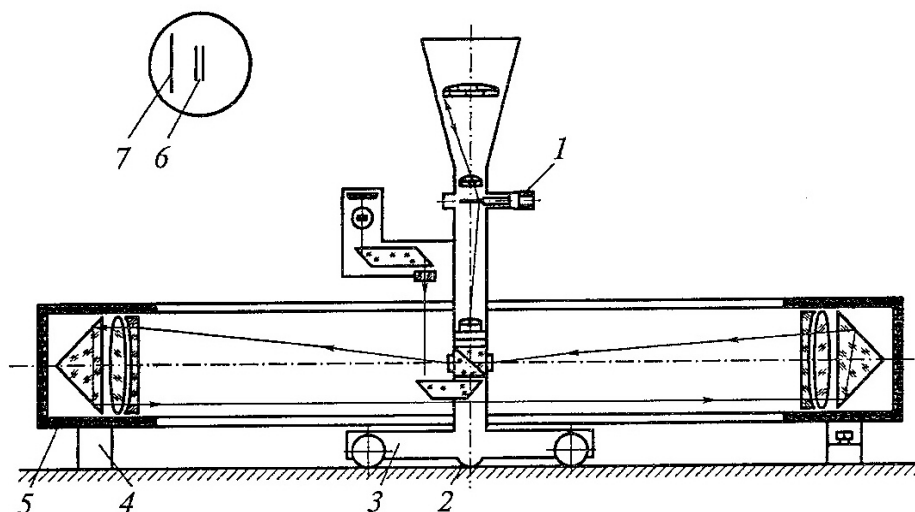


Рисунок 8.31 – Схема оптической линейки:

1 – микрометр; 2 – щуп; 3 – измерительная каретка; 4 – опоры;
5 – линейка; 6 – бифиляр; 7 – визирный штрих

Оптические линейки могут иметь регистрирующее устройство в виде профилографа, позволяющего графически воспроизводить на бумаге профиль контролируемой поверхности.

Условное обозначение оптической линейки, например, автоматической с наибольшей длиной контролируемой поверхности 1600 мм: ОЛА-1600 ГОСТ 24703.

Проекторы предназначены для контроля или измерения деталей сложного контура. Проектор состоит из объектива, дающего увеличенное изображение контролируемого изделия, и экрана, на котором оно рассматривается или сравнивается с сетками или предельными контурами. Проекторы бывают с экранами, работающими в проходящем и отраженном свете.

Оптические делительные головки (рис. 8.32 а, б) служат для измерения углов, а также для разметки и нанесения делений на деталях при обработке. Прибор состоит из корпуса 8, внутри которого в подшипниках помещен шпиндель 9 отсчетного микроскопа 11 с нониусами переднего центра 6 для установки детали, задней бабки 12 и станины 13. Поворот шпинделя отсчитывается предварительно по шкале 14, а точно – по стеклянной шкале с помощью отсчетного микроскопа, которая жестко закреплена на шпинделе (рис. 8.32 в). Ось шпинделя может быть установлена в любое положение в пределах между горизонталью и вертикалью. Отсчет углов в этом случае ведут по шкале 14.

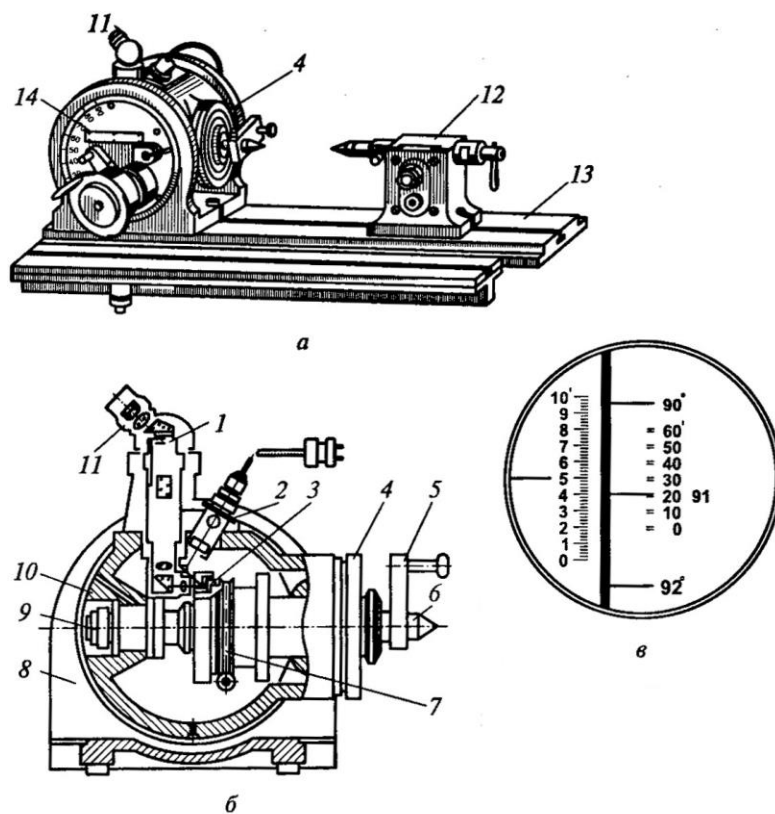
Оптические круглые столы предназначены для точных угловых измерений или поворотов на требуемые углы деталей, которые из-за своего веса, формы и размеров не могут быть установлены в центрах

или на оправках оптической делительной головки. Оптические круглые столы могут применяться также для точной разметки деталей по окружности или как точное приспособление для обработки деталей в полярной системе координат.

Для измерения наружных и внутренних углов применяются различные *оптические угломеры*. Величина отсчета по шкале равна $10'$, а допустимая погрешность $\pm 5'$.

Наиболее точными угломерными приборами являются приборы, основанные на применении автоколлимационных зрительных труб. Одним из представителей таких приборов является *автоколлиматор*. Он предназначен для измерения углов, измерения прямолинейности и плоскостности направляющих, а также для определения взаимного уг-

лового расположения осей и плоскостей изделий в пространстве. Кроме визуальных автоколлиматоров бывают автоколлиматоры с фотоэлектрической регистрацией результатов, например, автоколлиматор АФ-2, предназначенный для измерения угловых перемещений с точностью 1. Автоколлиматоры с фотоэлектрической регистрацией по сравнению с визуальными обеспечивают более высокую точность и скорость измерений.



- 1 – тубус; 2 – лампа подсветки; 3, 4 и 14 – шкала;
 5 – поводок; 6 – передний центр; 7 – червячное колесо;
 8 – корпус; 9 – шпиндель; 10 – полусфера; 11 – микроскоп;
 12 – задняя бабка; 13 – станина.

Рисунок 8.32 – Оптическая делительная головка:

а – общий вид, б – схема, в – стеклянная шкала

В последнее время в условиях возрастающей сложности контролируемых изделий находят все более широкое применение измерительные двухкоординатные системы. Они позволяют без переустановки изделия проводить более сложные измерения его угловых и линейных размеров в прямоугольной системе координат. К этим приборам относятся *измеритель-*

ные микроскопы, измерительные проекторы и измерительные машины [42–81].

Измерительные машины (одно-, двух- и трехкоординатные) появились как результат естественного развития измерительных микроскопов и проекторов (рис. 8.33). Они предназначены для контроля сложных корпусных деталей, деталей значительных длин, измерения расстояний между осями отверстий, лежащих в одной или разных плоскостях, контроля параметров плоских профильных шаблонов в прямоугольных и полярных координатах. Двух- и трехкоординатные измерительные машины позволяют получать цифровой отсчет с автоматической выдачей результатов измерений на ЭВМ с последующим применением полученных программ в станках с ЧПУ для обработки аналогичных деталей (обработка по моделям).



Рисунок 8.33 – Координатно-измерительная машина Mitutoyo

Мерами в них служат штриховые или концевые меры длины, а также прецизионные измерительные винты. Эти машины характеризуются использованием высокоточных оснований, опор, направляющих и приводов для перемещения стола с изделием или измерительной головки.

Оптические приборы для измерения *параметров шероховатости* поверхности (ГОСТ 9847) основаны на принципе одновременного преобразования профиля поверхности и предназначены для измерения параметров R_{max} ; R_z ; S ГОСТ 2789. Стандартом устанавливаются следующие типы приборов: ПТС – приборы теневого сечения; ПСС – приборы светового сечения; МОМ – микроскопы однообъективные муаровые;

МИИ – микроскопы интерференционные, действие которых основано на двухлучевой интерференции света; МПИ – микроскопы-профилометры интерференционные, действие которых основано на интерференции света; образованием полос равного хроматического порядка.

Диапазоны измерений параметров шероховатости для указанных типов приборов следующие: ПТС – Rz ; $R_{max} - 40...320$ мкм; МИИ – Rz ; $R_{max} - 0,05...0,8$ мкм; $S - 0,2...1,6$ мм; $S - 0,002...0,05$ мм; ПСС – Rz ; $R_{max} - 0,5...40$ мкм; МПИ – Rz ; $R_{max} - 0,05...0,8$ мкм; $S - 0,002...0,5$ мм; МОМ – Rz ; $R_{max} - 0,8...40$ мкм; $S - 0,0005...0,5$ мм.

Оптический метод светового сечения (рис. 8.34 а) позволяет наблюдать в окуляр 1 сильно увеличенный профиль неровностей и, измеряя их с помощью шкал окулярного микрометра, определять Ra Rz . Метод светового сечения заключается в следующем.

Освещенная узкая щель S' проектируется микроскопом A_1 на контролируемые поверхности B_1 и B_2 , образующие ступеньку высотой H . Изображение щели на поверхности B_1 займет положение S_1' , а на поверхности $B_2 - S_2'$. В поле зрения микроскопа A_2 , ось которого расположена под углом 90° к оси проецирующего микроскопа, изображение щели будет иметь вид световой ступеньки. Размер ступеньки b , соответствующий смещению изображения S_2'' относительно S_1'' , служит мерой высоты ступеньки $H -$ высоты неровности. На этом принципе построены такие приборы, как МИС-11, ПСС-2 и др.

С помощью двухлучевого интерферометра (рис. 8.34 б) измеряют разность длин путей двух пучков света, отраженных от разных участков исследуемой поверхности.

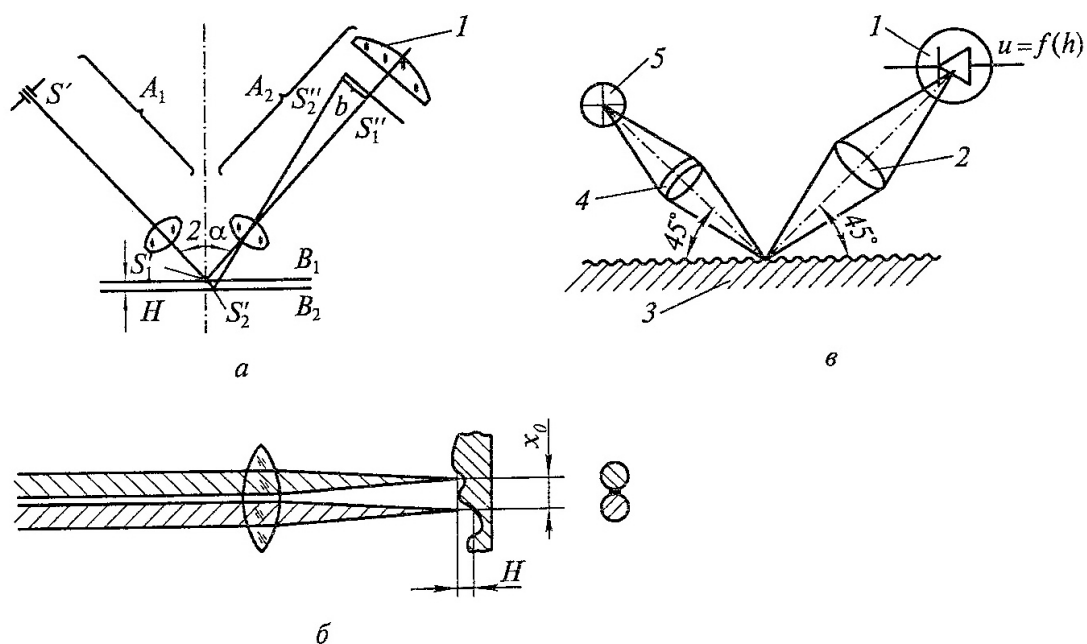
Оптический прибор, построенный по схеме, изображенной на рисунке 8.34 в, реализует рефлектометрический метод измерения и автоматизирует процесс измерения, обеспечивая получение интегрального значения высоты неровностей.

Основные характеристики некоторых мер длины штриховых, штанген и микрометрических инструментов, средства измерения и контроля с механическим, оптическим и оптико-механическим преобразованием приведены в приложениях Г и Д.

8.2.7 Средства измерения и контроля с пневматическим преобразованием. Электрические, электромеханические и радиоактивные измерительные приборы

Пневматические измерительные приборы нашли широкое применение для контроля линейных размеров. Они обладают высокой точностью, позволяют производить дистанционные измерения в относитель-

но труднодоступных местах, имеют низкую чувствительность к вибрациям. Пневматические бесконтактные измерения дают возможность контролировать легкодеформируемые детали, детали с малыми величинами микронеровностей, которые могут быть повреждены механическим контактом, а также исключают износ измерительных поверхностей контрольных устройств, что повышает точность и надежность контроля. Пневматические приборы сравнительно легко поддаются автоматизации, просты в эксплуатации, требуют менее квалифицированного обслуживания. Однако эти приборы обладают значительной инерционностью, снижающей их производительность [52–53].



1 – фотоприемник (окуляр); 2 – линза; 3 – объект измерения; 4 – объектив;
5 – осветитель

Рисунок 8.34 – Измерение шероховатости поверхности:

а – оптическим методом светового сечения; б – с помощью двухлучевого интерферометра; в – рефлектометрическим методом

Пневматические измерительные приборы делятся на два типа: приборы, в которых измеряется давление воздуха – манометрические («Солекс»); приборы, регистрирующие скорость истечения воздуха или его расход – расходомерные («Ротаметр»).

Приборы манометрического типа нашли более широкое распространение в устройствах активного контроля.

Вне зависимости от типа пневматический измерительный прибор состоит из измерительной головки, включающей в себя показывающий прибор, чувствительного элемента (сопла) и источника сжатого возду-

ха. Источник сжатого воздуха в свою очередь содержит: компрессор;

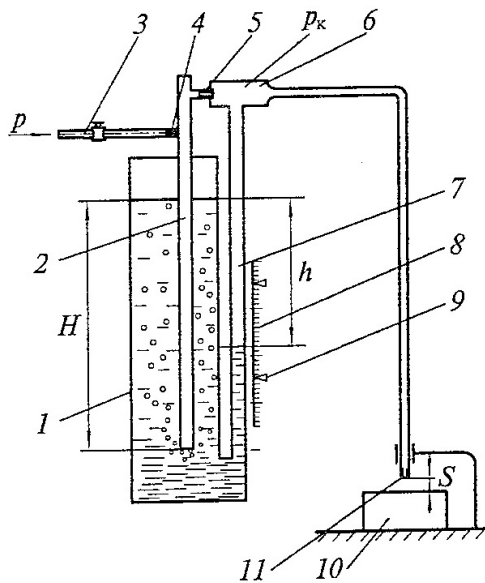


Рисунок 8.35 – Конструкция прибора давления с водяным манометром ДПНД-500 (манометрический):

- 1 – баллон; 2 – трубка;
- 3 – трубопровод;
- 4 – дроссельное устройство;
- 5 – входное сопло; 6 – камера;
- 7 – стеклянная трубка;
- 8 – шкала; 9 – указатель
- допуска; 10 – измеряемая
- деталь; 11 – выходное сопло

отстойники, в которых воздух очищается от влаги; фильтры, в которых воздух очищается от механических включений; редуктор, понижающий давление до нужной величины; стабилизатор давления, поддерживающий давление строго постоянным.

В зависимости от величины рабочего давления различают пневматические приборы низкого (например, 10 кПа) и высокого (например, 150 кПа) давления. И те и другие работают от сети давлением 0,2...0,6 МПа. Приборы низкого давления расходуют на измерение одного параметра до 10 л/мин воздуха, приборы высокого давления – до 20 л/мин.

В пневматических измерительных приборах для линейных измерений использована зависимость между площадью проходного сечения канала истечения и весовым расходом через него воздуха. Площадь канала истечения изменяется за счет измеряемого линейного перемещения.

Приборы давления (манометрические) выпускаются одномерными и многомерными в двух вариантах: цеховой прибор с длиной манометрической трубки 500 мм и лабораторный прибор с длиной манометрической трубки 1230 мм. Передаточное отношение в этих приборах достигает 20 000.

Конструкция прибора давления на примере прибора низкого давления с водяным манометром ДПНД-500, показана на рисунке 8.35. Он представляет собой цилиндрический баллон 1, сообщающийся с атмосферой и наполненный водой, в которую погружена трубка 2. К верхней части этой трубки через трубопровод 3 и дроссельное устройство 4 подается компрессором воздух под давлением. В трубке 2 автоматически поддерживается практически постоянное давление, определяемое высотой H столба в баллоне 1. С трубкой 2 соединена камера 6, имеющая входное 5 и выходное 11 сопла. Последнее установлено с зазором над поверхностью измеряемой детали 10. Для измерения переменного давления p_k в камере 6 прибор снабжен водяным манометром в виде стеклянной трубки 7 со шкалой 8. Давление p_k определяется разностью

уровней столбов воды в баллоне 1 и стеклянной трубке 7, которая соединена одним концом с камерой 6, а другим – с баллоном 1. Из трубки 2 воздух под постоянным давлением проходит через входное сопло 5 в камеру 6 и выходит через выходное (измерительное) сопло 11. От величины зазора S зависят давление p_k и, следовательно, разность уровней h , отсчитываемая по шкале 8. Так, при уменьшении размера детали 10 зазор S возрастает и уровень воды в стеклянной трубке 7 повышается. На шкале 8 устанавливают указатели допуска 9, между которыми должен находиться уровень воды в стеклянной трубке 7 при контроле годных деталей.

Приборы расхода (поплавковые) выполняются одномерными и многомерными, обслуживающими до 15 измерительных позиций. Конструкция расходомера типа «Ротаметр» показана на рисунке 8.36. Он имеет коническую стеклянную трубку 3 с широким концом кверху. По ней снизу под рабочим давлением 100...200 кПа проходит воздух, поднимающий поплавок 4. Верхняя плоскость поплавка является указателем для отсчета по шкале 5 (градуирована в микрометрах), помещенной рядом с трубкой. Высота подъема поплавка зависит от скорости

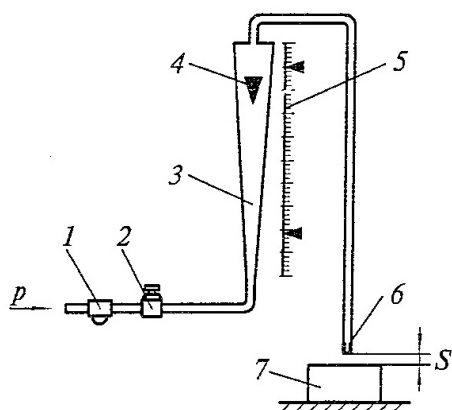


Рисунок 8.36 – Конструкция расходомера типа «Ротаметр» (поплавковый):

- 1 – дроссель; 2 – фильтр;
- 3 – стеклянная трубка;
- 4 – поплавок; 5 – шкала;
- 6 – измерительное сопло;
- 7 – объект измерения

прохождения воздуха, которая чем больше, тем больше зазор между торцом измерительного сопла 6 и поверхностью объекта измерения 7. Под действием скоростного напора воздуха поплавок поднимается в трубке до тех пор, пока не уравниются расходы воздуха через кольцевой зазор между поплавком и стенками стеклянной трубки 3 и через зазор S между измерительным соплом и контролируемой деталью. В этом случае поплавок зависает в трубке. Таким образом, каждому значению зазора S соответствует определенное по высоте положение поплавка в трубке. Точность рас-

смотренных выше приборов во многом зависит от постоянства рабочего давления воздуха. Любые (даже незначительные) случайные колебания давления непосредственно влияют на результаты измерения.

Применяются также и другие конструктивные решения (дифференциальный, сифонный, компенсационный).

Электрические и электромеханические измерительные приборы характеризуются наличием единого источника энергии – электрическо-

го тока. Широкое распространение в измерительной технике нашли электрические преобразователи, индуктивные, емкостные, электронные и фотоэлектрические приборы. Они отличаются высокой точностью, позволяют вести дистанционные измерения, имеют сравнительно небольшие габаритные размеры, обладают незначительной инерционностью.

Электрические преобразователи являются одной из составных частей электрических и электромеханических измерительных приборов.

В индуктивных приборах используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее параметров, определяющих величину индуктивности. Для получения возможно большей индуктивности катушку, как правило, выполняют с магнитопроводом из ферромагнитного материала.

В *емкостных измерительных* системах используется принцип преобразования линейных перемещений в изменение электрической емкости конденсатора. По изменению емкости судят об изменении размера.

Механотронные измерительные приборы состоят из электронного преобразователя, представляющего собой электронную лампу с механическим управлением электронными и ионными токами, измерительной схемы, усилителя, показывающего устройства и источника питания. Эти приборы предназначены не только для измерения перемещений, воздействующих перпендикулярно оси выходного штыря лампы, но и усилий.

В *фотоэлектрических* измерительных приборах с помощью оптической системы, построенной на диафрагмировании или отражении светового потока и фотоэлемента, энергия света преобразуется в электрический сигнал, который, усиливаясь, поступает либо на показывающий прибор, либо в устройство для подачи команд.

Фотоэлектрические измерительные системы для непрерывного измерения размера контролируемых деталей по изменению величины светового потока, падающего на катод фотоэлемента, применяются редко. Причиной этого является нестабильность характеристик фотоэлементов во времени.

Фотоэлектрические преобразователи, которые являются базовым элементом рассматриваемых систем, широко применяются в дискретных измерительных системах с отражением светового потока, например, в автоматах ЛИЗ для контроля и сортировки деталей подшипников качения, в счетных схемах, оптических системах для измерения перемещений и др.

Радиоактивные измерительные приборы основаны на использовании свойств радиоактивных излучений: проникать сквозь вещество, рассеиваться веществом и ионизировать вещество.

Радиоактивные приборы применяются в отраслях промышленности с тяжелыми условиями эксплуатации (запыленность, влажность, высокие температуры, агрессивная среда). Они успешно используются для автоматизации технологических процессов изготовления проката металлов, резины, бумаги, стекла, всевозможных пленок, автоматизации литейного и кузнечно-прессового производства. Радиоактивные приборы позволяют вести бесконтактные измерения при больших скоростях проката со значительными величинами вибраций и колебаний измеряемого объекта, при значительных колебаниях температуры в зоне измерения. Однако использование источников ядерного излучения всегда связано с необходимостью защиты обслуживающего персонала от воздействий излучения.

Для контроля линейных размеров применяются приборы, в которых величина поглощения или рассеивания потока радиоактивного излучения функционально связана с контролируемой величиной.

8.3 Выбор средств измерений линейных размеров

8.3.1 Общие положения

Результаты измерений могут быть использованы для разных целей: при исследовательских и поверочных работах для оценки погрешностей как самих средств и методов измерений, так и разрабатываемых и исследуемых приборов, механизмов, машин, процессов и т. п.; при приемочном контроле – для оценки качества принимаемых деталей, заготовок, узлов и аппаратов; при технологическом контроле (в том числе активном – управляющем) для настройки и поддержания технологического процесса на должном точностном уровне. Во всех случаях использования результатов измерений необходимо правильно выбрать средства измерений, сопоставив ожидаемую (расчетную) погрешность результата с допуском или заданным значением измеряемого параметра (длины, диаметра, угла, отклонения формы и т. п.).

Для выбора средств и методов измерений линейных размеров от 1 до 500 мм ГОСТ 8.051 устанавливает допускаемые погрешности измерения линейных размеров до 500 мм при приемочном контроле и правила определения приемочных границ с учетом этих погрешностей.

Значения допускаемых погрешностей измерений. Величины погрешности измерения, представленные в таблице 8.1, являются наибольшими допускаемыми погрешностями измерений, включающими в себя все составляющие, зависящие от измерительных средств, установочных мер, температурных деформаций и т. д. Допускаемая погрешность измерения включает случайные и неучтенные систематические погрешности измерения.

Таблица 8.1 – Величины погрешности измерения

Номинальные размеры, мм	Для квалитетов (мкм)													
	2		3		4		5		6		7		8	
	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ
До 3	1,2	0,4	2,0	0,8	3	1,0	4	1,4	6	1,8	10	3,0	14	3,0
Св. 3 до 6	1,5	0,6	2,5	1,0	4	1,4	5	1,6	8	2,0	12	3,0	18	4,0
« 6 « 10	1,5	0,6	2,5	1,0	4	1,4	6	2,0	9	2,0	15	4,0	22	5,0
« 10 « 18	2,0	0,8	3,0	1,2	5	1,6	8	2,8	11	3,0	18	5,0	27	7,0
« 18 « 30	2,5	1,0	4,0	1,4	6	2,0	9	3,0	13	4,0	21	6,0	33	8,0
« 30 « 50	2,5	1,0	4,0	1,4	7	2,4	11	4,0	16	5,0	25	7,0	39	10,0
« 50 « 80	3,0	1,2	5,0	1,8	8	2,8	13	4,0	19	5,0	30	9,0	46	12,0
« 80 « 120	4,0	1,6	6,0	2,0	10	3,0	15	5,0	22	6,0	35	10,0	54	12,0
« 120 « 180	5,0	2,0	8,0	2,8	12	4,0	18	6,0	25	7,0	40	12,0	63	16,0
« 180 « 250	7,0	2,8	10,0	4,0	14	5,0	20	7,0	29	8,0	46	12,0	72	18,0
« 250 « 315	8,0	3,0	12,0	4,0	16	5,0	23	8,0	32	10,0	52	14,0	81	20,0
« 315 « 400	9,0	3,0	13,0	5,0	18	6,0	25	9,0	36	10,0	57	16,0	89	24,0
« 400 « 500	10,0	4,0	15,0	5,0	20	6,0	27	9,0	40	12,0	63	18,0	97	26,0

Номинальные размеры, мм	Для квалитетов (мкм)															
	9		10		11		12		13		14		15		16	
	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ
До 3	25	6	40	8	60	12	100	20	140	30	250	50	400	80	600	120
Св. 3 до 6	30	8	48	10	75	16	120	30	180	40	300	60	480	100	750	160
« 6 « 10	36	9	58	12	90	18	150	30	220	50	360	80	580	120	900	200
« 10 « 18	43	10	70	14	110	30	180	40	270	60	430	90	700	140	1100	240
« 18 « 30	52	12	84	18	130	30	210	50	330	70	520	120	840	180	1300	280
« 30 « 50	62	16	100	20	160	40	250	50	390	80	620	140	1000	200	1600	320
« 50 « 80	74	18	120	30	190	40	300	60	460	100	740	160	1200	240	1900	400
« 80 « 120	87	20	140	30	220	50	350	70	540	120	870	180	1400	280	2200	440
« 120 « 180	100	30	160	40	250	50	400	80	630	140	1000	200	1600	320	2500	500
« 180 « 250	115	30	185	40	290	60	460	100	720	160	1150	240	1850	380	2900	600
« 250 « 315	130	30	210	50	320	70	520	120	810	180	1300	260	2100	440	3200	700
« 315 « 400	140	40	230	50	360	80	570	120	890	180	1400	280	2300	460	3600	800
« 400 « 500	155	40	250	50	400	80	630	140	970	200	1550	320	2500	500	4000	800

Примечание. Допускается увеличивать допускаемую погрешность измерения, указанную в таблице, при уменьшении допуска на размер, учитывающего это увеличение, а также в случае разделения изделий на размерные группы для селективной сборки.

Случайная погрешность измерения не должна превышать 0,6 допускаемой погрешности измерения и принимается равной 2σ , где σ – значение среднего квадратического отклонения погрешности измерения. При допусках, не соответствующих значениям, указанным в таблице 8.1, допускаемую погрешность выбирают по ближайшему меньшему значению допуска для соответствующего размера.

Приемочные границы с учетом допускаемых погрешностей измерения. Влияние погрешностей измерения на результат измерений должно быть учтено при установлении **приемочных границ** – значений размеров, по которым проводят приемочный контроль изделий.

Для учета влияния погрешностей измерений стандартом предусмотрены два возможных варианта установления приемочных границ (рис. 8.37).

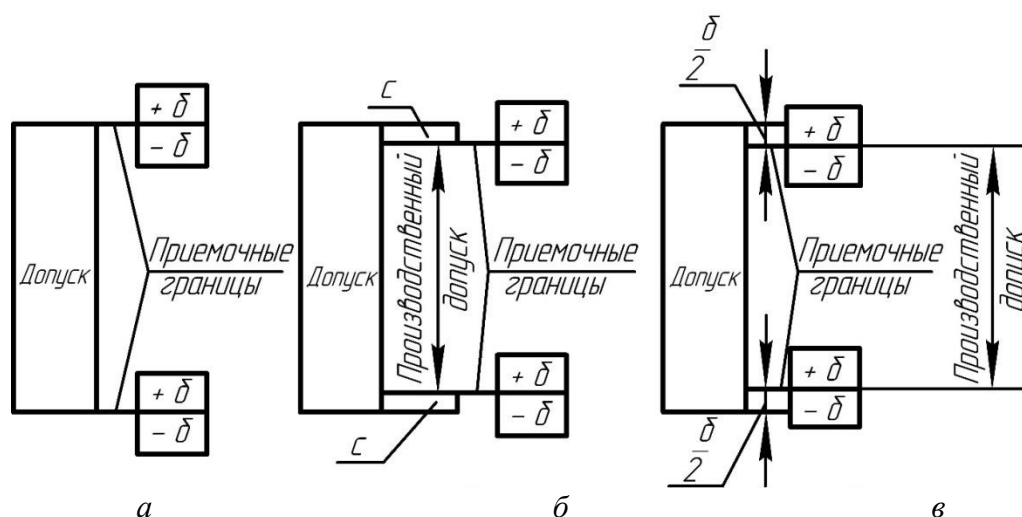


Рисунок 8.37 – Расположение приемочных границ:

а – без производственного допуска; б – производственный допуск в зависимости от параметров разбраковки;
в – производственный допуск по ГОСТ 8.051

В первом варианте приемочные границы устанавливают совпадающими с нормируемыми предельными значениями проверяемого размера (рис. 8.37 а), т. е. возможное влияние погрешности измерения учитывается конструктором при выборе качества и вида посадки. Этот вариант является основным и вполне соответствует принятой международной практике.

Во втором варианте (рис. 8.37 б) приемочные границы устанавливают с введением производственного допуска, т. е. нормируемые предельные значения размера смещают внутрь допуска с учетом возможного влияния погрешности измерения.

Смещение не должно превышать половины нормируемой в стандарте допускаемой погрешности измерений (рис. 8.37 в). Этот вариант менее предпочтителен, поскольку вносит определенные затруднения при оформлении документации и приводит к забракованию части годной продукции. Этот способ, хотя и редко, но используют в практике. Иногда рекомендуется, если необходимо, вводить производственный допуск, смещая приемочные границы на величину возможного выхода размера за границу поля допуска в зависимости от точности технологического процесса и погрешности измерения (рис. 8.37 б).

При введении производственного допуска значение смещения не должно превышать половины устанавливаемой стандартом допускаемой погрешности измерения у каждой приемочной границы.

При **арбитражной перепроверке** принятых деталей погрешность измерения не должна превышать 30 % погрешности, допускаемой при приемочном контроле. Среди принятых допускается наличие до 5 % деталей от перепроверяемой партии с отклонениями, выходящими за при-

емочные границы на значение, не превышающее половину допускаемой погрешности измерения при приемке, для квалитетов со 2-го по 7-й; рядов пределом допускаемых погрешностей измерения с 1 до 6; до 4 % для квалитетов 8, 9 или для рядов 7 и 8; 3 % – для квалитетов 10 и грубее или для ряда 9 и грубее.

Влияние погрешности измерения на результаты разбраковки при приемочном контроле. Влияние погрешности измерения при приемочном контроле оценивают параметрами:

– m – число деталей в процентах от общего числа измеренных, имеющих размеры, выходящие за предельные и принятые в числе годных (неправильно принятые);

– n – число деталей в процентах от общего числа измеренных, имеющих размеры, не превышающие предельные и забракованные (неправильно забракованные);

– c – вероятностная величина выхода размера за предельные у неправильно принятых деталей.

Значения параметров m , n и c при распределении контролируемых размеров по нормальному закону приведены на рисунке 8.38.

На рисунке 8.38 сплошные линии соответствуют распределению погрешности измерения по нормальному закону, а пунктирные – по закону равной вероятности.

При неизвестном законе распределения погрешности измерения для параметров m , n и c рекомендуется принимать средние из значений, определенные по сплошной и пунктирной линиям.

Параметры m и c на графиках определены с доверительной вероятностью 0,9973. Для определения m с другой доверительной вероятностью необходимо сместить начало координат по оси ординат.

На графиках рисунке 8.38 значения $A_{мет(\sigma)}$ в координатах определяют по формуле

$$A_{мет(\sigma)} = \frac{\sigma}{IT} 100,$$

где σ – среднее квадратическое отклонение погрешности измерения; IT – допуск на контролируемый размер.

При определении параметров m , n и c рекомендуется принимать $A_{мет(\sigma)}$, равное 16 % для квалитетов 2–7, 12 % – для квалитетов 8 и 9 и 10 % – для квалитетов 10 и грубее.

Параметры m , n и c приведены на графиках в зависимости от значения $\frac{IT}{\sigma_{тех}}$, где $\sigma_{тех}$ – среднее квадратическое отклонение погрешности изготовления.

Параметры m , n и c на рисунке 8.38 даны при симметричном расположении допуска относительно центра группирования контролируемых деталей.

Совместное влияние систематической и случайной погрешностей изготовления на параметры m и n определяют по графикам (рис. 8.38), но вместо значения $\frac{IT}{\sigma_{\text{мех}}}$ принимается для одной границы

$$\frac{IT + 2a_m}{\sigma_{\text{мех}}}, \quad \text{для другой} \quad \frac{IT - 2a_m}{\sigma_{\text{мех}}},$$

где a_m – систематическая погрешность изготовления.

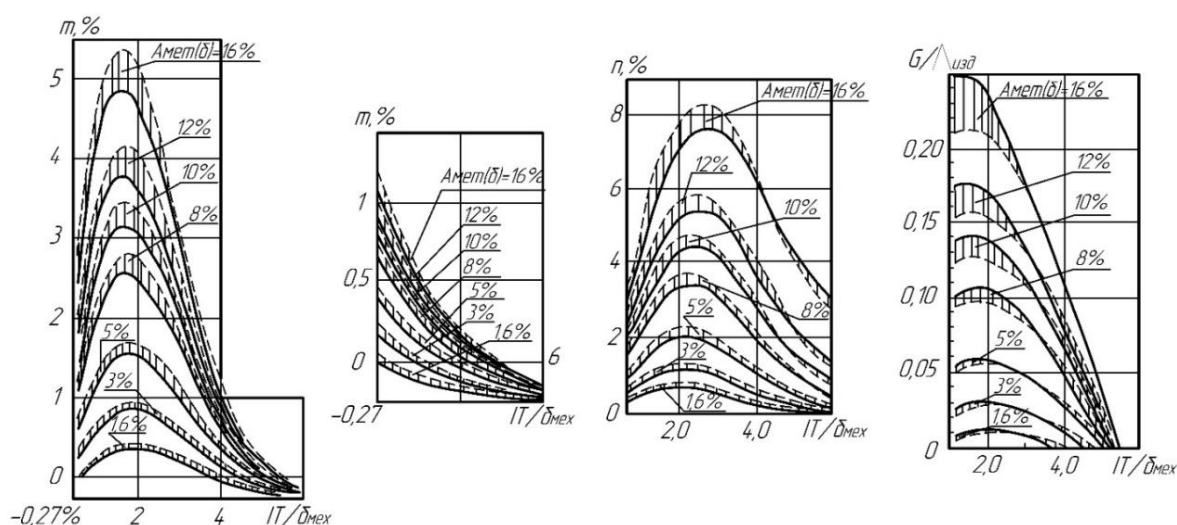


Рисунок 8.38 – Значения параметров m , n и c

При определении параметров m и n для каждой границы берут половину полученных значений.

Совместное влияние случайной и систематической погрешностей измерения (если последняя не исключается поправкой) на параметры m , n и c определяют по графику (рис. 8.38) при использовании зависимостей:

$$m = \left[F_0 \left(\frac{IT + 2a_u}{2\sigma_{\text{мех}}} \right) - F_0 \left(\frac{IT}{2\sigma_{\text{мех}}} \right) \right] + \frac{m_{(IT+2a_u)}}{2} - \frac{n_{(IT+2a_u)}}{2};$$

$$n = \left[F_0 \left(\frac{IT}{2\sigma_{\text{мех}}} \right) - F_0 \left(\frac{IT + 2a_u}{2\sigma_{\text{мех}}} \right) \right] + \frac{n_{(IT+2a_u)}}{2} - \frac{m_{(IT+2a_u)}}{2};$$

$$C = C_{(IT+2a_u)} + a_u,$$

где a_u – систематическая погрешность измерения (со знаком плюс при расширении допуска и минус – при сужении); $m_{(IT+2a_u)}$; $n_{(IT+2a_u)}$; $C_{(IT+2a_u)}$ – параметры при допуске, измененном на значение систематической погрешности измерения; F_0 – интегральная функция распределения погрешности изготовления.

При определении совместного влияния систематической и случайной погрешностей измерения следует использовать значения $A_{мет(\sigma)}$, определяемые по формуле

$$A_{мет(\sigma)} = \frac{\sigma}{IT + 2|a|},$$

где a – систематическая погрешность изготовления.

Возможные предельные значения параметров m , n и $\frac{C}{IT}$, соответствующие экстремальным значениям кривых на рисунке 8.38, приведены в таблице 8.2.

Приемочные границы с учетом погрешности измерения. Стандарт предусматривает два способа установления приемочных границ.

1-й способ. Приемочные границы устанавливают совпадающими с предельными размерами.

Пример. При проектировании вала диаметром 100 мм оценено, что отклонения его размеров для условий эксплуатации должны соответствовать $h6$ ($100_{-0,022}$).

В соответствии с таблицей 8.1 устанавливают, что для этого размера вала и допуска допускаемая погрешность измерения равна 0,006 мм.

В соответствии с таблицей 8.2 устанавливают, что для $A_{мет(\sigma)}$ равной 16 %, m неизвестной точности технологического процесса $m = 5,2$ и $c = 0,25 IT$, т. е. среди годных деталей может оказаться до 5,2 % неправильно принятых деталей с предельными отклонениями +0,0055 и – 0,0275 мм. Если полученные данные не повлияют на эксплуатационные показатели вала, то на чертежах указывают первоначально выбранный квалитет. В противном случае выбирают более точный квалитет или другое поле допуска в этом квалитете.

2-й способ. Приемочные границы смещают внутрь относительно предельных размеров.

При введении производственного допуска могут быть два варианта в зависимости от того, известна или неизвестна точность технологического процесса.

Вариант 1. При назначении предельных размеров точность технологического процесса неизвестна. Предельные размеры изменяются на половину допускаемой погрешности измерения. Для примера, рассмотренного выше, диаметр $100_{-0,019}^{-0,003}$.

Вариант 2. При назначении предельных размеров точность технологического процесса известна. В этом случае предельные размеры уменьшают на значение параметра c .

Таблица 8.2 – Предельные значения параметров m , n и $\frac{c}{IT}$

$A_{мет(\sigma)}$	$m, \% -$	$n, \%$	$\frac{c}{IT}$
1,6	от 0,37 до 0,39	от 0,7 до 0,75	0,01
3	от 0,87 до 0,9	от 1,2 до 1,3	0,03
5	от 1,6 до 1,7	от 2,0 до 2,25	0,06
8	от 2,6 до 2,8	от 3,4 до 3,7	0,1
10	от 3,1 до 3,5	от 4,5 до 4,75	0,14
12	от 3,75 до 4,1	от 5,4 до 5,8	0,17
16	от 5,0 до 5,4	от 7,8 до 8,25	0,25

Примечания.

1. Первые значения m и n соответствуют распределению погрешностей измерения по нормальному закону; вторые – по закону равной вероятности.

2. Предельные значения параметров m , n и $\frac{c}{IT}$ учитывают влияние только случайной составляющей погрешности измерения.

Предположим, что для рассмотренного выше примера $\frac{IT}{\sigma_{max}} = 4$ (при изготовлении имеется 4,5 % брака по обеим границам). $A_{мет(\sigma)} = 16 \%$. По рисунку 8.38 находим $C = 0,1$; $IT = 0,0022$ мм.

С учетом данных диаметр вала принимает $100_{-0,020}^{-0,002}$.

8.3.2 Порядок выбора средств измерений

Участие технических служб в выборе измерительных средств. Принципиальное положение ГОСТ 8.051 в отношении выбора измерительных средств заключается в том, что при установлении приемочных границ, т. е. значений размеров, по которым производят приемку изделий, необходимо учитывать влияние погрешности измерений.

В выборе измерительных средств должны участвовать **конструкторская, технологическая и метрологическая службы** в пределах выполняемых ими служебных обязанностей.

Конструкторская служба участвует в выборе измерительных средств только правильным назначением допускаемых отклонений на размер детали. При назначении допуска на изготовление конструктор должен установить по ГОСТ 8.051 возможное предельное количество неправильно принимаемых деталей и возможный предельный выход размера этих деталей за границы допуска. При этом у конструктора возможны три варианта установления приемочных границ (см. рис. 8.37).

В стандарте в качестве предпочтительного варианта принято установление приемочных границ без введения производственного допуска. Это означает, что следует выбрать такой квалитет или вид посадки, при котором предельные возможные значения размера удовлетворяли бы требованиям конструктора. Такой подход необходим в связи с тем, что только конструктор в полной мере может дать ответ на вопрос о возможности отклонения размеров определенной группы деталей от размеров, указанных на чертеже.

Если переход на более точный квалитет или другой вид посадки оказывается невозможным, например, в связи с большим ужесточением требований, а следовательно с неоправданным удорожанием производства, конструктор должен принять решение о введении производственного допуска. Стандартом предусмотрено, что смещение у каждой приемочной границы не должно быть больше половины допускаемой погрешности измерения (см. рис. 8.37). Следовательно, меньшие смещения вполне допустимы. Наиболее предпочтительными являются смещения на величину «с», т. е. на вероятный предельный выход размера за границу поля допуска у неправильно принятых деталей, определенную исходя из реального соотношения технологического рассеяния и поля допуска, а не из наиболее неблагоприятного. Для этой цели необходимо иметь представление о точности технологического процесса и определять величину «с» по графикам (рис. 8.38).

Технологическая служба. В обязанности технологической службы входит обеспечение наиболее экономичных технологических процессов. Для оценки технологического процесса технолог должен знать возможные количества действительного n и ложного брака m , руководствоваться при этом данными о технологическом распределении, допускаемой погрешности измерения и графиками (рис. 8.38). Если полученные результаты можно считать удовлетворительными, то выбор измерительных средств предоставляется метрологической службе или тем работникам технологической службы, в чьи обязанности это входит. Если результаты получились неудовлетворительными, то для исправления положения можно смещать настройку, т. е. центр группирования

технологического распределения, регулируя соотношение брака плюс и брака минус; изменять технологический процесс, уменьшая зону технологического рассеяния; повышать требования к точности измерения, сокращая процент ложного брака. Второй путь, как правило, оказывается наиболее эффективным.

Метрологическая служба. Метрологическая служба участвует в выборе конкретных измерительных средств с учетом условий измерения. Эта служба обязана установить, в какой мере условия измерения (например, указанные в приложениях Г и Д) соответствуют реально существующим, а также учесть специфические особенности производства (применяемость измерительных средств, их наличие и т. д.). Если метролог обнаружит, что рекомендуемые в приложениях Г и Д условия измерения не могут быть созданы на существующем производстве, то он обязан оценить степень влияния несовпадающих условий и определить возможные предельные погрешности при существующих условиях, а также их допустимость с точки зрения выполнения требований ГОСТ 8.051.

При неудовлетворительных результатах следует выбрать другое измерительное средство, при использовании которого в существующих условиях измерения (с учетом методической погрешности) будут удовлетворяться требования ГОСТ 8.051, или спроектировать новую методику выполнения измерения. Особое внимание следует обратить на ограниченную возможность изменения предельной погрешности за счет изменения отдельных ее составляющих. Как правило, при разработке вариантов использования измерительных средств обеспечивалось приблизительно равное влияние доминирующих составляющих погрешности измерения. Обычно в качестве исходной величины принималась погрешность измерительного средства и подбирались погрешности, зависящие от температурных деформаций и от установочных мер, каждая из которых приблизительно равна погрешности измерительного средства.

Погрешности измерения универсальными измерительными средствами. Для проведения измерений с погрешностями, не превышающими допускаемые ГОСТ 8.051 значения, необходимо иметь сведения о значениях погрешностей измерения различными измерительными средствами в различных условиях их применения. Такие сведения о погрешностях измерения некоторыми измерительными средствами даны в приложениях Г и Д (согласно РД 50-98).

В приложении Г приведены сведения о погрешностях измерения различными измерительными средствами наружных размеров, размеров уступов и величин биения, а в приложении Д – сведения о погрешностях измерений внутренних размеров.

Основой приложений Г и Д являются два принципиальных положения:

– измерительным средством одного вида можно выполнить измерения с различной погрешностью, в зависимости от методики и условий выполнения измерения;

– для выбора измерительных средств и условий выполнения измерений необходимо оценивать возможные пределы погрешности измерения.

При этом имеется в виду, что измерительное средство соответствует предъявляемым требованиям и используется оператором, имеющим навык в работе с ним.

Различные значения погрешностей измерения при использовании измерительных средств одного и того же вида в приложениях Г и Д даны без учета методической погрешности измерения.

Погрешности измерений указаны без знаков $\pm$, т. е. указаны абсолютные значения предельных погрешностей измерения единичным измерительным средством, другими словами, даны предельные значения, результаты измерения которых могут отличаться от истинного значения измеряемой величины.

Варианты использования измерительных средств отличаются различной погрешностью средств измерений при использовании их на различных пределах измерения. Для некоторых измерительных средств варианты использования приведены в зависимости от класса и разряда концевых мер длины, применяемых для настройки. Для стрелочных отсчетных головок при измерении биений, т. е. колебаний размеров, варианты использования установлены в зависимости от применяемых штативов и стоек, а при измерении размеров – в зависимости от вида контакта. Для всех измерительных средств указан температурный режим измерения. Эти значения в общем случае нельзя относить ни к отклонениям, ни к колебаниям температуры окружающей среды в процессе измерения. В приложении Д, где указаны погрешности измерений внутренних размеров существующими измерительными средствами, учитывается шероховатость поверхности измеряемой детали. При определении погрешности измерений учитывались субъективные погрешности отсчитывания показаний.

Выбор конкретных измерительных средств. Пример выбора. Выбрать конкретное измерительное средство можно с помощью РД 50-98 «Методические указания. Выбор универсальных СИ линейных размеров до 500 мм» по приложениям Г и Д в зависимости от измеряемого размера, допуска на изготовление и допускаемой погрешности измерения по ГОСТ 8.051. Однако по приложениям Г и Д трудно выявить весь комплекс измерительных средств, которые можно использовать для измерения с допускаемой погрешностью.

Для упрощения процесса выбора конкретных измерительных средств используются приложения Е–Л. В левой части таблиц указаны диапазоны номинальных размеров, сверху квалитеты, от *IT2* до *IT17*, а

на пересечении горизонтальных полос и вертикальных колонок указаны в виде дроби допускаемые погрешности измерений (числитель) и допуски на изготовление (знаменатель). Под ними номерами и буквами из приложений Г и Д указаны измерительные средства и варианты их использования, при которых погрешность измерения не превышает допускаемых значений.

Для измерений внутренних размеров, а также глубин и уступов (приложения И и К) указана практически вся возможная номенклатура универсальных измерительных средств. При этом часть диапазонов номинальных размеров в некоторых качествах не обеспечена универсальными измерительными средствами. Для измерения этих размеров должны проектироваться специальные измерительные средства и разрабатываться соответствующие методики измерений.

В ответственных случаях выбора измерительных средств, особенно при проектировании и модернизации производства, следует проводить технико-экономические расчеты.

На чертеже детали указан наружный диаметр 16h5 ($16_{-0,008}$). Требуется выбрать средство измерения этого размера. В зависимости от конфигурации и габаритов детали и требований к методике выполнения измерения следует решить вопрос о выборе накладного или станкового измерительного средства.

Предполагается, что схема и методика выполнения измерения выбрана таким образом, что методическая погрешность сведена до пренебрежимо малой величины.

Выбор накладного средства измерений производим по приложению Ж. В графе, соответствующей 5 качеству, для диапазона размеров свыше 10 до 18 мм находим обозначение «6в». В приложении Г под номером 6 указаны микрометр рычажный и скоба рычажная. Буквой «в» обозначены условия измерения: настройка на размер должна производиться по концевым мерам длины 2 класса, при использовании отсчета в пределах ± 10 делений шкалы; температурные условия характеризуются температурным режимом 5 °С, при обеспечении надежной теплоизоляции от рук оператора. Сделана оговорка, что контакт измерительных поверхностей с деталью должен быть плоскостным или линейчатым. В данном случае, измеряемая поверхность цилиндрическая, последнее условие выполняется.

Выбор станкового средства измерения производим по приложению Е. В графе, соответствующей 5 качеству, для диапазона размеров св. 10 до 18 мм находим группу обозначений: 9б, 10а, 15а, 20б, 21а, 34а, 36б. По приложению Г устанавливаем, что номерами 9 и 10 обозначены рычажно-зубчатые головки с ценой деления 2 и 1 мкм, 15 – микрокатор с ценой деления 2 мкм, 20 и 21 – пружинные малогабаритные головки с ценой деления 2 и 1 мкм, 34 – вертикальный и горизонтальный длиномеры, 36 – показывающий прибор с индуктивным преобразователем. Из

указанных приборов выбираем тот, который имеется в наличии, который проще в обращении и к условиям применения которого предъявляются менее жесткие требования.

Например, выбрана рычажно-зубчатая головка с ценой деления 1 мкм. В таблице Г. 8 приложения Г буквой «а» для нее обозначены следующие условия применения: установка в штативе с диаметром колонки не менее 30 мм и наибольшим вылетом до 200 мм (этим условиям удовлетворяют штативы Ш-11Н и ШМ-11Н), настройка по концевым мерам длины 5 разряда, температурный режим 2 °С. Настройка на размер может производиться на произвольное деление, а отсчет может использоваться в пределах $\pm 0,05$ мм, т. е. в пределах всей шкалы.

Допустимо изменять условия измерения, но только таким образом, чтобы это не приводило к снижению точности измерения. Например, концевые меры 5 разряда могут быть заменены мерами более высокого разряда или нулевого класса, штатив можно заменить более жесткой стойкой и т. д. Однако следует помнить, что загроубление одного из условий, чаще всего не может быть компенсировано ужесточением остальных.

8.3.3 Система поддержки принятия решений по выбору средств измерения

На кафедрах технологии машиностроения Учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» и технологии и оборудования машиностроительного производства Учреждения образования «Полоцкий государственный университет» разработано методическое, алгоритмическое и программное обеспечение системы поддержки принятия решений по выбору средств измерений. Программное обеспечение основано на использовании реляционной системы управления базами данных MicrosoftAccess 2015. Интерфейс и логическая часть системы реализована на языке программирования C# в среде разработки MicrosoftVisualStudio 2019.

При работе с приложением пользователь задает информацию о группе геометрической величины (линейный размер, допуск взаимного расположения, допуск формы, параметр резьбы, зубчатого венца, шлица, шпоночного паза, резьбы и т. д.). Далее в зависимости от выбранной группы задаются соответствующие характерные параметры и номинальные значения. Так для линейного размера необходимо ввести соответствующий тип размера (диаметр, глубина и т. п.), номинальное значение размера и допуск (калитет точности) на него. Результатом работы системы является список возможных средств измерения с описанием условий их применения, ссылками на соответствующие нормативные

документы, а также схематичное изображение процесса измерения. Некоторые интерфейсы программы представлены на рисунке 8.39.

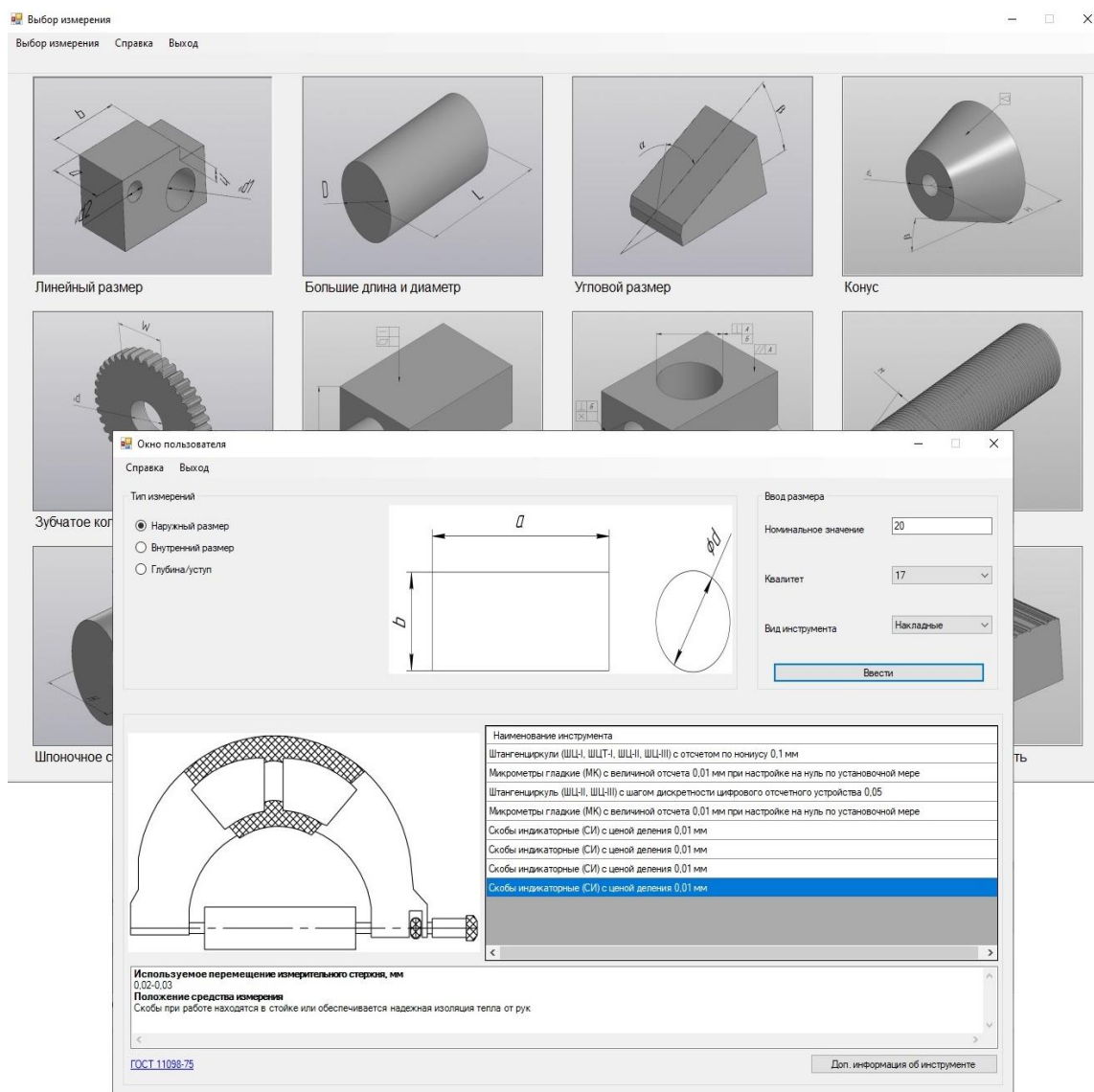


Рисунок 8.39 – Интерфейсы программного обеспечения выбора СИ геометрических величин

8.4 Измерение и контроль механических величин

8.4.1 Методы и средства измерения и контроля кинематических величин

8.4.1.1 Методы и средства измерения и контроля линейных скоростей

Параметрами механического движения, подлежащими измерению на практике, являются перемещение, скорость и ускорение. Это кинематические параметры и они взаимосвязаны: зная перемещение и время перемещения, можно определить скорость и ускорение: скорость – перемещение/время (м/с); ускорение – перемещение/квадрат времени (м/с²) [52–53].

Параметры движения по характеру изменения во времени можно разбить на параметры поступательного, вращательного и колебательного движений.

Средства измерений и контроля, предназначенные для измерения линейных скоростей, называются измерителями скорости; средства для измерения и контроля угловых скоростей (частоты вращения) – тахометрами, а средства для измерения ускорений – акселерометрами. Большой класс средств измерений применяется для измерения параметров колебательного движения (вибраций). Если измеряются параметры вибраций машин, устройств, сооружений, то соответствующие средства называются виброметрами. Приборы, применяемые для измерения параметров движения земной поверхности, называются сейсмографами.

Наиболее распространенные методы измерения линейных скоростей движущихся твердых тел: аэрометрический, компенсационный, термодинамический, корреляционный, доплеровский, электромагнитный, инерциальный и др.

Аэрометрический метод (рис. 8.40 а) основан на измерении скоростного (динамического) напора, функционально связанного со скоростью тела, движущегося в воздушной среде. Скоростной напор определяется манометрической коробкой 3 путем сравнения статического давления, образуемого при движении воздушной среды в приемнике статического давления 1 и приемнике полного давления 6. Результат сравнения показывается стрелкой 4 на отсчетном устройстве. Средства измерения, построенные на аэрометрическом методе, позволяют измерять скорость с погрешностью, не превышающей 2...3 %.

Компенсационный метод (рис. 8.40 б) основан на автоматическом уравнивании полного давления p_n и давления p_k , развиваемым воздушным компрессором 1. В манометрическом реле 2 с двумя полостями, в одну из которых поступает полное давление p_n , а во вторую – давление p_k . Давления p_n и p_k уравниваются. Замыкание цепи двигателя 3, приводящего во вращение компрессор, происходит тогда, когда

давление p_{Π} больше p_{κ} . При этом мембрана манометрического реле 2 прогибается влево. При замыкании и размыкании контактов частота вращения электродвигателя поддерживается такой, при которой обеспечивается равенство p_{Π} и p_{κ} .

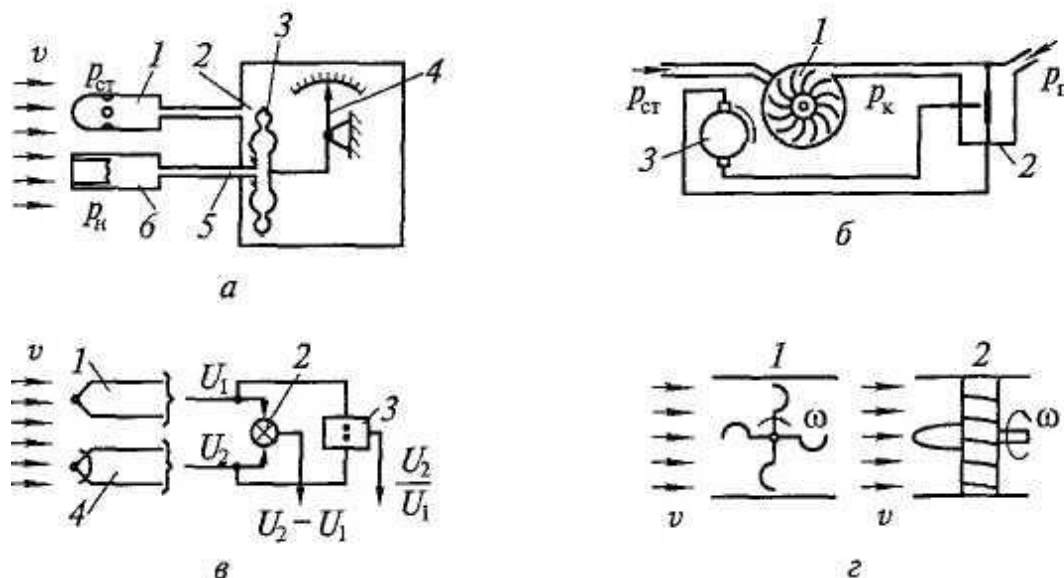


Рисунок 8.40 – Методы измерения и контроля линейных скоростей:
а – аэрометрический (1 – приемник статического давления; 2 – корпус;
3 – манометрическая коробка; 4 – стрелка; 5 – трубопроводы;
б – приемник полного давления); б – компенсационный (1 – воздушный компрессор; 2 – манометрическое реле; 3 – двигатель);
в – термодинамический (1 – открытая термопара; 2 – сумматор;
3 – делитель; 4 – экранированная термопара); г – турбинный
(1 – тангенциальная турбинка; 2 – аксиальная турбинка)

Термодинамический метод (рис. 8.40 в) основан на измерении температуры заторможенного потока воздушной среды с помощью открытой термопары 1 и экранированной термопары 4 (либо других преобразователей температуры). Разность сопротивлений этих термопар улавливается сумматором 2 и делителем 3. Для реализации этого метода необходимы малоинерционные измерители температуры. Погрешности средств измерений скоростей по этому методу обусловлены непостоянством параметров преобразователей температуры (1 и 4).

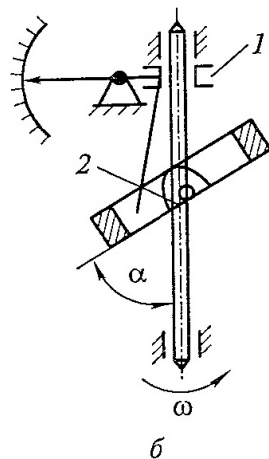
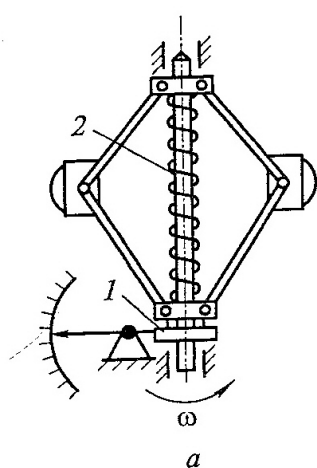
В турбинном методе (рис. 8.40 г) используется кинетическая энергия воздушного или водного потока для вращения тангенциальной 1 или аксиальной 2 турбинки. Частота вращения турбинки будет пропорциональна скорости движения. Средства измерений в виде аксиальной турбинки нашли широкое применение при измерении скорости морских кораблей [52–53].

8.4.1.2 Методы и средства измерения и контроля скоростей вращения

Методы и средства измерения и контроля скоростей вращения, нашедшие наиболее широкое распространение в технике: центробежные, магнитоиндукционные, электрические (постоянного и переменного тока), индукционные и стробоскопические [52–53].

Центробежный метод характерен тем, что чувствительный элемент реагирует на центробежную силу, развиваемую неуравновешенными массами вращающегося вала. Этот метод реализуется в коническом и кольцевом тахометрах.

В коническом тахометре (рис. 8.41 а) на шарнирах, вращающихся вместе с осью, установлены грузики m , которые под действием центро-



бежных сил расходятся, перемещая вдоль оси муфту 1 и сжимая пружину 2. Изменение положения муфты 1 регистрируется показывающим элементом тахометра – стрелкой. В кольцевом тахометре (рис. 8.41 б) при не вращающейся оси 2 ($\omega = 0$) плоскость кольца наклонена по отношению к оси на определенный угол. При вращении кольцо стремится занять положение, перпендикулярное оси вращения, и вызывает перемещение муфты 1 и стрелки отсчетного устройства.

Рисунок 8.41 – Центробежные тахометры:
а – конический (1 – муфта; 2 – пружина);
б – кольцевой (1 – муфта;
2 – не вращающаяся ось)

Центробежные тахометры нередко применяются в качестве преобразователей в регуляторах частоты вращения. Недостатком этих средств измерения является отсутствие дистанционности, значительные погрешности и технологические трудности в изготовлении и регулировании.

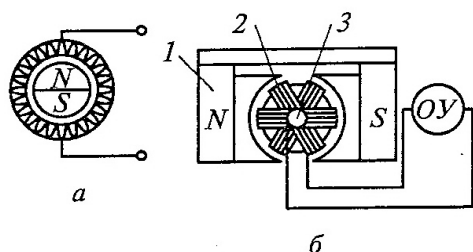
Магнитоиндукционный метод основан на зависимости наводимых в металлическом теле вихревых токов от частоты вращения.

Электрический метод измерения основан на зависимости генерируемого напряжения от частоты вращения (для постоянного, переменного и импульсного тока), а для переменного и импульсного тока – на зависимости частоты тока от частоты вращения.

Электрические тахометры постоянного тока (рисунок 8.42) включают в себя тахогенератор постоянного тока и гальванометр. Тахогенераторы бывают двух типов: с ограниченным и неограниченным углом поворота ротора.

Тахогенератор с ограниченным углом поворота ротора (см. рис. 8.42 а) выполняется с неподвижной статорной обмоткой, внутри которой помещается постоянный магнит, связанный с валом, скорость вращения которого измеряется. Такие тахогенераторы применяются в качестве преобразователей угловой скорости и скоростной обратной связи в системах управления. Достоинство такого тахогенератора – отсутствие коллектора и щеток.

Основными элементами тахогенератора с неограниченным углом поворота (см. рис. 8.42 б) являются постоянный магнит 1 с соответствующими магнитопроводами,



1 – постоянный магнит; 2 – обмотка якоря;
3 – коллектор, со щетками;

Рисунок 8.42 – Схемы электрических тахометров постоянного тока:

а – тахогенератора с $\varphi \leq \varphi_0$;

б – тахогенератора постоянного тока;

ОУ – отсчетное устройство

Первый способ более предпочтителен, так как частота вращения равна частоте переменного тока.

Стробоскопический метод измерения угловой скорости основан на свойстве глаза сохранять видимое изображение на десятые доли секунды после его исчезновения. Средства измерения, построенные по этому принципу, являются наиболее точными из рассмотренных выше. Они нашли применение в лабораторных исследованиях, а также при создании образцовых средств из-

меряющих магнитопроводами, обмотка якоря 2 и коллектор со щетками 3. Снимаемое с коллектора напряжение постоянного тока измеряется гальванометром.

В тахометрах переменного тока тахогенератор состоит из вращающегося постоянного магнита и статорной обмотки. Измерение угловой скорости ω сводится к измерению частоты переменного тока, равной частоте вращения или к измерению амплитуды напряжения.

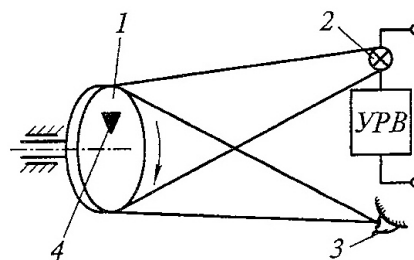


Рисунок 8.43 – Схема стробоскопического тахометра:

1 – вращающийся вал; 2 – источник света; 3 – глаз оператора;
4 – отметка; УРВ – устройство регулирования вспышки

мерений. Принцип реализации эффекта поясняет рисунок 8.43. Если отметку 4 на вращающемся валу 1 освещать вспышками света от источника 2, то при совпадении числа вспышек с частотой вращения отметка будет казаться неподвижной. Если эта разность будет отлична от нуля, то отметка начнет вращаться со скоростью в ту или иную сторону в зависимости от знака разности частоты вращения и числа вспышек. Поскольку глаз оператора 3 замечает очень медленное движение отметки, то, подбирая частоту вспышки посредством устройства регулирования вспышки *УРВ*, можно остановить отметку и определить частоту вращения вала.

Точность измерения определяется точностью воспроизведения и измерения частоты вспышек, точностью регистрации моментов остановки стробоскопической картины.

8.4.1.3 Методы и средства измерения ускорений

Ускорения измеряются в метрах на секунду в квадрате (м/с^2). В качестве единицы измерения ускорения часто применяют величину, связанную с ускорением земного притяжения – g . Например, ускорение, равное $0,1g$; $10g$ и т. д. Ускорения могут быть линейными и угловыми. Средства измерения ускорений называются акселерометрами.

Для измерения линейных ускорений применяются инерциальный метод, метод дифференцирования скорости и метод двукратного дифференцирования расстояния до неподвижной базы.

Инерциальный метод основан на измерении силы, развиваемой инерционной массой при ее движении с ускорением. Принцип действия средств измерений, реализующий инерциальный метод, состоит в следующем (рис. 8.44 а). Инерционная масса 7, связанная с корпусом прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 5, может перемещаться в направлении оси 7, называемой осью чувствительности. Перемещение инерционной массы, пропорциональное измеряемому ускорению, преобразуется посредством резистивных, индуктивных или емкостных преобразователей 6 в электрический сигнал, который после усиления в усилителе поступает на электромагнит 3. Последний создает усилие F , уравнивающее инерционную силу, т. е. $F = ma_x$, где a_x – ускорение.

Методы одно- или двукратного дифференцирования сводятся соответственно к дифференцированию измеренных скорости или расстояния до неподвижной базы.

Требования к точности измерения ускорений определяются областью применения. Так, в инерциальных системах погрешности не должны превышать $\pm 0,001$ %. При применении акселерометров в системах

управления погрешности могут составлять $\pm(1...2) \%$. Погрешности средств измерения ускорений в машинах могут достигать $\pm 4 \%$.

Рассмотрим некоторые возможные схемы акселерометров (рис. 8.44 б, в, г).

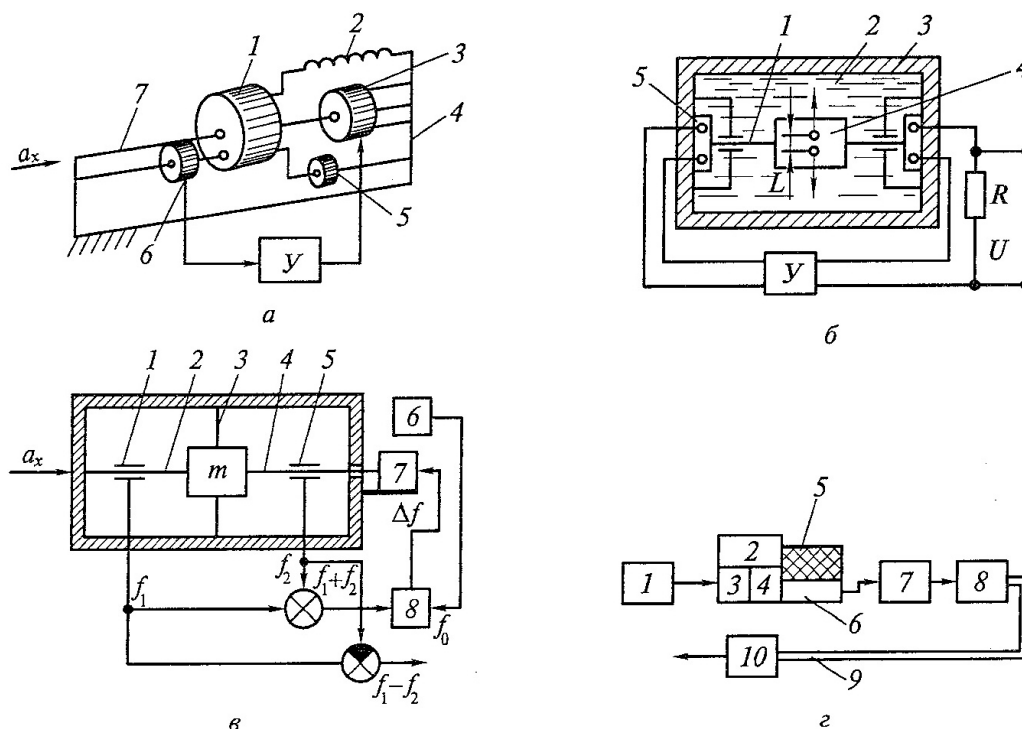


Рисунок 8.44 – Средства измерения ускорений:

а – схема акселерометра (1 – инерционная масса; 2 – пружина; 3 – электромагнит; 4 – корпус прибора; 5 – демпфер; 6 – преобразователь; 7 – ось; У – усилитель); б – схема маятникового акселерометра (1 – подвеска; 2 – жидкость; 3 – корпус; 4 – чувствительный элемент; 5 – преобразователь; У – усилитель); в – схема струнного акселерометра (7 и 5 – струнный преобразователь; 2 и 4 – струна; 3 – упругий подвес; 6 – генератор; 7 – механизм натяжения струн; 8 – регулирующее устройство); г – схема акселерометра с волоконно-оптическим преобразователем (1 – источник света; 2 – акселерометр; 3 и 8 – линза; 4 – поляризатор; 5 – фотоупругий материал; 6 – четвертьволновая пластина; 7 – анализатор; 9 – волоконный светопровод; 10 – приемник излучения – фотодиод)

Основными элементами акселерометров являются подвесы инерционных масс, преобразователи сигналов, моментные (силовые) устройства, усилители сигналов и корректирующие устройства (демпферы).

Для уменьшения потерь в осях подвеса, обеспечения линейной зависимости между отклонениями массы и измеряемым ускорением подвес помещают в жидкость с удельным весом, равным удельному весу чувствительного элемента, либо устанавливают его на воздушной подушке, на струнах. Применяют также электромагнитные и криогенные подвесы.

В качестве преобразователей сигналов применяются емкостные, индуктивные, фотоэлектрические, струнные и др. Основные требования к ним: большая разрешающая способность, линейная зависимость выхода от входа, отсутствие реакции преобразователя на чувствительный элемент.

Моментными (силовыми) устройствами для ввода сигналов обратной связи являются моментные двигатели (электродвигатели, работающие в заторможенном режиме) и электромагниты.

В маятниковых акселерометрах (см. рис. 8.44 б) чувствительный элемент 4 находится в жидкости 2, заключенной в корпусе 3. Температура жидкости поддерживается с точностью до $0,01^\circ\text{C}$, что позволяет устранить ее конвективные движения. Сигнал с чувствительного элемента снимается преобразователем 5 и подается на усилитель У. С выхода усилителя сигнал поступает на моментный двигатель, развивающий момент, зависящий от ускорения.

В акселерометрах со струнными преобразователями 1 и 5 (см. рис. 8.44 в) смещение массы m меняет упругие свойства струн 2 и 4, натянутых в направлении оси чувствительности. Упругий подвес 3 исключает движение массы m в поперечном направлении. Сумма частот колебаний струн 2 и 4 ($f_1 + f_2$) поддерживается постоянной посредством регулирующего устройства 8, для чего она сравнивается с эталонной частотой f_0 , вырабатываемой генератором 6. Разность $\Delta f = (f_1 + f_2) - f_0$ используется для управления механизмом 7 натяжения струн. При поддержании значения $(f_1 + f_2)$ постоянным получается линейная зависимость между измеряемым ускорением a_x и разностью частот Δf .

Струнные акселерометры находят применение в инерциальных системах управления. При диапазоне измерения ускорений до 20 g погрешность не превышает $\pm 0,004\%$.

Акселерометр с волоконно-оптическим измерительным преобразователем основан на эффекте фотоупругости. Некоторые материалы (эпоксидная смола, нитрат лития и др.) меняют свои оптические свойства при их деформировании. На этой основе создан целый ряд средств измерения, в которых сила преобразуется в деформацию. На рисунке 8.44 г источник света 1 (например, полупроводниковый лазер), проходя через линзу 3 и поляризатор 4, поступает на стержень из фотоупругого материала 5, изменяющий свое напряженное состояние в зависимости от ускорения груза акселерометра 2. Преобразуя полученный сигнал с помощью четвертьволновой пластины 6, анализатора 7 и линзы

8, он поступает по волоконному светопроводу 9 на приемник излучения (фотодиод) 10. В результате определяется величина ускорения с достаточно высокой точностью. Так, при массе груза 25 г чувствительность рассмотренного акселерометра составляет 0,01g [52–53].

8.4.1.4 Методы и средства измерения вибраций

При измерении вибраций всегда участвуют три элемента: вибрирующее звено, исходное (невибрирующее) звено и устройство для измерения движения вибрирующего звена относительно невибрирующего. Средство измерения вибраций носит название виброметр (рис. 8.45 а).

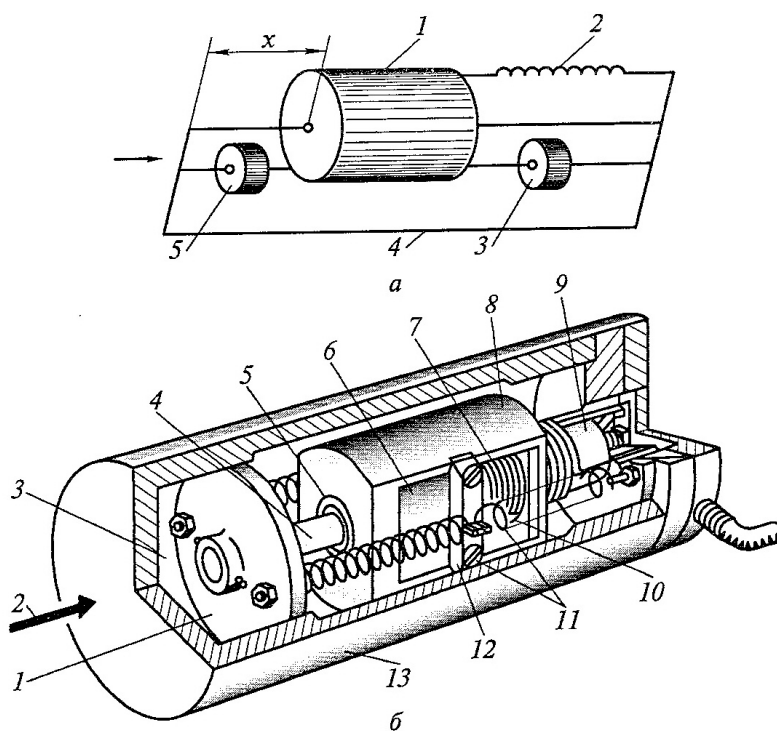


Рисунок 8.45 – Средства измерения вибраций:

- а – конструкция виброметра (1 – масса; 2 – пружина; 5 – демпфер; 4 – основание прибора; 5 – преобразователь); б – конструкция электромагнитного линейного виброметра (1 – направляющий диск; 2 – ось чувствительности; 3 – жидкость; 4 – опорный стержень; 5 – втулка; 6 – постоянный магнит; 7 – обмотка; 8 – сейсмический элемент; 9 – каркас катушки; 10 – паз; 11 – воздушный зазор; 12 – пружинный мост; 13 – корпус прибора)

Обычно исходное (невибрирующее) звено создается с помощью массы, которая может перемещаться вдоль (или вокруг) оси вибраций.

Масса 1 связывается с основанием прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 3. Преобразователь 5 выдает сигнал смещения корпуса относительно массы 1 в зависимости от параметров массы 1, пружины 2 и демпфера 3. Сигнал может быть пропорциональным относительному перемещению массы 1 и основания прибора 4, относительной скорости или ускорению. Масса 1 виброметра носит название сейсмического элемента, а система, образующаяся из массы 1, пружины 2 и демпфера 3 – сейсмической системы [52–53].

Рассмотрим конструктивные схемы некоторых типов виброметров. Применяемые в настоящее время виброметры имеют электрический выход. В качестве преобразователей перемещения в электрический сигнал используют резисторные, индуктивные, емкостные, электромагнитные, микросинные и др.

На рисунке 8.45 б представлена конструкция электромагнитного линейного виброметра с направляющей опорой для сейсмического элемента. Сейсмический элемент 8 установлен на опорном стержне 4 в вязкой жидкости 3. Направляющий диск 1 втулки 5 с малым трением позволяют перемещаться сейсмическому элементу вдоль оси чувствительности 2. Величина перемещения (вибрации) определяется наведением токов в обмотке 7, постоянным магнитом 6, закрепленным в сейсмическом элементе 8.

8.4.2 Методы и средства измерения и контроля динамических величин

К динамическим величинам можно отнести следующие: массу, силу, давление, механическое напряжение, момент силы (крутящий момент), массовый расход вещества, работу, энергию, мощность [52–53].

Для измерения массы тела (вещества) применяются весоизмерительные средства, которые кратко называются весами.

По назначению весоизмерительные и весодозирующие устройства можно разделить на следующие шесть групп (рис. 8.46).

Весы первой группы изготавливают с коромыслами шкального типа, циферблатными квадрантными указателями, цифропоказывающими и печатающими указательными приборами и пультами.

В зависимости от принципа действия весы подразделяют на механические, электромеханические, оптико-механические и радиоизотопные (рис. 8.47).

Наиболее широко распространены весы рычажные. Они основаны на принципе сравнения масс, и их показания не зависят от местного ускорения свободного падения. Сравнение масс производится при помощи рычагов (рычажной системы) и чашек весов.

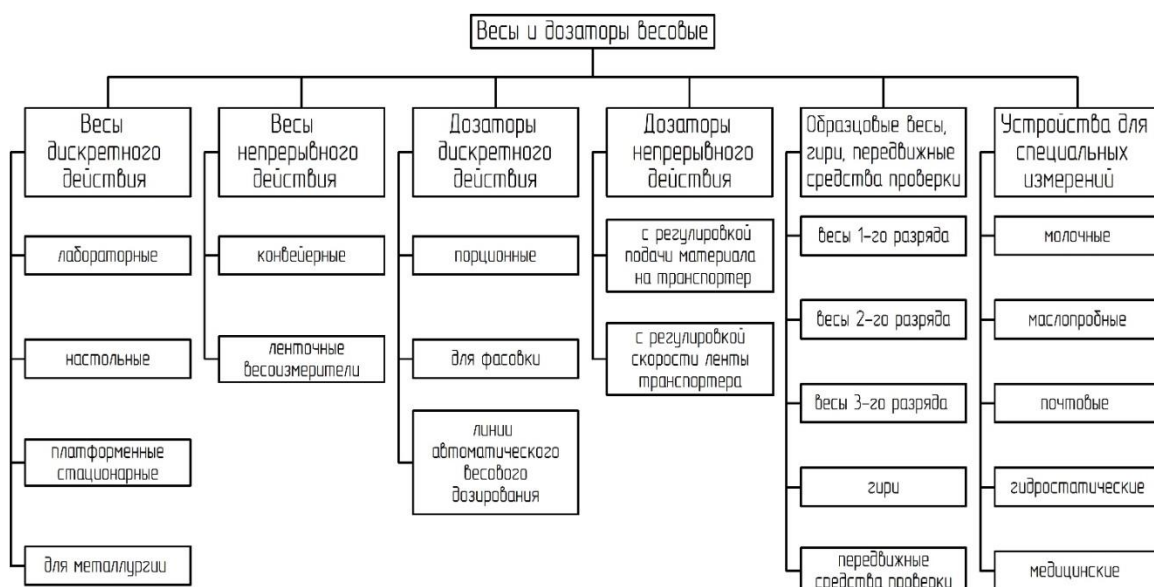


Рисунок 8.46 – Классификация весоизмерительных и весодозирующих устройств

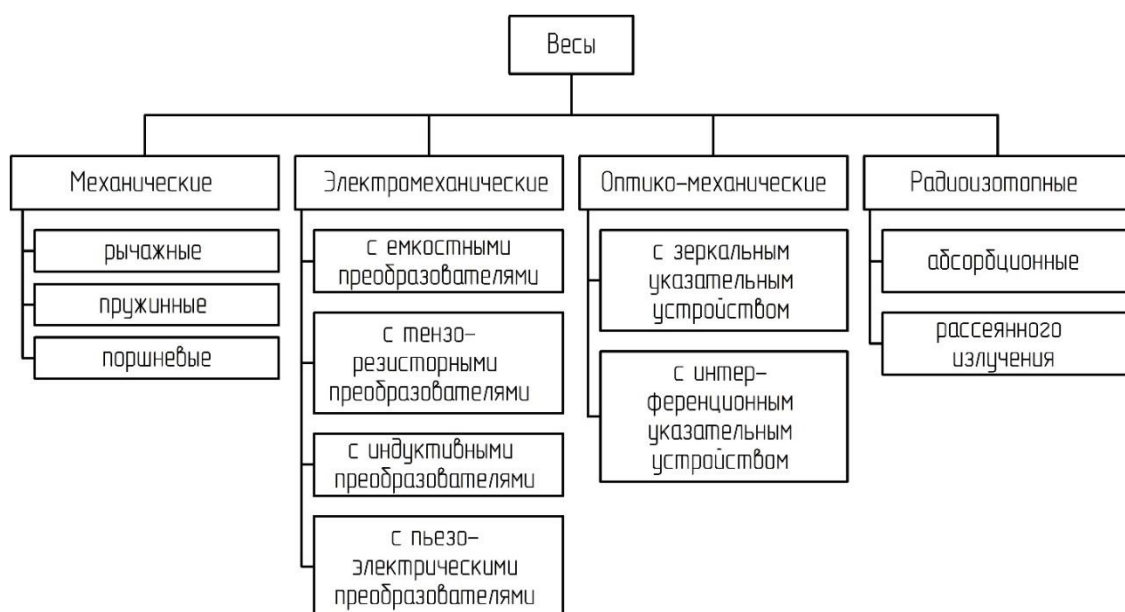


Рисунок 8.47 – Классификация весов по принципу действия

Особое место занимают способы взвешивания с применением в качестве силоизмерителя тензорезисторных и вибростержневых преобразователей. Применение этих преобразователей во многих случаях позволяет избавиться от недостатков рычажных систем и, следовательно, повысить точность измерения, снизить металлоемкость весов, сократить время взвешивания. Получение выходных электрических сигналов предопределяет автоматизацию процесса взвешивания, позволяет ввести этот процесс в автоматизированную систему управления. Применение встроенных тензорезисторных преобразователей в различные

подъемные и транспортирующие устройства позволяет сократить производственный цикл путем совмещения операций подъема (перемещения) и взвешивания.

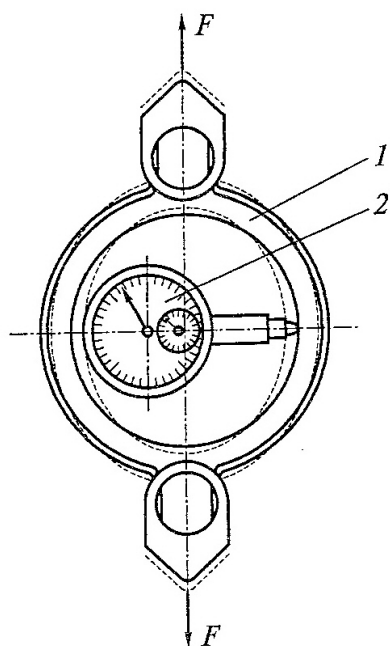


Рисунок 8.48 – Конструкция динамометра с упругим элементом:

- 1 – упругий элемент;
- 2 – стрелочный указатель

Близкими по назначению являются средства измерения крутящих моментов, называемые моментометрами (торсиометрами).

Для измерения и контроля давления используют различного типа манометры, вакуумметры, барометры.

Рассмотрим основные методы и средства измерения сил и крутящих моментов.

Динамометры. Принцип действия динамометров основан на использовании деформации упругих тел под действием силы, пьезоэффекта, тензоэффекта, магнитоупругости материалов и др.

Динамометры можно классифицировать по принципу действия на механические, гидравлические и электрические.

В качестве материалов для изготовления упругих элементов используют безгистерезисные металлы и неметаллы (например, кварцевое стекло, синтетические материалы).

В качестве примера механических *динамометров* с упругим элементом (рис. 8.48) рассмотрим конструкцию средства измерения силы тяги транспортных средств, усилий свинчивания резьбовых деталей и т. п. Здесь деформация упругого элемента 1 воспринимается стрелочным указателем 2. Малые значения деформаций упругого элемента под

Однозначной мерой, воспроизводящей единицу массы, кратное или дольное ее значение, является гиря. Государственный первичный эталон единицы массы предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы массы вторичным эталонам.

Рабочие эталоны массы изготавливают в виде отдельных гирь и в виде гирь от 1 мг до 10 кг. В качестве материала для гирь служат платина, золото, никель, бронза или кварц.

В зависимости от назначения гири подразделяют на гири общего назначения, образцовые, условные, каратные, а также встраиваемые в рычажные механизмы различных типов весов.

Средства измерения, предназначенные для измерения сил, называются *динамометрами* (силомерами).

действием сил F преобразуются в значительные перемещения стрелки или пера самопишущего устройства.

Гидравлические динамометры представляют собой устройства, трансформирующие приложенное усилие в гидравлическое давление, измеряемое тем или иным способом.

На рисунке 8.49 представлена конструкция гидравлического силоизмерителя (месдозы). Сила, воспринимаемая поршнем 2, через мембраны 1 и 3 трансформируется в давление, измеряемое манометром 6.

Механические и гидравлические динамометры отличаются высокой надежностью и простотой конструкции. Они могут работать при отсутствии источников энергии, что делает их удобными для эксплуатации в полевых условиях.

К недостаткам относятся: отсутствие возможности использования дистанционной индикации и регистрации показаний, относительно невысокая точность измерения 0,5...2 %, трудности измерения малых сил.

Наибольшее распространение получили электрические динамометры. В них используют измерительные преобразователи различных типов.

На рисунке 8.50 представлены схемы различных типов динамометров, в которых в качестве преобразователя в электрический сигнал применяются устройства с электрически неактивными упругими элементами (см. рис. 8.50 а–з), электрически активными упругими элементами (см. рис. 8.50 и–л), силовым уравниванием (см. рис. 8.50 м).

В первой группе схем измеряемая сила сравнивается с силой упругости элемента, а его деформация преобразуется в электрический сигнал. К преобразователям этой группы относят контактный, угольный резонансный, индуктивный емкостный, полупроводниковый и металлический.

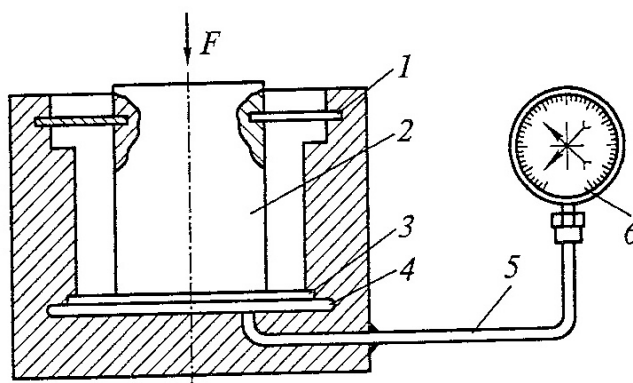


Рисунок 8.49 – Конструкция гидравлического силоизмерителя (месдозы):

1 и 3 – мембрана; 2 – поршень;
4 – полость; 5 – трубопровод;
6 – манометр

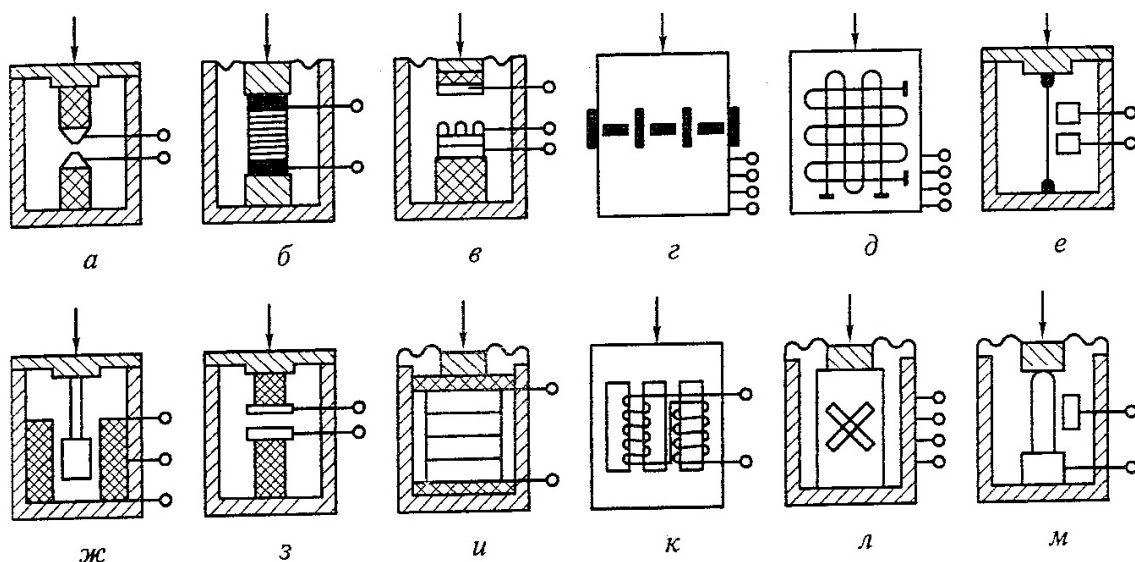


Рисунок 8.50 – Схемы электрических динамометров:

а – контактный; б – угольный; в, г – полупроводниковые;
 д – металлический; е – резонансный; ж – индуктивный; з – емкостный;
 и – пьезоэлектрический; к, л – магнитоупругие;
 м – с силовым уравниванием

Во второй группе динамометров измеряемая сила действует на электрические или магнитно-активные упругие элементы, которые меняют свои электрические или магнитные свойства при изменении напряжения или деформации. Это наиболее распространенная группа.

Для измерения массы, усилия, напряжения в большинстве случаев этой группы динамометров применяют тензометрические (резисторные) и магнитоупругие (магнитоизотропные) преобразователи.

Принцип работы таких преобразователей основан на преобразовании усилия в упругую деформацию какого-либо элемента, воспринимающего силовой параметр, и вторичном преобразовании напряженного состояния этого элемента в электрическую величину, которую можно непосредственно измерить. Используют упругие элементы, работающие на сжатие, растяжение, реже на изгиб.

Чувствительным элементом тензорезистора (тензодатчика) является металлический проводник, наклеенный на массивную деталь, подвергающуюся механической деформации. По изменению сопротивления тензорезистора в зависимости от прикладываемого усилия судят об измеряемом параметре.

Наиболее подходящими материалами тензорезисторов являются сплавы константан, манганин, нихром, хромель, имеющие малый температурный коэффициент сопротивления. На практике находят применение проволочные, фольговые, пленочные, металлические преобразователи, а также преобразователи из монокристаллов полупроводников кремния, германия, арсенида галлия и др.

Ценным свойством полупроводниковых преобразователей является большое значение коэффициента тензочувствительности (от -200 до $+850$ °С) при малых базах (до 2,5 мм).

Тензорезисторы являются преобразователями разового действия, так как они наклеиваются на деталь и не могут быть сняты без повреждения.

Простота конструкции и малые габаритные размеры тензорезисторов позволяют их использовать в труднодоступных местах различных машин и механизмов для определения деформаций.

Принцип действия магнитно-анизотропных преобразователей основан на изменении магнитных свойств (магнитной анизотропии) ферромагнитных материалов при их деформации под воздействием механических усилий. Этими свойствами обладают сплавы железа с алюминием, кобальтом, хромом и никелем.

Использование пьезоэлектрических преобразователей в пьезоэлектрических динамометрах не требует наличия упругих элементов в конструкции устройств. Измеряемое усилие непосредственно воспринимается пьезоэлектрическим элементом, выполненным в виде плоских пластин (рис. 8.51 а). Особенность этого типа динамометров – невозможность измерения статических и медленноменяющихся сил. Вследствие этого пьезометрические динамометры получили ограниченное распространение.

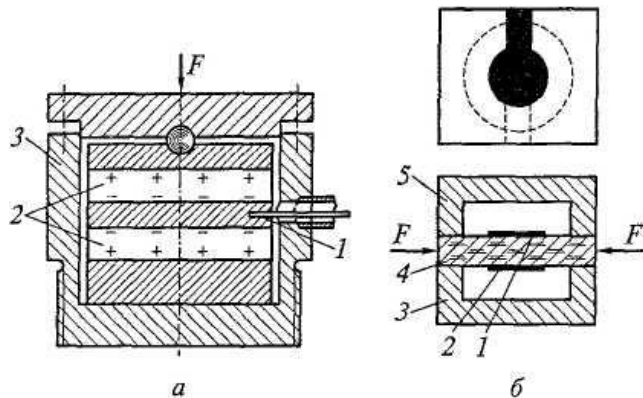


Рисунок 8.51 – Пьезоэлектрические динамометры:

а – схема преобразователя типа ДТ (1 – выводной электрод; 2 – кварцевые пластины; 3 – корпус); б – конструкция пьезоэлектрического частотного динамометра (1 и 2 – металлизированная обкладка; 3 и 5 – обойма; 4 – резонатор)

резонатор 4 в виде кварцевой пластины с металлизированными обкладками 1 и 2, зажатый по периметру между обоймами 3 и 5. При приложе-

Частотные динамометры и тензометры в последние годы получают все более широкое распространение, особенно в связи с внедрением в практику измерений ЭВМ, и в первую очередь микропроцессоров.

В частотных динамометрах получили распространение механические резонаторы, выполненные в виде струны, стержня, пластины или цилиндрического элемента.

На рисунке 8.51 б показана конструкция пьезоэлектрического частотного динамометра. Он содержит

нии усилия F вдоль блока изменяется толщина пластины, что приводит к изменению ее резонансной частоты.

Динамометры и тензометры с частотным выходом подключаются к вторичным приборам, в которых используются цифровые частотомеры и пересчетные устройства.

В третьей группе динамометров (см. рис. 8.50 м) измеряемая сила уравнивается электромагнитной или электростатической силой, формируемой на основе сигнала, пропорционального измеряемой силе. В этих приборах достигается полное уравнивание и упругий элемент практически не деформируется. Они применяются для измерения малых и средних сил с погрешностью измерения 0,025...0,06 %.

Моментомеры. Принцип действия моментометров основан на измерении деформации кручения вала, передающего крутящий момент. Моментомеры можно классифицировать на группы: с предварительным преобразованием в угловое перемещение, с непосредственным преобразованием. Деформацию можно измерять посредством тензорезисторного, индуктивного, магнитоупругого, струнного и других преобразователей. Диапазон измерения моментов для тензорезисторного и магнитоупругих моментометров находится в пределах $10...10^3$ Нм, для струнных – $0...5 \cdot 10$ Нм, для индуктивных – $10^{-1}...10^{-5}$ Нм с погрешностью измерений 0,2...1 %.

8.4.3 Методы и средства измерения и контроля механических свойств веществ и материалов

Качество изделий во многом определяется механическими свойствами материалов, из которых они изготавливаются. Основными из них являются удельный вес, плотность, вязкость, твердость, упругость, прочность, жесткость и т. п. [52–53].

Механические испытания металлов. Различают следующие виды испытаний механических свойств:

- статические (характеризуются плавным и медленным приложением нагрузки к испытываемому образцу, что позволяет измерять усилия и деформации в любой момент испытания);
- динамические (характеризуются резким изменением величины усилий, действующих на образец, что позволяет определять вязкость или хрупкость материала);
- испытания на усталость или выносливость (характеризуются многократными повторными или знакопеременными нагрузками, прикладываемыми к образцу);
- испытания на твердость (характеризуются проникновением более твердого тела в поверхность испытываемого тела);

– испытания на износ и истирание (закljučаются в определении изменений механических свойств материалов на их поверхности после длительного воздействия сил трения);

– технологические испытания (применяются при установлении пригодности материала для того или иного технологического процесса, а также позволяют судить о некоторых свойствах материала, например, пластичности).

Статические испытания на растяжение производят на специальных испытательных машинах, на которых образец круглого или прямоугольного сечения подвергается растяжению.

На кручение испытываются, как правило, цилиндрические образцы сплошного круглого, реже трубчатого, сечения, иногда для специальных целей – квадратного или иной формы сечения.

Кручение осуществляется на машинах с механическим приводом, преимущественно с горизонтальным расположением образца, имеющих предельный крутящий момент 200 Н·м; 500 Н·м и др.

Динамические испытания – это такие испытания, в которых нагрузка прикладывается ударом с большой скоростью. Скорость приложения нагрузки при этих испытаниях значительно выше, чем при статических испытаниях. Увеличение скорости приложения нагрузки в пластической области ведет к увеличению сопротивления материала пластической деформации.

Для оценки сопротивляемости материалов действию динамических нагрузок проводят испытания на ударный изгиб с помощью маятникового копра.

В процессе испытаний на усталость определяют предел усталости – наибольшее напряжение при котором образец не разрушается при заданном числе перемен нагрузки.

Испытание на твердость. Наиболее применимы стандартные методы определения твердости металлов при статической нагрузке: стальным шариком (по Бринеллю), алмазным конусом (по Роквеллу) и алмазной пирамидой (по Виккерсу).

Метод определения твердости стальным шариком (по Бринеллю) (рис. 8.52 а) заключается во вдавливании на глубину t стального закаленного шарика определенного диаметра в испытуемый образец под действием заданной нагрузки в течение определенного времени (ГОСТ 9012).

Конструкция универсального прибора ТПШО для определения твердости по Бринеллю и Виккерсу представлена на рисунке 8.52 б. Шарик, установленный в головке для индентора 1, с помощью нагружающей системы 2 вдавливается в образец 4. Измерение отпечатка выполняется оптической головкой 5.

Число единиц твердости HB определяется как среднее давление, выраженное в ньютонах на квадратный метр, вычисляется по следующей формуле:

$$HB = P/S = P/\pi Dt$$

где P – сила вдавливания, Н, нормальная к поверхности AB , установленная в соответствии со стандартом; S – площадь шаровой поверхности отпечатка шарика, m^2

На практике пользуются специальными таблицами, где подсчитаны значения HB для отпечатков, имеющих различные диаметры и полученных при нормированных нагрузках.

Испытание металлов твердостью выше $HB\ 450$ этим методом не производится, так как значительно увеличивается погрешность.

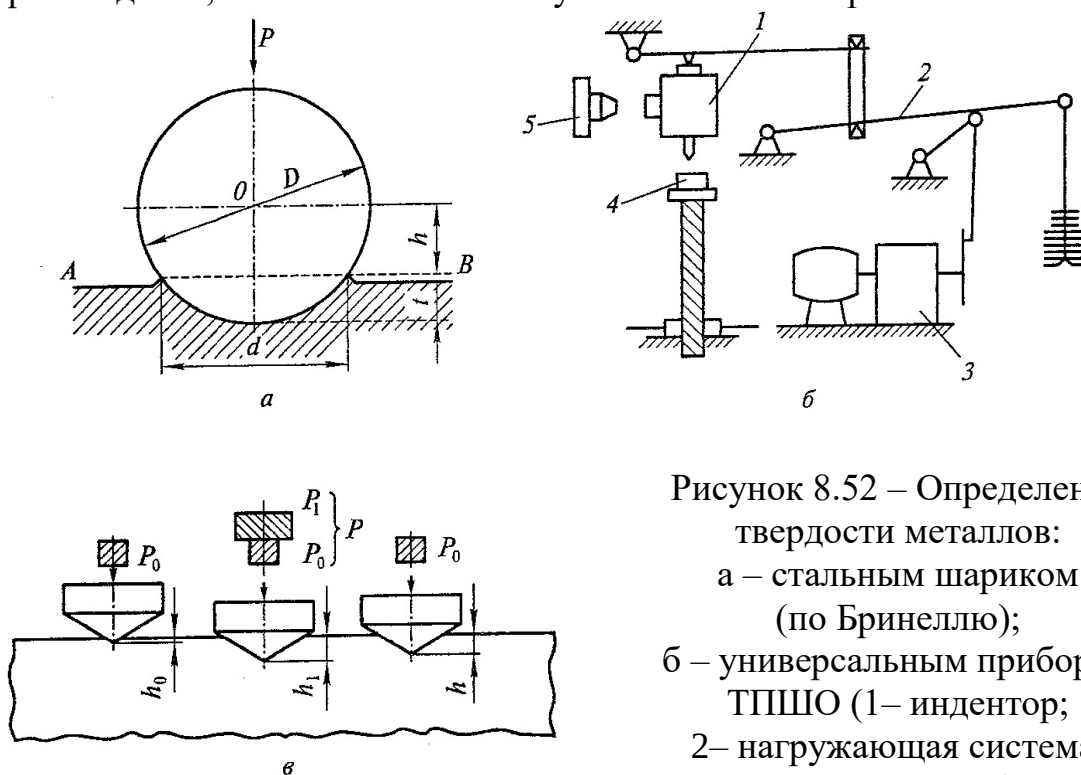


Рисунок 8.52 – Определение твердости металлов:

а – стальным шариком (по Бринеллю);

б – универсальным прибором ТПШО (1 – индентор;

2 – нагружающая система;

3 – редуктор; 4 – образец;

5 – оптическая головка);

в – алмазным конусом (по Роквеллу)

Метод определения твердости алмазным конусом (по Роквеллу) (рис. 8.52 в) применяется для изделий из низкоотпущенной закаленной стали или твердых сплавов в соответствии с ГОСТ 9013. Алмазный конус с углом 120° имеет у вершины закругление радиусом $\rho = (0,2 \pm 0,005)$ мм.

Определение твердости производится вдавливанием в испытуемый образец алмазного конуса под действием двух последовательно

прилагаемых нагрузок: предварительной в 100 Н и общей в 600 или 1500 Н.

Алмазный конус сначала получает предварительную нагрузку (P_0), в результате которой конус вдавливается в испытуемый материал на незначительную глубину. Далее нагрузка увеличивается до величины $P = P_0 + P_1$, где P_1 – основная нагрузка.

Общая нагрузка P равна 600 Н (шкала А), 1000 Н (шкала В) или 1500 Н (шкала С). Под действием общей нагрузки P конус вдавливается на глубину h_1 . Затем основная нагрузка P_1 снимается, но остается предварительная P_0 . Глубина вдавливания h характеризует твердость испытуемого материала (HR).

При измерении по шкалам А и С

$$HR = 100 - e.$$

При измерении по шкале В

$$HR = 130 - e,$$

где $e = (h - h_0)/0,002$.

Число твердости обозначается через HR с добавлением обозначения шкалы (В, С, А), по которой производилось испытание.

Например:

HRB – испытание шариком с нагрузкой 1000 Н;

HRC – испытание алмазным конусом при нагрузке 1500 Н;

HRA – испытание алмазным конусом при нагрузке 600 Н.

Пределы измерения твердости по указанным шкалам устанавливаются в соответствии с таблицей 8.3.

Метод определения твердости алмазной пирамидой (по Виккерсу, ГОСТ 2999) предполагает вдавливание в испытуемый материал правильной четырехгранной пирамиды стандартного размера, имеющей квадратное основание и угол $136^\circ \pm 30'$ у вершины. Вдавливание производится под действием нагрузки в 50, 100, 200, 300, 500, 1000 Н.

Измерив отпечаток алмазной пирамиды по длине диагонали квадрата, определяют число единиц твердости:

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

где P – величина нагрузки на пирамиду, Н; d – среднее арифметическое обеих диагоналей отпечатка, м.

Полученное число твердости HV обозначается с индексами нагрузки и времени ее приложения. Например: $HV 100/30 - 500$ означает

число твердости «500», полученное при испытании нагрузкой 100 Н, приложенной в течение 30 с.

Числа твердости HV практически совпадают с числами твердости HB до значений 450.

Определение микротвердости выполняют для мелких деталей, тонких металлических лент, отдельных структурных составляющих сплавов, тонких поверхностных слоев, т. е. определяют твердость небольших объемов.

Таблица 8.3 – Соответствие единиц твердости по шкалам *B, C, A*

Обозначения		Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу	Приближенные значения чисел твердости в единицах по Виккерсу
шкалы	числа твердости		
<i>B</i>	<i>HRB</i>	25...100	60...228
<i>C</i>	<i>HRC</i>	25...670	228...900
<i>A</i>	<i>HRA</i>	70... 850	390...1170

Для измерения микротвердости применяются микротвердомеры, построенные по принципу объединения устройства для нагружения алмазной пирамиды и микроскопа, чтобы определить размер диагоналей отпечатка.

На рисунке 8.53 показан микротвердомер ПМТ-3. Прибор состоит из массивного основания 1 с вертикальной стойкой 3, по которой перемещается измерительный микроскоп 8 с окулярным микрометром 7, объективом 9, осветителем и нагружающим механизмом 2.

Микроскоп снабжен винтами для грубой настройки 6 и тонкой настройки 5 на фокусное расстояние. Цена деления микровинта тонкой настройки 5 составляет 0,002 мм.

Испытуемый образец устанавливается на предметный столик 11, который имеет возможность независимого перемещения в двух направлениях: координатном (с помощью двух микрометрических винтов) и круговом (на шариках) на 180°. Координатное перемещение предметного столика позволяет выполнить вдавливание алмазной пирамиды 10 в любой точке образца. Круговым перемещением столика образец с нанесенным на него отпечатком подводится под объектив измерительного микроскопа.

Нагружающий механизм 2 имеет стержень 12 с алмазной пирамидой 10. Рабочая нагрузка создается гирями в виде шайб с вырезами, которые устанавливаются на стержень 12. Подъем и опускание стержня 12 с алмазной пирамидой 10 для получения отпечатка производится рукояткой 13. Нагрузка прилагается равномерным поворотом рукоятки 13. Полная нагрузка выдерживается в пределах 10 с и затем плавно снимается.

Число единиц твердости определяется по той же формуле, что и при испытании твердости алмазной пирамидой по Виккерсу.

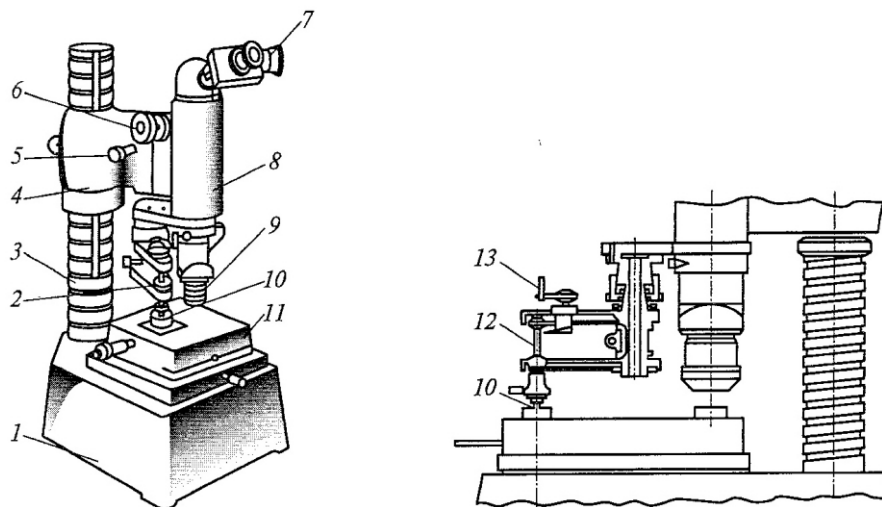


Рисунок 8.53 – Микротвердомер ПМТ-3:

- 1 – основание; 2 – нагружающий механизм; 3 – стойка; 4 – кулиса;
 5 – винт для тонкой настройки; 6 – винт для грубой настройки;
 7 – окулярный микрометр; 8 – измерительный микроскоп;
 9 – объектив; 10 – алмазная пирамида; 11 – предметный столик;
 12 – стержень; 13 – рукоятка

Метод измерения твердости по Шору регламентирован ГОСТ 23273. Это – основной метод определения твердости поверхности прокатных валков при их изготовлении, поставке на металлургическое предприятие, а также в процессе эксплуатации валков на прокатных станах. При измерении твердости по Шору боек определенной массы с алмазным индентором на конце свободно падает по вертикали с определенной высоты $h = 19,0 \pm 0,5$ мм на испытуемую поверхность. Индентор представляет собой алмазный наконечник в виде тела вращения с радиусом закруглений рабочего конца $R = 1,0 \pm 0,1$ мм. Масса бойка вместе с алмазным индентором составляет 36,0 г. За характеристику твердости принимается высота отскока бойка h . За 100 единиц твердости по Шору принимается определенная величина отскока бойка $h_{100} = 13,6 \pm 0,5$ мм. Такая твердость соответствует максимальной твердости стабилизированной после закалки на мартенсит углеродистой эвтектоидной инструментальной стали по ГОСТ 1435. Согласно стандарту, твердость по Шору измеряют в диапазоне от 20 до 140 единиц (*HSD*). Число твердости по Шору обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, со стоящим после них символом *HSD*, например, 95 *HSD*. Число твердости указывается с округлением до целого числа.

Измерение плотности. Приборы для измерения плотности жидких и сыпучих тел по принципу действия делятся на поплавковые, весовые, манометрические, звуковые и радиоизотопные.

Рассмотрим поплавковый плотномер (ареометр). В нем используется принцип плавающего поплавка. Схема плотномера, работающего по этому принципу, изображена на рисунке 8.54 а. Жидкость по трубе 10 поступает в переливной сосуд 9, обеспечивающий постоянство напора. Далее по трубе 8 жидкость поступает в измерительную камеру 4, снабженную переливным устройством. Избыточная жидкость стекает по трубе 7. Измерение плотности жидкости вызывает перемещение по вертикали поплавок 5 и связанного с ним сердечника. Это перемещение измеряется с помощью индуктивного преобразователя 6, включенного в схему моста 1, и регистрируется на показывающем устройстве 2. Компенсация влияния температуры осуществляется терморезистором 3, включенным в измерительную схему моста. Наибольший ход поплавок – 200 мм.

Весовые, или пикнометрические, методы основаны на том, что масса жидкости при неизменном ее объеме прямо пропорциональна плотности. Следовательно, при непрерывном взвешивании некоторого постоянного объема вещества, протекающего по трубопроводу, можно измерять его плотность.

На рисунке 8.54 б представлена схема весового плотномера. Чувствительным элементом прибора является U-образная трубка, масса которой вместе с протекающей через нее жидкостью непрерывно измеряется. Масса трубки 1 с жидкостью передается на заслонку 2, прикрывающую сопло 3, и через пневмоусилитель 4 в виде унифицированного пневматического сигнала на прибор. При изменении плотности жидкости, протекающей по трубке, масса ее меняется и заслонка 2 приближается или отходит от сопла 3. В соответствии с изменением плотности измеряемой жидкости изменяется и давление воздуха на выходе пневмоусилителя 4. С помощью сильфона 5 осуществляется обратная связь и восстанавливается равновесие в системе, соответствующее измеряемой плотности жидкости.

Весовые плотномеры применяются для измерения плотности вязких жидкостей, суспензий и жидкостей, содержащих твердые включения. Возможно измерение и плотности газов.

Манометрические методы измерения плотности основаны на том, что давление жидкости p на глубине H от поверхности равно массе столба жидкости при площади основания 10^{-4} :

$$P = \rho g H$$

При неизменной высоте столба жидкости давление является мерой ее плотности. Измерение давления столба жидкости производится

аналогично измерению уровня жидкости манометрическими уровнемерами (рис. 8.54 в) при условии постоянного уровня. Плюсовая камера дифференциального манометра 3 соединена трубкой 2 с уравнительным сосудом 1, а минусовая камера – с нижней частью водяного пространства резервуара трубкой 4. Уровень жидкости в сосуде 1 поддерживается постоянным и ее плотность можно определить по показаниям дифманометра.

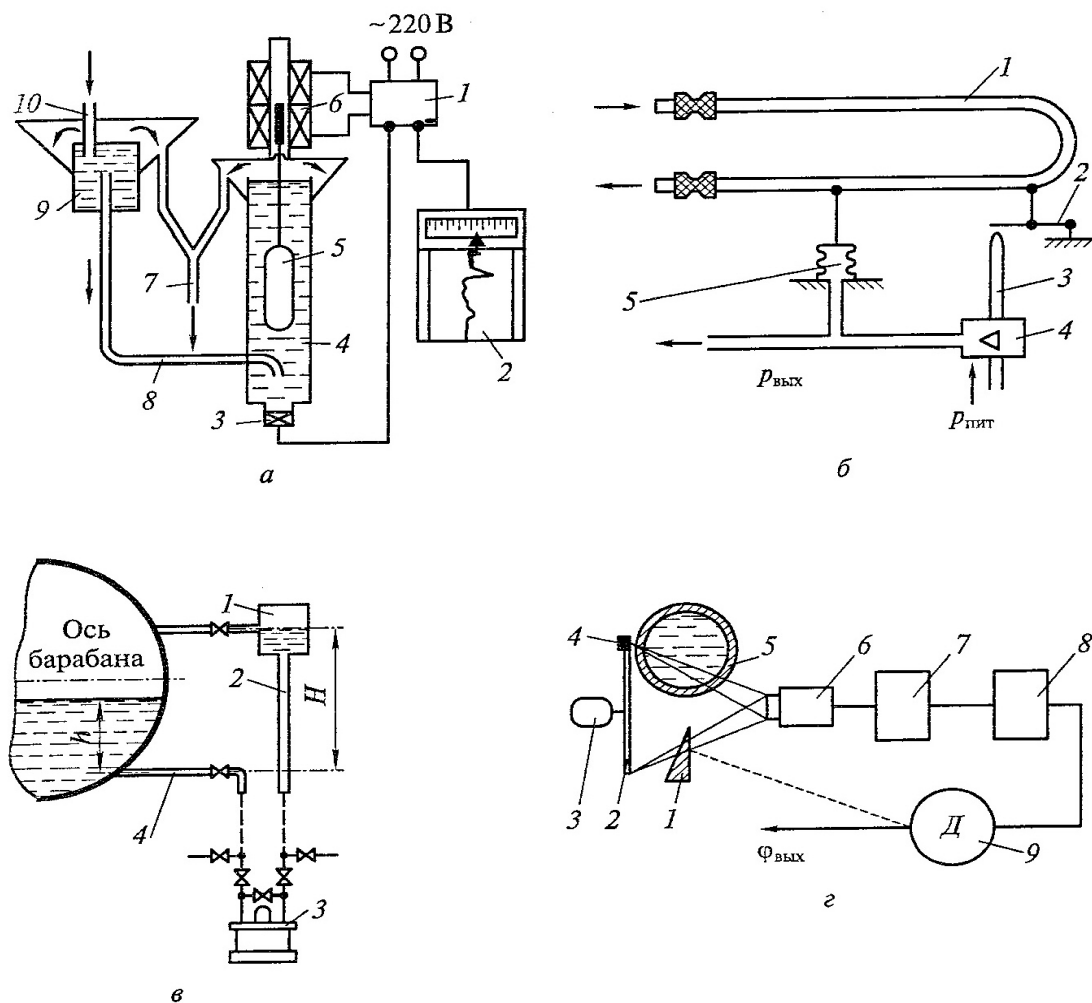


Рисунок 8.54 – Методы и средства измерения плотности жидких тел:
 а – схема поплавкового плотномера (1 – мост; 2 – показывающее устройство; 3 – терморезистор; 4 – измерительная камера; 5 – поплавок;
 б – индуктивный преобразователь; 7, 8 и 10 – труба; 9 – переливной сосуд); б – схема весового плотномера (1 – трубка; 2 – заслонка; 3 – сопло; 4 – пневмоусилитель; 5 – сильфон); в – манометрический метод измерения плотности (1 – уравнительный сосуд; 2 и 4 – трубка; 3 – дифференциальный манометр); г – схема радиоизотопного плотномера (1 – компенсационный клин; 2 – диск; 3 – двигатель; 4 – источник излучения; 5 – трубопровод; 6 – счетчик; 7 – интегрирующее устройство; 8 – усилитель переменного тока; 9 – двигатель)

Тогда

$$P = P/gH$$

В *ультразвуковых плотномерах* используется зависимость скорости распространения ультразвука в жидкости от ее плотности. Измеряя скорость распространения ультразвуковых колебаний, можно судить о ее плотности.

Радиоизотопные методы измерения плотности основаны на измерении поглощения γ -излучения радиоактивного источника при прохождении лучей через вещество, которое изменяется в зависимости от изменения его плотности.

Метод просвечивания γ -лучами находит широкое применение для определения плотности плит, бетонных блоков, грунтовых пульп и т. п.

Измерение вязкости. В технологических процессах многих отраслей промышленности важным показателем качества является вязкость жидких веществ. Вязкость жидкостей измеряется вискозиметрами.

По методам измерения вискозиметры можно разделить на следующие:

- капиллярные (измерение перепада давления на капилляре, через который пропускается жидкость с постоянным расходом);
- ротационные (измерение усилия, возникающего при вращении твердого тела в жидкости);
- с падающим телом (измерение времени падения твердого тела в слое жидкости заданной высоты);
- вибрационные (измерение скорости затухания упругих колебаний пластины в исследуемой жидкости).

Схема капиллярного вискозиметра представлена на рисунке 8.55 а. Продукт от точки отбора пробы 1 подается насосом 2 через змеевик 3 и регулятор расхода 5 в капилляр 6. Основные части прибора помещены в термостат 9 с мешалкой 13, обычно заполняемый маслом. Привод мешалки осуществляет электродвигатель 4. Температура в ванне поддерживается постоянной с помощью регулятора 11, управляющего нагревателем 12. Дифференциальный манометр 7 измеряет перепад давления на капилляре и осуществляет передачу показаний на вторичный прибор 8, градуированный в единицах вязкости.

Погрешность прибора определяется в основном точностью поддержания расхода и температуры исследуемой жидкости (изменение температуры на 1 °С может дать погрешность в 10 %).

Капиллярные вискозиметры широко используются для анализа дистиллятных продуктов и масел в диапазоне вязкости до 0,12 м²/с (15°ВУ) при 150 °С. Погрешность таких приборов составляет 1...2 % от измеряемого диапазона вязкости.

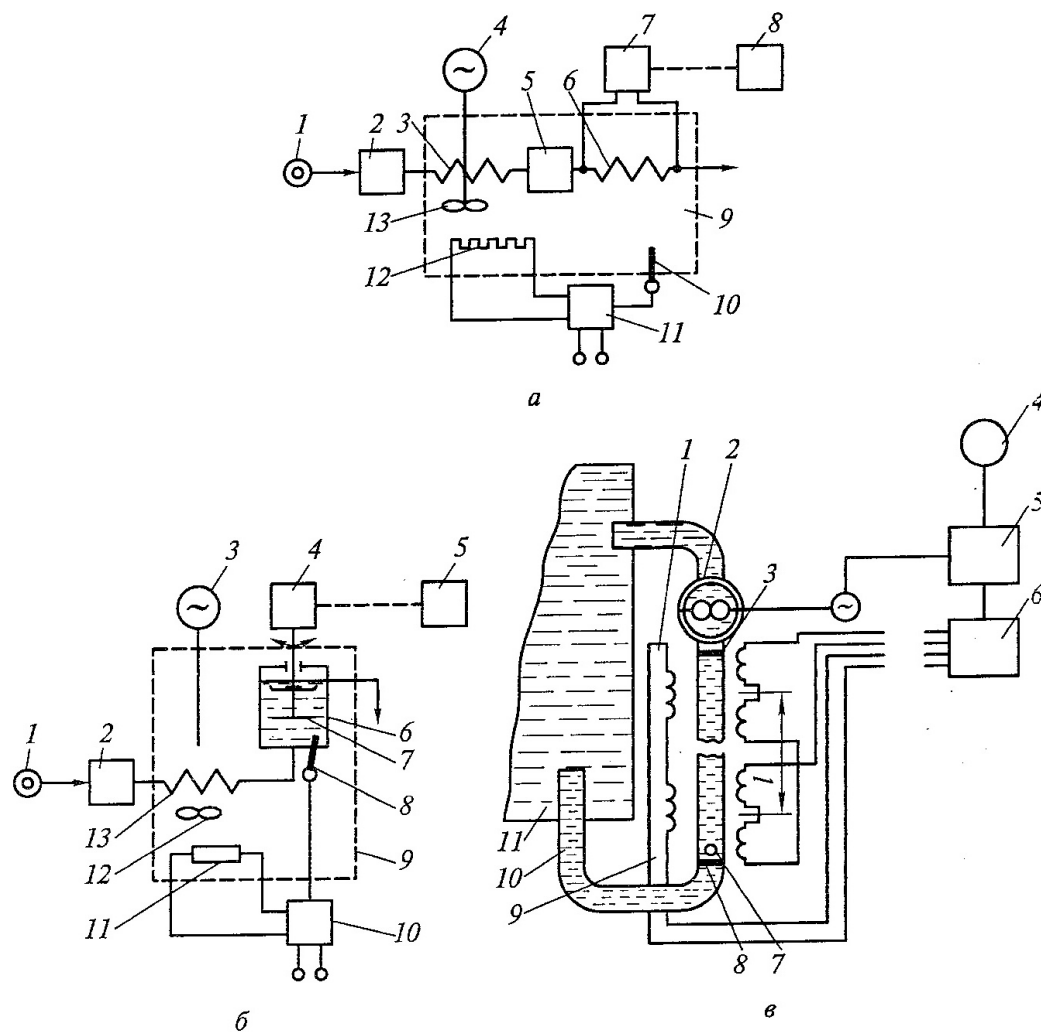


Рисунок 8.55 – Методы и средства измерения вязкости жидких тел:
 а – схема капиллярного вискозиметра (1 – точка отбора пробы;
 2 – насос; 3 – змеевик; 4 – электродвигатель; 5 – регулятор расхода;
 6 – капилляр; 7 – дифференциальный манометр; 8 – вторичный прибор;
 9 – термостат; 10 – термометр; 11 – регулятор; 12 – нагреватель;
 13 – мешалка); б – схема ротационного вискозиметра (1 – точка
 отбора пробы; 2 – насос; 3 – электродвигатель; 4 – измерительный
 блок; 5 – показывающее устройство; 6 – рабочая камера; 7 – ротор;
 8 – термочувствительный элемент; 9 – термостат; 10 – регулятор;
 11 – нагреватель; 12 – мешалка; 13 – змеевик); в – схема
 автоматического вискозиметра с падающим телом (1 и 9 – катушка;
 2 – насос; 3 и 8 – ограничивающая сетка; 4 – вторичный прибор;
 5 – релейный блок; 6 – усилитель; 7 – шарик;
 10 – мерная трубка;
 11 – резервуар)

Ротационные вискозиметры различаются в зависимости от используемой формы вращающегося элемента и способа измерения кру-

тящего момента. В качестве вращающегося элемента применяют пластины, цилиндры, лопасти, набор дисков и др.

Крутящий момент определяют следующими способами: силой тока, потребляемой электродвигателем привода вращающегося элемента; углом поворота уравнивающей торсионной пружины; реактивным моментом вращения статора приводного электродвигателя.

На рисунке 8.55 б изображена схема ротационного вискозиметра. Термочувствительный элемент 8 располагается непосредственно в рабочей камере 6. Измерительный блок 4 содержит узел привода ротора 7 и устройства для измерения крутящего момента и передачи показаний на показывающее устройство 5.

Вискозиметры с падающим телом. Схема одного из них представлена на рисунке 8.55 в. Измерение проводится циклично. Подъем шарика 7 в исходное положение происходит за счет восходящего потока исследуемой жидкости, который создается шестеренчатым насосом 2. Проба жидкости отбирается насосом из резервуара 11 в мерную трубку 10. Шарик, находясь в нерабочем положении у нижней ограничивающей сетки 8, при включении насоса поднимается до верхней ограничивающей сетки 3. В момент касания шарика с сеткой 3 насос автоматически отключается и шарик падает в неподвижной среде исследуемой жидкости. На мерную трубку 10, выполненную из немагнитного материала, установлены катушки 1 и 9, первичные и вторичные обмотки которых соединены по дифференциально-трансформаторной схеме. При прохождении шарика через катушки на входе контрольной схемы возникает сигнал разбаланса, который усиливается электронным усилителем 6. Автоматическое включение шестеренчатого насоса и отсчет времени падения шарика осуществляют релейным блоком 5 и вторичным прибором 4. Пределы измерения вискозиметра можно менять установкой различных расстояний между катушками и подбором размера шарика [52–53].

8.5 Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите известные Вам признаки классификации средства измерений.

2. Классифицируйте средства измерения и контроля по типу контролируемых физических величин.

3. Классифицируйте средства измерения и контроля по виду измеряемых геометрических величин.

4. Перечислите известные Вам универсальные средства измерения и контроля линейных размеров в машиностроении.

5. Для чего предназначены меры длины концевые плоскопараллельные?
6. Какой класс концевых мер точнее 00 или 1?
7. Что такое «притираемость» концевых мер?
8. Из каких материалов изготавливают концевые меры длины?
9. Для чего применяются специальные принадлежности для концевых мер?
10. Что относится к штриховым мерам?
11. Что представляют собой и для чего используются щупы?
12. Как различаются калибры по конструктивным признакам?
13. Какие конструкции калибров-скоб Вы знаете?
14. На какие виды делятся калибры по назначению?
15. Какие методы контроля размеров глубин и высот уступов Вы знаете?
16. Изобразите схему контроля калибром методом «надвигания».
17. Какие средства измерения линейных размеров относятся к штангенинструментам?
18. Какие типы нониусов Вы знаете? Их основные характеристики.
19. Сколько типов штангенциркулей Вам известно? В чем их отличие?
20. Опишите конструкцию индикаторного штангенциркуля.
21. Опишите принцип действия и область применения штанген-глубиномера и штангенрейсмаса.
22. На чем основан принцип действия микрометрических инструментов?
23. Для чего применяются микрометрические глубиномер и нутромер?
24. Как подразделяются средства измерения и контроля с механическим преобразованием в зависимости от типа механизма?
25. Для чего применяются рычажно-механические приборы?
26. Изобразите схему и опишите принцип действия миниметра. Каковы их недостатки?
27. Для чего применяется индикаторный нутромер?
28. Опишите принцип действия и область применения индикаторов часового типа.
29. Дайте определение понятию «статистический индикатор».
30. Опишите принцип действия приборов с рычажно-зубчатой передачей.
31. Какие приборы с рычажно-зубчатой передачей Вы знаете?
32. К каким видам приборов относятся микаторы и миникаторы? Каков принцип их действия?
33. Каковы преимущества и недостатки измерительных пружинных головок?

34. Для чего нашли широкое применение оптико-механические измерительные приборы?
35. Опишите принцип действия оптикатора.
36. Чем оптикатор отличается от оптиметра?
37. Как работает оптический длиномер?
38. Для чего применяются измерительные машины и интерферометры?
39. Каков принцип действия интерферометра? Изобразите принципиальную схему.
40. Где и для чего нашли применение оптические измерительные приборы? Какие их виды Вы знаете?
41. Изобразите оптическую схему инструментального микроскопа.
42. Для чего применяются проекторы?
43. Каковы преимущества пневматических измерительных приборов?
44. Какие типы пневматических измерительных приборов Вы знаете?
45. Изобразите схемы приборов давления и приборов расхода.
46. Опишите принцип действия и область применения электрических, электромеханических и радиоактивных измерительных приборов.
47. Что такое «допускаемая погрешность измерения»?
48. Дайте определение понятию «приемочная граница». Как они могут располагаться?
49. Чему равна погрешность измерения при арбитражной перепроверке?
50. Какими параметрами оценивается влияние погрешности измерения при приемочном контроле? Как их определить?
51. Как участвуют в выборе измерительных средств конструкторская, технологическая и метрологическая службы?
52. Опишите алгоритм выбора средства измерения линейных размеров.
53. Опишите систему поддержки принятия решений по выбору средств измерений, разработанную в УО «ВГТУ».
54. Опишите методы измерения линейных скоростей движущихся твердых тел.
55. Изобразите схемы аэрометрического, компенсационного, термодинамического методов измерения линейных скоростей движущихся твердых тел.
56. Перечислите и охарактеризуйте нашедшие наиболее широкое распространение в технике методы и средства измерения и контроля скоростей вращения.
57. Изобразите схему действия центробежных тахометров.

58. Изобразите схемы действия электрических тахометров постоянного тока.
59. Какие методы применяют для измерения линейных ускорений?
60. Изобразите схемы работы известных Вам акселерометров.
61. Изобразите схемы работы известных Вам виброметров.
62. На какие виды классифицируются весоизмерительные и весодозирующие устройства по назначению?
63. Как классифицируются весы по принципу действия?
64. Как классифицируются динамометры по принципу действия?
65. Опишите принцип действия динамометра с упругим элементом.
66. Изобразите известные Вам схемы электрических динамометров.
67. В чем суть работы пьезоэлектрических динамометров?
68. Какие Вам известны виды испытаний механических свойств?
69. Метод определения твердости по Бринеллю.
70. Опишите метод определения твердости по Роквеллу.
71. Опишите метод определения твердости по Виккерсу.
72. Опишите метод измерения твердости по Шору.
73. На какие группы делятся вискозиметры в зависимости от метода измерения?
74. Опишите принцип действия капиллярного и ротационного вискозиметров.

9 МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ. ПОВЕРКА

9.1 Основные понятия теории метрологической надежности

В процессе эксплуатации метрологические характеристики и параметры средства измерений претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к *отказам*, т. е. к невозможности СИ выполнять свои функции. Отказы делятся на *неметрологические* и *метрологические*.

Неметрологическим называется отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят главным образом явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения *поверки*.

Метрологическим называется отказ, вызванный выходом МХ из установленных допустимых границ. Метрологические отказы происходят значительно чаще, чем неметрологические. Это обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения. Метрологические отказы подразделяются на *внезапные* и *постепенные*.

Внезапным называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т. п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т. е. по характеру проявления они являются явными. Особенностью внезапных отказов является постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. В связи с этим в дальнейшем отказы такого рода не рассматриваются.

Постепенным называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля СИ. В дальнейшем рассматриваются именно такие отказы.

С понятием «метрологический отказ» тесно связано понятие метрологической исправности средства измерений. Под ней понимается состояние СИ, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям. Способность СИ сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называется *метрологической надежностью*. Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической тео-

рии надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособное и неработоспособное. Постепенное изменение погрешности СИ позволяет ввести множество работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий. Важно и то, что зафиксировать точное время наступления метрологического отказа ввиду скрытого характера его проявления невозможно, в то время как явные отказы, с которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения. Все это потребовало разработки специальных методов анализа метрологической надежности СИ.

Надежность СИ характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим в себя *стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых СИ) и сохраняемость*.

Стабильность СИ является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологическая надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того же процесса старения СИ. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его «внутреннее» свойство. Надежность, наоборот, является «внешним» свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.

Безотказностью называется свойство СИ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности СИ. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы СИ.

Долговечностью называется свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. Работоспособное состояние – это такое состояние СИ, при котором все его МХ

соответствуют нормированным значениям. Предельным называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо. После метрологического отказа характеристики СИ путем соответствующих регулировок могут быть возвращены в допустимые диапазоны. Процесс проведения регулировок может быть более или менее длительным в зависимости от характера метрологического отказа, конструкции СИ и ряда других причин. Поэтому в характеристику надежности введено понятие «ремонтпригодность». *Ремонтпригодность* – свойство СИ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление СИ после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии. Как будет показано далее, процесс изменения МХ идет непрерывно независимо от того, используется ли СИ или оно хранится на складе. Свойство СИ сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования называется его сохраняемостью.

Прежде чем перейти к рассмотрению показателей, характеризующих метрологическую надежность СИ, необходимо выяснить характер изменения во времени его МХ.

9.2 Изменение метрологических характеристик средств измерений в процессе эксплуатации

Метрологические характеристики СИ могут изменяться в процессе эксплуатации. В дальнейшем будем говорить об изменениях погрешности $\Delta(t)$, подразумевая, что вместо нее может быть аналогичным образом рассмотрена любая другая МХ [23–24].

Следует отметить, что не все составляющие погрешности подвержены изменению во времени. Например, методические погрешности зависят только от используемой методики измерения. Среди инструментальных погрешностей есть много составляющих, практически не подверженных старению, например, размер кванта в цифровых приборах и определяемая им погрешность квантования.

Изменение МХ средств измерений во времени обусловлено процессами старения в его узлах и элементах, вызванными взаимодействием с внешней окружающей средой. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или хранится на консервации. Следовательно, основным фактором, определяющим старение СИ, является календарное время, прошедшее с момента их изготовления, т. е. возраст. Скорость старения

зависит прежде всего от используемых материалов и технологий. Необратимые процессы, изменяющие погрешность, протекают очень медленно и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно. В связи с этим большое значение приобретают различные математические методы, на основе которых строятся модели изменения погрешностей и производится прогнозирование метрологических отказов.

Задача, решаемая при определении метрологической надежности СИ, состоит в нахождении начальных изменений МХ и построении математической модели, экстраполирующей полученные результаты на большой интервал времени. Поскольку изменение МХ во времени – случайный процесс, то основным инструментом построения математических моделей является теория случайных процессов.

Изменение погрешности СИ во времени представляет собой нестационарный случайный процесс. Множество его реализаций показаны на рисунке 9.1 в виде кривых Δ_i модулей погрешности. В каждый момент t_i они характеризуются некоторым законом распределения плотности вероятности $p(\Delta, t_i)$ (кривые 1 и 2 на рис. 9.1 а). В центре полосы (кривая $\Delta_{cp}(t)$) наблюдается наибольшая плотность появления погрешностей, которая постепенно уменьшается к границам полосы, теоретически стремясь к нулю при бесконечном удалении от центра. Верхняя и нижняя границы полосы погрешностей СИ могут быть представлены лишь в виде некоторых квантильных границ, внутри которых заключена большая часть погрешностей, реализуемых с доверительной вероятностью P . За пределами границ с вероятностью $(1 - P)/2$ находятся погрешности наиболее удаленные от центра реализаций.

Для применения квантильного описания границ полосы погрешностей в каждом ее сечении t необходимо знать оценки математического ожидания $\Delta_{cp}(t_i)$ и СКО $\sigma_{\Delta}(t_i)$ отдельных реализаций Δ_i . Значение погрешности на границах в каждом сечении t_i равно $\Delta r(t_i) = \Delta_{cp}(t) \pm k\sigma_{\Delta}(t_i)$, где k – квантильный множитель, соответствующий заданной доверительной вероятности P , значение которого существенно зависит от вида закона распределения погрешностей по сечениям. Определить вид этого закона при исследовании процессов старения СИ практически не представляется возможным. Это связано с тем, что законы распределения могут претерпевать значительные изменения с течением времени.

Для решения данной проблемы используют общее для высокоэнтропийных симметричных законов распределения свойство, состоящее в том, что при доверительной вероятности $P = 0,95$ % и 95%-ный квантили отстоят от центра распределения $\Delta_{cp}(t)$ на $\pm 1,6k\sigma_{\Delta}(t)$. Если предположить, что закон распределения погрешностей, деформируясь со временем, остается высокоэнтропийным и симметричным, то 95%-ный квантиль нестационарного случайного процесса изменения погрешности во времени может быть описана уравнением $\Delta_{0,95}(t) = \Delta_{cp}(t) \pm 1,6\sigma_{\Delta}(t_i)$.

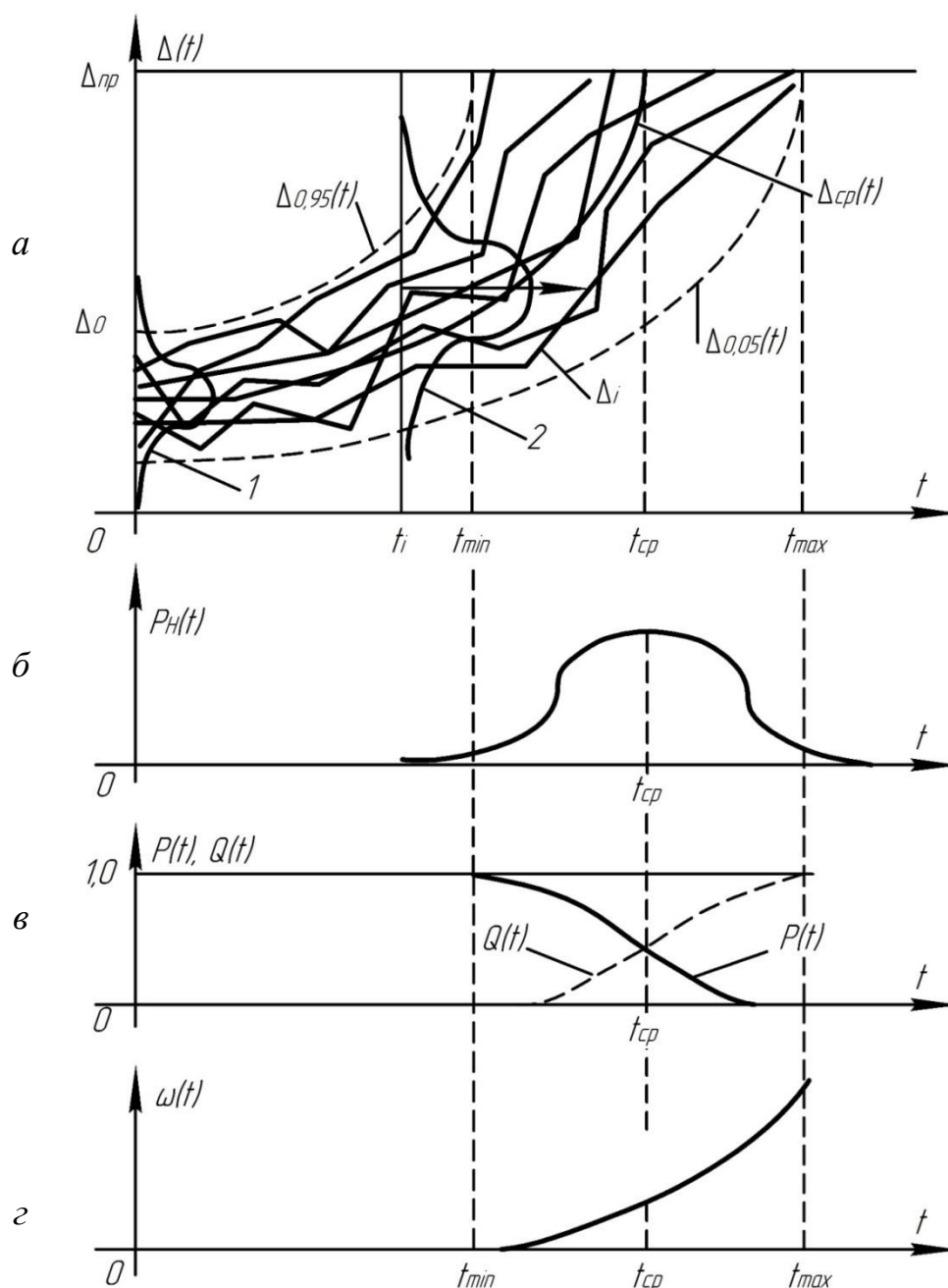


Рисунок 9.1 – Изменение некоторых характеристик во времени:
а – модель изменения погрешности во времени; б – плотность
распределения времени наступления метрологических отказов;
в – вероятность безотказной работы; г – зависимость интенсивности
метрологических отказов от времени

Метрологический отказ наступает при пересечении кривой Δ_i прямых $\pm \Delta_{np}$. Отказы могут наступать в различные моменты времени в диапазоне от t_{min} до t_{max} , причем эти точки являются точками пересечения 5%- и 95%-ного квантилей с линией допустимого значения погрешности. При достижении кривой $\Delta_{0,95}(t)$ допустимого предела Δ_{np} у 5 % приборов наступает метрологический отказ. Распределение моментов

наступления таких отказов будет характеризоваться плотностью вероятности $p_H(t)$, показанной на рисунке 9.1 б. Таким образом, в качестве модели нестационарного случайного процесса изменения во времени модуля погрешности СИ целесообразно использовать зависимость изменения во времени 95%-ного квантиля этого процесса.

Показатели точности, метрологической надежности и стабильности СИ соответствуют различным функционалам, построенным на траекториях изменения его МХ $\Delta_i(t)$. Точность СИ характеризуется значением МХ в рассматриваемый момент времени, а по совокупности средств измерений – распределением этих значений, представленных кривой 1 для начального момента и кривой 2 для момента t_i . Метрологическая надежность характеризуется распределением моментов времени наступления метрологических отказов (см. рис. 9.1 б). Стабильность СИ характеризуется распределением приращений МХ за заданное время [23–24].

9.3. Математические модели изменения во времени погрешности средств измерений

9.3.1 Линейная модель изменения погрешности

В общем виде модель погрешности $\Delta_{0,95}(t)$ может быть представлена в виде $\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + F(t)$, где Δ_0 – начальная погрешность СИ; $F(t)$ – случайная для совокупности СИ данного типа функция времени, обусловленная физико-химическими процессами постепенного износа и старения элементов и блоков. Получить точное выражение для функции $F(t)$ исходя из физических моделей процессов старения практически не представляется возможным. Поэтому, основываясь на данных экспериментальных исследований изменения погрешностей во времени, функцию $F(t)$ аппроксимируют той или иной математической зависимостью [23–24].

Простейшей моделью изменения погрешности является линейная:

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + vt \quad (9.1)$$

где v – скорость изменения погрешности.

Данная модель удовлетворительно описывает старение СИ в возрасте от одного до пяти лет. Использование ее в других диапазонах времени невозможно ввиду явного противоречия между определенными по этой формуле и экспериментальными значениями частоты отказов.

Метрологические отказы возникают периодически. Механизм их периодичности иллюстрирует рисунок 9.2 а, где прямой линией 1 показано изменение 95%-ного квантиля при линейном законе. При метроло-

гическом отказе погрешность $\Delta_{0,95}(t)$ превышает значение $\Delta_{np} = \Delta_0 + \Delta_3$, где Δ_3 – значение запаса нормируемого предела погрешности, необходимого для обеспечения долговременной работоспособности СИ. При каждом таком отказе производится ремонт прибора и его погрешность возвращается к исходному значению Δ_0 . По прошествии времени $T_p = t_i - t_{i-1}$ опять происходит отказ (моменты t_1, t_2, t_3 и т. д.), после которого вновь производится ремонт. Следовательно, процесс изменения погрешности СИ описывается ломаной линией 2 на рисунке 9.2 а, которая может быть представлена уравнением

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + n\Delta_3, \quad (9.2)$$

где n – число отказов (или ремонтов) СИ.

Если число отказов считать целым, то это уравнение описывает дискретные точки на прямой 1 (рис. 9.2 а). Если же условно принять, что n может принимать и дробные значения, то формула (9.2) будет описывать всю прямую 1 изменения погрешности $\Delta_{0,95}(t)$ при отсутствии отказов.

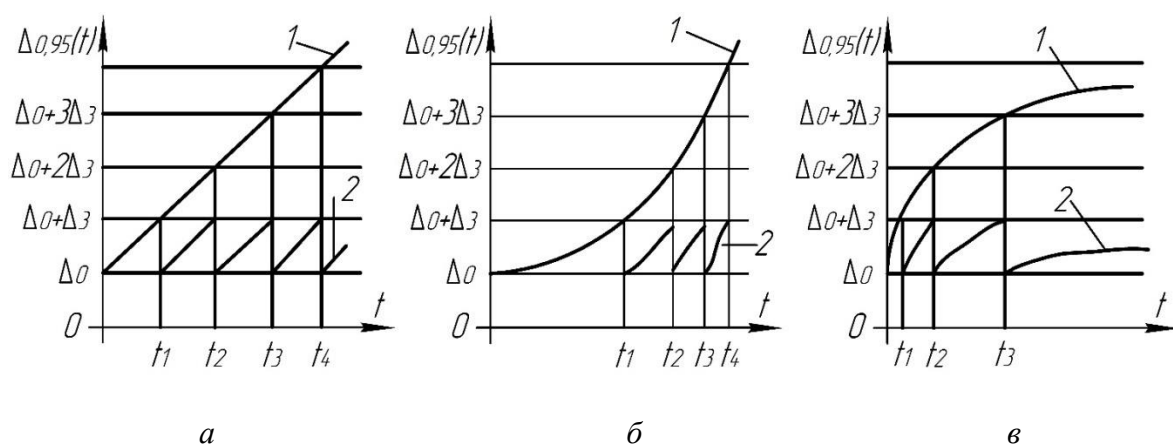


Рисунок 9.2 – Законы изменения погрешности:

а – линейный, б, в – экспоненциальный

Частота метрологических отказов увеличивается с ростом скорости v . Она столь же сильно зависит от запаса нормируемого значения погрешности Δ_3 по отношению к фактическому значению погрешности средства измерений Δ_0 на момент изготовления или окончания ремонта прибора. Практические возможности воздействия на скорость изменения v и запас погрешности Δ_3 совершенно различны. Скорость старения определяется существующей технологией производства. Запас погрешности для первого межремонтного интервала определяется решениями, принятыми производителем СИ, а для всех последующих межремонт-

ных интервалов – уровнем культуры ремонтной службы пользователя [23–24].

Если метрологическая служба предприятия обеспечивает при ремонте погрешность СИ, равную погрешности Δ_0 на момент изготовления, то частота метрологических отказов будет малой. Если же при ремонте лишь обеспечивается выполнение условия $\Delta = (0,9...0,95)\Delta_{np}$, то погрешность может выйти за пределы допустимых значений уже в ближайшие месяцы эксплуатации СИ и большую часть межповерочного интервала оно будет эксплуатироваться с погрешностью, превышающей его класс точности. Поэтому основным практическим средством достижения долговременной метрологической исправности средства измерений является обеспечение достаточно большого запаса Δ_3 нормируемого по отношению к пределу Δ_{np} .

Постепенное непрерывное расходование этого запаса обеспечивает на некоторый определенный период времени метрологически исправное состояние СИ. Ведущие приборостроительные заводы обеспечивают $\Delta_3 = (0,4...0,5)\Delta_{np}$, что при средней скорости старения $\nu = 0,05\Delta_{np}/\text{год}$ позволяет получать межремонтный интервал $T_p = \Delta_3/\nu = 8...10$ лет и частоту отказов $\omega = 1/T_p = 0,1...0,125 \text{ год}^{-1}$.

При изменении погрешности СИ в соответствии с формулой (9.1) все межремонтные интервалы T_p будут равны между собой, а частота метрологических отказов $\omega = 1/T$ будет постоянной в течение всего срока эксплуатации. Однако на практике это не выполняется.

9.3.2 Экспоненциальная модель изменения погрешности

В реальности для одних приборов межремонтные интервалы уменьшаются, для других – увеличиваются. Это может быть объяснено тем, что погрешность СИ с течением времени экспоненциально возрастает или убывает. При ускоряющемся возрастании погрешности (рис. 9.2 б) каждый последующий межремонтный интервал короче предыдущего, и частота метрологических отказов $\omega(t)$ с течением времени возрастает. При замедленном возрастании погрешности (рис. 9.2 в) каждый последующий межремонтный интервал длиннее предыдущего и частота метрологических отказов $\omega(t)$ с течением времени убывает вплоть до нуля [23–24].

Для рассмотренных случаев изменения погрешности во времени описываются на основе экспоненциальной модели. В ней частота метрологических отказов

$$\omega(t) = \omega_0 e^{at}, \quad (9.3)$$

где ω_0 – частота метрологических отказов на момент изготовления средства измерений (т. е. при $t = 0$), год⁻¹; a – положительное или отрицательное ускорение процесса метрологического старения, год⁻¹.

Число отказов $n(t)$ определяется через частоту отказов $\omega(t)$ и при ее экспоненциальном изменении согласно формуле (9.3), рассчитывается как

$$n(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau = \int_0^t \omega_0 e^{a\tau} d\tau = \frac{\omega_0}{a} (e^{at} - 1).$$

Тогда изменение во времени погрешности СИ с учетом формулы (9.2) имеет вид

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + n(t)\Delta_3 = \Delta_0 + \Delta_3 \frac{\omega_0}{a} (e^{at} - 1). \quad (9.4)$$

Указанная зависимость показана кривыми 1 на рисунке 9.2 б и в.

Практическое использование формулы (9.4) требует знания четырех параметров: начального значения погрешности (Δ_0), абсолютного запаса погрешности (Δ_3), начальной частоты метрологических отказов (ω_0) при $t = 0$ и ускорения (a) процесса старения. Уравнения для определения названных параметров, получаемые из (9.4), оказываются трансцендентными, что существенно затрудняет их применение.

С целью упрощения использования уравнения (9.4) необходимо разложить в ряд экспоненциальную функцию и взять три первых члена этого разложения. В результате зависимость погрешности СИ от времени будет представлена в виде

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + \Delta_3 \omega_0 t + \Delta_3 \omega_0 a t^2 / 2 = \Delta_0 + vt + a_\Delta t^2 / 2, \quad (9.5)$$

где v – начальная скорость возрастания погрешности, %; a_Δ – абсолютное значение ускорения изменения погрешности, %. В частном случае, когда $a = 0$, формула (9.5) превращается в линейное уравнение вида (9.1).

Выражение (9.5) имеет ясный физический смысл и позволяет путем аппроксимации экспериментальных данных о погрешностях СИ за 10–15 лет получить оценки коэффициентов v и a_Δ , а по ним рассчитать параметры уравнения (9.4) в виде $\omega_0 = v/\Delta_3$ и $a = a_\Delta/(\Delta_3 \omega_0)$.

Расчет времени наступления метрологического отказа сводится к определению моментов пересечения кривой $\Delta_{0,95}(t)$ постоянных уровней $\Delta_0 + \Delta_3$, $\Delta_0 + 2\Delta_3$, ..., $\Delta_0 + n\Delta_3$. Они могут быть найдены путем совместного решения уравнений (9.2) и (9.4). Момент наступления n -го отказа и

соответственно длительность межремонтных периодов можно определить по формулам:

$$t_n = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{an}{\omega_0} + 1 \right); \quad T_n = \frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{1}{\omega_0 / a + n} \right). \quad (9.6)$$

Срок службы СИ – это календарное время, прошедшее с момента его изготовления до конца эксплуатации. При положительном ускорении процесса старения (см. рис. 9.2 б) частота отказов с увеличением срока службы возрастает и по истечении времени T_{cl} его приходится настолько часто ремонтировать, что эксплуатация становится экономически невыгодной, так как дешевле купить новый прибор. Экономическая целесообразность ремонта определяется отношением средней стоимости одного ремонта c_p к стоимости c_n нового средства измерений, называемого относительной глубиной ремонта $c = c_p/c_n$. Срок службы СИ:

$$T_{cl} = 1 / \sqrt{c \omega_0 a} \quad (9.7)$$

Решая полученное уравнение совместно с первым выражением из (9.6), можно рассчитать общее число отказов (ремонтов) СИ в течение срока эксплуатации.

Пример. Для измерительных приборов магнитоэлектрической системы класса точности 0,5 глубина ремонта составляет $c = 0,3 \dots 0,4$; частота метрологических отказов на момент изготовления СИ $\omega_0 = 0,11 \text{ год}^{-1}$, ускорение процесса старения $a \approx 0,19 \text{ год}^{-1}$. Определите срок службы таких приборов и общее число отказов.

Срок службы прибора рассчитывается по формуле (9.7):

$$T_{cl} = 1 / \sqrt{0,3 \cdot 0,11 \cdot 0,19} = 12,63 \text{ года.}$$

Уравнение для расчета общего числа отказов имеет вид:

$$n_{\Sigma} = \frac{\omega_0}{a} \left[\exp(a / \sqrt{c \omega_0 a}) - 1 \right]$$

Подставив в него все числовые данные, получим:

$$n_{\Sigma} = \frac{0,11}{0,19} \left[\exp(0,19 / \sqrt{0,19 \cdot 0,3 \cdot 0,11}) - 1 \right] = 0,579(e^{5,8} - 1) = 5,8.$$

При отрицательном ускорении процесса старения СИ межремонтный период увеличивается. После некоторого числа ремонтов n_{Σ} он ста-

новится бесконечным, метрологические отказы не возникают и СИ работает до тех пор, пока морально не устареет. В этом случае ($a < 0$) число метрологических отказов при $t \rightarrow \infty$

$$n_{\Sigma} = n_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} n(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\omega_0}{a} (e^{at} - 1) = -\frac{\omega_0}{a}.$$

Погрешность СИ стремится к пределу, равному, согласно (9.4)

$$\Delta_{0,95}(\infty) = \Delta_0 - \frac{\omega_0}{a} \Delta_3 = \Delta_0 + n_{\infty} \Delta_3. \quad (9.8)$$

Экспоненциальная модель процесса старения позволяет описать изменения погрешности СИ при увеличении его возраста от года и практически до бесконечности. Однако данная модель имеет ряд недостатков. Для СИ с отрицательным ускорением процесса старения она прогнозирует при $t \rightarrow \infty$ стремление погрешности к предельному значению. В то же время для СИ с положительным ускорением модель прогнозирует неограниченное возрастание погрешности с течением времени, что противоречит практике [23–24].

9.3.3 Логистическая модель изменения погрешности

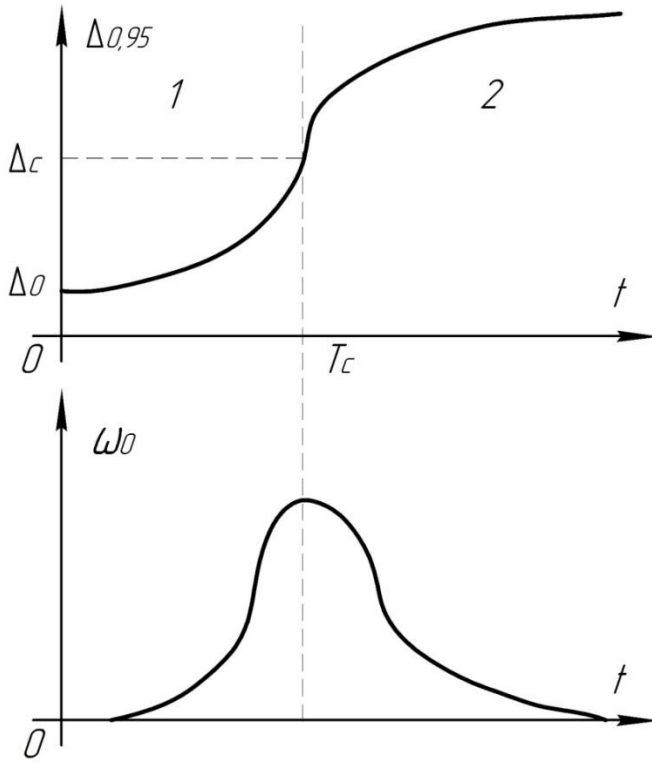
Некоторые из недостатков экспоненциальной модели старения удастся устранить при использовании так называемой логистической модели. Кривые, описывающие процесс изменения погрешности СИ и частоты отказов, приведены на рисунке 9.3. В области малых значений погрешности (0,2–1 %) зависимость $\Delta_{0,95}(t)$ экспоненциально ускоряется, а в области больших значений – экспоненциально замедляется и при очень больших значениях времени выходит на некоторый предельный уровень, выше которого погрешность не возрастает. Кривая частоты метрологических отказов (см. рис. 9.3) при малых значениях времени возрастает, достигая своего максимума при некотором значении T_c , после которого начинается спад до нуля. Участки кривой $\Delta_{0,95}(t)$, соответствующие диапазонам 1 и 2 изменения времени, не обязательно должны быть симметричны относительно точки (Δ_c, T_c) . Ускорения процесса старения a_1 и a_2 , как правило, имеют разные значения. Частота метрологических отказов на участках 1 и 2 соответственно равна

$$\omega_1(t) = \omega_{01} e^{a_1 t}; \quad \omega_2(t) = \omega_{02} e^{a_2 t}, \quad (9.9)$$

где ω_{01}, ω_{02} – начальные частоты метрологических отказов на участках 1 и 2.

Абсцисса точки, разделяющей два участка

$$T_c = \frac{\ln(\omega_{02} / \omega_{01})}{a_1 - a_2}. \quad (9.10)$$



Используя параметры логистической модели процесса старения, можно обоснованно прогнозировать моменты наступления метрологических отказов t_n и изменение с возрастом наработки на отказ T_n . Момент наступления n -го метрологического отказа при $t < T_c$ и $t > T_c$ определяется соответственно по формулам:

Рисунок 9.3 – Логистическая модель временного изменения погрешности

$$t_n = \frac{1}{a_1} \ln \left(1 + \frac{a_1}{\omega_{01}} n \right), \quad t_n = \frac{1}{a_2} \ln \left(1 + \frac{a_2(n - n_\infty)}{\omega_{02}} \right)$$

при $n_\infty = \frac{\omega_{01}}{a_1} (e^{a_1 T_c} - 1) - \frac{\omega_{02}}{a_2} e^{a_2 T_c}.$

Длительность межремонтных интервалов при $t < T_c$ и $t > T_c$:

$$T_n = -\frac{1}{a_1} \ln \left(1 - \frac{1}{n - \omega_{01} / a_1} \right), \quad T_n = -\frac{1}{a_2} \ln \frac{n_\infty - n}{n_\infty - n + 1},$$

где n – порядковый номер ремонта.

Экспериментальные исследования показывают, что длительность межремонтных интервалов, начиная со второго, монотонно и ускоренно возрастает. Отличие первого интервала от последующих состоит в том, что на нем СИ работает с запасом нормируемого значения погрешности, обеспеченным изготовителем. На остальных межремонтных интервалах этот запас обеспечивается ремонтными службами предприятия. Многократное превышение первого интервала по сравнению с остальными указывает на то, что ремонтные запасы погрешности Δ_p предусматриваются во много раз меньшими, чем заводские запасы Δ_3 .

Кривая изменения погрешности $\Delta_{0,95}(t)$ в случае использования логистической модели при $t < T_c$ и $t > T_c$ имеет соответственно вид

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + \Delta_3 \frac{\omega_{01}}{a_1} (e^{a_1 t} - 1),$$

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + \Delta_3 \frac{\omega_{01}}{a_1} (e^{a_1 T_c} - 1) + \Delta_p [n(t) - n(T_c)],$$

где $n(t) = n_\infty - \frac{\omega_{02}}{a_2} e^{a_2 t}$.

При практическом использовании приведенных в этом разделе формул необходимо помнить, что входящие в них параметры являются оценками, которые должны быть получены на основе обработки экспериментальных данных для достаточно представительных выборок однотипных СИ. Поэтому сами оценки параметров имеют определенный разброс, поскольку представляют собой некоторые средние оценки обследованной группы приборов у отдельных экземпляров, в которых могут быть весьма существенные индивидуальные отклонения постоянных $\Delta_{0,95}$, Δ_3 , ω_{0i} , и a_i . В связи с этим все рассчитанные по приведенным формулам показатели должны рассматриваться лишь как средние прогнозируемые величины.

К недостаткам логистической модели следует отнести то, что она не позволяет описывать изменение погрешности СИ от момента изготовления прибора до нескольких месяцев его эксплуатации. Это связано с тем, что как в линейной, так и в экспоненциальной модели значение начальной погрешности Δ_0 считалось постоянной величиной, неизменной с момента изготовления СИ. В действительности указанная погрешность образуется из различных составляющих, возникающих на начальных стадиях эксплуатации СИ.

Одним из вариантов описания изменения погрешности СИ, начиная с первых секунд его эксплуатации, является спектральное описание погрешности. Оно позволяет подробно описать многие особенности изменения погрешности прибора. Главный недостаток спектрального опи-

сания состоит в очень большом объеме экспериментальных данных, необходимых для построения спектральных кривых.

Рассмотренные выше модели являются разновидностями модели нестационарного монотонного процесса изменения погрешности во времени. Их общий недостаток – идеализация случайных процессов изменения МХ средства измерений, которые представляются монотонными. При этом не учитываются флуктуационные, обратимые процессы изменения параметров и характеристик приборов. Данный недостаток в той или иной степени устранен в полиномиальной и диффузионной марковской моделях, а также в модели на основе процессов авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего [23–24].

9.4 Показатели метрологической надежности средств измерений

В технике используется большое число показателей надежности, которые приведены в стандарте ГОСТ 27.002 «Надежность в технике. Термины и определения». Рассмотрим основные из них, нашедшие применение в теории метрологической надежности. Знание показателей метрологической надежности позволяет потребителю *оптимально использовать СИ, планировать мощности ремонтных участков, размер резервного фонда приборов, обоснованно назначать межповерочные интервалы и грамотно проводить мероприятия по техническому обслуживанию СИ.*

Стабильность СИ характеризуется плотностью распределения приращения погрешности $\Delta[\Delta(t)] = \Delta_{0,95}(t) - \Delta_0$.

Среди показателей **безотказности** наибольшее распространение получили *вероятность безотказной работы, средняя и гамма-процентная наработка до отказа и интенсивность отказов. Вероятность безотказной работы СИ $P(t)$* – это вероятность того, что в течение времени t нормированные МХ не выйдут за допускаемые пределы, т. е. не наступит метрологический отказ. Нарботкой называется продолжительность работы СИ, а *наработкой до отказа* – продолжительность работы от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Вероятность $P(t)$ является функцией времени и задается аналитически либо таблицей или графиком (см. рис. 9.1 в). Например, если вероятность безотказной работы в течение 1000 ч составляет $P(t) = 0,97$, то это означает, что в среднем из большого числа СИ данного типа около 97 % проработают более 1000 ч. Вероятность $P(t)$ изменяется от нуля до единицы. Чем она ближе к единице, тем выше безотказность работы СИ. На практике допустимым считается значение $P(t) \geq 0,9$. Вероят-

ность безотказной работы СИ в интервале от 0 до t определяется по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t p_n(t) dt = \int_t^\infty p_n(t) dt,$$

где $F(t)$, $p_n(t)$ – интегральная и дифференциальная функции распределения наработки на отказ; $Q(t)$ – вероятность отказа.

Средней наработкой до отказа называется математическое ожидание наработки СИ до первого отказа:

$$t_{cp} = \int_0^\infty t p_n(t) dt.$$

Гамма-процентная наработка до отказа t_γ – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах. Она определяется из уравнения:

$$P(t_\gamma) = 1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} p_n(t) dt = \frac{\gamma}{100}.$$

При $\gamma = 100$ % гамма-процентная наработка называется установленной безотказной наработкой, а при $\gamma = 50$ % – медианной наработкой.

Частота (интенсивность) отказов $\omega(t)$ определяется как условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого СИ, которая находится для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник:

$$\omega(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{p_n(t)}{P(t)} = \frac{p_n(t)}{\int_t^\infty p_n(t) dt}. \quad (9.11)$$

Вероятность того, что СИ, проработавшее безотказно в течение времени t , откажет в последующий малый промежуток времени dt , равна $\omega(t)dt$. Вероятность безотказной работы выражается через интенсивность отказов следующим образом:

$$P + (t) = \exp\left(-\int_0^t \omega(t) dt\right).$$

Из теории надежности известно, что при постепенных отказах, к которым относятся и метрологические отказы, плотность распределения наработки на отказ распределяется в основном по одному из четырех законов: экспоненциальному, нормальному, лог-нормальному и закону Вейбулла. Выбор того или иного закона должен производиться только на основе экспериментальных исследований. При нормальном законе:

$$p_n(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(t - T_{cp})^2 / (2\sigma^2)\right],$$

где T_{cp} , σ – параметры распределения.

В этом случае:

$$P(t) = 1 - \Phi[(t - T_{cp}) / \sigma],$$

где $\Phi(z)$ – функция Лапласа.

Интенсивность отказов описывается выражением, полученным с использованием формулы (9.11):

$$\omega(t) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(t - T_{cp})^2 / (2\sigma^2)\right]}{\{1 - \Phi[(t - T_{cp}) / \sigma]\}}.$$

Для использования этих формул необходимо знать средний срок службы T_{cp} и его СКО, которые находятся экспериментально при испытаниях СИ на надежность.

Основными показателями **долговечности** являются средние и гамма-процентные сроки службы и ресурсы. *Срок службы* – это календарная продолжительность работы СИ от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Он измеряется в годах или месяцах. Средним сроком службы называется математическое ожидание срока службы:

$$\overline{T_{cl}} = \int_0^{\infty} t f_{cl}(t) dt,$$

где $f_{cl}(t)$ – плотность распределения срока службы для совокупности СИ данного типа.

Гамма-процентный срок службы – это календарная продолжительность от начала эксплуатации СИ, в течение которой оно не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Он определяется из уравнения:

$$P(T_{сл\gamma}) = 1 - \int_0^{T_{сл\gamma}} f_{сл\gamma}(t) dt = \frac{\gamma}{100}.$$

Ресурсом называется наработка СИ от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Ресурс представляет собой запас возможной наработки СИ. Средним ресурсом называется математическое ожидание ресурса:

$$\overline{T_p} = \int_0^{\infty} t f_p(t) dt,$$

где $f_p(t)$ – плотность распределения ресурса для совокупности СИ данного типа.

Гамма-процентный ресурс – это наработка, в течение которой средство измерений не достигнет своего предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Он определяется из уравнения

$$P(T_{p\gamma}) = 1 - \int_0^{T_{p\gamma}} f_{p\gamma}(t) dt = \frac{\gamma}{100}.$$

Срок службы (средний или гамма-процентный) акцентирует внимание на календарной продолжительности эксплуатации, включая в себя, помимо времени непосредственной работы СИ, время хранения его на складе, нахождения в выключенном состоянии, транспортировку, ремонт и т. д. При нормировании он задается в годах. Ресурс (средний или гамма-процентный) представляет собой чистую наработку изделия, находящегося во включенном состоянии, и нормируется в часах.

В качестве показателей **ремонтпригодности** используются вероятность и среднее время восстановления работоспособности СИ. *Вероятностью восстановления работоспособного состояния* называется вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния СИ не превысит заданное значение. Она представляет собой значение функции распределения времени восстановления при $t = T_{зад}$, где $T_{зад}$ – заданное время восстановления. *Средним временем восстановления работоспособного состояния* называется математическое ожидание времени восстановления, определяемое по его функции распределения.

Сохраняемость СИ характеризуется *сроком сохраняемости* – календарной продолжительностью его хранения и(или) транспортирования, в течение и после которого значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности сохраняются в установленных

пределах. Показателями сохраняемости являются *средний срок сохраняемости* – математическое ожидание, определяемо по функции распределения сроков сохраняемости совокупности СИ одного типа, и *гамма-процентный срок сохраняемости*.

9.5 Поверка средств измерений

9.5.1 Общие сведения о поверке средств измерений

Поверка является одной из важнейших процедур, которая определяет единство и точность измерений в стране. Проводится государственной метрологической службой (ГМС), метрологическими службами государственных органов управления (ведомств, министерств и т. п.) и субъектов хозяйствования (предприятий, организаций – МСП) как для эталонных; так и для всех тех рабочих СИ, для которых она является обязательной. Организация и порядок проведения поверок СИ регламентируется стандартом Республики Беларусь СТБ 8003-93 «Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения» [30–36].

Поверка – это совокупность операций выполняемых органами ГМС и субъектами хозяйствования с целью определения и подтверждения соответствия СИ установленным требованиям.

Поверку проводят с целью установления соответствия показателей и характеристик СИ метрологическим и техническим требованиям; установленным в нормативной и технической документации. Поверка производится по определенной методике поверки, которая в свою очередь должна разрабатываться в соответствии с определенными нормативными документами (см., например, руководящий документ РД РБ 50.8103-93 «Методики поверки средств измерений. Построение и содержание»). Соответствие или несоответствие СИ должно обязательно подтверждаться документально.

Поверку проводят лица, аттестованные в качестве поверителей в установленном Госстандартом порядке. Срок действия аттестата поверителей составляет пять лет.

Выполняются следующие виды поверок:

- первичная;
- периодическая;
- внеочередная;
- инспекционная;
- экспертная.

Первичная поверка проводится при выпуске СИ из производства или после ремонта, а также для ввозимых по импорту партий СИ, об-

разцы которых прошли государственные приемочные испытания по СТБ 8001-93 «Государственные испытания СИ».

Периодическая поверка проводится через межповерочный интервал практически по такой же программе, как и первичная; с целью установления пригодности СИ к применению на последующий период между поверками. Для СИ, не подлежащих процедуре обязательной поверки, периодическая поверка может быть упрощена, если поверяемое СИ работает только в каком-то одном из нескольких диапазонов измерения, или если оно используется для измерения одной, а не нескольких ФВ, для которых оно рассчитано, или если измерения проводятся в более узком диапазоне условий, чем предполагалось первоначально. В случае использования таких исключений в документации о поверке должна быть сделана специальная надпись, а на СМ должно быть нанесено условное обозначение.

Внеочередная поверка проводится до окончания срока действия периодической поверки (до окончания срока межповерочного интервала) в случае:

- если необходимо по какой-либо причине подтвердить годность СИ к применению;
- если СИ вводится в эксплуатацию (при необходимости);
- при повреждении повелительного клейма, пломбы или утери документа, подтверждающего прохождение СИ периодической или первичной поверки;
- если СИ применяется в качестве комплектующего изделия и срок его хранения до включения не определен;
- если СИ отправляется потребителю по истечении половины межповерочного интервала.

Инспекционная поверка проводится при осуществлении государственного метрологического надзора или ведомственного метрологического контроля за состоянием и применением СИ в организации. Допускается сокращение программы инспекционной поверки по сравнению с перечисленными выше видами поверок.

Экспертная поверка проводится при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности СИ и возможности его применения. Ее осуществляют органы ГМС по письменному обращению заявителя.

9.5.2 Классификация СИ, подлежащих поверке

СИ, подлежащие поверке, делятся на две категории: СИ, подлежащие обязательной поверке, и СИ, подлежащие поверке по желанию владельца СИ [30–36].

Обязательной поверке подлежат СИ, применяемые в отраслях торговли, здравоохранения, защиты и безопасности государства (включая ликвидацию чрезвычайных ситуаций), промышленности, строительства, транспорта, сельского хозяйства, гидрометеорологии, связи и коммунального хозяйства, в том числе:

- при проведении торгово-коммерческих, таможенных, почтовых и налоговых операций;
- при диагностике и лечении заболеваний человека;
- при контроле медикаментов;
- при контроле состояния окружающей среды;
- при хранении, перевозке, утилизации, захоронении и уничтожении токсичных, легковоспламеняющихся, взрывчатых и радиоактивных веществ; при контроле безопасности и условий труда;
- при определении безопасности и качества производимой продукции и соответствия ее реальных характеристик предписанным;
- при контроле всех видов продуктов питания;
- при проведении испытаний, поверке и метрологической аттестации (МА) СИ;
- при регистрации спортивных национальных и международных рекордов и т. д.

Первичной поверке подлежат СИ, перечисленные выше, за исключением:

- СИ, подлежащих метрологической аттестации;
- импортируемых СИ при наличии соглашения о взаимном признании результатов поверки, участницей которого является Республика Беларусь.

Перечень СИ, подлежащих обязательной поверке, приведен в СТБ 8003-93. Кроме указанных в этом перечне, обязательной поверке подлежат те СИ, которые применяются при проведении испытаний, метрологической аттестации и поверке средств измерений.

О средствах измерений, которые подлежат обязательной поверке, говорят, что они относятся к области действия законодательной метрологии и, соответственно, должны удовлетворять общим правилам, требованиям и нормам, которые требуют регламентации и контроля со стороны государства. Естественно, эти СИ входят в сферу деятельности органов государственного метрологического надзора и метрологического контроля.

Межповерочные интервалы для указанных СИ устанавливает государственная метрологическая служба (ГМС).

СИ, не вошедшие в указанный выше перечень, могут подвергаться поверке или калибровке в порядке, установленном владельцем СИ. Он же (владелец) устанавливает и правила метрологического контроля этих средств измерений.

Если СИ применяются в качестве индикаторов, то для них указывают только наличие определенной физической величины и не обязательно указывают ее значение. Эти СИ подлежат обычно метрологическому контролю предприятия (владельца средства). На индикаторы должно быть нанесено обозначение «И».

Поверку СИ, подлежащих обязательной поверке, проводят органы ГМС и аккредитованные поверочные лаборатории, входящие, как правило, в состав метрологических служб государственных органов управления и предприятий, и которым дано право Госстандартом на проведение поверки СИ определенной номенклатуры. Поверка собственных СИ может осуществляться метрологической службой (МС) непосредственно самого предприятия, но эта МС должна быть зарегистрирована в органах Госстандарта в соответствующем порядке.

9.5.3 Взаимодействие сторон при процедурах поверки

Поверку СИ проводят:

- в стационарных поверочных лабораториях;
- в передвижных поверочных лабораториях;
- в специально оборудованных постоянных (или временно действующих) поверочных пунктах;
- на месте изготовления СИ;
- на месте эксплуатации СИ.

Место поверки устанавливает организация, проводящая поверку.

В тех случаях, когда поверка СИ выполняется органами ГМС непосредственно на местах изготовления, ремонта и эксплуатации СИ, предприятия должны:

- обеспечить доставку поверочных средств, принадлежащих ГМС к месту поверки и обратно;
- предоставить стационарное поверочное оборудование, выделить помещение и вспомогательный персонал, необходимый для проведения поверки;
- обеспечивать в необходимых случаях хранение эталонов или ОСИ принадлежащих органам ГМС;
- в случае обслуживания предприятия передвижной лабораторией предоставлять для нее места стоянки, подключение ее к сети, обеспечение сохранности.

Расходы, связанные с поверкой, которую проводят органы ГМС, оплачивает владелец СИ по утвержденным тарифам. При проведении поверки СИ в аккредитованной лаборатории какого-либо предприятия плата за поверку осуществляется на договорной основе. Все расходы, связанные с вызовом поверителя, оплачивает владелец СИ, а проведе-

ние экспертной поверки оплачивается в тройном размере. Инспекционная поверка проводится бесплатно.

Если СИ поверяется непосредственно в органе ГМС то:

- СИ должны поставляться расконсервированными вместе с техническим описанием, инструкцией по эксплуатации или паспортом, свидетельством о последней поверке, а также необходимыми комплектующими устройствами;
- СИ должны поставляться по графику, согласованному совместно владельцем СИ и органом ГМС;
- график поставки для поверки должен соответствовать установленным межповерочным интервалам для СИ [30–36].

9.5.4 Поверочные схемы

Поверочные схемы (ПС) представляют собой утвержденные в установленном порядке документы, которые регламентируют средства, методы и точность передачи размера единицы величины от государственного эталона (национальный, первичный, исходный) к образцовым и рабочим СИ. В настоящее время эти документы составляют на основании ГОСТ 8.061 «Поверочные схемы, содержание и построение».

В зависимости от области распространения поверочные схемы подразделяются следующим образом:

- государственные поверочные схемы;
- ведомственные поверочные схемы;
- локальные поверочные схемы.

Локальные поверочные схемы распространяются на СИ, подлежащие поверке, как правило, в метрологической службе предприятия. Эти схемы определяются тем, какое образцовое средство измерений имеется на предприятии, какова точность приборов и т. д. Локальные поверочные схемы разрабатываются метрологическими службами предприятий, они обычно документируются в виде стандарта предприятия и действуют только на нем. При этом локальная поверочная схема должна быть согласована с вышестоящей метрологической службой (ведомства, министерства и другого государственного органа управления).

Ведомственные поверочные схемы распространяются на все СИ, подлежащие поверке в данном ведомстве. Поверочные схемы разрабатывает ведомственная метрологическая служба, они оформляются в виде отраслевого стандарта, согласовываются с региональным органом или непосредственно с Госстандартом. Ведомственная поверочная схема определяет передачу размера от исходного эталона, который при-

надлежит ведомству (или образцового средства высшего разряда) к образцовому СИ, которое применяется на предприятии.

Государственная поверочная схема распространяется на все виды СИ, применяемые в стране. Государственные поверочные схемы определяют передачу размера от эталонов наивысшей точности (первичных, национальных) ко вторичным эталонам (образцовым средствам высшего разряда), которые, в свою очередь, являются исходными эталонами для ведомственных метрологических служб. Эти схемы разрабатывает Госстандарт, он же утверждает их. Государственные поверочные схемы документируются в виде государственных стандартов.

К поверочным схемам предъявляют следующие общие требования:

1) государственные поверочные схемы не должны противоречить межгосударственным поверочным схемам;

2) как правило, поверочные схемы распространяются на передачу одной ФВ (или нескольких взаимосвязанных ФВ);

3) документ на поверочную схему (стандарт предприятия, отраслевой стандарт, государственный стандарт) должен включать в себя чертеж поверочной схемы и текстовую часть, содержащую пояснение к чертежу. На чертеже нужно указывать наименование СИ и метод поверки (или метод передачи размера), номинальное значение или диапазон значений передаваемой единицы, допускаемые значения погрешности СИ и допускаемые значения погрешности методов поверки.

Варианты построения поверочных схем (на примере государственной поверочной схемы) приведены на рисунке 9.4. На рисунке 9.4 а приведен основной вариант поверочной схемы (ПС), показывающий, от какого НЭ и с помощью какого метода передачи размера (МПР) осуществляется поверка вторичного эталона ВЭ.

На рисунке 9.4 б показана ПС, в которой одному и тому же ВЭ может быть передан размер от одного НЭ двумя разными методами.

На рисунке 9.4 в приведены варианты поверочной схемы, когда для одного вторичного эталона ВЭ1 и другого ВЭ2 применяются разные методы передачи размера единиц (МПР1 и МПР2) от одного и того же НЭ.

Рисунок 9.4 г обобщает варианты, показанные на рисунке 9.4 а, б на случаи использования ПС для передачи размеров от одного из двух НЭ тем или иным МПР одному из трех ВЭ.

Методы передачи размера (поверки), указанные на поверочной схеме, должны соответствовать одному из общих методов:

- непосредственное сличение (т. е. без средств сравнения);
- сличение при помощи компаратора или других средств сравнения;
- метод прямых измерений;
- метод косвенных измерений.

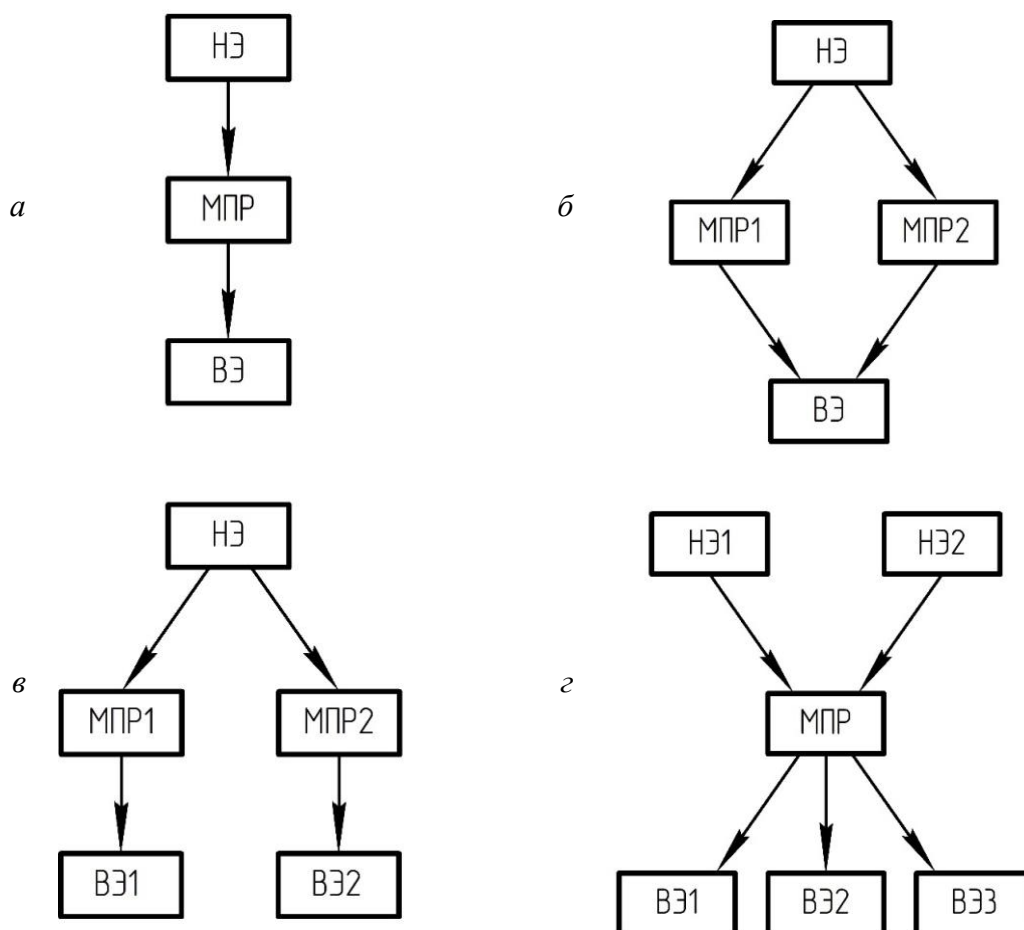


Рисунок 9.4 – Варианты поверочных схем

В зависимости от условий, при которых происходит передача размера, поверочные схемы делятся на два класса:

- централизованные;
- децентрализованные.

Пример такой схемы приведен на рисунке 9.5.

Нижняя часть таких схем носит общий характер, так как охватывает большую группу средств измерений, объединяемых общими метрологическими, и иногда и конструктивными признаками. Эти схемы являются основой для построения поверочных схем предприятий, располагающих большим числом разнообразных средств измерений с двумя, тремя и более степенями точности.

В поверочных схемах предприятий рабочие средства измерений, как правило, объединяют в группы, образцовые же средства измерений указывают более конкретно. В верхней части схемы располагаются средства измерений высшей для данного предприятия точности. Часто их называют исходными. Называть их эталонами или эталонными не следует, так как по точности они стоят ниже государственного эталона. Эти средства измерений в установленные сроки поверяют в метрологической организации.

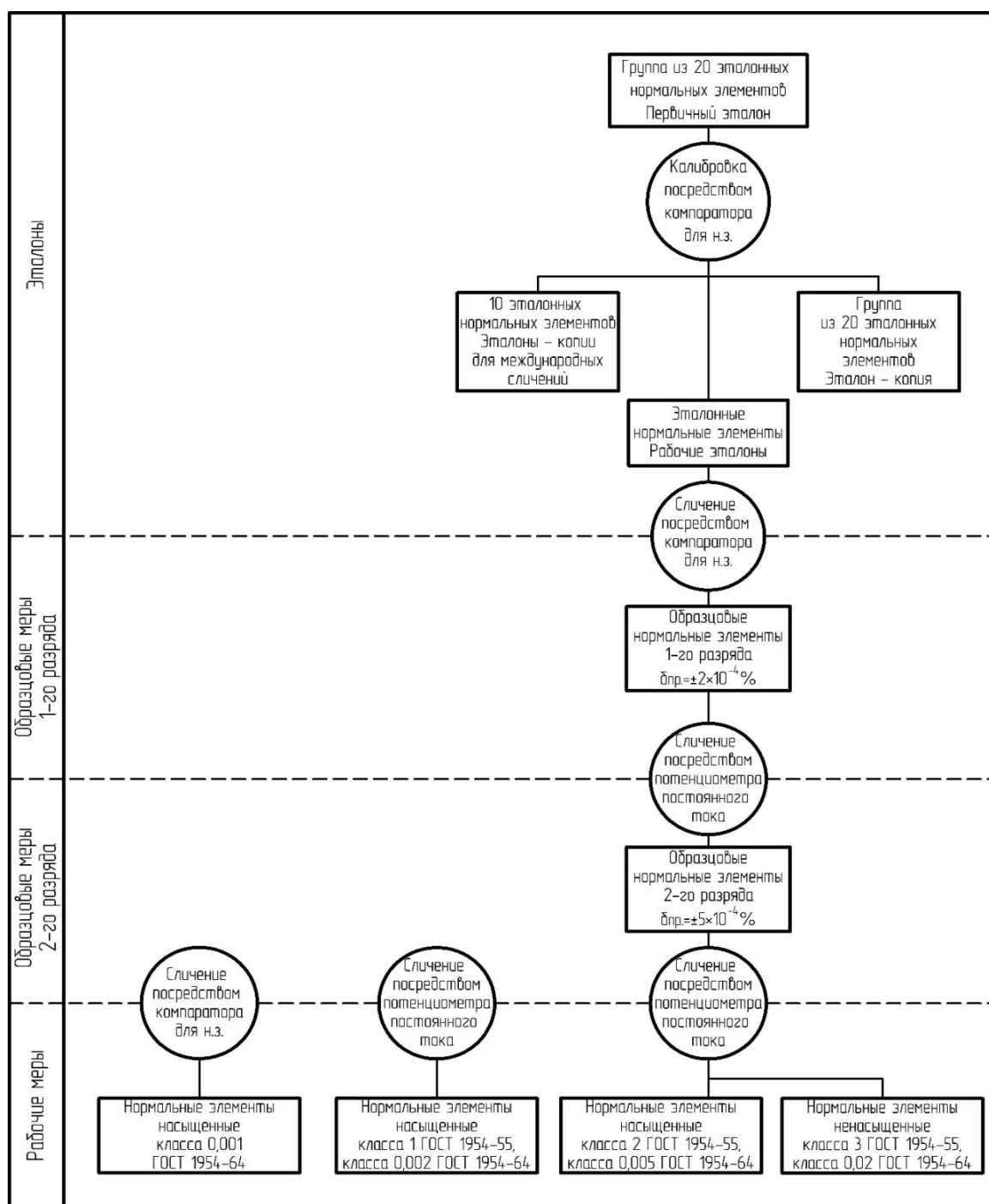


Рисунок 9.5 – Поверочная схема для нормальных элементов

Пример сравнительно простой поверочной схемы предприятия введен на рисунке 9.6.

Централизованная поверочная схема предполагает, что все ниже следующие эталоны, которым передастся размер, должны привозиться в центр, где хранятся эталоны высшей точности.

Децентрализованная поверочная схема применяется в тех случаях, когда необходимо привезти эталонные СИ в места концентрации рабочих СИ или когда рабочее СИ нельзя привезти к эталону. Для примене-

ния децентрализованной поверочной схемы необходимо разрабатывать специальные эталоны, которые называются установками высшей точности [30–36].

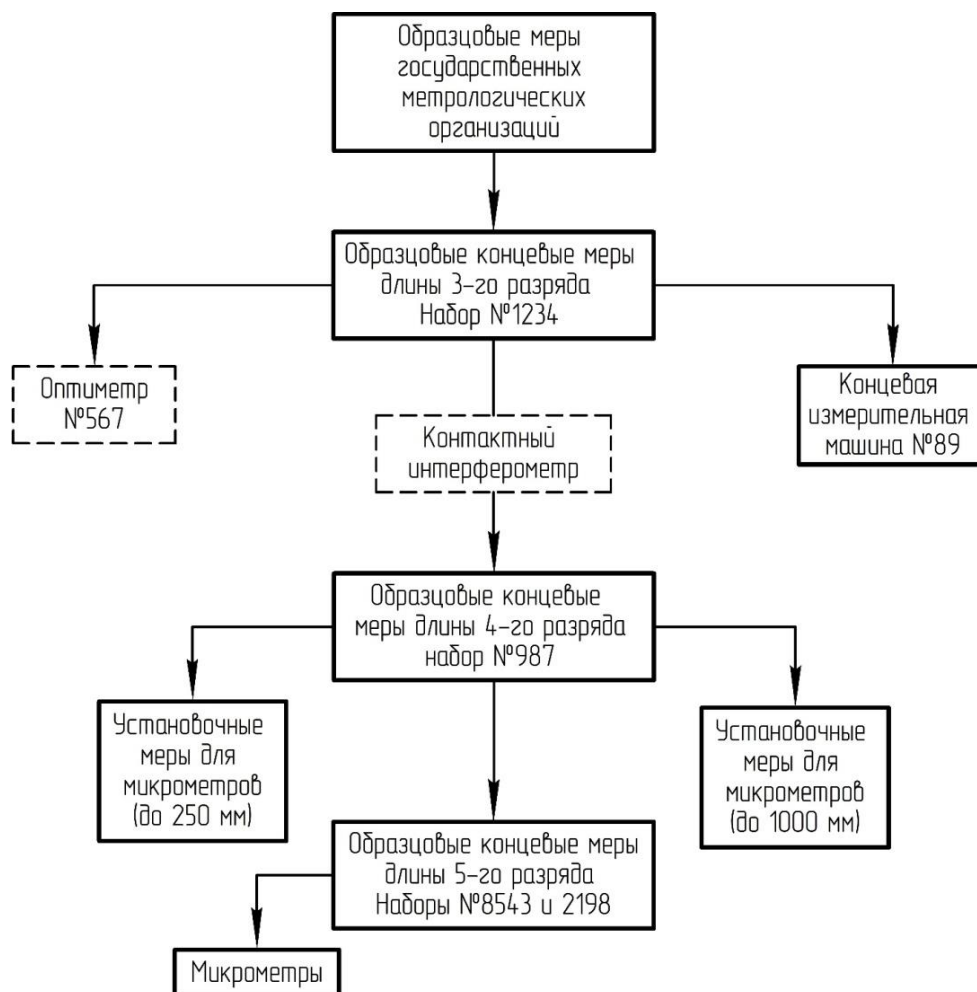


Рисунок 9.6 – Поверочная схема предприятия (фрагмент)

9.5.5 Установки высшей точности для воспроизведения единиц

Порядок разработки, аттестации, хранения и применения установок высшей точности (УВТ) регламентируется в ГОСТ 8.525 «Установки высшей точности для воспроизведения единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения».

УВТ представляет собой аттестованный в установленном порядке комплекс СИ, который предназначен для локального децентрализованного воспроизведения в особых условиях единицы ФВ с наивысшей точностью, достигнутой страной в данной области измерения, и передачи ее размера нижестоящим СИ.

УВТ создаются в тех случаях, когда:

- централизованное воспроизведение единицы не является возможным, необходимым и экономически целесообразным;
- единица, которую воспроизводит УВТ является безразмерной относительной величиной или коэффициентом;
- граничные условия, в которых воспроизводится единица ФВ, имеют узкоспециализированный диапазон или область распространения;
- рабочие средства в данной области измерений применяют в двух или более ведомствах, но общее количество их незначительно.

В состав УВТ следует включать комплекс СИ при помощи которых:

- воспроизводят единицу;
- осуществляют передачу размера;
- контролируют неизменность воспроизводимого размера единицы;
- проводят сличения.

УВТ создают организации Госстандарта совместно с заинтересованными ведомствами. ТЗ на разработку УВТ утверждает Госстандарт. Он же проводит аттестацию. Организация работ, связанных с применением, хранением, транспортировкой, аттестацией и т. п., возлагается на ученого хранителя УВТ. На УВТ выдается заводской комплект документов, в которых указываются основные метрологические характеристики и условия, в которых воспроизводится и хранится единица.

9.5.6 Метрологическая надежность и межповерочные интервалы

Периодичность поверки должна быть согласована с требованиями к надежности СИ. Поверку необходимо проводить через оптимально выбранные интервалы времени, называемые межповерочными интервалами (МПИ).

Момент наступления метрологического отказа может выявить только поверка СИ, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие – могут привести к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов.

Межповерочные интервалы устанавливаются в календарном времени для СИ, изменение метрологических характеристик которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Зна-

чения МПИ рекомендуется выбирать из следующего ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 6К месяцев, где К – целое положительное число. Для СИ, у которых изменение МХ является следствием износа его элементов, зависящего от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки.

При нахождении МПИ выбирается МХ, определяющая состояние метрологической исправности средства измерений. В качестве таких характеристик, как правило, используются основная погрешность, СКО случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько МХ, то из них выбирается та, по которой обеспечивается наибольший процент брака при поверках.

Вопросу обоснованного выбора продолжительности МПИ посвящено большое число работ. В настоящее время существуют три основных пути их определения:

- на основе статистики отказов;
- на основе экономического критерия;
- произвольное назначение первоначального МПИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы СИ.

Выбор конкретного метода определения продолжительности МПИ зависит от наличия исходной информации о надежности и стабильности СИ. Первый способ является эффективным при условии, что известны показатели метрологической надежности. Наиболее полная информация такого рода содержится в моделях, описывающих изменение во времени МХ средств измерений. Эти модели рассмотрены в разделе 9.3. При известных параметрах моделей МПИ определяется моментом выхода погрешности за нормируемый для данного СИ допуск. Однако большой разброс параметров и характеристик процессов старения СИ приводит к большой погрешности расчета МПИ с помощью таких моделей.

Применение методов расчета МПИ, основанных на статистике скрытых и явных отказов, требует наличия большого количества экспериментальных данных по процессам изменения во времени МХ средств измерений различных типов. Такого рода исследования весьма трудоемки и занимают значительное время. Этим объясняется тот факт, что опубликованных статистических данных о процессах старения приборов различных типов крайне мало. В технических описаниях СИ, как правило, приводится средняя наработка до отказа, средний или гамма-процентный ресурс и срок службы. Этого явно недостаточно для расчета МПИ.

Определение межповерочного интервала по экономическому критерию состоит в решении задачи по выбору такого интервала, при котором можно минимизировать расходы на эксплуатацию СИ и устранять последствия от возможных ошибок, вызванных погрешностями измере-

ния. Исходной информацией для определения МПИ служат данные о стоимости поверки и ремонта СИ, а также об ущербе от изъятия его из эксплуатации и от использования метрологически неисправного прибора. Основная сложность применения этого метода состоит в следующем. Затраты на ремонт и поверку СИ достаточно легко определяются по нормативным документам. В отличие от них потери из-за использования приборов со скрытым метрологическим отказом на практике, как правило, неизвестны. Приходится прибегать к приближенным моделям, описывающим затраты на эксплуатацию СИ со скрытыми метрологическими отказами в виде функции потерь того или иного вида.

Один из вариантов определения МПИ по экономическому критерию приведен в рекомендации МИ 2187-92 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».

Наиболее универсальным является метод, состоящий в произвольном назначении МПИ с последующей корректировкой его величины. В этом случае при минимальной исходной информации назначается первоначальный интервал, а результаты последующих поверок являются исходными данными для его корректировки.

Основной трудностью данного метода является назначение первого МПИ. Преодолеть ее возможно тремя путями. Во-первых, для определения протяженности первого МПИ могут быть использованы показатели метрологической надежности поверяемого СИ. Во-вторых, длительность первого интервала может быть оценена исходя из анализа данных по эксплуатации аналогичных поверяемому по конструкции и технологии производства СИ. В-третьих, первый МПИ выбирается в соответствии с рекомендациями нормативных документов государственных и ведомственных метрологических служб.

Последующие значения МПИ определяются путем корректировки первого интервала с учетом результатов проведенных поверок большого числа однотипных СИ.

Данный метод рассмотрен в рекомендации МИ 1872–88 «Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика определения и корректировки» и в международном стандарте ИСО 10012-1 «Требования, гарантирующие качество измерительного оборудования».

9.5.7. Методики поверки СИ

9.5.7.1 Общие положения

Методика поверки – это документ, подробно описывающий теоретические и практические действия, которые необходимо выполнить при проведении поверок по определенному методу. Правила построения этого документа, порядок изложения и оформления оговаривается само-

стоятельным нормативным документом. Как указано в СТБ 8016-2001 «Классификация нормативных и методических документов системы обеспечения единства измерений», для средств измерений, подлежащих обязательной поверке (относящихся к области законодательной метрологии) правила построения, изложения и оформления методик поверки должны быть изложены в руководящем документе (РД РБ) и утверждены Госстандартом Республики Беларусь. В настоящее время таким документом является руководящий документ Республики Беларусь РД РБ 50.8103-93 «Методики поверки СИ. Построение и содержание».

Для средств измерений, которые не подлежат обязательной поверке (не относятся к области действия законодательной метрологии), правила построения методик поверки формулирует владелец СИ и оформляет их в виде стандарта предприятия. Как правило, по основным положениям этот стандарт использует рекомендации упомянутого выше РД РБ 50.8103-93.

Операция поверки содержит ряд логически самостоятельных работ, осуществляемых над определенными СИ одним или группой работников на определенном рабочем месте. НД по поверке (методика поверки) устанавливает методы и средства поверки СИ, которые позволяют определить пригодность СИ к применению.

Метод поверки и используемое СИ выбираются таким образом, чтобы гарантировать необходимую точность. Метод должен содержать минимальное число поверяемых параметров, которые необходимы и достаточны для обеспечения требуемой точности. В НД излагаются только вопросы техники и методики измерений, но не затрагиваются экономические вопросы. В методике используют международную систему единиц и типовые термины и определения. Желательно, чтобы методика устанавливала методы поверки и средства поверки не для одного типа СИ, а для группы СИ одного наименования.

На практике используется очень большое число методик поверки разных типов СИ (более 1000).

В зависимости от того, подлежит или не подлежит СИ обязательной поверке, а также от места СИ в иерархической цепи передачи размера единицы (по существу, от точности СИ), методика поверки данного СИ (или группы СИ) оформляется в виде одного из перечисленных ниже документов (в соответствии с классификацией СТБ 8016-2001) :

- республиканский или межгосударственный стандарт;
- руководящий документ Республики Беларусь;
- метрологическая рекомендация отрасли (МРО);
- стандарт предприятия.

Первые два типа документов соответствуют только тем СИ, которые относятся к сфере законодательной метрологии (подлежат обязательной поверке); причем СТБ и ГОСТ соответствуют эталонным СИ, а РД РБ – образцовым и рабочим СИ. Естественно, такие документы раз-

рабатываются государственной метрологической службой, а утверждает их Госстандарт Республики Беларусь.

Третий и четвертый тип документов относятся к СИ, не подлежащим обязательной поверке, при этом МРО соответствует более точным (образцовым) или широко распространенным в отрасли СИ, а СТП – рабочим СИ. Методика поверки, оформленная в виде МРО, утверждается в головной организации метрологической службы ведомства (отрасли) при согласовании с Госстандартом. СТП разрабатывается и утверждается на предприятии-владельце СИ [30–36].

9.5.7.2 Основные принципы построения методики поверки средств измерений

В соответствии с РД РБ 50.81 03-93 методика поверки СИ должна состоять из наименования и отдельных разделов.

Наименование содержит:

- наименование системы, в которую включен НД по поверке (например, СОЕИ);
- наименование поверяемого средства;
- наименование объекта стандартизации (в данном случае, методика поверки).

Методика также содержит вводную часть и определенные разделы.

Во введении указывается наименование СИ, приводятся ссылки на НД более высокой категории, которые регламентируют требования к этим СИ и устанавливают методику их поверки.

Основная часть содержит следующие разделы:

Раздел 1 «Операции поверки» должен содержать перечень операций, проводимых при поверке и указанных в наиболее рациональной последовательности.

Раздел 2 «Средства поверки» должен содержать перечень эталонов (образцовых средств измерений) и вспомогательных средств поверки с указанием их метрологических характеристик и(или) обозначения распространяющихся на них стандартов, регламентирующих технические требования к ним. К вспомогательным средствам поверки относятся вспомогательные средства измерений, устройства и поверочные приспособления.

В разделе указывается на возможность применения средств поверки: не приведенных в перечне, но обеспечивающих определение метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью.

Возможно объединение разделов «Операции поверки» и «Средства поверки» под общим названием «Операции и средства поверки», при этом наименования операций и применяемые средства поверки с их характеристиками указываются в табличной форме.

Раздел 3 «Требования безопасности» должен содержать требования, обеспечивающие при проведении поверки безопасность труда, производственную санитарию, охрану окружающей среды и т. п. В разделе указывается о необходимости отнесения процесса проведения поверки к вредным или особо вредным условиям труда.

Раздел 4 «Требования к квалификации поверителей» содержит сведения об уровне квалификации (профессии, образовании, должности, практическом опыте работы и т. п.) лиц, допускаемых к проведению поверки. Раздел включают при наличии особых требований, предъявляемых к квалификации поверителей.

Раздел 5 «Условия поверки» должен содержать перечень физических величин, влияющих на метрологические характеристики поверяемых средств измерений, с указанием номинальных значений и пределов, отклонения от номинальных значений, допускаемых при проверке.

Раздел 6 «Подготовка к поверке» содержит перечень подготовительных работ, которые должны производиться перед поверкой, и способов их выполнения.

При малом числе требований к подготовке и условиям поверки допускается объединять разделы «Условия поверки» и «Подготовка к поверке» под общим названием «Условия поверки и подготовка к ней». При этом сначала должны излагаться условия, а потом порядок подготовки к поверке.

Раздел 7 «Проведение поверки» должен содержать следующие подразделы: внешний осмотр; опробование; определение метрологических характеристик.

Подраздел «Внешний осмотр» содержит перечень требований, которым должны удовлетворять поверяемые средства измерений в отношении комплектности и внешнего вида.

Подраздел «Опробование» должен содержать перечень и описание операций, которые необходимо провести с использованием или без использования образцовых и вспомогательных средств поверки для проверки работоспособности поверяемого средства измерений или действия и взаимодействия его отдельных узлов и элементов.

Подраздел «Определение метрологических характеристик» должен содержать описание операций, указанных в разделе «Операции поверки», и устанавливать наиболее рациональные методы определения метрологических характеристик поверяемого средства измерений.

Если при проведении операций поверки необходимо вести протокол записи результатов наблюдений, это должно быть оговорено, и форма протокола должна быть указана в информационном приложении.

Раздел 8 «Обработка результатов измерений» должен включаться в НД по поверке при наличии сложных способов обработки результатов измерений.

Раздел 9 «Оформление результатов поверки».

9.5.7.3 Содержание требований к оформлению результатов поверки

Положительные результаты поверки должны оформляться одним или несколькими из следующих способов:

- нанесением оттиска поверительного клейма на средства измерений и(или) эксплуатационные документы;
- выдачей свидетельства о поверке.

Последний пункт раздела должен содержать указания о запрете применения средств измерений, прошедших поверку с отрицательными результатами, и об обязательности в этом случае погашения клейма, аннулирования свидетельства или записи в эксплуатационной документации.

НД по поверке может содержать обязательные и справочные приложения.

Обязательными приложениями оформляются:

- примеры расчетов по обработке результатов наблюдений, таблицы расчетных величин, графики зависимости и другие расчетные данные;
- содержание и порядок записи в свидетельстве результатов поверки образцовых и рабочих средств измерений;
- специальные указания по технике безопасности (при необходимости).

Справочными приложениями оформляются:

- термины и определения;
- технические описания вспомогательных устройств и поверочных приспособлений;
- необходимые дополнительные сведения о поверяемых и образцовых средствах измерения и вспомогательных средствах поверки;
- дополнительные особые указания о способах нанесения поверительных клейм;
- другие требования, способствующие исключению ошибок при поверке и повышению производительности поверочных работ, например, поверочные таблицы с заранее подсчитанными предельно допускаемыми нормами отклонений для определения при поверке значений параметров: номограммы, указания по применению вычислительной техники и т. п.

9.5.8 Разновидности поверок

Существуют следующие основные способы поверки: непосредственное сличение, компарирование, поверка по образцовой мере, измерение поверяемым средством измерений величины, воспроизводимой мерой [30–36].

Для более сложных средств измерений, состоящих из ряда взаимосвязанных элементов, различают комплектную и поэлементную поверки.

Особо следует рассматривать поверку измерительных приборов сравнения (компарировующих устройств). Многие из этих приборов не содержат элементов, определяющих значение измеряемой величины. В то же время точность измерений, проводимых с помощью приборов сравнения, зависит от ряда их свойств и характеристик. То же самое можно сказать о ряде измерительных преобразователей, которые сами по себе не могут служить для целей измерения.

Поверка путем непосредственного сличения. Поверку можно проводить путем непосредственного сличения показаний двух средств измерений: поверяемого и образцового – без применения компарирующих или каких-либо других промежуточных приборов.

Непосредственно сличать можно только штриховые меры длины (линейки, брусковые метры, рулетки), меры вместимости (измерительные цилиндры, бюретки, пипетки, мерные колбы и т. п.). Непосредственное сличение при поверке применяют, как правило, для менее точных мер. Для более точной поверки используют те или иные компарирующие устройства.

Поверку путем непосредственного сличения показаний других средств измерений применяют довольно широко. В основе такой поверки лежит одновременное измерение одной и той же величины поверяемым и образцовым средством измерений. Необходимо тщательно следить за тем, чтобы средства измерений измеряли действительно одну и ту же величину. Так, при погружении нескольких термометров в термостат температура каждого из них может быть различной вследствие неисправности или несовершенства конструкции термостата. На термопары, при помещении их в печь, может повлиять неравномерность температурного поля печи и т. д.

В нормативных документах по поверке тех или иных средств измерений предусмотрены пути обеспечения идентичности измеряемых величин и способы поверки воспроизводящей их аппаратуры.

Поверка мер с помощью приборов сравнения. Большинство мер сличают с образцовыми при помощи того или иного измерительного прибора сравнения (компарировующего устройства). Как уже было сказано, сам по себе компаратор не содержит образцовых мер или показыва-

ющих измерительных механизмов. Тем не менее точность поверки мер зависит от ряда метрологических характеристик приборов сравнения. Наиболее часто применяют следующие измерительные приборы сравнения (компараторы): образцовые весы различных разрядов (при поверке гирь), мосты постоянного и переменного тока (при сличении мер сопротивления, индуктивности и емкости), потенциометры (при сличении мер сопротивления и э. д. с. нормальных элементов), компараторы для точных сличений мер длины.

Остановимся на некоторых требованиях к метрологическим характеристикам измерительных приборов сравнения, применяемых для поверки. Общее требование к чувствительности можно сформулировать так: компаратор должен быть настолько чувствительным, чтобы с его помощью можно было обнаружить изменение измеряемой величины, не превышающее значения погрешности образцовой меры. Например, для гири 1 кг допускается погрешность 500 мг. Для ее поверки используют образцовые гири, погрешность которых не должна превышать 100 мг. От весов, применяемых для поверки, требуют, чтобы при изменении нагрузки на 100 мг отклонение их указателя было не меньше одного деления.

Элементы конструкции измерительных приборов сравнения должны быть стабильными. Так, одним из основных требований к весам является требование устойчивой их равноплечести. Поскольку достичь идеальной равноплечести не удастся, приходится применять различные приемы исключения влияния неравноплечести. Однако все эти приемы могут дать надлежащий эффект только тогда, когда неравноплечесть невелика и когда она не изменяется. Если бы в процессе двукратного взвешивания неравноплечесть изменилась, то возникла бы новая погрешность.

Мосты постоянного и переменного тока также имеют «плечи», отношение между которыми бывает равно не только 1:1, но и 1:10, 1:100 и т. д. Постоянство отношений плеч, т. е. отношения их электрических сопротивлений, непосредственно влияет на точность поверки.

Здесь приведены примеры только некоторых характеристик особенностей поверки мер с применением измерительных приборов сравнения. Существует много других особенностей такой поверки, о которых говорится в соответствующих руководствах и инструкциях. Поверка мер с помощью измерительных приборов сравнения может обеспечить очень высокую точность. В частности, большинство эталонных работ (сличение образцовых мер с рабочими эталонами, вторичных эталонов с первичными) проводится с применением измерительных приборов сравнения.

Поверка средств измерений по образцовым мерам. Процесс поверки средств измерений в этом случае сводится или к измерению величины, воспроизводимой образцовой мерой, или к измерению некоторой величины, которая одновременно сопоставляется со значением образцо-

вой меры. Например, штангенциркуль – один из простых приборов для измерения длины – можно поверять с помощью концевых мер длины. Поверка ведется путем непосредственного «измерения» размера меры, помещаемой между губками штангенциркуля. О погрешности судят по разности между показанием штангенциркуля и значением меры, которая принимается за действительное значение измеряемой длины.

Когда можно использовать многозначную образцовую меру или набор образцовых мер, удобнее изменять значение образцовой меры (или комплекта образцовых мер) до тех пор, пока указатель измерительного прибора не установится на необходимой отметке. Например, при поверке омметра его зажимы соединяют с магазином сопротивления, на котором набирают некоторое значение сопротивления, наблюдая при этом за указателем омметра. Когда указатель остановится на требуемой отметке, по шкале магазина сопротивления определяют действительное значение сопротивления, соответствующее этой отметке.

Другой пример – поверка циферблатных настольных весов при помощи образцовых гирь, помещаемых на чашку этих весов.

Примером параллельного измерения некоторой величины при помощи поверяемого измерительного прибора и образцовых мер может служить поверка вольтметров путем сличения его показаний с э. д. с. нормального элемента при помощи потенциометра.

Поэлементная поверка средств измерений. Перечисленные выше способы поверки средств измерений являются комплектными, т. е. средство измерений поверяют в целом – в полном комплекте всех его составных частей, и суждение о его пригодности выносят на основании измерений известных или параллельно измеряемых величин. Средство измерений действует при этом так, как оно действовало бы при его практическом применении. Точность такой поверки в большинстве случаев не вызывает сомнений. Однако иногда целесообразнее проводить поверку поэлементно. Поэлементной называют поверку средств измерений путем измерения параметров отдельных его частей с последующим вычислением действительных значений измеряемой им величины. Такой путь применим тогда, когда закономерности взаимодействия отдельных частей средства измерений точно известны и возможности посторонних влияний на его показания исключены или эти влияния поддаются точному учету.

Одной из причин, побуждающих прибегать к поэлементной поверке, является большая трудоемкость комплектного способа или сложность подбора образцовых мер для поверки средств измерений при большом разнообразии его показаний.

На практике поэлементную поверку нередко проводят в сочетании с комплектной. Кроме отдельных частей средства измерений и расчета погрешностей, производят комплектную поверку его при некоторых характерных показаниях. В качестве примера можно привести поверку

грузопоршневого манометра. Кроме сличения показаний такого манометра с показаниями образцового грузопоршневого манометра более высокого разряда, отдельно определяют массы накладываемых грузов. При поверке многодиапазонных вольтметров можно осуществить комплектную поверку прибора на всех диапазонах измерения. Можно также, проведя тщательную поверку в одном или двух диапазонах измерения и измерив значения добавочных сопротивлений и сопротивления измерительного механизма, вычислить поправки (или поправочные множители) для других диапазонов.

Поэлементная поверка в ряде случаев оказывается целесообразной для сложных средств измерений, в частности таких, которые состоят из компарирующего устройства со встроенными в его образцовыми мерами.

Поверка измерительных приборов сравнения. Как уже указывалось, измерительные приборы сравнения (компараторы) отдельно без образцовых мер непригодны для измерений. Тем не менее они всегда рассматриваются как средства измерений и подлежат поверке.

Измерительные приборы сравнения не дают показаний, выраженных в тех или иных единицах, что обуславливает специфические особенности их поверки. Задача, которая ставится при их поверке, сводится к выявлению тех погрешностей, которые может внести в результаты измерений прибор сравнения при различных условиях его применения. Поверка приборов сравнения часто осуществляется поэлементно. Так как прибор сравнения является устройством, устанавливающим определенное отношение между значением измеряемой величины и значением меры, то в первую очередь поверке подлежит правильность воспроизведения им этого отношения. Правильность отношения «плеч» можно определить путем пробных сличений двух мер с известными значениями или путем измерения отдельных элементов, образующих «плечи» прибора сравнения.

Например, правильность отношения плеч в равноплечих (1:1) или в неравноплечих (1: 100 и более) весах определяется путем наложения образцовых гирь на грузоприемные площадки. Учитывая особенности конструкции опор и рычагов, эти гири располагают на различных участках площадок, имитируя таким образом возможные случаи неравномерного распределения взвешиваемых масс. Необходимо, чтобы отношение плеч не нарушалось, вернее, чтобы его нарушения не выходили за установленные пределы.

Отношение плеч в электроизмерительных мостах проверяют путем сравнения с отношением сопротивлений образцовых мер или путем измерения отдельных элементов (сопротивлений), составляющих плечи. Последний путь выбирают тогда, когда число возможных отношений плеч достаточно велико. Если сопротивления плеч не предназначены для применения в качестве мер сопротивления, то точные значения сопротивлений могут быть неизвестны; необходимо лишь, чтобы их от-

ношения соответствовали номинальным значениям отношений плеч. Важной характеристикой приборов сравнения является чувствительность, свойственная только измерительным приборам сравнения, с встроенными нулевыми указателями. Следует иметь в виду, что при различных режимах работы прибора сравнения чувствительность может заметно измениться, как, например, в равноплечих весах.

Поверка измерительных преобразователей. Основной характеристикой измерительных преобразователей является отношение между значениями измеряемой величины на их входе и выходе. Эти величины могут отличаться не только размером, но и быть разнородными. Проверка правильности отношения, т. е. соответствия их номинальному значению, является важнейшей операцией поверки измерительных преобразователей. Определение действительного значения отношений в преобразователях напоминает определение отношений плеч в приборах сравнения. При поэлементной поверке измеряют отдельные части преобразователя, а затем вычисляют отношение. При комплектной поверке преобразователи поверяют в действии, причем и на входе, и на выходе их производят измерения с помощью образцовых средств измерений. Отношение показаний этих средств измерений (если необходимо, после введения поправок) принимают за действительный коэффициент (отношение) преобразования.

В некоторых случаях поверку осуществляют путем сличения с образцовым, более точным преобразователем (например, поверка измерительных трансформаторов электрического тока и напряжения). Такой способ эффективнее, однако при этом приходится использовать образцовые преобразователи, которые сами требуют более точной поверки.

Существует еще один путь поверки преобразователей, который заключается в преобразовании измеряемой величины с помощью относительно легко поверяемых элементов. Например, при поверке измерительных трансформаторов для преобразования тока или напряжения применяют шунты или делители напряжения.

9.6 Вопросы для самоконтроля

1. Чем метрологический отказ отличается от неметрологического?
2. Чем внезапный отказ отличается от постепенного?
3. Дайте определение понятию «метрологическая надежность».
4. Перечислите характеристики надежности средства измерения.
5. Дайте определение понятиям «стабильность», «безотказность», «долговечность», «ремонтпригодность» и «сохраняемость».
6. Чем обусловлено изменение метрологических характеристик средств измерений во времени?

7. Изобразите график изменения погрешности средства измерения во времени.

8. Изобразите график зависимости интенсивности метрологических отказов от времени.

9. Запишите линейную модель изменения погрешности средств измерения.

10. Что является основным практическим средством достижения долговременной метрологической исправности средства измерений?

11. Запишите экспоненциальную модель изменения погрешности средств измерения.

12. Проиллюстрируйте линейный и экспоненциальный законы изменения погрешности средств измерения.

13. Как определить число отказов в случае изменения погрешности средств измерения по экспоненциальной модели?

14. По каким формулам можно определить момент наступления очередного отказа и длительность межремонтных периодов в случае изменения погрешности средств измерения по экспоненциальной модели?

15. Дайте определение понятию «срок службы средства измерения».

16. Запишите формулу для определения срока службы средства измерения в случае изменения погрешности по экспоненциальной модели.

17. К чему приводит отрицательное ускорение процесса старения средства измерения в случае изменения погрешности по экспоненциальной модели?

18. По какой зависимости определяется момент наступления отказа средства измерения с помощью логистической модели изменения погрешности?

19. Как определить длительность межремонтных интервалов по логистической модели изменения погрешности средств измерений?

20. Какой вид имеет кривая изменения погрешности в случае использования логистической модели?

21. Охарактеризуйте недостатки логистической модели изменения погрешности средств измерений.

22. Что дает потребителю средств измерения знание показателей метрологической надежности?

23. Перечислите известные Вам показатели безотказности средств измерений.

24. Дайте определения понятиям «вероятность безотказной работы», «средняя и гамма-процентная наработки до отказа» и «интенсивность отказов».

25. Запишите формулы для определения вероятности безотказной работы, средней и гамма-процентной наработки до отказа и интенсивности отказов.

26. Какие Вам известны основные показатели долговечности средств измерений?

27. Запишите формулы определяющие средние и гамма-процентные сроки службы и ресурсы средств измерений.

28. Охарактеризуйте показатели сохраняемости и ремонтпригодности средств измерений.

29. Дайте определение понятию «поверка».

30. Кто имеет право проводить поверку средств измерений?

31. Перечислите и охарактеризуйте известные Вам виды поверок.

32. В каких случаях проводится внеочередная поверка?

33. В каких случаях средства измерения подвергаются обязательной поверке?

34. Какие органы должны проводить поверку средств измерений подлежащих обязательной поверке?

35. Укажите обязанности предприятия в случае поверки средств измерений непосредственно на местах изготовления, ремонта и эксплуатации органами государственной метрологической службы.

36. Дайте определение понятию «поверочная схема».

37. Как классифицируются поверочные схемы в зависимости от области распространения?

38. Какие требования предъявляются к поверочным схемам?

39. Изобразите пример поверочной схемы предприятия.

40. Дайте определение понятию «установка высшей точности».

41. Когда создаются установки высшей точности?

42. Опишите пути определения межповерочных интервалов.

43. В чем суть методики определения межповерочного интервала по экономическому критерию?

44. В чем суть методики произвольного назначения первоначального межповерочного интервала с последующей корректировкой в течение всего срока службы средства измерения?

45. Дайте определение понятию «методика поверки».

46. В каком виде оформляются методики поверок?

47. Перечислите и опишите содержание разделов методики поверки.

48. Каким образом оформляются положительные результаты поверки?

49. Перечислите основные способы поверки.

50. Как осуществляется поверка путем непосредственного сличения?

51. Как осуществляется поверка мер с помощью приборов сравнения?

52. Как осуществляется поверка средств измерений по образцовым мерам?

53. Как осуществляется поэлементная поверка средств измерений?

54. Как осуществляется поверка измерительных приборов сравнения?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимова, Е. Б. Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. пособие / Е. Б. Герасимова, Б. И. Герасимов. – Москва : ИНФРА-М, 2010. – 224 с.
2. Голуб, О. В. Стандартизация, метрология и сертификация : учеб. пособие / О. В. Голуб. – Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2009. – 335 с.
3. Дельцова, В. Д. Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством : учеб. пособие / В. Д. Дельцова. – Витебск : УО «ВГТУ», 2002. – 294 с.
4. Димов, Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / Ю. В. Димов – 2-е издание – Москва : Питер, 2004. – 432 с.
5. Ким, К. К. Метрология, стандартизация и электроизмерительная техника : учеб. пособие / К. К. Ким, Г. Н. Анисимов, Б. Я. Литвинов. – Санкт-Петербург : Питер, 2006. – 368 с.
6. Крылова, Г. Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии : учебник для вузов / Г. Д. Крылова. – 2-е издание., перераб. и доп. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 711 с.
7. Кравченко, Е. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. пособие / Е. В. Кравченко, Ю. К. Кривогузова, И. П. Озерова. – Томск : изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 172 с.
8. Лифиц, И. М. Стандартизация, метрология и сертификация : учебник / И. М. Лифиц. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт-Издат., 2005. – 345 с.
9. Марусина, М. Я. Основы метрологии, стандартизации и сертификации : учеб. пособие / М. Я. Марусина, В. Л. Ткалич, Е. А. Воронцов, Н. Д. Скалецкая. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2009. – 164 с.
10. Никифоров, А. Д. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие / А. Д. Никифоров, Т. А. Бакиев. – 3-е изд. испр. – Москва : Высш. шк., 2005. – 422 с.
11. Пономарев, С. В. Метрология, стандартизация, сертификация : учебник для вузов / С. В. Пономарев, Г. В. Шишкина, Г. В. Мозгова. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.
12. Радкевич, Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для вузов / Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе, Б. И. Лактионов. – 2-е изд., доп. – Москва : Высш. шк., 2006. – 800 с.
13. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерения : учебник для вузов / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 2008. – 216 с.
14. Тюрин, Н. И. Введение в метрологию / Н. И. Тюрин. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 304 с.
15. Кедров, Б. М. Классификация наук : в 3-х т./ Б. М. Кедров. – Москва : Мысль, 1965. – Т. 2 – 544 с.

16. Васильев, А. С. Основы метрологии и технические измерения : учеб. пособие / А. С. Васильев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1988. – 240 с.
17. Зайцев, С. А. Метрология, стандартизация и сертификация в машиностроении : учебник / С. А. Зайцев, А. Н. Толстов, Д. Д. Грибанов, А. Д. Куранов. – Москва : Издательский центр «Академия», – 2017. – 288 с.
18. Кириллов, В. И. Метрологическое обеспечение : учеб. пособие : в 4 ч. / В. И. Кириллов. – Мн. : БГУИР, 2003. – Ч. 1. – 88с.
19. Кузнецов, В. А. Общая метрология / В. А. Кузнецов, Г. В. Ялунина. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 272 с.
20. Лячнев, В. В. Метрологические основы теории измерительных процедур : научное издание / В. В. Лячнев, Т. Н. Сирая, Л. И. Довбета ; под ред. В. В. Лячнева. – Санкт-Петербург : Элмор, 2011. – 416 с.
21. Пазушкина, О. В. Основы метрологии, стандартизации, сертификации и контроля качества : учебное пособие / О. В. Пазушкина. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 148 с.
22. Пронкин, Н. С. Основы метрологии : практикум по метрологии и измерениям: учеб. пособие для вузов / Н. С. Пронкин. – Москва : Логос, 2007. – 392 с.
23. Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – Москва : Логос, 2001. – 408 с.
24. Сергеев, А. Г. Метрология : учебник / А. Г. Сергеев. – Москва : Логос, 2005. – 272 с.
25. Фридман, А. Э. Основы метрологии. Современный курс / А. Э. Фридман. – Санкт-петербург : Профессионал, 2008. – 284 с.
26. Шишмарев, В. Ю. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / В. Ю. Шишмарев. – Москва : КНОРУС, 2017. – 305 с.
27. Обеспечение единства измерений [Электронный ресурс] : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://gosstandart.gov.by/metrology/>. – Дата доступа : 20.09.2023.
28. Наилучшие калибровочные и измерительные возможности [Электронный ресурс] : Белорусский государственный институт метрологии / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://belgim.by/pages/view?id=141>. – Дата доступа : 20.09.2023.
29. Техническое нормирование и стандартизация [Электронный ресурс] : Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <https://belgiss.by/technical-regulation-standardization>. – Дата доступа : 20.09.2023.
30. Артемьев, Б. Г. Справочное пособие для работников метрологических служб : в 2 книгах / Б. Г. Артемьев, С. М. Голубев. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 352 с.

31. Богданов, Г. П. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Г. П. Богданов [и др.] ; под ред. В. А. Кузнецова. – Москва : Радио и связь, 1990. – 240 с.
32. Клюев, В. В. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – Москва : Машиностроение. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7 / В. В. Клюев., Ф. Р. Соснин., В. Н. Филинов [и др.] ; Под общ. Ред. В. В. Клюева. – 1996. – 464 с.
33. Миронов, Э. Г. Метрология и технические измерения : учеб. пособие / Э. Г. Миронов., Н. П. Бессонов. – Москва : КНОРУС, 2015. – 422 с.
34. Перельштейн, Е. Л. Метрологическая служба промышленного предприятия / Е. Л. Перельштейн. – Москва : Издательство стандартов, 1982. – 192 с.
35. Рейх, Н. Н. Метрологическое обеспечение производства : учеб. пособие для ВИСМ / Н. Н. Рейх, А. А. Тупиченко, В. Г. Цейтлин ; под ред. Л. К. Исаева. – Москва : Изд-во стандартов, 1987. – 248 с.
36. Швандар, В.А. Стандартизация и управление качеством продукции : учебник для вузов / В. А. Швандар [и др.] ; под ред. В. А. Швандара. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2000. – 487 с.
37. Яковлев, Ю. Н. Метрологическая экспертиза технической документации / Ю. Н. Яковлев [и др.]. – Москва : Изд-во стандартов. – 1992. – 184 с.
38. Измерение деталей машин. Погрешности измерений [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/52414/_1/978-5-7996-2172-8_2017.pdf– Дата доступа : 20.03.2022.
39. Марков, Н. Н. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях / Н. Н. Марков., Г. Б. Кайнер., П. А. Сацедотов. – Москва : Машиностроение – 1967. – 393 с.
40. Новицкий, П. Ф. Оценка погрешностей результатов измерений / П. Ф. Новицкий, И. А. Зограф. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
41. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск : Вышэйшая школа, – 1985. – 287 с.
42. Абаджи, К. И. Справочник по производственному контролю в машиностроении / К. И. Абаджи., А. Н. Бойцов., М. Г. Богуславский [и др.] ; Под ред. д-ра техн. наук проф. А. К. Кутая. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отд-ние – 1974. – 975 с.
43. Аникст, Д. А. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст., К. М. Константинович., И. В. Меськин [и др.] ; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. – Москва : Машиностроение, – 1987. – 480 с.

44. Балакшин, Б. С. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении / Б. С. Балакшин [и др.]. – Москва : Машиностроение, – 1972. – 616 с.

45. Бастль, В. Измерения в промышленности : справ. изд. в 3-х книгах. / В. Бастль [и др.] ; под ред. П. Профоса – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия. – Книга 1 : Теоретические основы (пер. с нем.) – 1990. – 492 с.

46. Белкин, И. М. Средства линейно-угловых измерений. : Справочник / И. М. Белкин. – Москва : Машиностроение, 1987. – 368 с.

47. Бурдун, Г. Д. Линейные и угловые измерения / Г. Д. Бурдун, Г. С. Бирюков, М. Г. Богуславский [и др.] ; Под ред. д-ра техн. наук проф. Г. Д. Бурдуна. – Москва : Изд-во стандартов, 1977. – 512 с.

48. Бурдун, Г. Д. Технические измерения в машиностроении / Г. Д. Бурдун., С. С. Волосов ; Под ред. заслуж. деятеля науки и техники проф. Г. Д. Бурдуна. – Москва : Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при совете министров СССР, 1967. – 182 с.

49. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм [Электронный ресурс] : методические указания / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850861.pdf>. – Дата доступа : 20.03.2022.

50. Государственный реестр средств измерений [Электронный ресурс] : Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : [https://www.oei.by/grsi?GrsiSearch\[grsi_status\]=1](https://www.oei.by/grsi?GrsiSearch[grsi_status]=1). – Дата доступа : 20.03.2022.

51. Зайцев, С. А. Допуски, посадки и технические измерения в машиностроении : учебник для нач. проф. образования / С. А. Зайцев, А. Д. Куранов, А. Н. Толстов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 240 с.

52. Зайцев, С. А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты / С. А. Зайцев, Д. Д. Грибанов, А. Н. Толстов, Р. В. Меркулов. – Москва : Издательский центр «Академия», 2005. – 464 с.

53. Зайцев, С. А. Технические измерения : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / С. А. Зайцев., А. Н. Толстов. – 3-е изд., испр. – Москва : Издательский центр «Академия», 2019. – 368 с.

54. Иванов, А. Г. Измерительные приборы в машиностроении / А. Г. Иванов., Г. Д. Бурдун., С. С. Волосов [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук проф. Г. Д. Бурдуна, д-ра техн. наук проф. Б. А. Тайца. – Москва : Машиностроение, – 1964. – 525 с.

55. Кайнер, Г. Б. Измерение линейных размеров высокоточных деталей / Г. Б. Кайнер. – Москва : Машиностроение, – 1975. – 168с.

56. Каталог измерительных средств [Электронный ресурс] : «Метал Гирз» / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://metallgears.ru/catalog/instrument-izmeritelnyij/>. – Дата доступа : 20.09.2023.

57. Каталог измерительных средств [Электронный ресурс] : «Микрон» / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://www.microntools.ru/c/izmeritelnyy-instrument/>. – Дата доступа : 20.03.2022.

58. Каталог измерительных средств [Электронный ресурс] : Челябинский инструментальный завод / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <https://chiz.ru/catalog/izmeritelnyy-instrument/>. – Дата доступа : 20.09.2023.

59. Каталог линейных средств измерений контроля [Электронный ресурс] : «Первая инструментальная компания». / Сайт производителя. – Электрон. Текстовые данные. – Режим доступа : <https://meritel.by/index.pl?act=SECTION&section=linejnye+sredstva+izmereniya>. – Дата доступа : 20.09.2023.

60. Кирилловский, В. К. Оптические измерения. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений. : учеб. пособие / В. К. Кирилловский, Т. В. Точилина. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2017. – 49 с.

61. Классификация средств измерений [Электронный ресурс] : Главный форум метрологов / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : https://info.metrologu.ru/spravochnik/metrologiya/sredstva-izmereniy/klassifikaciya_sredstv_izmereniy.html. – Дата доступа : 20.09.2023.

62. Клименков, С. С. Нормирование точности и технические измерения в машиностроении : учебник / С. С. Клименков. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2013. – 248 с.

63. Ковалев, Л. Д. Специальные приборы для измерения линейных и угловых величин : учеб. пособие / Л. Д. Ковалев. – Минск : БНТУ – 2003. – 238с.

64. Кострицкий, В. Г. Контрольно-измерительные инструменты и приборы в машиностроении : справочник / В. Г. Кострицкий [и др.]. – Киев : Техника, – 1986. – 135 с.

65. Марков, А. Л. Краткий справочник контрольного мастера машиностроительного завода / А. Л. Марков, Ф. П. Волосевич. – Ленинград : Машиностроение, – 1973. – 312 с.

66. Махоня, И. Т. Справочник инструментальщика по техническим измерениям / И. Т. Махоня. – 4-е изд., перераб. – М.: Машиностроение – 1984. – 144 с.

67. Медянцева, Л. Л. Контроль прямолинейности и плоскостности поверхностей / Л. Л. Медянцева, В. В. Горбачева, Е. Е. Шарова. – Москва : Издательство стандартов, – 1972. – 119 с.

68. Мерительный инструмент [Электронный ресурс] : «Чертежная документация» / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа : <http://gk-drawing.ru/plotting/measuring-tools/>. – Дата доступа : 20.09.2023.

69. Метрологические характеристики средств измерений [Электронный ресурс] : Метрологическое обеспечение производства / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: https://metro.ru/html/_ci/metrologicheskie_harakteristiki_si.html. – Дата доступа : 20.03.2022.

70. Методы и средства измерений [Электронный ресурс] : Учебное электронное текстовое пособие / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/9033/1/Mironov.pdf>. – Дата доступа : 20.03.2022.

71. Никитин, В. А. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие / В. А. Никитин, С. В. Бойко. – 2-е изд. перераб. и доп. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2004. – 462 с.

72. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – Москва : Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.

73. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие / В. Я. Распопов. – М.: Машиностроение, – 2007. – 400 с.

74. Соломахо, В. Л. Нормирование точности и технические измерения : учеб. пособие / В. Л. Соломахо. – Минск : изд-во Гревцова, 2011. – 360 с.

75. Соломахо, В. Л. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 296 с.

76. Сорочкин, Б. М. Автоматизация измерений и контроля размеров деталей / Б. М. Сорочкин. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 365 с.

77. Сорочкин, Б. М. Средства для линейных измерений / Б. М. Сорочкин [и др.]. ; под ред. Н. А. Жуковой, Т. П. Малашкиной. – Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 264 с.

78. Справочник по производственному контролю в машиностроении / под ред. А. К. Кутая. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, 1974. – 676 с.

79. Средства измерений [Электронный ресурс] : МетрКонсалт / Сайт производителя. – Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <https://metrcons.ru/info/articles/sredstva-izmereniy-i-ikh-pogreshnosti/sredstva-izmereniy/>. – Дата доступа : 20.09.2023.

80. Степанов, Ю. С. Альбом контрольно-измерительных приспособлений : учеб. пособие для вузов / Ю. С. Степанов, Б. И. Афонасьев

[и др.] ; под общ. ред. Ю. С. Степанова. – Москва : Машиностроение, – 1998. – 184 с.

81. Уайтхауз, Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы : научное издание / Д. Уайтхауз. – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», – 2009. – 472 с.

Приложение А
Перевод некоторых единиц, применяемых в Англии и США,
в единицы СИ

Величина	Наименование	Перевод в единицы СИ или их кратные, или дольные
Длина	Ярд	0,9144 м
	Фут	0,3048 м
	Дюйм	0,0254 м
	Миля	1609,344 м
	Морская миля	1852 м
Объем	Галлон (англ.)	4,54609 дм ³
	Пинта (англ.)	0,568261 дм ³
	Жидкостная унция (англ.)	28,4130 см ³
	Бушель (англ.)	36,3687 дм ³
	Галлон (США)	3,78543 дм ³
	Жидкостная пинта (США)	0,473179 дм ³
	Жидкостная унция (США)	29,5737 см ³
	Нефтяной баррель (США)	158,988 дм ³
	Бушель (США)	35,2393 дм ³
	Сухая пинта (США)	0,550614 дм ³
	Сухой баррель (США)	115,628 дм ³
Скорость	Фут в секунду	0,3048 м/с
	Миля в час	0,44704 м/с
Масса	Фунт (торговый)	0,45359237 кг
	Гран	64,79891 мг
	Унция (торговая)	28,3495 г
	Центнер	50,8023 кг
	Тонна	1016,05 кг
	Унция аптекарская	31,1035 г
Сила	Паундаль	0,138255 Н
Вес	Фунт-сила	4,44822 Н
Давление	Паундаль на квадратный фут	1,48816 Па
	Фунт-сила на квадратный фут	47,8803 Па
	Фунт-сила на квадратный дюйм	6894,76 Па
	Фут водяного столба	2989,07 Па
	Дюйм водяного столба	249,089 Па
	Дюйм ртутного столба	3386,39 Па
Работа Энергия	Фут-паундаль	0,0421401 Дж
	Фут-фунт-сила	1,35582 Дж
	Британская тепловая единица	1055,06 Дж

Приложение Б
Номинальные значения влияющих величин при нормальных условиях

Влияющая величина	Значение
1. Температура для всех видов измерений, С (К)	20 (293)
2. Давление окружающего воздуха для измерения ионизирующих излучений, теплофизических, температурных, магнитных, электрических измерений, измерения давления и параметров движения кПА (мм. рт. ст.)	100 (750)
3. Давление окружающего воздуха для линейных, угловых измерений, измерения массы, силы света и измерений в других областях, кроме указанных в п. 2, кПА (мм. рт. ст.)	101,3 (760)
4. Относительная влажность воздуха для линейных, угловых измерений, измерений массы, измерений в спектроскопии, %	58
5. Относительная влажность воздуха для измерения электрического сопротивления, %	55
6. Относительная влажность воздуха для измерений температуры, силы, твердости, переменного электрического тока, ионизирующих излучений, параметров движений, %	65
7. Относительная влажность воздуха для всех видов измерений, кроме указанных в п. 4–6, %	60
8. Плотность воздуха, кг · м ³	1,2
9. Ускорение свободного падения, м · с ²	9,8
10. Магнитная индукция (Тл) и напряженность электростатического поля (В/м) для измерений параметров движения, магнитных и электрических величин	0
11. Магнитная индукция и напряженность электростатического поля для всех видов измерений, кроме указанных в п. 10	Соответствует характеристикам поля Земли в данном географическом районе
12. Частота питающей сети переменного тока, Гц	50±1 %
13. Среднеквадратическое значение напряжения питающей сети переменного тока, В	220±10 %

Приложение В

Статистические таблицы

Таблица В.1 – Значения функции Лапласа

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0398	0438	0478	0517	0557	0596	0636	0675	0714	0753
0,2	0793	0832	0871	0910	0948	0987	1026	1064	1103	1141
0,3	1179	1217	1255	1293	1331	1368	1406	1443	1480	1517
0,4	1554	1591	1628	1664	1700	Д736	1772	1808	184.4	1879
0,5	1915	1950	1985	2019	2054	2088	2123	2157	2190	2224
0,6	2257	2291	2324	2357	2389	2422	2454	2486	2517	2549
0,7	2580	2611	2642	2673	2703	2734	2764	2794	2823	2852
0,8	2881	2910	2939	2967	2995	3023	3051	3078	3106	3133
0,9	3159	3186	3212	3238	3264	3289	3315	3340	3365	3389
1,0	3413	3438	3461	3485	3508	3531	3554	3577	3599	3621
1,1	3643	3665	3686	3708	3729	3749	3770	3790	3810	3830
1,2	3849	3869	3888	3907	3925	3944	3962	3980	3997	4015
1,3	4032	4049	4066	4082	4099	4115	4131	4147	4162	4177
1,4	4192	4207	4222	4236	4251	4265	4279	4292	4306	4319
1,5	4332	4345	4357	4370	4382	4394	4406	4418	4429	4441
1,6	4452	4463	4474	4484	4495	4505	4515	4525	4535	4545
1,7	4554	4564	4573	4582	4591	4599	4608	4616	4625	4633
1,8	4641	4649	4656	4664	4671	4678	4686	4693	4699	4706
1,9	4713	4719	4726	4732	4738	4744	4750	4756	4761	4767
2,0	4772	4778	4783	4788	479,3	4798	4803	4808	4813	4817
2,1	4821	4826	4830	4834	4838	4842	4846	4850	4854	4857
2,2	4861	4864	4868	4871	4874	4878	4881	4884	4887	4890
2,3	4893	4896	4898	4901	4904	4906	4909	4911	4913	4916
2,4	4918	4920	4922	4925	4927	4929	4931	4932	4934	4936
2,5	4938	4940	4941	4943	4945	4946	4948	4949	4951	4952
2,6	4953	4955	4956	4957	4959	4960	4961	4962	4963	4964
2,7	4965	4966	4967	4968	4969	4970	4971	4972	4973	4974
2,8	4974	4975	4976	4977	4977	4978	4979	4979	4980	4981
2,9	4981	4982	4982	4983	4984	4984	4985	4985	4986	4886
3,0	4986									
3,5	4998									
4,0	4999									

Таблица В.2 – Значения распределения Стьюдента

n	Доверительная вероятность Р				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,68	636,62
3	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,06	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96

Окончание таблицы В.2

8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

Таблица В.3 – Значения критерия Фишера для различных уровней значимости

k_2	F_k при k_1 равном									
	1	2	3	4	5	6	8	12	16	00
	$q = 0$									
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,43	19,50
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,84	5,63
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,92	3,67
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,20	2,93
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,82	2,54
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,60	2,30
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,44	2,13
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,33	2,01
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,25	1,92
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,18	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,99	1,62
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,94	1,75	1,64	1,00
	$q = 0$									
2	98,49	99,00	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,42	99,44	99,50
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,80	14,37	14,15	13,46
6	13,74	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,10	7,72	7,52	6,88
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,03	5,67	5,48	4,86
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,06	4,71	4,52	3,91
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,50	4,16	3,98	3,36
14	8,86	6,51	5,56	5,03	4,69	4,46	4,14	3,80	3,62	3,00
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	3,89	3,55	3,37	2,75
18	8,28	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,71	3,37	3,20	2,57
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,56	3,23	3,05	2,42
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,17	2,84	2,66	2,01
∞	6,64	4,60	3,78	3,32	3,02	2,80	2,51	2,18	1,99	1,00

Примечание: k_1 – число степеней свободы большей дисперсии; k_2 – число степеней свободы меньшей дисперсии.

Приложение Г **Предельные погрешности измерения наружных линейных размеров, биений и глубин некоторыми универсальными измерительными средствами**

Таблица Г.1

Средства измерения		Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм
№ для прил. Ж, И, К	Наименование и случаи применения	
		до 500
1	Линейка измерительная металлическая с ценой деления 1 мм	500

Таблица Г.2

Средства измерения		Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм						
№ для прил. Ж	Наименование и случаи применения	до 10	св 10 до 50	св 50 до 80	св 80 до 120	св 120 до 180	св 180 до 250	св 250 до 500
2	Штангенциркули (ШЦ-I, ШЦТ-I, ШЦ-II, ШЦ-III) с отсчетом по нониусу 0,1 мм	150	150	200	200	200	200	250
3	Штангенциркули (ШЦ-II, ШЦ-III) с отсчетом по нониусу 0,05 мм	100	100	100	100	100	100	-

Таблица Г.3

Средства измерения		Варианты использования	Температурный режим, °С, для диапазона размеров, мм			Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм													
№ для прил. Ж	Наименование и случаи применения		0-50	50-250	250-500	до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 75	св. 75 до 100	св. 100 до 125	св. 125 до 150	св. 150 до 175	св. 175 до 200	св. 200 до 225	св. 225 до 250	св. 250 до 275	св. 275 до 300	св. 300 до 400	св. 400 до 500
4	Микрометры гладкие (МК) с величиной отсчета 0,001 мм при настройке на нуль по установочной мере	а* б*	5 5	5 2	5 1	5 5	10 5	10 5	15 5	15 10	15 10	20 10	20 10	25 10	25 10	30 10	30 10	40 10	50 10

* Микрометры при работе находятся в руках.

** Микрометры при работе находятся в стойке или обеспечивается надежная изоляция от тепла рук оператора.

Таблица Г.4

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения				Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм												
№ для прил. Ж	Наименование и случаи применения		Вид контакта	Используемое перемещение измерительного стержня, мм	Класс применяемых концевых мер	Температурный режим °С, для диапазона размеров, мм													
						0-50	50-100	100-200	200-500	до10	св. 10 до 30	св. 30до 50	св. 50до 80	св. 80 до 100	св. 100до 180	св. 180 до 200	св. 200до 300	св. 300до 400	св. 400до 500
5	Скобы индикаторные (СИ) с ценой деления 0,01 мм	a*	Любой	3	5	5	5	5	5	10	12	15	15	20	20	25	40	50	60
		б**	Любой	3	4	5	5	5	2	10	10	10	12	12	12	15	18	20	25
		в**	Плоскостный и линейчатый	0,1	4	5	-	-	-	6	7	7	-	-	-	-	-	-	-
		г**	Плоскостный и линейчатый	0,02-0,03	3	-	2	1	1	-	-	-	7	7	7	8	10	10	12

* Скобы при работе находятся в руках.

** Скобы при работе находятся в стойке или обеспечивается надежная изоляция от тепла рук оператора.

Таблица Г.5

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения			Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм													
№ для прил. Ж	Наименование и случаи применения		Вид контакта	Класс концевых мер	Температурный режим °С, для диапазона размеров, мм			до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 75	св. 75 до 100	св. 100 до 125	св. 125 до 150	св. 150 до 175	св. 175 до 200	св. 200 до 250	св. 250 до 300	св. 300 до 400	св. 400 до 500
					0–50	50–200	200–500												
6	Микрометры рычажные (МР и МРИ) с ценой деления 0,002 мм и 0,01 мм при установке на нуль по установочной мере и скобы рычажные (СР) с ценой деления 0,002 мм при настройке на нуль по концевым мерам длины при использовании на всем пределе измерения	а *	Любой	3	5	5	5	4	7	9	12	14	16	18	21	26	30	40	50
		б **	Любой	3	5	2	1	4	4,5	5	5	6	7	7	7	7	7	10***	10***
		в **	Плоскостный и линейчатый	2	5	2	1	2	3	3	3	3,5	4	4,5	5	4	5	6	7
		г **	Плоскостный и линейчатый	1	1	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,7	1,8	2,3	2,6	3,3

* При работе приборы находятся в руках.

** При работе приборы находятся в стойке или обеспечивается надежная теплоизоляция от рук оператора.

*** При измерении микрометром рычажным с ценой деления 0,002 мм погрешность равна соответственно 8 мкм и 9 мкм.

Таблица Г.6

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения					Предельные погрешности измерения мкм, для диапазона размеров, мм														
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Установочные узлы	Используемое перемещение измерительного стержня, мм	Классы применяемых концевых мер	Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			1-3	3-6	6-10	10-18	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180	180-250	250-315	315-400	400-500	
						1-30	30-120	120-500														
7	Индикаторы часового типа (ИЧ и ИТ) с ценой деления 0,01 мм и пределом измерения от 2 до 10 мм, класс точности 1	а б в г д	До 250 мм – штативы и стойки с диаметром колонки не менее 30 мм и наибольшим вылетом головки до 200 мм (С-IV; Ш-11Н; ШМ-11Н); ШМ-11В) колонки не менее 50 мм и наибольшим вылетом головки до 500 мм (Ш-11В; ШМ-11В)	10 5 2 1 0,1	5 5 4 3 3	5 5 5 5 5	5 5 5 2 2	5 5 2 1 1	15 12 10 8 5	15 13 10 8 5	15 13 10 8 5	15 13 10 8 5	16 14 10 8 5	16 14 10 8 5	18 15 12 8 6	20 18 12 8 6	22 20 12 8 6	25 25 14 9 7	35 35 18 10 9	40 40 20 11 9	45 45 22 12 10	
	То же, класс точности 0	е ж з и к		10 5 2 1 0,1	4 4 3 3 3	5 5 5 5 5	5 5 2 1 2	2 2 2 1 1	12 10 8 6 4	12 10 8 6 4	12 10 8 7 4	12 10 9 7 4	12 10 9 7 4	13 12 10 7 5	14 12 10 7 5	14 12 10 7 6	15 14 10 8 7	18 18 12 10 9	20 20 14 10 9	22 22 16 12 10		
	Индикаторы часового типа (ИЧ и ИТ) с ценой деления 0,01 мм и пределом измерения от 2 до 10 мм, класс точности 1, при измерении биений	л м н о п р		10 5 2 1 0,1 0,02-0,03	- - - - - -	- - - - - -	- - - - - -	- - - - - -	21 17 13 11 8 6													
	То же, класс точности 0	с т у ф х		10 5 2 1 0,1	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	16 14 11 10 6													

Таблица Г.7

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения	Предельные погрешности измерения, мкм
№ для прил. Ж	Наименование и случаи применения		Используемый предел измерения, мм	
8	Индикаторы рычажно-зубчатые (ИРБ и ИРТ) с ценой деления 0,01 мм и пределом измерения 0,8 мм при измерении биения	а б в	0,8 0,1 0,01-0,02	15 10 5

Таблица Г.8

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения						Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм											
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня в мм	Установочные узлы	Применяемые концевые меры		Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	
					класс	разряд	1–30	30–120	120–250											
9	Головки рычажно-зубчатые (ЗИГ) с ценой деления 0,002 мм и пределом измерения ± 0,1 мм; с настройкой по концевым мерам длины на любое деление	а	± 0,10	Штативы*	3	-	5	2	1	3	3	3	3,5	3,5	3,5	4	4,5	5	6	
	То же с настройкой на нулевое деление	б	± 0,06	Стойки**	-	5	2	1	0,5	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,8	2,2	2,2	-	
	Головки рычажно-зубчатые (ЗИГ) с ценой деления 0,002 мм и пределом измерения ± 0,1 мм; при измерении биений	в	0,04	Штативы*	-	-	-	-	-	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,8	1,8	1,8	
10	Головки рычажно-зубчатые (ИИГ) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения ± 0,05 мм; с настройкой по концевым мерам длины на любое деление	а	± 0,050	Штативы*	-	5	2	1	0,5	2	2	2	2	2	2	2	2,5	2,5	2,8	
	То же с настройкой на нулевое деление	б	± 0,030	Стойки**	-	4	2	0,5	0,2	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	-	
	Головки рычажно-зубчатые (ИИГ) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения ± 0,05 мм; при измерении биений	в	0,020	Штативы*	-	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	1,1	

* Штативы с диаметром колонки не менее 30 мм и наибольшим вылетом головки до 200 мм (Ш-11Н и ШМ-11Н).

** Стойки с пределами измерения 0–160 мм и 0–100 мм и диаметром колонки не менее 50 мм и не менее 30 мм соответственно (С-II и С-III).

Таблица Г.9

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения						Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм									
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня в мм	Установочные узлы	Класс применяемых концевых мер	Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250
						1–30	30–120	120–250										
11	Индикаторы многооборотные (2МИГ) с ценой деления 0,002 мм и пределом измерения 2 мм	а б в	2 1 0,4	Штативы* Штативы** Стойки	4 3 2	5 5 5	5 2 1	2 2 0,5	5 5 3	5 5 3	5 5 3	6 5 4	6 5 4	7 5 4	8 5 4	10 6 4	10 7 4	12 8
	То же, при измерении биений	г д е	2 1 0,05	Штативы* Штативы** Стойки	- - -	- - -	- - -	- - -	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 2	6 5 -
12	Индикаторы многооборотные (1МИГ) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения 1 мм	а б	1 0,2	Штативы* Стойки**	2	5 5	1 1	0,5 0,5	3 2	3 2	3 2,2	3 2,5	3 2,5	3 2,5	3 2,5	3,5 3	3,5 3	4
	То же, при измерении биений	в г	1 0,05	Штативы* Стойки**	- -	- -	- -	- -	3 2	3 2	3 2	3 2	3 2	3 2	3 2	3 2	3 2	3 -

* Штативы с диаметром колонки не менее 30 мм и наибольшим вылетом головки до 200 мм (Ш-11Н и ШМ-11Н).

** Стойки с пределами измерения 0–160 мм и 0–100 мм и диаметром колонки не менее 50 мм и не менее 30 мм соответственно (С-II и С-III).

Таблица Г.10

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения							Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм									
№ д ля прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня в мм	Установочные узлы	При-меня-емые кон-цевые меры		Темпера-турный режим, °С, для диапа-зона изме-ряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 160	
					класс	разряд	1-30	30-120	120-180										
13	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (10ИГП, 10ИГПГ) с ценой деления 0,01 мм и пределом измерения ± 0,30 мм	а	± 0,30	С-II*	4	-	5	5	2	6	6	6	7	7	7	8	10	10	
		б	0,30	С-II*	3	-	5	2	1	4	4	4	4	5	5	5	6	6	
		в	± 0,30	С-II*	-	-	-	-	-	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
		г	0,30	С-II*	-	-	-	-	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
14	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (5ИГП, 5ИГПГ) с ценой деления 0,005 мм и пределом измерения ± 0,15 мм	а	± 0,15	С-II*	4	-	5	5	2	5	5	5	5	5	6	7	9	9	
		б	0,15	С-II*	3	-	5	2	1	3	3	3	3	3	3	4	5	5	
		в	± 0,15	С-II*	-	-	-	-	-	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
		г	0,15	С-II*	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
15	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (2ИГП, 2ИГПГ) с ценой деления 0,002 мм и пределом измерения ± 0,060 мм	а	± 0,060	С-II*	2	-	2	1	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2,5	2,5	
		б	0,060	С-II*	2	-	2	1	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	
		в	± 0,060	С-II*	-	-	-	-	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
		г	0,060	С-II*	-	-	-	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
16	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (1ИГП, 1ИГПГ) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения ± 0,030 мм	а	± 0,030	С-II*	1	-	2	0,5	0,2	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	1,2	1,2	
		б	0,030	С-II*	1	-	2	0,5	0,2	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,0	
		в	± 0,030	С-II*	-	-	-	-	-	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
		г	0,030	С-II*	-	-	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

Окончание таблицы Г.10

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения							Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм									
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня в мм	Установочные узлы	Применяемые концевые меры		Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 160	
					класс	разряд	1—30	30—120	120—180										
17	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (05ИГП) с ценой деления 0,0005 мм и пределом измерения ± 0,015 мм	а	± 0,015	С-I**	-	3	1	0,5	0,2	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,90	0,80	
		б	0,015	С-I**	-	2	1	0,2	0,2	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,70	
	То же, при измерении биения	в	± 0,015	С-I**	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
		г	0,015	С-I**	-	-	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
18	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (02ИГП) с ценой деления 0,0002 мм и пределом измерения ± 0,006 мм	а	± 0,006	С-I**	-	2	0,5	0,1	0,1	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	0,60	
		б	0,006	С-I**	-	2	0,5	0,1	0,1	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,50	0,50	
	То же, при измерении биения	в	± 0,006	С-I**	-	-	-	-	-	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
		г	0,006	С-I**	-	-	-	-	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
19	Головки измерительные пружинные (микрокаторы) (01ИГП) с ценой деления 0,0001 мм и пределом измерения ± 0,004 мм	а	± 0,004	С-I**	-	2	0,5	0,1	0,1	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,40	0,50	0,50	
		б	0,003	С-I**	-	2	0,5	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45	0,50	
	То же, при измерении биения	в	± 0,004	С-I**	-	-	-	-	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
		г	0,003	С-I**	-	-	-	-	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	

* С-II – стойки с пределом измерений 0–160 мм, вылетом головки 75 мм и диаметром колонки 50 мм.

** С-I – стойки с пределом измерений 0–160 мм, вылетом головки 75 мм и диаметром колонки 70 мм.

Таблица Г.11

Средства измерения		Варианты	Условия измерения							Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм												
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Исполъ- поль- зуемые пере- меще- ния стерж- ня, мм	Установоч- ные узлы по ГОСТ 10197	Приме- няемые конце- вые ме- ры		Температур- ный режим, °С, для диапа- зона размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
					класс	разряд	до 30	30—120	120—500													
20	Головки измерительные пружин- ные малогабаритные (микаторы) (2ИПМ) с ценой деления 0,002 мм и пределом измерения ± 0,1 мм	а б	± 0,1 0,06	Штативы* Штатив	3 2	- -	5 2	2 1	1 0,5	2,5 1,5	2,5 1,5	2,5 1,5	3,0 1,5	3,0 1,6	3,0 1,5	3,5 2	4,5 2	4,5 2	5,5 3	7,5 4	8,5 4	10 5
	То же, при измерении биения	в г	± 0,1 0,06	Штативы* Штативы	- -	- -	- -	- -	- -	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2 1,5	2,5 1,5	3 2	3,5 2
21	Головки измерительные пружин- ные малогабаритные (микаторы) (1ИПМ, 1ИПМУ) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения ± 0,05 мм	а б	± 0,05 0,03	Штативы* Штативы	2 1	- -	2 2	1 0,5	0,5 0,2	1,2 0,7	1,2 0,7	1,2 0,7	1,5 0,8	1,5 0,9	1,5 0,8	2 1	2 1,2	2 1,2	3 1,5	4 2	4,5 2,5	5,5 3
	То же, (с нормальным измеритель- ным усилием – 1ИПМ) при измере- нии биения	в	± 0,05	Штативы*	-	-	-	-	-	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,8	2,4	2,6
		г	0,03	Штативы*	-	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,3	1,6	1,8
		д	0,03	Стойки**	-	-	-	-	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	-	-	-	-
То же, (с уменьшенным измери- тельным усилием – 1ИПМУ) при измерении биения	е ж	± 0,05 0,03	Штативы* Штативы	- -	- -	- -	- -	- -	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,1 0,8	1,5 1	1,8 1,2	1,9 1,3
	22	Головки измерительные пружин- ные малогабаритные с нормальным измерительным усилием (05ИПМ) с ценой деления 0,0005 мм и преде- лом измерения ± 0,025 мм	а б	± 0,025 0,015	Штативы* Стойки**	- -	3 3	2 2	0,5 0,5	0,2 0,2	0,7 0,4	0,7 0,4	0,7 0,5	0,8 0,6	0,9 0,7	0,8 0,6	0,9 0,7	1,1 0,8	1,0 0,7	1,1 -	1,8 -	2,5 -
То же, при измерении биения		в	± 0,025	Штативы*	-	-	-	-	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	1,6	2,2	2,5
		г	0,015	Штативы*	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	1	1,5	1,7
		д	0,015	Стойки**	-	-	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	-	-

Окончание таблицы Г.11

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения							Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм												
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Используемые перемещения измерительного стержня, мм	Установочные узлы по ГОСТ 10197	Применяемые концевые меры		Температурный режим, °С, для диапазона размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
					класс	разряд	до 30	30–120	120–500													
23	Головки измерительные пружинные малогабаритные (микрометры) с уменьшенным измерительным усилием (05ИПМУ) с ценой деления 0,0005 мм и пределом измерения ± 0,025 мм	а	± 0,025	Штативы*	-	3	2	0,5	0,2	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	1,0	0,9	1,0	1,5	2,0	2,2
	То же, при измерении биения	б в	± 0,025 0,015	Штативы* Штативы*	- -	- -	- -	- -	- -	0,6 0,4	0,6 0,4	0,6 0,4	0,6 0,4	0,6 0,4	0,6 0,4	0,6 0,4	0,7 0,4	0,7 0,4	0,7 0,4	1,2 0,7	1,5 0,9	1,7 1,0
24	Головки измерительные пружинные малогабаритные (микрометры) (02ИПМ, 02ИПМУ) с ценой деления 0,0002 мм и пределом измерения ± 0,010 мм	а б	± 0,01 0,006	Штативы* Штативы*	- -	2 2	1 1	0,5 0,5	0,2 0,2	0,45 0,30	0,45 0,30	0,50 0,35	0,50 0,40	0,60 0,50	0,60 0,45	0,70 0,60	1,0 0,80	0,9 0,70	0,9 0,70			
	То же, при измерении биения	в	± 0,01	Штативы*	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	-	-	-
		г д	0,006 0,006	Штативы* Штативы* Стойки**	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	0,25 0,15	0,25 0,15	0,25 0,15	0,25 0,15	0,25 0,15	0,25 0,15	0,25 0,15	0,35 0,15	0,35 0,15	0,35 0,15	- -	- -	- -

* До 250 мм – штативы с диаметром колонки не менее 30 мм и наибольшим вылетом головки до 200 мм (Ш-11Н, ШМ-11Н).

св. 250 мм до 500 мм – штативы с диаметром колонки не менее 50 мм и наибольшим вылетом головки до 500 мм (Ш-11В, ШМ-11В).

** Стойки с пределами измерения 0–160 мм и 0–100 мм и диаметром колонки не менее 50 мм и не менее 30 мм соответственно (С-II и С-III).

Таблица Г.12

Средства измерения		Условия измерения								Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм								
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения	Варианты	Используемое перемещение измерительного стержня в мм	Установочные узлы	Применяемые концевые меры		Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 160
					класс	разряд	1–30	30–120	120–180									
25	Головки измерительные пружинно-оптические (оптикаторы) (1П) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения 0,25 мм	а	± 0,100	С-1*	1	-	2	0,5	0,2	0,90	0,90	0,90	1,0	1,0	1,0	1,1	1,3	1,3
		б	0,100	С-1*	1	-	2	0,5	0,2	0,60	0,60	0,60	0,70	0,80	0,70	0,90	1,2	1,0
		в	± 0,100	С-1*	-	-	-	-	-	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
		г	0,100	С-1*	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
26	Головки измерительные пружинно-оптические (оптикаторы) (05П) с ценой деления 0,0005 мм и пределом измерения 0,1 мм	а	± 0,050	С-1*	-	3	1	0,5	0,2	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,90	0,70
		б	0,050	С-1*	-	2	1	0,5	0,1	0,35	0,35	0,35	0,40	0,50	0,50	0,60	0,80	0,60
		в	± 0,050	С-1*	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		г	0,050	С-1*	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
27	Головки измерительные пружинно-оптические (оптикаторы) (02П) с ценой деления 0,0002 мм и пределом измерения 0,050 мм	а	± 0,020	С-1*	-	2	0,5	0,1	0,1	0,30	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35	0,45	0,45
		б	0,020	С-1*	-	2	0,5	0,1	0,1	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40
		в	± 0,020	С-1*	-	-	-	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		г	0,020	С-1*	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
28	Головки измерительные пружинно-оптические (оптикаторы) (01П) с ценой деления 0,0001 мм и пределом измерения 0,024 мм	а	± 0,010	С-1*	-	2	0,5	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40
		б	0,010	С-1*	-	2	0,5	0,1	0,1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40
		в	± 0,010	С-1*	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		г	0,010	С-1*	-	-	-	-	-	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

* С-1 – стойки с пределом измерений 0–160 мм, вылетом головки 75 мм и диаметром колонки 70 мм.

Таблица Г.13

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения		Предельные погрешности измерения, мкм
№ для прил. Л	Наименование и случаи применения		Используемая цена деления, мкм	Используемый предел измерения, мкм	
29	Головки измерительные рычажно-пружинные с ценой деления 0,001 (0,002) мм и пределом измерения 0,040 (0,080) мм при измерении биений. Положение головки горизонтальное, шкалой вверх.	а	2	0,080	3
		б	2	0,040	2
		в	1	0,040	1
		г	1	0,020	0,5

Таблица Г.14

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения						Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм													
№ для прил. Е	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня, мм	Тип накопчика и вид контакта	Применяемые контактные меры		Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
					класс	разряд																
30	Оптиметр вертикальный, оптиметр горизонтальный, машина измерительная (ИЗМ) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения по шкале 0,1 мм	а	± 0,1	При любом виде контакта	0	-	1	0,5	0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	2	2	
		б	± 0,06	Сферический, ножевидный, плоский	-	2	1	0,5	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Таблица Г.15

Средства измерения		Температурный режим, °С	Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм								
№ для прил. Е	Наименование и случаи применения		до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 150
31	Микроскопы инструментальные (большая и малая модели)	5	4	4	4	4	5	5	6	9	11

Примечание. Пределы измерения микроскопов инструментальных: малой модели – до 75 × 25 мм, большой модели – до 150 × 50 мм.

Таблица Г.16

Средства измерения		Варианты	Условия измерения				Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм													
№ для прил. Е	Наименование		Форма детали	Метод измерения	Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм		до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500	
					до 30	св. 30														
32	Микроскопы измерительные универсальные	а	Плоская	Проекционный	5	2	3,0	3,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,5	7,0	9,0	12	16	20	25	
		б	Цилиндрическая	Проекционный	5	2	6,0	6,0	6,0	6,0	6,5	6,5	7,0	8,0	-	-	-	-	-	
		в	в центрах	Метод осевого сечения	5	2	2,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,5	4,0	5,0	-	-	-	-	-	

Примечание. Пределы измерения универсальных измерительных микроскопов 200×100 и 500×200

Таблица Г.17

Средства измерения		Варианты исполь- зования	Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм												
№ для прил. Е	Наименование и случаи приме- нения		до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
33	Машина измерительная (ИЗМ) при абсолютных измерениях	а	1	1	1	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3,5	4	5	6
	То же, при относительных измере- ниях	б	См. табл. Г.14												

Примечание. Температурный режим при измерении размеров до 100 мм – 1 °С, свыше 100 мм – 0,5 °С.

Таблица Г.18

Средства измерения		Варианты	Условия измерения			Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм													
№ для прил. Е	Наименование и случаи применения		Класс концевых мер	Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм			до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
				до 30	30–120	св. 120													
34	Длиномеры: горизонтальный и вертикальный При измерениях методом сравнения	а	-	5	2	-	1,2	1,3	1,3	1,6	2	2	2,5	3	-	-	-	-	-
		б	1	2	0,5	0,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,5	2,5

Примечание. Пределы измерения длиномеров: при абсолютном методе измерения 0–100 мм; при измерениях методом сравнения с мерой: горизонтального 0–500 мм, вертикального 0–250 мм.

Таблица Г.19

№ для прил. Е	Наименование	Варианты исполь- зования	Увеличение	Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм						
				до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 100
35	Проекторы измерительные	а	10×	15	15	15	15	16	16	16
		б	20×	8	8	10	10	10	10	10
		в	50×, 100×, 200×	6	6	6	6	7	7	7

Примечания: 1. пределы измерения: часовых проекторов (ЧП-2; ПИ 360Ц) 40×25 мм; больших проекторов (БП; БП-3Ц) 100×50 мм; 2. температурные условия измерения: часовых проекторов – допускаемое отклонение температуры от 20 °С до 3 °С; больших проекторов – допускаемое отклонение температуры от 20 °С до 1 °С, допускаемое изменение температуры в процессе измерения 1 °С.

Таблица Г.20

Средство измерения		Варианты использования	Условия измерения						Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм													
№ для прил. Е и Л	Наименование и случаи применения		Установочные узлы по ГОСТ 10197	Применяемые концевые меры		Температурный режим, °С, для диапазона размеров, мм			Цена деления	до 3	св. 3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 30	св. 30 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400	св. 400 до 500
				класс	разряд	до 30	30–120	св. 120														
36	Приборы, показывающие с индуктивными преобразователями с переменной ценой деления: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 и 2,0 мкм и пределами измерения: ± 3; ± 6; ± 15; ± 30 и ± 60 мкм при работе с одним преобразователем	а б в г	Штативы*	2	-	2,0	1,0	0,5	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
									1,0	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,8	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	
									0,5	0,8	0,8	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	2,0	2,0	2,5	3,5	4,0	5,0
									0,2	0,6	0,6	0,6	0,9	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-
		д е ж з	Штативы*	1	-	2,0	0,5	0,5	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,5	2,5	2,5	3,0	-	-	-
									1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,5	1,7	2,0	-	-	-	
									0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1,1	1,4	1,8	-	-	-
									0,2	0,4	0,4	0,45	0,6	0,75	0,6	0,75	1,0	1,25	1,75	-	-	-
		и к л м	Стойки**	-	3	1,0	0,2	0,2	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	-	-	-	-
									0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	-	-	-	-
									0,2	0,35	0,35	0,35	0,45	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	-	-	-	-
									0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	
	н о п	Стойки**	-	2	0,5	0,1	0,1	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	-	-	-	-
								0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	-	-	-	-	
								0,1	0,25	0,25	0,25	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-		
То же, при измерении биения	р с т у ф	Штативы*	-	-	-	-	-	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	
								1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	
								0,5	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,9	
								0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,30	0,30	0,30	-	-		
	х ц ч	Стойки**	-	-	-	-	-	0,2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22					
								0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	-	-	-					

* До 250 мм – штативы с диаметром колонки не менее 30 мм и наибольшим вылетом головки до 200 мм (Ш-11Н, ШМ-11Н), св. 250 мм до 500 мм – штативы с диаметром колонки не менее 50 мм и наибольшим вылетом головки до 500 мм (Ш-11В, ШМ-11В).

** Стойки с пределами измерения 0-160 мм и 0-100 мм и диаметром колонки не менее 50 мм и не менее 30 мм соответственно (С-II и С-III).

Таблица Г.21

Средства измерения		Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм							
№ для прил. К	Наименование	до 10	св. 10 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 180	св. 180 до 250	св. 250 до 315	св. 315 до 400
37	Штангенглубиномер (ШГ) с отсчетом по нониусу 0,05 мм	100	100	150	150	150	150	150	150

Таблица Г.22

Средства измерения		Варианты использования	Температурный режим, °C	Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм					
№ для прил. К	Наименование и случаи применения			до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 75	св. 75 до 100	св. 100 до 125	св. 125 до 150
38	Глубиномеры микрометрические (ГМ) при абсолютном методе измерения	а	5	7	20	20	20	20	25
	Глубиномеры микрометрические с настройкой по установочным мерам	б	5	6	6	7	8	10	11

Таблица Г.23

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения				Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм					
№ для прил. К	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня, мм	Класс применяемых концевых мер	Температурный режим, °С		до 10	св. 10 до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 80	св. 80 до 120	св. 120 до 150
					до 30	св. 30						
39	Глубиномеры индикаторные (ГИ) при измерении с настройкой по установочной мере	а	10	-	5	5	15	15	15	15	20	20
	То же, с настройкой по блокам концевых мер	б в	0,1 0,02-0,03	4 3	5 5	5 2	6 4	7 5	7 5	9 5	10 6	15 9
40	Глубиномеры индикаторные (ГИ) при замене отсчетного устройства измерительной головкой с ценой деления 0,001 мм (1ИГ или 1ИПМ) и измерении с настройкой по блокам концевых мер	а	0,002-0,003	2	2	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2
	То же, при четырехкратном измерении с переборкой блока при каждом измерении	б	0,002-0,003	2	2	1	0,5	0,5	1,0	1,5	-	-

Приложение Д **Предельные погрешности измерения внутренних линейных** **размеров некоторыми универсальными измерительными** **средствами**

Таблица Д.1

Средства измерения		Варианты	Условия измерения					Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм				
№ для прил. И	Наименование и случаи применения		Используемое перемещение измерительного стержня, мм	Средство установки	Шероховатость поверхности отверстий, Ra мкм	Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм		св. 3 до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 120	св. 120 до 250	св. 250 до 500
						3–120	120–500					
1	Линейки измерительные	-	-	-	-	-	-	500				
2	Штангенциркули (ШЦ-I, ШЦТ-I, ШЦ-II, ШЦ-III) с отсчетом по нониусу 0,1 мм ¹	-	-	-	5	7		200	200	250	300	300
3	Штангенциркули (ШЦ-II, ШЦ-III) с отсчетом по нониусу 0,05 мм ¹	-	-	-	5	7		150	150	200	200	250
4	Нутромеры микрометрические (НМ) с величиной отсчета 0,01 мм	а	13	Микропара устанавливается по установочной мере	5	5	3	-	-	15	20	30
		б		Тестируется размер собранного нутромера				-	-	10	15	20
5	Нутромеры индикаторные (НИ) с ценой деления отсчетного устройства 0,01 мм ¹	а	Весь расход	Концевые меры длины 3 класса с боковиками или микрометры ²	5	5	3	15	20	25	25	30
		б	0,1		1,25			10	10	15	15	20
		в	0,03	Концевые меры длины 1 класса с боковиками	0,32	3	2	5	5	10	10 ³	-
6	Нутромеры индикаторные (НИ) при замене отсчетного устройства измерительной головкой (ИГ) с ценой деления 0,001 или 0,002 мм ^{1,4}	а	0,1	Концевые меры длины 1 класса с боковиками	1,25	3	2	4,5	5,5	6,5	7,5 ³	11 ⁴
		б	0,03		0,32			2,8	3,5	4,5	6,5	9 ⁴
7	Нутромеры с ценой деления отсчетного устройства 0,001 и 0,002 мм	а	0,1	Концевые меры длины 1 класса с боковиками	1,25	3	2	3,5	5	6	7	-
		б	0,01	Концевые меры длины 1 класса с боковиками	0,32			2	3,5	4,5	5,5	-
		в	0,01	Установочные кольца (до 160 мм)	0,32			1,5	2,5	3,5	4,5	-

Таблица Д.2

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения				Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм				
№ для прил. И	Наименование		Используемое перемещение измерительного стержня, мм	Средство установки	Шероховатость поверхности отверстий, Ra мкм	Температурный режим, °С	св. 13 до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 120	св. 120 до 250	св. 250 до 500
8	Оптиметры и длиномеры горизонтальные, измерительные машины с ценой деления отсчетного устройства 0,001	а	± 0,06	Концевые меры 1 класса с боковиками	0,25	2	1,5	1,5	2,5	5	9
		б		Установочные кольца ⁵		1	1	1	1,2	2,5	-

Таблица Д.3

Средства измерения		Варианты использования	Условия измерения				Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм			
№ для прил. И	Наименование и случаи применения		Диаметральный зазор между пробкой и отверстием, мкм	Шероховатость поверхности отверстий, Ra мкм	Температурный режим, °C		св. 3 до 6	св. 6 до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 120
					до 18	св. 18 до120				
9	Пневматические пробки с отсчетным прибором с ценой деления 1 мкм и 0,5 мкм с настройкой по установочным кольцам ⁵ То же, при цене деления прибора 0,5 мкм	а	0,04–0,06	1,25	2		4	4	4,5	5
		б	0,03–0,04	1,25			3	3	3,5	4
		в	0,02–0,03	1,25			2,5	2,5	2,5	3
		г	0,02–0,03	0,32			2	2	2,5	3
		д	0,01–0,02				1,5	1,5	2	2,5
10	То же, при цене деления прибора 0,2 мкм		0,01–0,02	0,32	0,5	0,2	0,8	0,6	0,6	0,8

Таблица Д.4

Средства измерения		Температурный режим, °С, для диапазона измеряемых размеров, мм		Предельные погрешности измерения, мкм, для диапазона размеров, мм			
№ для прил. И	Наименование и случаи применения	1–50	50–250	до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 120	св. 120 до 250
11	Микроскопы инструментальные (большая и малая модели) ^{6, 7}	5	5	7	10	10	10
12	Микроскопы универсальные измерительные при использовании штриховой головки ^{6, 7}	3	2	5	6	7	7
13	Приборы с электронным индикатором контакта ⁸ при настройке по концевым мерам 0 класса	2	1	0,3	0,3	0,5	0,5
14	Приборы с электронным индикатором контакта для измерения диаметра малых отверстий при настройке по концевым мерам 0 класса	2	-	0,5	-	-	-

Примечания к таблицам Д:

¹ Штангенциркули имеют нижний предел измерения 10 мм, нутромеры индикаторные – 6 мм.

² При использовании для установки на размер концевых мер, вместо микрометров, предельная погрешность уменьшается на 2–3 мкм.

³ При использовании установочных колец диаметром 120–160 мм предельная погрешность уменьшается на 1–2 мкм.

⁴ Для диапазона 160–250 мм предельная погрешность указана только при использовании концевых мер длины.

⁵ Предельная погрешность измерения, указанная в таблицах, может быть обеспечена только при применении аттестованных установочных колец по ГОСТ 14865 в соответствии с таблицей:

№ по табл.	Класс точности установочных колец	Диаметр установочных колец, мм				
		от 3 до 6	св. 6 до 18	св. 18 до 50	св. 50 до 120	св. 120 до 160
		Допускаемая погрешность аттестации, мкм				
8 и 9	2 и 4	0,5	0,5	0,5	0,8	1,5
10	1	0,3	0,3	0,3	0,3 и 0,5	-

⁶ Погрешности микроскопов указаны при измерении сквозных отверстий и глухих отверстий с острой торцевой кромкой.

⁷ Пределы измерения инструментальных микроскопов большой модели до 150 мм, малой модели до 75 мм, универсальных микроскопов до 200 мм.

⁸ Пределы измерения прибора с электронным индикатором контакта от 4 мм до 200 мм, а также для малых отверстий от 1 мм до 4 мм.

Приложение Е **Измерение наружных размеров станковыми средствами измерения**

Диапазоны номинальных размеров, мм	Квалитеты											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Допускаемая погрешность измерения, мкм/допуски, мкм; средства измерения, по прил. Г											
До 3	0,4/1,2	0,8/2	1/3	1,4/4	1,8/6	3/10	3/14	6/25	8/40	12/60	20/100	30/40
	17б, 18а, 19а, 22б, 24б, 26б, 27а, 28а, 30б, 36з	10б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 24а, 25б, 26а, 30б, 36в	10б, 15б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 25а, 26а, 30а, 33а, 36в	9б, 10б, 15б, 16а, 21а, 22а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10б, 15а, 20б, 21а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9а, 10а, 11в, 12а, 15а, 20а, 32а, в, 36а	9а, 10а, 11в, 12а, 14б, 15а, 20а, 32а, б, в, 36а	7д, и, 9а, 11а, 12а, 13а, 14а, 31, 35в	7г, з, 11а, 13а, 32б, 35б	7б, е, 13а, 35б	7а, е, 35а	7а, 35а
Св. 3 до 6	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	1,6/5	2/8	3/12	4/18	8/30	10/48	16/75	30/120	40/180
	10б, 16б, 17а, 18а, 19а, 22б, 23а, 24а, 25б, 26а, 27а, 30б, 36г, к	10б, 15б, 16б, 17а, 21б, 22а, 23а, 25а, 26а, 30а, 33а, 36в	9б, 10б, 15б, 16а, 21а, 22а, 23а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10б, 15а, 20б, 21а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10а, 12б, 15а, 20б, 21а, 30б, 33а, 34а, 36б	9а, 10а, 11в, 12а, 14б, 15а, 20а, 32а, в, 36а	7к, 9а, 10а, 11в, 12а, 13б, 14б, 20а, 31, 32а, в, 36а	7г, з, 11а, 13а, 14а, 31, 32б, 35б	7в, ж, 11а, 13а, 14а, 32б, 35б	7а, е, 35а	7а, 35а	-
Св. 6 до 10	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	2/6	2/9	4/15	5/22	9/36	12/58	18/90	30/150	50/220
	10б, 16б, 17а, 18а, 19а, 22б, 24а, 25б, 26а, 27а, 30б, 36г, к	10б, 15б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 25а, 26а, 30а, 33а, 36в	9б, 10б, 15б, 16а, 21а, 22а, 23а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10а, 15а, 20б, 21а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10а, 15а, 20б, 21а, 30а, 33а, 34а, 36б	7к, 9а, 10а, 11в, 12а, 13б, 14б, 20а, 31, 32а, в, 36а	7д, 9а, 11а, 12а, 13б, 14а, 20а, 31, 32а, в, 36а	7г, з, 11а, 13а, 14а, 32б	7б, е, 13а, 35б	7а, 35а	7а, 35а	-
Св. 10 до 18	0,8/2	1,2/3	1,6/5	2,8/8	3/11	5/18	7/27	10/43	14/70	30/110	40/180	60/270
	10б, 16б, 17а, 18а, 21б, 22а, 23а, 24а, 25б, 26а, 27а, 30б, 36ж	10б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 25а, 26а, 30а, 33а, 36в, е	9б, 10б, 15а, 16а, 20б, 21а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10а, 15а, 20б, 21а, 34а, 36б	9б, 10а, 12а, 14б, 15а, 20а, 21а, 32в, 34а, 36а	7д, 9а, 11б, 12а, 13б, 14а, 20а, 31, 32а, в, 36а	7д, и, 9а, 11а, 13а, 14а, 31, 32а, б, 35в	7в, ж, 11а, 13а, 14а, 32б, 35б	7б, е, 13а, 35б	7а, 35а	-	-

Продолжение приложения Е

Диапазоны номинальных размеров, мм	Квалитеты											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Допускаемая погрешность измерения, мкм/допуски, мкм; средства измерения, по прил. Г											
Св. 18 до 30	1/2,5	1,4/4	2/6	3/9	4/13	6/21	8/33	12/52	18/84	30/130	50/210	70/330
	10б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 24а, 25а, 26а, 30а, 36г, ж	10б, 16а, 21б, 22а, 23а, 25а, 30а, 33а, 36в, е	9б, 10а, 15а, 16а, 20б, 21а, 25а, 30а, 33а, 34а, 36б	9б, 10а, 12а, 14б, 15а, 20а, 21а, 32в, 34а, 36а	7к, 9а, 10а, 11в, 12а, 14б, 20а, 32а, в, 34а, 36а	7д, 9а, 11а, 12а, 13б, 14а, 20а, 31, 32а, в	7г, 11а, 13а, 14а, 31, 32а, б, 35в	7в, е, 11а, 13а, 32б, 35б	7а, 35а	-	-	-
Св. 30 до 50	1/2,5	1,4/4	2,4/7	4/11	5/16	7/25	10/39	16/62	20/100	40/160	50/250	80/390
	10б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 24а, 25а, 26а, 30а, 36ж	10б, 16а, 21б, 22а, 23а, 25а, 30а, 33а, 36в, е	9б, 10а, 15а, 20б, 21а, 33а, 34а, 36б, д	7к, 9а, 10а, 11в, 12а, 14б, 15а, 20а, 32в, 34а, 36а	7д, 9а, 11б, 12а, 13б, 14б, 20а, 31, 32а, в, 36а	7д, и, 9а, 11а, 13а, 14а, 31, 32а, б, 35в	7в, 11а, 13а, 14а, 31, 32б, 35б	7а, 35а	7а, 35а	-	-	-
Св. 50 до 80	1,2/3	1,8/5	2,8/8	4/13	5/19	9/30	12/46	18/74	30/120	40/190	60/300	100/460
	10б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 24а, 25а, 26а, 30а, 36ж, и	9б, 10б, 15б, 16а, 21б, 22а, 25а, 30а, 33а, 34б, 36б	9б, 10а, 12б, 15а, 20б, 21а, 33а, 34а, 36б	9а, 10а, 11в, 12а, 14б, 15а, 20а, 21а, 32в, 34а, 36а	7к, 9а, 11б, 12а, 13б, 14б, 20а, 32в, 34а, 36а	7г, 11а, 13а, 14а, 31, 32а, б, 35в	7в, ж, 11а, 13а, 14а, 31, 32б, 35б	7а, 35а	7а, 35а	-	-	-
Св. 80 до 120	1,6/4	2/6	3/10	5/15	6/22	10/35	12/54	20/87	30/140	50/220	70/350	120/540
	10б, 16а, 17а, 21б, 22а, 23а, 24а, 25а, 26а, 30а, 34б, 36е	10б, 15б, 16а, 20б, 21а, 22а, 23а, 24а, 25а, 30а, 33а, 34б, 36б	9б, 10а, 12б, 15а, 20б, 21а, 33а, 34а*, б, 36а	7к, 9а, 10а, 11в, 12а, 14б, 15а, 20а, 32в*, 34а*, 36а	7д, 9а, 11б, 12а, 13б, 14б, 20а, 32в*, 34а*, 36а	7г, з, 11а, 13а, 14а, 31, 32а, б*, в*, 35б*	7в, ж, 11а, 13а, 14а, 31, 32а, б*, 35б*	7а, 11а, 13а, 35а*	7а, 35а*	-	-	-

Окончание приложения Е

Диапазоны номинальных размеров, мм	Квалитеты											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Допускаемая погрешность измерения, мкм/допуски, мкм; средства измерения, по прил. Г											
Св. 120 до 180	2/5	2,8/8	4/12	6/18	7/25	12/40	16/63	30/100	40/160	50/250	80/400	140/630
	10 _б [*] , 15 _б [*] , 16 _а [*] , 20 _б , 21 _а , 22 _а , 23 _а , 24 _а , 25 _а [*] , 30 _а , 34 _б , 36 _б	9 _б [*] , 10 _а , 15 _а [*] , 20 _б , 21 _а , 34 _б , 36 _б , д	9 _б [*] , 10 _а , 11 _в [*] , 12 _а , 15 _а [*] , 20 _б , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _д , 9 _а , 11 _в [*] , 12 _а , 13 _б [*] , 14 _б [*] , 20 _а , 33 _а , 36 _а	7 _д , и, 9 _а , 11 _б , 13 _б [*] , 14 _б [*] , 20 _а	7 _в , ж, 11 _а , 13 _а [*] , 14 _а [*] , 31 [*] , 32 _а	7 _в , е, 11 _а , 13 _а [*] , 14 _а [*] , 31 [*] , 32 _а	7 _а	7 _а	-	-	-
Св. 180 до 250	2,8/7	4/10	5/14	7/20	8/29	12/46	18/72	30/115	40/185	60/290	100/460	160/720
	10 _а , 22 _а , 23 _а , 24 _а , 30 _а , 34 _б , 36 _в , е	10 _а , 12 _а , 20 _б , 21 _а , 33 _а , 34 _б , 36 _б	10 _а , 12 _а , 20 _б , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _д , 9 _а , 12 _а , 20 _а , 33 _а , 36 _а	7 _д , и, 9 _а , 11 _б , 12 _а , 20 _а	7 _г , з, 9 _а , 11 _а , 32 _а	7 _в , е, 11 _а , 32 _а	7 _а	7 _а	-	-	-
Св. 250 до 315	3/8	4/12	5/16	8/23	10/32	14/52	20/81	30/130	50/210	70/320	120/520	180/810
	21 _б , 22 _а , 23 _а , 30 _а , 34 _б	20 _б , 21 _а , 33 _а , 34 _б , 36 _а	20 _б , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _к , 20 _а , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _г , 20 _а	7 _г , з, 20 _а	7 _в , е, 32 _а	7 _в , е, 32 _а	7 _а	-	-	-
Св. 315 до 400	3/9	5/13	6/18	9/25	10/36	16/57	24/89	40/140	50/230	80/360	120/570	180/890
	21 _а , 22 _а , 23 _а , 30 _а , 34 _б	20 _б , 21 _а , 33 _а , 34 _б , 36 _а	20 _б , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _д , 20 _а , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _д , и, 20 _а , 33 _а	7 _г , з, 20 _а	7 _в , е, 32 _а	7 _а , 32 _а	7 _а	-	-	-
Св. 400 до 500	4/10	5/15	6/20	9/27	12/40	18/63	26/97	40/155	50/250	80/400	140/630	200/970
	21 _б , 22 _а , 23 _а , 30 _а , 34 _б	20 _б , 21 _б , 34 _б , 36 _а	20 _б , 21 _а , 33 _а , 36 _а	20 _б , 21 _а , 33 _а , 36 _а	7 _г , 20 _а , 33 _а	7 _г , з, 20 _а	7 _в , е, 32 _а	7 _в , е, 32 _а	7 _а , 32 _а	-	-	-

Приложение Ж **Измерение наружных размеров накладными средствами** **измерения**

Диапазоны номиналь- ных разме- ров, мм	Квалитеты							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Допускаемая погрешность, мкм/допуски, мкм; средства измерения, по прил. Г							
До 3	0,4/1,2	0,8/2	1/3	1,4/4	1,8/6	3/10	3/14	6/25
	-	6г	6г	6г	6г	6в	6в	4а, 5в, 6а
Св. 3 до 6	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	1,6/5	2/8	3/12	4/18	8/30
	6г	6г	6г	6г	6в	6в	6а	4а, 5в, 6а
Св. 6 до 10	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	2/6	2/9	4/15	5/22	9/36
	6г	6г	6г	6в	6в	6а	4а, 5г, 6а	4а, 5в
Св. 10 до 18	0,8/2	1,2/3	1,6/5	2,8/8	3/11	5/18	7/27	10/43
	6г	6г	6г	6в	6в	4а, 5г, 6а	4а, 5в, 6а	4а, 5б
Св. 18 до 30	1/2,5	1,4/4	2/6	3/9	4/13	6/21	8/33	12/52
	6г	6г	6в*, г	6в	6а*, в	4а*, в, 5г, 6а*, б	4а*, б, 5в, 6а	4а, 5б, 6а
Св. 30 до 50	1/2,5	1,4/4	2,4/7	4/11	5/16	7/25	10/39	16/62
	6г	6г	6г	6в	4б, 5г, 6б	4б, 5в, 6а	4а, 5б, 6а	4а, 5а
Св. 50 до 80	1,2/3	1,8/5	2,8/8	4/13	5/19	9/30	12/46	18/74
	6г	6г	6г	6в	4б, 5г, 6б	4б, 5в, 6а*, б	4а*, б, 5б, 6а	4а, 5а, 6а
Св. 80 до 120	1,6/4	2/6	3/10	5/15	6/22	10/35	12/54	20/87
	6г	6г	6г	4б*, 6б*, в	4б*, 5г, 6б	4б, 5в, 6б	4б, 5б	4а, 5а, 6а
Св. 120 до 180	2/5	2,8/8	4/12	6/18	7/25	12/40	16/63	30/100
	6г	6г	6в*, г	5г, 6в	5в, 6б	4б, 5б, 6б	4а*, б, 5б, 6а*, б	4а, 5а, 6а
Св. 180 до 250	2,8/7	4/10	5/14	7/20	8/29	12/46	18/72	30/115
	6г	6в*, г	6в	5г*, 6б	5в*, 6б	4б, 5в, 6б	4б, 5б, 6б	4а, 5а*, б, 6а
Св. 250 до 315	3/8	4/12	5/16	8/23	10/32	14/52	20/81	30/130
	6г	6г	6в*, г	6б	4б, 5в, 6б	4б, 5в, 6б	4в, 5б*, в, 6б	4а*, б, 5б, 6а*, б
Св. 315 до 400	3/9	5/13	6/18	9/25	10/36	16/57	24/89	40/140
	6г	6г	6в	6б	4б, 5в, 6б	4б, 5в, 6б	4б, 5б, 6б	4а, 5б, 6а
Св. 400 до 500	4/10	5/15	6/20	9/27	12/40	18/63	26/97	40/155
	6г	6г	6г	6б	4б, 5в, 6б	4б, 5в, 6б	4б, 5б, 6б	4б, 5б, 6б

Окончание приложения Ж

Диапазоны номинальных размеров, мм	Квалитеты							
	10	11	12	13	14	15	16	17
	Допускаемая погрешность, мкм/допуски, мкм; средства измерения, по прил. Г							
До 3	8/40	12/60	20/100	30/140	50/250	80/400	120/600	200/1000
	4а, 5в, 6а	4а, 5а	4а, 5а	4а	4а	4а	3	2
Св. 3 до 6	10/48	16/75	30/120	40/180	6/300	100/480	160/750	240/1200
	4а, 5а	4а, 5а	4а	4а	4а	3	2	2
Св. 6 до 10	12/58	18/90	30/150	50/220	80/360	120/580	200/900	300/1500
	4а, 5а	4а, 5а	4а	4а	4а	3	2	2
Св. 10 до 18	14/70	30/110	40/180	60/270	90/430	140/700	240/1100	380/1800
	4а, 5а	4а	4а	4а	4а	3	2	2
Св. 18 до 30	18/84	30/130	50/120	70/330	120/520	180/840	280/1300	440/2100
	4а, 5а	4а	4а	4а	3	2	2	2
Св. 30 до 50	20/100	40/160	50/250	80/390	140/620	200/1000	320/1600	500/2500
	4а, 5а	4а	4а	4а	3	2	2	1, 2
Св. 50 до 80	30/120	40/190	60/300	100/460	160/740	240/1200	400/1900	600/3000
	4а, 5а	4а	4а	3	3	2	2	1, 2
Св. 80 до 120	30/140	50/220	70/350	120/540	180/870	280/1400	440/2200	700/3500
	4а, 5а	4а	4а	3	3	2	2	1, 2
Св. 120 до 180	40/160	50/250	80/400	140/630	200/1000	320/1600	500/2500	800/4000
	4а, 5а	4а	4а	3, 4а	2, 4а	2, 4а	1, 2, 4а	1, 2, 4а
Св. 180 до 250	40/185	60/290	100/460	160/720	240/1150	380/1850	600/2900	1000/4000
	4а, 5а, 6а	4а, 5а	3, 4а	3, 4а	3, 4а	2, 4а	1, 2, 4а	1, 2, 4а
Св. 250 до 315	50/210	70/320	120/520	180/810	260/1300	440/2100	700/3200	1100/5200
	4а, 5а, 6а	4а, 5а	4а	4а	2, 4а	2, 4а	1, 2, 4а	1, 2, 4а
Св. 315 до 400	50/230	80/360	120/570	180/890	280/1400	460/2300	800/3600	1200/5700
	4а, 5а, 6а	4а, 5а, 6а	4а	4а	2, 4а	2, 4а	1, 2, 4а	1, 2, 4а
Св. 400 до 500	50/250	80/400	140/630	200/970	320/1550	500/2500	800/4000	1400/6300
	4а, 5а, 6а	4а, 5а, 6а	4а	4а	2, 4а	1, 2, 4а	1, 2, 4а	1, 2, 4а

Приложение И

Измерение внутренних размеров

Диапазон номинальных размеров, мм	Квалитеты							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Допускаемая погрешность, мкм/допуски; средства измерения по прил. Д							
До 3	0,4/1,2	0,8/2	1/3	1,4/4	1,8/6	3/10	3/14	6/25
	14	14	14	14	14	14	14	12
Св. 3 до 6	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	1,6/5	2/8	3/12	4/18	8/30
	13*, 14*	10, 13*, 14*	10, 13*, 14*	7в, 9д	7в, 9г	7б, 9б	7а, 9а	9а, 11, 12
Св. 6 до 10	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	2/6	2/9	4/15	5/22	9/36
	10, 13	10, 13	10, 13	7в, 9д	7в, 9г	6б, 7а, 9а	5в, 6а, 7а, 9а, 12	5в, 6а, 7а, 9а, 11, 12
Св. 10 до 18	0,8/2	1,2/3	1,6/5	2,8/8	3/11	5/18	7/27	10/43
	10, 13	8б*, 10, 13	7в, 8а*, 9д	7б, 8а*, 9в	6б, 7б, 8а*, 9б	5в, 6а, 7а, 9а, 12	5в, 6а, 7а, 9а, 11, 12	5б, 9а, 11, 12
Св. 18 до 30	1/2,5	1,4/4	2/6	3/9	4/13	6/21	8/33	12/52
	10, 13	8б, 10, 13	8а, 9д	7в, 8а, 9в	6б, 7б, 9б	5в, 6а, 7а, 9а, 12	5в, 6а, 12	5б, 11
Св. 30 до 50	1/2,5	1,4/4	2,4/7	4/11	5/16	7/25	10/39	16/62
	10, 13	8б, 10, 13	8а, 9д	6б, 7б, 9б	5в, 6б, 7а, 9а	5в, 6а, 7а, 9а, 12	5б, 9а, 11, 12	5б, 11
Св. 50 до 80	1,2/3	1,8/5	2,8/8	4/13	5/19	9/30	12/46	18/74
	8б, 10, 13	8б, 10	8а, 9д	8а, 9б	6б, 8а, 9а	6а, 9а, 12	4б, 5в, 6а, 11, 12	4а, 5б, 11
Св. 80 до 120	1,6/4	2/6	3/10	5/15	6/22	10/35	12/54	20/87
	8б, 10, 13	8б, 10	8а, 9в	6б, 8а, 9а	6б, 9а	4б, 6а, 9а, 11, 12	4б, 6а, 11, 12	4а, 5б, 11
Св. 120 до 180	2/5	2,8/8	4/10	6/18	7/25	12/40	16/63	30/100
	13	8б	8б	8а	6а, 8а, 12	6а, 11*, 12	4б, 5б, 11*, 12	4а, 5а, 11*, 12
Св. 180 до 250	2,8/7	4/10	5/14	7/20	8/29	12/46	18/72	30/115
	8б	8б	8а	6а, 8а, 12*	6а, 8а, 12*	6а, 12*	4б, 5б, 12*	4а, 5а, 12*
Св. 250 до 315	3/8	4/12	5/16	8/23	10/32	14/52	20/81	30/130
	-	-	-	-	6б, 8а	6а, 8а	4б, 5б	4а, 5а
Св. 315 до 400	3/9	5/13	6/18	9/25	10/36	16/57	24/89	40/140
	-	-	-	8а	6б, 8а	6а, 8а	4б, 5б	4а, 5а
Св. 400 до 500	4/10	5/15	6/20	9/27	12/40	18/63	26/97	40/155
	-	-	-	6б, 8а	6а, 8а	6а, 8а	4б, 5б	4а, 5а

Окончание приложения И

Диапазон номиналь- ных разме- ров, мм	Квалитеты							
	10	11	12	13	14	15	16	17
	Допускаемая погрешность, мкм/допуски; средства измерения по прил. Д							
До 3	8/40	12/60	20/100	30/140	50/250	80/400	120/600	200/1000
	11, 12	11	11	11	11	11	11	11
Св. 3 до 6	10/48	15/75	30/120	40/180	60/300	100/480	160/750	240/1200
	9a, 11, 12	11	11	11	11	11	11	11
Св. 6 до 10	12/58	18/90	30/150	50/220	80/360	120/580	200/900	300/1500
	5b, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	2, 5a	2, 5a
Св. 10 до 18	14/70	30/110	40/180	60/270	90/430	140/700	240/1100	380/1800
	5b, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	2	2
Св. 18 до 30	18/84	30/130	50/210	70/330	120/520	180/840	280/1300	440/2100
	5b, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	3	2	2
Св. 30 до 50	20/100	40/160	50/250	80/390	140/620	200/1000	320/1600	500/2500
	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	5a, 11	2	2	1, 2
Св. 50 до 80	30/120	40/190	60/300	100/460	160/740	240/1200	400/1900	600/3000
	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	3	2	1, 2
Св. 80 до 120	30/140	50/220	70/350	120/540	180/870	280/1400	440/2200	700/3500
	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	4a, 5a, 11	2	2	1, 2
Св. 120 до 180	40/160	50/250	80/400	140/630	200/1000	320/1600	500/2500	800/4000
	4a, 5a, 11*, 12	4a, 5a, 11*, 12	4a, 5a, 11*, 12	4a, 5a, 11*, 12	3	2	1, 2	1, 2
Св. 180 до 250	40/185	60/290	100/460	160/720	240/1150	380/1850	600/2900	1000/4600
	4a, 5a, 12*	4a, 5a, 12*	4a, 5a, 12*	4a, 5a, 12*	3	2	1, 2	1, 2
Св. 250 до 315	50/210	70/320	120/520	180/810	260/1300	440/2100	700/3200	1100/5200
	4a, 5a	4a, 5a	4a, 5a	4a, 5a	3	2	1, 2	1, 2
Св. 315 до 400	50/230	80/360	120/570	180/890	280/1400	460/2300	800/3600	1200/5700
	4a, 5a	4a, 5a	4a, 5a	4a, 5a	3	2	1, 2	1, 2
Св. 400 до 500	50/250	80/400	140/630	200/970	320/1550	500/2500	800/4000	1400/6300
	4a, 5a	4a, 5a	4a, 5a	4a, 5a	2	1, 2	1, 2	1, 2

* Измерительное средство не полностью обеспечивает диапазон номинальных размеров (см. прил. Д).

Приложение К **Измерение глубин и уступов универсальными измерительными средствами**

Диапазон номинальных размеров, мм	Квалитеты							
	2	3	4	5	6	7	8	9
	Допускаемая погрешность, мкм/допуски; средства измерения по прил. Г							
До 3	0,4/1,2	0,8/2	1/3	1,4/4	1,8/6	3/10	3/14	6/25
	-	40б	40б	40б	40а	40а	40а	38б, 39б
Св. 3 до 6	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	1,6/5	2/8	3/12	4/18	8/30
	40б	40б	40б	40а	40а	40а	39в	38б, 39б
Св. 6 до 10	0,6/1,5	1/2,5	1,4/4	2/6	2/9	4/15	5/22	9/36
	40б	40б	40б	40а	40а	39в	39в	38б, 39б
Св. 10 до 18	0,8/2	1,2/3	1,6/5	2,8/8	3/11	5/18	7/27	10/43
	40б	40б	40а	40а	40а	39в	38б, 39б	38б, 39б
Св. 18 до 30	1/2,5	1,4/4	2/6	3/9	4/13	6/21	8/33	12/52
	40б	40б	40а	40а	40а	38б, 39в	38б, 39б	38б, 39б
Св. 30 до 50	1/2,5	1,4/4	2,4/7	4/11	5/16	7/25	10/39	16/62
	40б	40б	40а	40а	39в	38б, 39б	38б, 39б	38б, 39а
Св. 50 до 80	1,2/3	1,8/5	2,8/8	4/13	5/19	9/30	12/46	18/74
	-	40б	40а	40а	39в	38б, 39б	38б, 39б	38б, 39а
Св. 80 до 120	1,6/4	2/6	3/10	5/15	6/22	10/35	12/54	20/87
	-	40а	40а	40а	39в	38б, 39б	38б, 39б	38а, 39а
Св. 120 до 180	2/5	2,8/8	4/12	6/18	7/25	12/40	16/63	30/100
	40а*	40а*	40а*	40а*	40а*	38б*, 39б*	38б*, 39б*	38а*, 39а*
Св. 180 до 250	2,8/7	4/10	5/14	7/20	8/29	14/46	18/72	30/115
	-	-	-	-	-	-	-	-
Св. 250 до 315	3/8	4/12	5/16	8/23	10/32	14/52	20/81	30/130
	-	-	-	-	-	-	-	-
Св. 315 до 400	3/9	5/13	6/18	9/25	10/36	16/57	24/89	40/140
	-	-	-	-	-	-	-	-
Св. 400 до 500	4/10	5/15	6/20	9/27	12/40	18/63	26/97	40/155
	-	-	-	-	-	-	-	-

Окончание приложения К

Диапазон номиналь- ных разме- ров, мм	Квалитеты							
	10	11	12	13	14	15	16	17
	Допускаемая погрешность, мкм/допуски; средства измерения по прил. Г							
До 3	8/40	12/60	20/100	30/140	50/250	80/400	120/600	200/1000
	38 _б , 39 _б	38 _б , 39 _б	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37
Св. 3 до 6	10/48	15/75	30/120	40/180	60/300	100/480	160/750	240/1200
	38 _б , 39 _б	38 _б , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37
Св. 6 до 10	12/58	18/90	30/150	50/220	80/360	120/580	200/900	300/1500
	38 _б , 39 _б	38 _б , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37
Св. 10 до 18	14/70	30/110	40/180	60/270	90/430	140/700	240/1100	380/1800
	38 _б , 39 _б	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37
Св. 18 до 30	18/84	30/130	50/210	70/330	120/520	180/840	280/1300	440/2100
	38 _б , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37	37
Св. 30 до 50	20/100	40/160	50/250	80/390	140/620	200/1000	320/1600	500/2500
	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37	1, 37
Св. 50 до 80	30/120	40/190	60/300	100/460	160/740	240/1200	400/1900	600/3000
	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37	1, 37
Св. 80 до 120	30/140	50/220	70/350	120/540	180/870	280/1400	440/2200	700/3500
	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	38 _а , 39 _а	37	37	37	1, 37
Св. 120 до 180	40/160	50/250	80/400	140/630	200/1000	320/1600	500/2500	800/4000
	38 _а [*] , 39 _а [*]	38 _а [*] , 39 _а [*]	38 _а [*] , 39 _а [*]	38 _а [*] , 39 _а [*]	37	37	1, 37	1, 37
Св. 180 до 250	40/185	60/290	100/460	160/720	240/1150	380/1850	600/2900	1000/4600
	-	-	-	37	37	37	1, 37	1, 37
Св. 250 до 315	50/210	70/320	120/520	180/810	260/1300	440/2100	700/3200	1100/5200
	-	-	-	37	37	37	1, 37	1, 37
Св. 315 до 400	50/230	80/360	120/570	180/890	280/1400	460/2300	800/3600	1200/5700
	-	-	-	37	37	37	1, 37	1, 37
Св. 400 до 500	50/250	80/400	140/630	200/970	320/1550	500/2500	800/4000	1400/6300
	-	-	-	-	-	1	1	1

Приложение Л

Измерение радиального и торцевого биения поверхностей

Допуск, мкм	Допускаемая погрешность измерения, мкм	Диапазоны диаметров контролируемых поверхностей, мм						
		До 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 160	Св. 160 до 250	Св. 250 до 315	Св. 315 до 400	Св. 400 до 500
		Средства измерения, по прил. Г						
0,4	0,14	19Г, 27Г, 28В, 36Ц						
0,5	0,18	18Г, 19В, 27Г, 28В, 36Ц						
0,6	0,2	18В, 19В, 24Д, 26Г, 27В, 28В, 36Ф						
0,8	0,3	17Г, 18В, 19В, 22Д, 24Г, 26Г, 27В, 36У						
1	0,35	17Г, 18В, 22Д, 24Г, 26Г, 27В, 36У	17Г, 18В, 22Д, 24Г, 26Г, 27В, 36У					
1,2	0,4	17В, 18В, 22Г, 23В, 24В, 25Г, 26В, 27В, 36У	17В, 18В, 22Г, 23В, 24В, 25Г, 26В, 27В, 36У	17В, 18В, 22Д, 23В, 24Г, 25Г, 26В, 27В, 36У				
1,6	0,6	16Г, 17В, 21Д, 22В, 23В, 24В, 25Г, 26В, 29Г, 36Т	16Г, 17В, 21Д, 22В, 23В, 24В, 25Г, 26В, 29Г, 36Т	16Г, 17В, 21Д, 22Г, 23В, 24В, 25Г, 26В, 29Г, 36Т				
2	0,7	16В, 17В, 21Д, 22В, 23В, 24В, 25Г, 26В, 29Г, 36Т	16В, 17В, 21Д, 22В, 23В, 24В, 25Г, 26В, 29Г, 36Т	16В, 17В, 21Д, 22Г, 23В, 24В, 25Г, 26В, 29Г, 36Т	22Г, 23В, 24В, 36Т			
2,5	0,9	10В, 16В, 21Г, ж, 22В, 23В, 25В, 29Г, 36Т	10В, 16В, 21Д, ж, 22В, 23В, 25В, 29Г, 36Т	16В, 21Д, ж, 22В, 23В, 24В, 25В, 29Г, 36Т	21Д, ж, 22В, 23В, 24В, 36Т	23В, 36Т	23В, 36Т	
3	1	10В, 15Г, 16В, 21Г, ж, 22В, 23В, 29В, 36Т	10В, 15Г, 16В, 21Г, ж, 22В, 23В, 29В, 36Т	15Г, 16В, 21Г, ж, 22В, 23В, 24В, 29В, 36Т	21Г, ж, 22В, 23В, 24В, 36Т	21Ж, 22Г, 23В, 36Т	23В, 36Т	23В, 36Т

Окончание приложения Л

120	30	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
160	40	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
200	50	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
250	50	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
300	60	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
400	80	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
500	100	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
600	120	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а	7о, 8а
800	160	7о	7о	7о	7о	7о	7о	7о
1000	200	7н	7н	7н	7н	7н	7н	7н
1200	240	7н	7н	7н	7н	7н	7н	7н
1600	320	7н	7н	7н	7н	7н	7н	7н
2000	400	7м	7м	7м	7м	7м	7м	7м
2500	500		7м	7м	7м	7м	7м	7м
3000	600			7м	7м	7м	7м	7м
4000	800					7м	7м	7м
5000	1000							7л

Учебное издание

Шелег Валерий Константинович
Попок Николай Николаевич
Беляков Николай Владимирович

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В трех томах

Том 3

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *Н.В. Беляков*

Подписано к печати 29.03.2024. Формат 60х90¹/₁₆. Усл. печ. листов 26,5.
Уч.-изд. листов 33,7. Тираж 40 экз. Заказ № 87.

Учреждение образования «Витебский государственный
технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.
Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №3/1497 от 30 мая 2017г.