

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А.Г. ДИВИН, С.В. ПОНОМАРЕВ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Часть 1

*Допущено УМО по образованию
в области прикладной математики и управления качеством
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по специальности
220501 – Управление качеством и направлению
221400 – Управление качеством*



Тамбов
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ
2011

УДК 681.5.08(075.8)
ББК Ж107я73 + з221я73
Д443

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ГОУ ВПО ТГТУ
М.М. Мордасов

Доктор технических наук, главный научный сотрудник
ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии
А.И. Петрашев

Доктор технических наук, профессор ГОУ ВПО МИЭМ
Е.А. Карцев

Дивин, А.Г.

Д443 Методы и средства измерений, испытаний и контроля :
учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев. – Там-
бов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – Ч. 1. – 104 с. – 100 экз. –
ISBN 978-5-8265-0987-6.

Содержит основные сведения о видах и методах измерений, кон-
троля и испытаний, классификации средств измерения. Рассмотрен по-
рядок проведения испытаний при сертификации продукции. Дана клас-
сификация средств измерения электрических и механических величин,
в первую очередь средств измерения геометрических размеров, пере-
мещений, контроля плоскостности и формы объектов. Приведены уст-
ройство, принцип действия, характеристики и область применения
электромеханических, электронных аналоговых и цифровых приборов,
а также методы измерения электрических величин.

Предназначено для студентов вузов дневного и заочного отделений,
обучающихся по специальности 220501 – Управление качеством и
направлению 221400 – Управление качеством.

УДК 681.5.08(075.8)
ББК Ж107я73 + з221я73

ISBN 978-5-8265-0987-6 © Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2011

ВВЕДЕНИЕ

Специалисты в области стандартизации, сертификации и управления качеством должны владеть необходимыми знаниями о методах и средствах контроля характеристик продукции, поскольку инструментальный контроль позволяет наиболее объективно подтвердить соответствие объекта предъявляемым требованиям.

Данное учебное пособие поможет студентам понять место и значение измерений при контроле и испытаниях продукции.

В настоящее время наиболее распространены измерения электрических величин: силы тока, напряжения, электрического сопротивления, частоты тока и др. Даже те физические величины, которые сами по себе являются неэлектрическими (например, температура, давление, виброускорение и т.д.), очень часто преобразуются в измеряемые электрические величины.

Наравне с измерениями электрических величин очень часто возникает потребность в измерении линейных и угловых размеров, а также других геометрических параметров. Поэтому в данном пособии особое внимание уделено методам и средствам измерения электрических величин, а также геометрических размеров, перемещений, контроля формы объектов, рассмотрены актуальные проблемы и перспективы развития методов и средств измерений и контроля.

Предлагаемое читателям учебное пособие является первой частью методического комплекса по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» и предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, специализирующихся в области проектирования, разработки и практического применения приборов для измерения различного рода физических величин, контроля и управления качеством сырья, материалов, промежуточной и конечной продукции технологических процессов.

1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ КУРСА

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ [1]

Измерения, испытания и контроль являются основными методами подтверждения соответствия продукции. Особенности их применения определяются задачами, которые решает испытательная лаборатория при сертификации.

Цель курса «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» заключается в формировании у студентов знаний и умений, необходимых для выбора, создания, внедрения и эксплуатации современных испытательных стендов, измерительных установок и систем, используемых при оценке соответствия продукции.

Курс базируется на знаниях, получаемых студентами при изучении ими дисциплин естественно-научного цикла: физика, химия, общепрофессиональных дисциплин: электротехника, физические основы измерений и др.

Рассмотрим основные понятия курса, некоторые из которых должны быть уже Вам знакомы.

Физическая величина (ФВ) – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них (например, длина, масса, время, сила тока и т.д.). Физической величиной может быть характеристика продукции, подлежащая определению при оценке соответствия. Термин «величина» обычно применяется в отношении тех свойств или характеристик, которые могут быть оценены количественно, т.е. могут быть измерены. Существуют такие свойства или характеристики, которые современный уровень науки и техники ещё не позволяет оценивать количественно, например, запах, вкус, цвет. Поэтому такие характеристики обычно избегают называть величинами, а называют свойствами.

Размер ФВ – количественная определённость физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Другими словами, размер ФВ есть количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина» (например, размер длины, массы, силы тока и т.д.)

Значение ФВ – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для неё единиц, причём отвлечённое (безразмерное) число, входящее в значение физической величины, называется числовым значением.

Истинное значение ФВ – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количествен-

ном отношении соответствующую физическую величину. Например, скорость света в вакууме, плотность дистиллированной воды при температуре 4 °С имеют вполне определённое значение – идеальное, которое мы не знаем.

Действительное значение ФВ – значение физической величины, полученное экспериментальным путём и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной **измерительной задаче** может быть использовано вместо него. Например, действительное значение скорости света в вакууме составляет $2,997925 \cdot 10^8$ м/с, плотность дистиллированной воды при температуре 4 °С составляет 10^3 кг/м³.

Единица ФВ – физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Единицы одной и той же ФВ могут различаться по своему размеру. Например, метр, фут и дюйм, являясь единицами длины, имеют различные числовые значения:

$$1 \text{ фут} = 0,3048 \text{ м}, 1 \text{ дюйм} = 0,0254 \text{ м}.$$

Кратная единица ФВ – единица, которая в целое число раз больше основной или производной единицы.

Дольная единица ФВ – единица, которая в целое число раз меньше основной или производной единицы.

Кратные и дольные единицы ФВ образуются благодаря соответствующим приставкам к основным единицам (табл. 1.1).

1.1. Приставки СИ и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		Международное	Русское
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф

Система ФВ – совокупность ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин.

Основная ФВ – физическая величина, входящая в систему и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы. Например, в системе LMT основные величины – длина, масса, время.

Основная единица ФВ – единица основной физической величины, выбранная произвольно при построении системы единиц (см. подразд. 1.2). Например, основные единицы Международной системы единиц (СИ): метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела.

Рассмотрим наиболее распространенную во всем мире и принятую у нас в стране Международную систему единиц (СИ), содержащую семь основных единиц, которые приведены в табл. 1.2.

В названии системы величин применяют символы величин, принятых за основные. Так, система величин механики, в которой в качестве основных приняты длина L , масса M и время T , должна называться системой LMT. Система основных величин, соответствующая Международной системе единиц (СИ), должна обозначаться символами LMTI Θ NJ, обозначающими соответственно символы основных величин – длины L , массы M , времени T , силы электрического тока I , температуры Θ , количества вещества N и силы света J .

Метр равен 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

1.2. Основные единицы СИ

Величина			Обозначение единицы	
Наименование	Размерность	Наименование	Международное	Русское
			Длина	L
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Температура тройной точки воды – это температура точки равновесия в твёрдой (лед), жидкой и газообразной (пар) фазах на 0,01 К или 0,01 °С выше точки таяния льда.

Допускается применение шкалы Цельсия (°С). Температура в °С обозначается символом t : $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К. Тогда $t = 0$ °С при $T = 273,15$ К.

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, теоретическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

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

Примечания:

1. Степени символов основных величин, входящих в одночлен, в зависимости от связи рассматриваемой физической величины с основными, могут быть целыми, дробными, положительными и отрицательными. Понятие «размерность» распространяется и на основные величины. Размерность основной величины в отношении самой себя равна единице, т.е. формула размерности основной величины совпадает с её символом.

2. В соответствии с международным стандартом ИСО 31/0, размерность величин следует обозначать знаком \dim . В системе величин LMT размерность величины x будет: $\dim x = L^l M^m T^t$, где L, M, T – символы величин, принятых за основные (соответственно длины, массы, времени).

Производные единицы системы СИ образуются с помощью простейших уравнений связи между величинами.

Кроме системных единиц системы СИ в нашей стране узаконено применение некоторых внесистемных единиц: *атмосфера* (98 кПа), *бар*, *мм рт. ст.*, *ангстрем* (10^{-10} м); *киловатт-час*; *час* (3600 с); *дюйм* (25,4 мм) и др.

Кроме того, применяются логарифмические ФВ – логарифм (десятичный или натуральный) безразмерного отношения одноимённых ФВ. Логарифмические ФВ применяют для выражения звукового давления, усиления, ослабления.

Единица логарифмической ФВ – бел (Б), которая определяется по следующей формуле:

$$1 \text{ Б} = \lg(P_2 / P_1) \text{ при } P_2 = 10 \cdot P_1,$$

где P_2 и P_1 – одноимённые энергетические величины (мощность, энергия).

Для «силовых» величин (напряжение, сила тока, давление, напряжённость поля) бел определяется по формуле

$$1 \text{ Б} = 2 \lg(F_2 / F_1) \text{ при } F_2 = \sqrt{10 F_1}.$$

Дольная единица от бела – децибел (дБ): $1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б}$.

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

Примеры:

1. В простейшем случае, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути, сравнивают её размер с единицей, хранимой линейкой, и, произведя отсчёт, получают значение величины (длины, высоты, толщины и других параметров детали).

2. С помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчёт.

Примечания:

1. Приведённое определение понятия «измерение» удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение в деле упорядочения системы понятий в метрологии. В нём учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины).

2. От термина «измерение» происходит термин «измерять», которым широко пользуются на практике. Всё же нередко применяются такие термины, как «мерить», «обмерять», «замерять», «промерять», не вписывающиеся в систему метрологических терминов. Их применять не следует.

Не следует также применять такие выражения, как «измерение значения» (например, мгновенного значения напряжения или его среднего квадратического значения), так как значение величины – это уже результат измерений.

3. В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины), практикуется *оценивание* таких величин по условным шкалам.

Испытание – определение одной или нескольких характеристик продукции согласно установленной процедуре.

Задача испытания – получение количественных или качественных оценок характеристик продукции, т.е. оценивание способности выполнять требуемые функции в заданных условиях. Эта задача решается в испытательных лабораториях, её решением является подготовленный протокол испытаний с указанием параметров продукции.

Контроль – процедура оценивания соответствия путём наблюдений и суждений, сопровождаемых соответствующими измерениями, испытаниями и калибровкой.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ [1]

Средством измерений называется техническое средство (или их комплекс), используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики. В отличие от таких технических средств, как индикаторы, предназначенных для обнаружения физических свойств (компас, лакмусовая бумага, осветительная электрическая лампочка), средства измерений позволяют не только обнаружить физическую величину, но и измерить её, т.е. сопоставить неизвестный размер с известным.

Другими отличительными признаками средств измерений являются, во-первых, «умение» хранить (или воспроизводить) единицу физической величины; во-вторых, неизменность размера хранимой единицы. Если же размер единицы в процессе измерений изменяется более чем установлено нормами, то с помощью такого средства невозможно получить результат с требуемой точностью. Отсюда следует, что измерять можно только тогда, когда техническое средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени).

Средства измерений можно классифицировать по двум признакам: конструктивное исполнение; метрологическое назначение.

По конструктивному исполнению средства измерений подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные системы (комплексы) (см. рис. 1.1).

Мера физической величины – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.



Рис. 1.1. Классификация средств измерений по конструктивному исполнению

Различают меры: однозначные (гиря 1 кг, калибр, конденсатор постоянной ёмкости); многозначные (масштабная линейка, конденсатор переменной ёмкости); наборы мер (набор гирь, набор калибров). Набор мер, конструктивно объединённых в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях, называется магазином мер. Примером такого набора может быть магазин электрических сопротивлений, магазин индуктивностей. Сравнение с мерой выполняется с помощью специальных технических средств – компараторов (рычажные весы, измерительный мост и т.д.).

К однозначным мерам можно отнести стандартные образцы (СО). Существуют стандартные образцы состава и стандартные образцы свойств.

Стандартный образец свойств или состава вещества (материала) – стандартный образец с установленными значениями величин, характеризующих свойства или состав веществ и материалов.

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Принцип его действия основан на различных физических явлениях.

По характеру преобразования различают аналоговые, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), преобразующие непрерывную величину в числовой эквивалент, цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), выполняющие обратное преобразование.

По месту в измерительной цепи преобразователи разделяют на первичный (сенсор, чувствительный элемент), на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина; промежуточный,

включённый в измерительную цепь после первичного; преобразователи, предназначенные для масштабного преобразования, т.е. для изменения значения величины в некоторое число раз; передающие и др.

К измерительным преобразователям можно отнести преобразователи переменного напряжения в постоянное, измерительные трансформаторы напряжения и тока, делители тока, напряжения, усилители, компараторы, термопару и др. Измерительные преобразователи входят в состав какого-либо измерительного прибора, измерительной установки, измерительной системы или применяются вместе с каким-либо средством измерений.

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «даёт» информацию).

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы. В области аналитических измерений иногда применяют термин «детектор».

Пример: датчики запущенного метеорологического радиозонда передают измерительную информацию о температуре, давлении, влажности и других параметрах атмосферы.

Измерительный прибор (ИП) – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

По способу индикации значений измеряемой величины измерительные приборы разделяют на показывающие и регистрирующие. По действию измерительные приборы разделяют на интегрирующие и суммирующие. Различают также приборы прямого действия и приборы сравнения, аналоговые и цифровые приборы, самопишущие и печатающие приборы

Измерительная установка (ИУ) – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте, например, установка для измерения характеристик транзистора, установка для измерения мощности в трёхфазных цепях и др.

Измерительная машина (ИМ) – измерительная установка крупных размеров, предназначенная для точных измерений физических величин, характеризующих изделие.

Примеры:

1. Силоизмерительная машина.
2. Машина для измерения больших длин в промышленном производстве.
3. Делительная машина.
4. Координатно-измерительная машина.

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) – функционально объединённая совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Измерительная система – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещённых в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие системы и др.

Измерительную систему, перестраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют гибкой измерительной системой (ГИС).

Примеры:

1. Измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде физических величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов.

2. Радионавигационная система для определения местоположения различных объектов, состоящая из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесённых в пространстве на значительное расстояние друг от друга.

Измерительное устройство – часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение.

Пример: измерительным устройством может быть названо регистрирующее устройство измерительного прибора (включающее ленту для записи, лентопротяжный механизм и пишущий элемент), измерительный преобразователь.

1.3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ [1]

Методы и технические средства не являются идеальными, а органы восприятия экспериментатора не могут идеально воспринимать показания приборов. Поэтому после завершения процесса измерения остаётся некоторая неопределённость в наших знаниях об объекте измерения, т.е. получить истинное значение ФВ невозможно. Остаточная неопределённость наших знаний об измеряемом объекте может характеризоваться различными мерами неопределённости. В теории изме-

рений мерой неопределённости результата измерения является погрешность результата наблюдения. Более подробно погрешности измерений рассматриваются в курсе «Метрология, стандартизация, сертификация». Ниже будут приведены лишь основные сведения о них.

Под **погрешностью результата измерения**, или просто погрешностью измерения, понимается отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой физической величины. Записывается это следующим образом:

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X ,$$

где $X_{\text{изм}}$ – результат измерения; X – истинное значение ФВ.

Однако, поскольку истинное значение ФВ остаётся неизвестным, то неизвестна и погрешность измерения. Поэтому на практике имеют дело с приближёнными значениями погрешности или с так называемыми их оценками. В формулу для оценки погрешности подставляют вместо истинного значения ФВ её действительное значение. Таким образом, формула для оценки погрешности имеет следующий вид:

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X_{\text{д}} ,$$

где $X_{\text{д}}$ – действительное значение ФВ.

Каковы же основные причины возникновения погрешности? Можно выделить четыре основные группы погрешностей измерения:

- погрешности, вызванные методиками выполнения измерения (погрешность метода измерения);
- погрешность средств измерения;
- погрешность органов чувств наблюдателей (субъективные погрешности);
- погрешности, обусловленные влиянием условий измерения.

Все эти погрешности дают суммарную погрешность измерения. В метрологии принято разделять суммарную погрешность измерения на две составляющие – случайную и систематическую погрешности.

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности результатов измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в повторных наблюдениях, проведённых с одинаковой тщательностью одной и той же неизменяющейся (детерминированной) ФВ.

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных наблюдениях одной и той же неизменяющейся ФВ.

В общем случае в результатах измерения всегда присутствуют эти обе составляющие. На практике часто бывает так, что одна из них значительно превышает другую. В этих случаях меньшей составляющей

пренебрегают. Например, при измерениях, проводимых с помощью линейки или рулетки, как правило, преобладает случайная составляющая погрешности, а систематическая – мала, ею пренебрегают. Случайная составляющая в этом случае объясняется следующими основными причинами:

- неточностью (перекосом) установки рулетки (линейки);
- неточностью установки начала отсчёта;
- изменением угла наблюдения;
- усталостью глаз;
- изменением освещённости.

Систематическая погрешность возникает из-за несовершенства метода выполнения измерения, погрешностей СИ, неточного знания математической модели измерения, из-за влияния условий, погрешностей градуировки и поверки СИ, личных причин.

Поскольку случайные погрешности результатов измерения являются случайными величинами, в основе их обработки лежат методы теории вероятностей и математической статистики.

Кроме случайной и систематической погрешностей измерения различают так называемую *грубую погрешность* измерения. Иногда в литературе эту погрешность называют *промахом*. Грубая погрешность результата измерения – это такая погрешность, которая значительно превышает ожидаемую.

Как уже отмечалось, в общем случае проявляются одновременно обе составляющие суммарной погрешности измерения – случайная и систематическая, поэтому

$$\Delta = \overset{\circ}{\Delta} + \Delta_{\text{сист}},$$

где Δ – суммарная погрешность измерения, она может быть представлена в виде суммы; $\overset{\circ}{\Delta}$ – случайная составляющая погрешности измерения; $\Delta_{\text{сист}}$ – систематическая составляющая погрешности измерения.

Различают также абсолютные и относительные погрешности.

Абсолютная погрешность – погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины. Например, погрешность измерения массы в 5 кг – 0,0001 кг. Она обозначается Δ . Данная погрешность может быть как отрицательной, так и положительной. Как правило, она позволяет определить интервал возможных значений измеряемой величины и не позволяет судить о точности измерений. Например, абсолютная погрешность измерения длины составила $\pm 0,5$ м. Если измерялось расстояние между поверхностями Земли и Луны в какой-либо момент времени, то это точное измерение, а если измерялась длина стола –

точность измерения была крайне низка. Поэтому для характеристики точности измерений удобно применять относительную погрешность.

Относительная погрешность – это безразмерная величина, определяющаяся отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой ФВ. Как правило, она выражается в процентах (%). Относительная погрешность обозначается δ и определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_d} \cdot 100 \% = \frac{X_{\text{изм}} - X_d}{X_d} \cdot 100 \% .$$

Точностью измерения называется величина, обратная относительной погрешности.

Поскольку значение X_d близко к $X_{\text{изм}}$ (очень мало отличается от него), то на практике обычно принимается $\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{изм}}} \cdot 100 \% .$

Приведённой погрешностью средства измерения по входу γ_x или выходу γ_y называют отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению входного X_N или выходного Y_N сигнала. Вычисление погрешности по входу (выходу) проводят по формулам:

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100 \% , \quad \gamma_y = \frac{\Delta}{Y_N} \cdot 100 \% .$$

Обычно в качестве нормирующего значения используется диапазон измерений преобразователя ($X_v - X_n$) или соответствующий ему диапазон измерений выходного сигнала ($Y_v - Y_n$).

Приведённая погрешность не позволяет судить о точности измерений, поскольку на точность измерения в данном случае влияет ещё диапазон измерения.

Чрезвычайно важными для применения измерительных устройств и правильной оценки погрешности измерений, получаемой при их использовании, являются сведения о зависимости погрешности от значения измерительной величины в пределах диапазона измерений, а также сведения об изменениях этой погрешности под действием влияющих величин.

Зависимость погрешности от значения измеряемой величины определяется принятой конструкцией (схемой) и технологией изготовления измерительного устройства. Для рассмотрения этих зависимостей удобно использовать понятие номинальной и реальной статической характеристики измерительного устройства.

Градуировочная характеристика – зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально. Зависимость выходной величины средства измерения от

величины на входе в статическом режиме называется *статической характеристикой*.

Номинальной (или идеальной) статической характеристикой (НСХ) называется характеристика, которая приписана измерительному устройству данного типа, указанная в его паспорте и используется при выполнении с его помощью измерений.

Реальной статической характеристикой (РСХ) называется характеристика, которой обладает конкретный экземпляр измерительного устройства данного типа. Статические характеристики называют иначе *функциями преобразования*.

Из-за несовершенства конструкций и технологий изготовления измерительных устройств РСХ отличается от НСХ. Это отличие и определяет природу погрешностей данного измерительного устройства. Отклонения реальной характеристики от номинальной различны и зависят от значений измеряемой величины по всей шкале. По этому признаку погрешности принято разделять на аддитивную, мультипликативную, линейности и гистерезиса.

Аддитивной погрешностью, или «погрешностью нуля» измерительного устройства (получаемой путём сложения), называется погрешность, которая остаётся постоянной при всех значениях измеряемой величины.

На рисунке 1.2, а показана величина, где реальная характеристика несколько смещена относительно номинальной, т.е. выходной сигнал измерительного устройства при всех значениях X будет больше или меньше на одну и ту же величину, чем он должен быть, в соответствии с НСХ. Если аддитивная погрешность является систематиче-

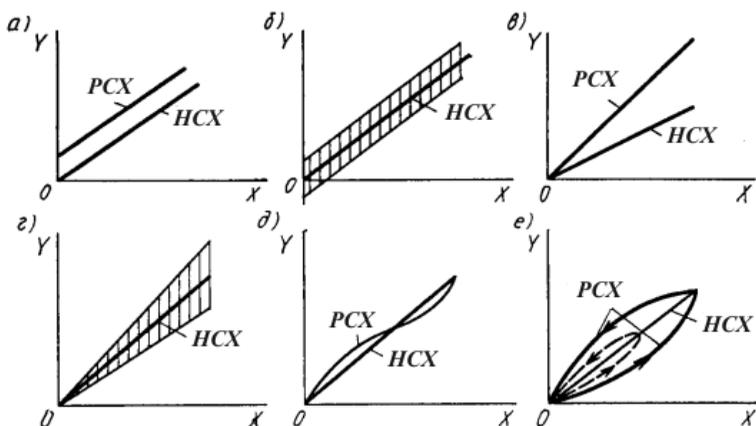


Рис. 1.2. Статические характеристики средств измерения

ской, то она может быть устранена. Для этого в измерительных устройствах имеется специально настроенный узел (корректор) нулевого значения выходного сигнала. Но если аддитивная погрешность случайная, то её нельзя исключить, а РСХ смещается по отношению к НСХ во времени произвольным образом. При этом для реальной характеристики можно определить некоторую полосу (рис. 1.2, б), ширина которой остаётся постоянной при всех значениях измеряемой величины. Возникновение случайной аддитивной погрешности обычно вызвано трением в опорах, контактными сопротивлениями, дрейфом нуля, шумом и фоном измерительных устройств.

Мультипликативной погрешностью (получаемой путём умножения), или «погрешностью чувствительности» измерительных устройств, называется погрешность, которая линейно возрастает (или убывает) с увеличением измеряемой величины. Это хорошо просматривается на рис. 1.2, в. При случайной, мультипликативной погрешности, на реальной функции она представляется некоторой угловой полосой (рис. 1.2, з). Причинами мультипликативных погрешностей являются изменения коэффициентов преобразования отдельных элементов и узлов измерительных устройств.

На рисунке 1.2, д показано взаимное расположение номинальной и реальной функций преобразования измерительных устройств. Это бывает в случае, когда отличие этих функций вызвано нелинейными эффектами. В таких случаях эту погрешность называют погрешностью линейности, а причины её могут быть связаны с несовершенством электронных элементов в технологии их изготовления и их нелинейных собственных характеристик. Наиболее затруднительной является погрешность гистерезиса (в переводе с греческого языка – запаздывание) или погрешность обратного хода, выражающаяся в несовпадении РСХ измерительного устройства при увеличении (прямой ход) и уменьшении (обратный ход) измеряемой величины (рис. 1.2, е).

Причинами гистерезиса являются: люфт, сухое трение в механических узлах, гистерезисный эффект в ферромагнитных материалах, внутреннее трение в материалах пружин, явление упругого последействия в упругих чувствительных элементах, явление поляризации в электрических, пьезоэлектрических и электрохимических элементах и т.д. Существенным при этом является тот факт, что форма получаемой петли реальной функции преобразования зависит от предыстории, а именно от значения измеряемой величины, при котором после постепенного увеличения последней начинается её уменьшение (на рис. 1.2, е это показано пунктирными линиями).

Если влияющие величины, вызывающие изменения положения и формы РСХ, при измерении не выявляются, то рассматриваемое явление определяется как невоспроизводимость и характеризует случай-

ную погрешность измерительного устройства. При этом используют понятия «размах» и «вариация».

Размахом (непостоянством) R выходного сигнала измерительного преобразователя (показаний измерительного прибора) называется разность между наибольшим и наименьшим значениями выходного сигнала. Этот «размах» соответствует одному и тому же значению измеряемой величины, полученному при многократном и одностороннем подходе к этому значению, т.е. при постепенном увеличении или уменьшении измеряемой величины (только при прямом или только при обратном ходе).

Вариацией ϵ_y выходного сигнала измерительного преобразователя (показаний измерительного прибора) называют среднюю разность между значениями выходного сигнала, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины, полученными при многократном и двустороннем подходе к этому значению, т.е. при постепенном увеличении и последующем уменьшении измеряемой величины (иначе говоря, при прямом и обратном ходе).

Основная погрешность – это погрешность СИ, находящегося в нормальных условиях эксплуатации. Она возникает из-за неидеальности собственных свойств СИ и показывает отличие действительной функции преобразования СИ в нормальных условиях от номинальной.

Нормативными документами на СИ конкретного типа (стандартами, техническими условиями и др.) оговариваются нормальные условия измерений – это условия измерения, характеризующие совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости. Среди таких влияющих величин наиболее общими являются температура и влажность окружающей среды, напряжение, частота и форма кривой питающего напряжения, наличие внешних электрических и магнитных полей и др. Для нормальных условий применения СИ нормативными документами предусматриваются:

– нормальная область значений влияющей величины (диапазон значений): температура окружающей среды – (20 ± 5) °С; положение прибора – горизонтальное с отклонением от горизонтального $\pm 2^\circ$; относительная влажность – $(65 \pm 15)\%$; практическое отсутствие электрических и магнитных полей, напряжение питающей сети – $(220 \pm 4,4)$ В, частота питающей сети – (50 ± 1) Гц и т.д.;

– рабочая область значений влияющей величины – область значений влияющей величины, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменение показаний средства измерений;

– рабочие условия измерений – это условия измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих об-

ластей. Например, для измерительного конденсатора нормируют дополнительную погрешность на отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной. Для амперметра – изменение показаний, вызванное отклонением частоты переменного тока от 50 Гц (значение частоты 50 Гц в данном случае принимают за нормальное значение частоты).

Дополнительная погрешность – составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального её значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений.

1.4. ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ [1]

Виды измерений обычно классифицируются по следующим признакам:

характеристике точности – равноточные, неравноточные (равнорассеянные, неравнорассеянные);

числу измерений – однократные, многократные;

отношению к изменению измеряемой величины – статические, динамические;

метрологическому назначению – метрологические, технические;

выражению результата измерений – абсолютные, относительные;

по общим приемам получения результатов измерений – прямые, косвенные, совместные, совокупные.

Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности СИ и в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных несколькими различными по точности СИ и (или) в разных условиях.

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.

Многократные измерения – измерения одного и того же размера ФВ, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом наблюдений, т.е. состоящих из ряда однократных измерений.

Прямое измерение – измерение ФВ, проводимое прямым методом, при котором искомое значение ФВ получают непосредственно из опытных данных. Прямое измерение производится путём экспериментального сравнения измеряемой ФВ с мерой этой величины или путём отчёта показаний СИ по шкале или цифровому прибору. (Например, измерения длины, высоты с помощью линейки, напряжения – с помощью вольтметра, массы – с помощью весов.)

Косвенное измерение – измерение, проводимое косвенным методом, при котором искомое значение ФВ находят на основании результата прямого измерения другой ФВ, функционально связанной с искомой величиной известной зависимостью между этой ФВ и величиной, получаемой прямым измерением.

Примеры косвенных измерений:

– определение значения активного сопротивления R резистора на основе прямых измерений силы тока I через резистор и падения напряжения U на нём по формуле $R = U/I$;

– определение плотности ρ тела цилиндрической формы на основе прямых измерений его массы m , диаметра d и высоты h цилиндра по формуле $\rho = 4m/\pi d^2 h$ и т.п.

Отметим, что измерения, в которых искомая величина определяется на основе прямых измерений основных физических величин системы и при использовании физических констант, называются *абсолютными*.

Косвенные измерения сложнее прямых, однако, они широко применяются в практике либо потому, что прямые измерения практически невыполнимы, либо потому, что косвенное измерение позволяет получить более точный результат по сравнению с прямым измерением.

Совокупные измерения – одновременно проводимые измерения нескольких одноимённых величин, при которых искомые значения величин определяют путём решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин.

Пример: значение массы отдельных гирь набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь.

Совместные измерения – это производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними.

Числовые значения искомых величин при совокупных и совместных измерениях определяются из системы уравнений, связывающих значения искомых величин со значениями величин, измеренных прямым (или косвенным) способом.

Чтобы определить числовые значения искомых величин, необходимо получить, по крайней мере, столько уравнений, сколько имеется этих величин. Хотя в общем случае число прямых измерений может быть и больше минимально необходимого.

В качестве примера рассмотрим задачу экспериментального определения зависимости сопротивления резистора от температуры. Предположим, что эта зависимость имеет вид

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2),$$

где R_0 и R_t – значения сопротивлений резистора при нулевой температуре и температуре t соответственно; α и β – постоянные температурные коэффициенты. Требуется определить значения величин R_0 , α и β . Очевидно, ни прямыми, ни косвенными измерениями здесь задачу не решить. Поступим следующим образом. При различных (известных) значениях температуры (она может быть измерена прямо или косвенно) t_1 , t_2 и t_3 измеряем (прямо или косвенно) значения R_{t_1} , R_{t_2} и R_{t_3} и записываем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} R_{t_1} &= R_0(1 + \alpha t_1 + \beta t_1^2); \\ R_{t_2} &= R_0(1 + \alpha t_2 + \beta t_2^2); \\ R_{t_3} &= R_0(1 + \alpha t_3 + \beta t_3^2). \end{aligned} \right\}$$

Решая эту систему относительно R_0 , α и β , получаем значения искомых величин. Это пример совместных измерений.

1.5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ [1]

Совокупность приёмов использования принципов и средств измерений составляет **метод измерения**. Различные методы измерений отличаются прежде всего организацией сравнения измеряемой величины с единицей измерения. С этой точки зрения все методы измерений в соответствии с ГОСТ 16263–70 подразделяются на две группы: методы непосредственной оценки и методы сравнения. Методы сравнения в свою очередь включают в себя метод противопоставления, дифференциальный метод, нулевой метод, метод замещения и метод совпадений.

При **методе непосредственной оценки** значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчётному устройству измерительного прибора прямого действия (измерительный прибор, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без обратной связи). На этом методе основаны все показывающие (стрелочные) приборы (вольтметры, амперметры, ваттметры, счётчики электрической энергии, термометры, тахометры и т.п.). Следует отметить, что при использовании данного метода измерений мера как вещественное воспроизведение единицы измерения, как правило, непосредственно в процессе измерения не участвует. Сравнение измеряемой величины с единицей измерения осуществляется косвенно путём предварительной градуировки измерительного прибора с помощью образцовых мер или образцовых измерительных приборов.

Точность измерений по методу непосредственной оценки в большинстве случаев невелика и ограничивается точностью применяемых измерительных приборов.

Метод сравнения с мерой – это такой метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. *Примеры* этого метода: измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гири; измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с ЭДС нормального элемента.

Метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами, называется **методом противопоставления**. Это, например, измерение массы на рычажных весах с помещением её и уравновешивающих гирь на две чаши весов при известном соотношении плеч рычага весов. В этом случае при качественном выполнении устройства сравнения (малое трение в опорах, стабильность соотношения плеч рычага и т.п.) может быть достигнута высокая точность измерений (пример – аналитические весы).

Дифференциальный метод – это метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой. Этот метод позволяет получать результаты измерений с высокой точностью даже в случае применения относительно неточных измерительных приборов, если с большой точностью воспроизводится известная величина.

Рассмотрим следующий пример. Необходимо измерить постоянное напряжение, истинное значение которого равно $U_x = 0,99$ В. В распоряжении экспериментатора имеется набор вольтметров (или один многопредельный) с пределами измерения 0,01; 0,1; 1 В. Пусть погрешность каждого вольтметра при измерении величины, значение которой равно пределу измерения, составляет 1%. Предположим, что имеется также образцовая мера напряжения $U_0 = 1$ В, погрешность которой пренебрежимо мала. Очевидно, что, производя измерения методом непосредственной оценки, экспериментатор использует вольтметр с пределом измерения 1 В и получает результат измерений с погрешностью 1%. При дифференциальном методе измерения экспериментатор включает источники измеряемого постоянного напряжения U_x и образцового напряжения U_0 последовательно и встречно и измеряет их разность $U_0 - U_x = 0,01$ В вольтметром с пределом измерения 0,01 В. В этом случае разность $U_0 - U_x$ будет измерена с погрешностью 1%, а, следовательно, значение напряжения будет определено с погрешностью 0,01%.

Указанный метод широко используется, в частности, при проверке средств измерений (например, измерительных трансформаторов тока и напряжения). На нём основана работа очень распространённых в электроизмерительной технике мостов постоянного и переменного токов.

Эффект повышения точности результатов измерений, достигаемый при дифференциальном методе, оказывается тем значительнее, чем ближе значение меры к истинному значению измеряемой величины. В том случае, когда результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля, дифференциальный метод измерений превращается в нулевой. Очевидно, что в нулевом методе измерений используемая мера должна быть изменяемой (регулируемой), а прибор сравнения выполняет функции индикатора равенства нулю результирующего воздействия измеряемой величины и меры.

Нулевой метод позволяет получить высокие точности измерений и широко используется, например, при измерениях электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием или постоянным напряжением компенсатором постоянного тока.

Методом замещения называется метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Это, например, взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов. Метод замещения можно рассматривать как разновидность дифференциального или нулевого метода, отличающуюся тем, что сравнение измеряемой величины с мерой производится одновременно.

Метод совпадений – это метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов. Примерами этого метода являются измерения длины с помощью штангенциркуля с нониусом, измерение частоты вращения стробоскопом.

Описанные выше различия в методах сравнения измеряемой величины с мерой находят своё отражение и в принципах построения измерительных приборов.

С этой точки зрения различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения. В измерительном приборе прямого действия предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения обратной связи. Так, например, на рис. 1.3 приведена структура электронного вольтметра переменного и постоянного тока, которая содержит выпрямитель В, усилитель постоянного тока УПТ и измерительный механизм ИМ. В этом приборе преобразование сигнала измерительной информации идёт только в одном направлении.

Характерной особенностью приборов прямого действия является потребление энергии от объекта измерения. Однако это не исключает возможности применения приборов прямого действия для измерения, например, электрического сопротивления или ёмкости, но для этого необходимо использовать вспомогательный источник энергии.

Измерительный прибор сравнения предназначен для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно.

На рисунке 1.4 приведена структурная схема автоматического прибора сравнения, содержащая устройство сравнения УС, устройство управления УУ и изменяемую (регулируемую) меру М с отсчётным устройством.

Измеряемая величина x и однородная с ней величина x_0 подаются на входы устройства сравнения УС. Величина x_0 получается от регулируемой меры М. В зависимости от результата сравнения x с x_0 устройство управления УУ воздействует на меру М таким образом, чтобы величина $|x - x_0|$ уменьшалась. Процесс уравнивания заканчивается, когда $x_0 = x$. При этом значение измеряемой величины отсчитывается по шкале регулируемой меры. Если в устройстве сравнения происходит вычитание величин x и x_0 , то в данном приборе реализуется сравнение измеряемой величины с мерой нулевым методом.

Очевидно, что любой измерительный прибор сравнения должен иметь цепь обратной связи и замкнутую структуру. Обратная связь может применяться и в приборах прямого действия, однако в них она всегда охватывает не весь процесс преобразования, а только его часть. Например, в структурной схеме на рис. 1.3 усилитель постоянного тока может быть охвачен обратной связью. В измерительных приборах сравнения в цепи обратной связи всегда формируется физическая величина, однородная с измеряемой, которая подаётся на вход прибора.

Следует отметить, что сравнение измеряемой величины с мерой в приборах сравнения может осуществляться либо одновременно (нулевой метод), либо разновременно (метод замещения).

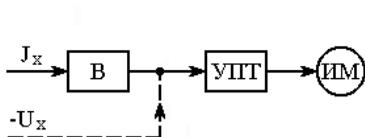


Рис. 1.3. Структурная схема прибора прямого действия

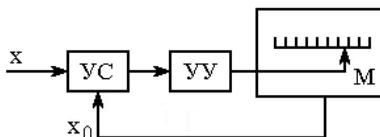


Рис. 1.4. Структурная схема прибора сравнения

Таким образом, приведённая классификация видов и методов измерений позволяет не только систематизировать разнообразные измерения всевозможных физических величин и тем самым облегчить подход к решению конкретной измерительной задачи, но и с общих позиций подойти к рассмотрению структур и принципов действия различных измерительных приборов.

1.6. ВИДЫ КОНТРОЛЯ [2]

В зависимости от вида объекта контроля может быть контроль продукции, услуг, систем качества (производств) и персонала. Все объекты контролируются на соответствие требованиям норм, установленным на сырьё, материалы, изделия, оборудование и инструмент. Одной из важнейших характеристик объектов контроля является их контролепригодность, т.е. свойство конструкции изделия, обеспечивающее возможность, удобство и надёжность её контроля при изготовлении, испытании, техническом обслуживании и ремонте.

Кроме названных объектов, контролю подвергаются элементы системы качества и стадии процесса производства. Контроль после какой-либо операции на станке, прессе, сборке называется операционным. После изготовления детали, узла или изделия в качестве готовой продукции применяют приёмочный контроль: проводится контроль комплектности, упаковки и транспортирования и, наконец, контроль хранения. Какие параметры подлежат контролю и каким инструментом или прибором контролируется объект при операционном контроле, регламентируется картой технологического процесса в графе «контрольная операция». Приёмочный контроль проводят по нормативно-технической документации (НТД), общим техническим условиям и соответствующим техническим условиям.

Проверка соответствия характеристик, режимов и других показателей названных стадий производства и составляет суть контролируемых операций.

Контроль объектов или стадий процесса производства может быть:

- *летучим* – срок проведения его не регламентирован;
- *периодическим* – проводится через определённый промежуток времени (часы, сутки, месяцы);
- *непрерывным* – ведётся непрерывно (постоянно).

В зависимости от средств контроля различают контроль:

- *визуальный* – когда объект контроля подвергается осмотру и определяется его соответствие требованиям НТД (все ли операции выполнены, наличие маркировки, сопроводительной документации);

– *органолептический* – субъективный метод контроля, проводимый специалистами-экспертами (оценка в баллах);

– *инструментальный* – контроль, осуществляемый при помощи измерительного инструмента, калибров, приборов, стендов, испытательных машин и др.

Последний вид контроля может быть ручным, автоматизированным и автоматическим. При *ручном* контроле используется ручной измерительный инструмент (штангенциркули, микрометры, калибры, скобы, индикаторы и т.д.) для проверки деталей и изделий. Данный контроль весьма субъективен: даже при сплошном контроле вручную обнаруживается лишь 2 ... 4% дефектных деталей. *Автоматизированный* контроль связан с использованием специальных средств, позволяющих исключить субъективизм при измерении. Наиболее прогрессивным является *автоматический* контроль, т.е. при изготовлении деталей и узлов встраиваются автоматические средства контроля, с помощью которых осуществляют непрерывный контроль.

В зависимости от объёма продукции различают контроль:

– *сплошной*, при котором решение о качестве контролируемой продукции принимается по результатам проверки каждой единицы продукции;

– *выборочный*, при котором решение о качестве принимается по результатам проверки одной или нескольких выборок (в зависимости от требований НТД) из партии или потока продукции.

По характеру воздействия на ход производственного процесса различают *активный* и *пассивный* контроль. При активном контроле (он осуществляется приборами, встроенными в технологическое оборудование) полученные результаты используются для непрерывного управления процессом изготовления изделий. Пассивный контроль лишь фиксирует полученный результат и является основанием для забраковки продукции.

По характеру воздействия на объект контроль может быть *разрушающим*, при котором продукция становится непригодной для дальнейшего использования по назначению, и *неразрушающим*.

По типу проверяемых параметров выделяют контроль геометрических параметров (линейные, угловые размеры, форма и расположение поверхностей, осей, деталей, узлов и агрегатов и т.д.), физических свойств (электрические, теплотехнические, оптические и др.), механических свойств (прочность, твёрдость, пластичность при различных внешних условиях), микро- и макроструктур (металлографические исследования), химические свойства (химический анализ состава вещества, химическая стойкость в различных средах), а также специальный контроль (свето-, газонепроницаемость, герметичность).

Процесс контроля при сертификации является организованной системой. Ему присущи определённые признаки, характеризующие его целевую направленность, назначение и содержание. Основными элементами процесса контроля являются объект, метод и исполнитель контроля, а также нормативно-техническая документация по контролю.

При организации процессов контроля, прежде всего технического, можно использовать ГОСТ 14.317–75, в котором указаны основные этапы разработки операций, применяемых при техническом контроле.

1.7. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ [2, 9]

Испытания продукции – это разновидность контроля, поэтому им также присущ системный подход. В систему испытаний входят следующие основные элементы: объект (изделие, продукция), категория испытания, средства для проведения испытаний и замеров (испытательное оборудование и измерительные приборы или регистрирующие средства измерений), исполнитель испытания, нормативно-техническая документация на испытания (программа, методики).

В зависимости от стадии жизненного цикла продукции проводятся следующие испытания:

- исследования – исследовательские;
- разработка – доводочные, предварительные;
- производство – приёмочные, квалификационные, предъявительские, приёмосдаточные, периодические, типовые, инспекционные, сертификационные;
- эксплуатация – подконтрольная эксплуатация, эксплуатационные периодические, инспекционные.

Исследовательские испытания при необходимости проводят на любых стадиях жизненного цикла продукции. В процессе производства продукции покупные материалы, комплектующие изделия могут подвергаться контрольным испытаниям при входном контроле, а составные части собственного изготовления – при операционном. Исследовательские испытания проводят для изучения поведения объекта при том или ином внешнем воздействующем факторе (ВВФ) или в том случае, если нет необходимого объёма информации. Чаще всего это бывает, когда объект недостаточно изучен, например, при исследовательских работах, проектировании, выборе оптимальных способов хранения, транспортирования, ремонта и технического обслуживания.

В цехах опытного производства по эскизам изготавливают модели, макеты, опытные образцы сборочных узлов или деталей, которые затем испытывают. В процессе испытаний оценивают работоспособность образца, правильность конструкторского решения, определяют

возможные характеристики, выясняют закономерности и тенденции изменения параметров. Различные проверки проводят по специальной программе, которую разрабатывает ведущий конструктор.

Исследовательские испытания проводят в основном на типовом представителе с целью получения информации о совокупности всех объектов данного вида. Таким образом, эти испытания проводятся для изучения характеристик свойств объекта, формирования исходных требований к продукции, выбора технических решений, определения характеристик продукции и её составных частей, выбора наиболее эффективных методов производства, эксплуатации (применения) и контроля продукции; определения условий эксплуатации.

Исследовательские испытания часто проводят как определительные и оценочные. Цель определительных испытаний – нахождение значений одной или нескольких величин с заданной точностью и достоверностью. Иногда при испытаниях надо лишь установить факт годности объекта, т.е. определить, удовлетворяет ли данный экземпляр из ряда объектов данного вида установленным требованиям или нет. Такие испытания называются *оценочными*.

Испытания, проводимые для контроля качества объекта, называются *контрольными*. Назначение контрольных испытаний – проверка на соответствие техническим условиям определённых экземпляров комплектующих изделий или составных частей при изготовлении. В результате испытаний полученные данные сопоставляют с установленными в технических условиях и делают заключение о соответствии испытываемого (контролируемого) объекта нормативно-технической документации (документации на поставку комплектующих изделий).

Доводочные испытания проводят на стадии НИОКР для оценки влияния вносимых в техническую документацию изменений, чтобы обеспечить достижение заданных значений показателей качества продукции. Необходимость испытаний определяет разработчик либо при составлении технического задания на разработку, либо в процессе разработки; он же составляет программу и методику испытаний.

Испытаниям подвергают опытные или головные образцы продукции и её составные части. Испытания, как правило, проводит или организует разработчик, привлекая к ним при необходимости изготовителя.

Цель *предварительных* испытаний – определение возможности предъявления образцов на приёмочные испытания. Испытания проводят в соответствии со стандартом или организационно-методическим документом министерства, ведомства, предприятия. При отсутствии последних необходимость испытаний определяет разработчик. Программа предварительных испытаний максимально приближена к условиям эксплуатации изделия, организация проведения испытаний такая же, как и при доводочных испытаниях.

Предварительные испытания проводят аттестованные испытательные подразделения с использованием аттестованного испытательного оборудования. Продукцию, закреплённую за головными организациями, испытывают с их участием или под их контролем.

По результатам испытаний оформляют акт, отчёт и определяют возможность предъявления изделия на приёмочные испытания.

Приёмочные испытания проводят для определения целесообразности и возможности постановки продукции на производство. Приёмочные испытания изделий единичного производства проводят для решения вопроса о целесообразности передачи этих изделий в эксплуатацию. Испытаниям подвергают опытные или головные образцы (партии) продукции. При поставке на производство семейства, гаммы или типоразмерного ряда продукции типовой представитель выбирают исходя из условия возможности распространения результатов его испытаний на всю совокупность продукции. Приёмочные испытания проводят аттестованные испытательные подразделения с использованием аттестованного испытательного оборудования. Продукцию, закреплённую за головными организациями по испытаниям, проверяют указанные организации.

По видам продукции, не закреплённой за головной организацией по государственным испытаниям, проведение испытаний организует одна из сторон – заказчик (основной потребитель), разработчик или изготовитель при участии других сторон под руководством приёмочной комиссии в аттестованных испытательных подразделениях.

При приёмочных испытаниях контролируют все установленные в техническом задании значения показателей и требований. Приёмочные испытания образцов модернизированной или модифицированной продукции по возможности проводят путём сравнительных испытаний образцов этой продукции и образцов выпускаемой продукции.

Квалификационные испытания проводят в следующих случаях: при оценке готовности предприятия к выпуску конкретной серийной продукции, если изготовители опытных образцов и серийной продукции разные, а также при постановке на производство продукции по лицензиям и продукции, освоенной на другом предприятии. В остальных случаях необходимость проведения квалификационных испытаний устанавливает приёмочная комиссия.

Испытаниям подвергают образцы из установочной серии (первой промышленной партии), а также первые образцы продукции, выпускаемой по лицензиям и освоенной на другом предприятии.

Приёмодаточные испытания проводят для принятия решения о пригодности продукции к поставке или её использованию. Испытани-

ям подвергают каждую изготовленную единицу продукции или выборку из партии. Испытания проводит служба технического контроля изготовителя с участием в установленных случаях представителя заказчика. При наличии на предприятии государственной приёмки приёмосдаточные испытания проводят её представители. При испытаниях контролируют значения основных параметров и работоспособность изделия. При этом контроль установленных в НТД показателей надёжности изделий может осуществляться косвенными методами.

Порядок испытаний установлен в стандарте общих технических требований или технических условиях, а для продукции единичного производства – в техническом задании.

Периодические испытания проводят с целью:

- периодического контроля качества продукции;
- контроля стабильности технологического процесса в период между очередными испытаниями;
- подтверждения возможности продолжения изготовления изделий по действующей документации и их приёмки;
- подтверждения уровня качества продукции, выпущенной в течение контролируемого периода;
- подтверждения эффективности методов испытания, применяемых при приёмочном контроле.

Периодические испытания предназначены для продукции установившегося серийного (массового) производства. При их проведении контролируют значения показателей, которые зависят от стабильности технологического процесса, но не проверяются при приёмосдаточных испытаниях. Для испытаний представляют образцы продукции, отобранные в соответствии со стандартами, техническими условиями и прошедшие приёмосдаточные испытания.

Программа периодических испытаний разнообразна и максимально приближена к условиям эксплуатации.

Типовые испытания – контроль продукции одного типоразмера, по единой методике, который проводят для оценки эффективности и целесообразности изменений, вносимых в конструкцию или технологический процесс. Испытаниям подвергают образцы выпускаемой продукции, в конструкцию или технологический процесс изготовления которых внесены изменения. Проводит эти испытания изготовитель с участием представителей государственной приёмки или испытательная организация. Программу испытаний устанавливают в зависимости от характера внесённых изменений.

Инспекционные испытания осуществляют выборочно с целью контроля стабильности качества образцов готовой продукции и продукции, находящейся в эксплуатации. Их проводят специально упол-

номоченные организации (органы госнадзора, ведомственного контроля, организации, осуществляющие внешнеторговые операции и др.) в соответствии с НТД на эту продукцию по программе, установленной организацией, их выполняющей, или согласованной с ней. Сертификационные испытания проводят для определения соответствия продукции требованиям безопасности и охраны окружающей среды, а в некоторых случаях и важнейших показателей качества продукции: надёжности, экономичности и т.д.

Сертификационные испытания – элемент системы мероприятий, направленных на подтверждение соответствия фактических характеристик продукции требованиям НТД. Сертификационные испытания, как правило, проводят независимые от производителя испытательные центры. По результатам испытаний орган по сертификации принимает решение о соответствии продукции требованиям НТД. Сертификация предполагает взаимное признание результатов испытаний поставщиком и потребителем продукции, что особенно важно при внешнеторговых операциях.

Программу и методы испытаний устанавливают в сертификационной документации и указывают в положении по сертификации данного вида продукции с учётом особенностей её изготовления, испытаний и поставки.

Подконтрольную эксплуатацию проводят для подтверждения соответствия продукции требованиям НТД в условиях её применения, получения дополнительных сведений о надёжности, рекомендаций по устранению недостатков, повышению эффективности применения, а также для получения данных, которые учитывались бы при последующих разработках. Для подконтрольной эксплуатации выделяют образцы, которым создают условия, близкие к эксплуатационным. Для серийной продукции предпочтительно ставить на подконтрольную эксплуатацию образцы, прошедшие квалификационные или периодические испытания. Результаты подконтрольной эксплуатации (сведения об отказах, техническом обслуживании, ремонте, расходе запасных частей и др.) потребитель вносит в извещения, которые отправляет изготовителю (разработчику), или в журнал на месте эксплуатации.

Эксплуатационные периодические испытания проводят для определения возможности или целесообразности дальнейшей эксплуатации (применения) продукции в том случае, если изменение её показателя качества может создать угрозу безопасности, здоровью, окружающей среде или привести к снижению эффективности её применения. Испытаниям подвергают каждую единицу эксплуатируемой продукции через установленные интервалы наработки или календарного времени. Испытания проводят органы госнадзора в соответствии с положением о них или потребитель. При испытаниях контролируют соответствие

продукции нормам и требованиям по безопасности и экологии, установленным в НТД (стандартах, инструкциях, правилах), а также нормам и требованиям, определяющим эффективность её применения и приведённым в эксплуатационных документах.

Допускается совмещать следующие категории испытаний:

- предварительные с доводочными;
- приёмочные с приёмодаточными – для продукции единичного производства;
- приёмочные с квалификационными – при приёмочных испытаниях головных или опытных образцов (опытных партий) с подготовленным технологическим процессом для серийного производства на этом этапе;
- периодические с типовыми – при согласии заказчика (основного потребителя), кроме продукции, подлежащей государственной приёмке;
- сертификационные с приёмочными и периодическими.

Испытания проводятся на следующих уровнях:

- государственном – для приёмочных, квалификационных, инспекционных, сертификационных и периодических (если их результаты используют при аттестации продукции по категориям качества);
- межведомственном – для приёмочных, квалификационных и инспекционных испытаний;
- ведомственном – для приёмочных, квалификационных и инспекционных испытаний.

Испытания важнейших видов продукции производственно-технического и культурно-бытового назначения, проводимые в головных организациях по испытаниям именно этих видов продукции, называются *государственными*. Таким образом, наряду с приёмочными испытаниями, т.е. испытаниями для выдачи разрешения на серийное производство, к государственным испытаниям могут относиться квалификационные, периодические (для аттестации продукции по категориям качества), инспекционные и сертификационные. В государственных испытаниях принимают участие представители всех заинтересованных министерств (ведомств).

Межведомственные испытания проводят, как правило, при приёмочных испытаниях, когда в комиссии принимают участие представители нескольких министерств (ведомств). Ведомственные испытания – это испытания, проводимые комиссией из представителей заинтересованного министерства (ведомства).

При проведении испытаний необходимо обеспечить их единство, т.е. необходимую точность, воспроизводимость и достоверность результатов испытаний. Обеспечение единства испытаний направлено на устранение расхождений в результатах повторных испытаний у поставщика и потребителя и сокращение объёма повторных испытаний.

При этом главной целью испытаний являются безусловная достоверность и полнота получаемой при испытаниях информации о качестве продукции.

Работы по обеспечению единства испытаний организуются министерствами (ведомствами) под методическим руководством Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии через головные организации по государственным испытаниям продукции, головные и базовые организации по стандартизации, контрольно-испытательные и метрологические службы объединений, предприятий, организаций. Технической основой обеспечения единства испытаний являются аттестованное испытательное оборудование и поверенные средства измерений, средства аттестации и поверки. Нормативно-методической основой обеспечения единства испытаний являются:

- стандарты на методы испытаний продукции, а также разделы методов испытаний в стандартах и технических условиях на конкретную продукцию;
- программы и методики испытаний продукции;
- организационно-методические документы, устанавливающие порядок деятельности испытательных подразделений, регламентирующие общие требования к испытаниям продукции, а также надзор за их проведением;
- стандарты Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

По условиям и месту проведения различают испытания:

- *лабораторные*, осуществляемые в лабораторных условиях;
- *стендовые*, проводимые на испытательном оборудовании в испытательных или научно-исследовательских подразделениях. Испытательное оборудование может выпускаться серийно, например вибрационные стенды для испытаний на вибрацию, ударные стенды и др., а может специально разрабатываться (проектироваться и изготавливаться) в процессе создания нового изделия для его испытания с целью получения каких-либо характеристик (показателей);
- *полигонные*, выполняемые на испытательном полигоне, например испытания автомобилей;
- *натурные* – испытания в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению. В данном случае испытываются не составные части изделия или его модель, а только непосредственно изготовленная продукция. Характеристики свойств изделия при натурных испытаниях определяются непосредственно без использования аналитических зависимостей, отражающих физическую структуру объекта испытаний или его частей;
- *испытания с использованием моделей* проводятся на физической модели (упрощённой, уменьшенной) изделия или его составных частей; иногда при этих испытаниях возникает необходимость в про-

ведении расчётов на математических и физико-математических моделях в сочетании с натурными испытаниями объекта и его составных частей.

По продолжительности, а вернее, по временной полноте проведения испытания могут быть:

– *нормальные*, когда методы и условия проведения обеспечивают получение необходимого объёма информации о характеристиках свойств продукции (объекта) в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиях эксплуатации;

– *ускоренные*, когда методы и условия проведения обеспечивают получение необходимой информации о характеристиках свойств объекта в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. Проведение ускоренных испытаний позволяет сокращать затраты средств и времени на создание продукции. Ускорение получения результатов испытаний может быть достигнуто за счёт применения повышенных нагрузок, увеличения температур при термических испытаниях и т.д.;

– *сокращённые*, проводимые по сокращённой программе.

По результату воздействия, как и в методах контроля, различают испытания:

неразрушающие – объект испытаний после проведения испытаний может функционировать (эксплуатироваться);

разрушающие – объект после проведения испытаний не может быть использован для эксплуатации.

Наконец, по определяемым характеристикам объекта различают испытания:

функциональные – проводятся с целью определения показателей назначения объекта;

на надёжность – осуществляются для определения показателей надёжности в заданных условиях;

на прочность – проводятся для установления значений воздействующих факторов, при которых определённые характеристики объекта выходят за установленные пределы;

на устойчивость – выполняются для контроля способности изделия реализовывать свои функции и сохранять значения параметров в пределах норм, установленных НТД, во время воздействия на него определённых факторов (агрессивных сред, ударной волны, электрического поля, радиационных излучений и т.д.);

на безопасность – проводятся с целью подтверждения, установления фактора безопасности для обслуживаемого персонала или лиц, имеющих отношение к объекту испытаний;

на транспортабельность – осуществляются с целью определения возможности транспортирования объекта в той или иной таре без нарушения способности объекта выполнять свои функции и сохранять значения параметров в пределах норм;

границные – проводятся для определения зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимом эксплуатации;

технологические – выполняются при изготовлении продукции с целью обеспечения её технологичности.

В руководстве ИСО/МЭК2 дано следующее определение термина «испытание»: техническая операция, заключающаяся в определении одной или нескольких характеристик данной продукции, процесса или услуги в соответствии с установленной процедурой. Другое определение дано в ГОСТ 16504–81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения». Согласно этому документу, испытания – экспериментальное определение (оценивание) количественных и (или) качественных свойств объекта как результата воздействия на него при его функционировании, а также при моделировании объекта и (или) воздействии на него. Основными составляющими процесса испытаний являются следующие:

1. Объект испытаний – продукция, подвергаемая испытаниям. Главным признаком объекта испытаний является то, что по результатам испытаний принимается решение именно по этому объекту: о его годности или браковке, о возможности предъявления на последующие испытания, о возможности серийного выпуска и т.п. Характеристики свойств объекта при испытаниях можно определить путём измерений, анализов, диагностирования, применения органолептических методов или регистрации определённых событий при испытаниях (отказы, повреждения) и т.д.

При испытаниях характеристики свойств объекта либо оценивают, либо контролируют. В первом случае задачей испытаний является получение количественных или качественных оценок свойств объекта; во втором – только установление соответствия характеристик объекта заданным требованиям.

2. Условия испытаний – это совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях. Условия испытаний могут быть реальными или моделируемыми, предусматривать определение характеристик объекта при его функционировании и отсутствии функционирования, при наличии воздействий или после их приложении.

3. Средства испытаний – это технические устройства, необходимые для проведения испытаний. Сюда входят средства измерений, испытательное оборудование и вспомогательные технические устройства.

4. Исполнители испытаний – это персонал, участвующий в процессе испытаний. К нему предъявляются требования по квалификации, образованию, опыту работы, другим критериям.

Нормативно-методическую основу процесса испытаний составляют:

- комплекс стандартов, регламентирующих организационно-методические и нормативно-технические основы испытаний;
- комплекс стандартов системы разработки и постановки продукции на производство;
- комплекс стандартов Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ);
- нормативно-технические и технические документы, регламентирующие требования к продукции и методам её испытаний;
- нормативно-технические документы, регламентирующие требования к средствам испытаний и порядок их использования.

Основным документом, определяющим качество технологического процесса испытаний, является методика испытаний. С учётом вышеуказанных составляющих на рис. 1.5 приводится структура процесса сертификационных испытаний.

Сертификационные испытания продукции в большинстве случаев проводятся для оценки соответствия функциональных показателей условиям эксплуатации, способности к воздействию внешних факторов и критериям надёжности. Внешние воздействующие факторы (ВВФ) во многом определяют требования к безопасности продукции в сфере её применения и поэтому обычно оцениваются в рамках обязательной сертификации. Надёжность как основное потребительское свойство продукции играет существенную роль в её конкурентоспособности на рынке. Показатели надёжности часто являются предметом оценки при добровольной сертификации.

В зависимости от характера воздействия на изделия все ВВФ делятся на классы: механические, климатические и другие природные, биологические, радиационные, электромагнитных полей, специальных сред, термические.

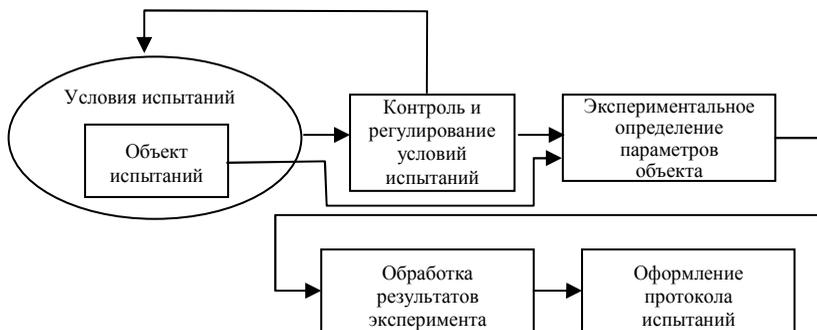


Рис. 1.5. Структурная схема процесса испытаний

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН [8]

Различные физические величины имеют разную физическую природу, поэтому отличаются методы и средства их измерений. Для удобства разработки или выбора тех или иных методов и средств измерений все физические величины делятся на электрические, магнитные и неэлектрические.

Характерной особенностью современных измерений является то, что не только электрические и магнитные, но и большинство неэлектрических величин измеряются электрическими методами, т.е. путём предварительного преобразования неэлектрической величины в электрическую. Это обусловлено следующими достоинствами электрических измерений:

- электрические величины удобно передавать на расстояние, причём передача осуществляется с высокой скоростью;
- электрические величины универсальны в том смысле, что любые другие величины могут быть преобразованы в электрические и наоборот;
- электрические величины легко, точно и быстро преобразуются в цифровой код;
- электрические измерения позволяют достигнуть высокой точности, чувствительности и быстродействия средств измерений.

Автоматизация технологических процессов во всех отраслях народного хозяйства приводит как к возрастанию общего объёма электрических измерений физических величин, так и к изменению доли тех или иных физических величин в общем объёме.

Аналоговые и цифровые измерительные приборы и измерительные преобразователи предназначены главным образом для прямых измерений электрических величин: постоянных токов и напряжений, параметров сигналов переменного тока, электрической мощности, расхода энергии, параметров электрических цепей и т.д. Знание их возможностей и принципа действия позволяет квалифицированно решать задачу измерений большинства электрических величин. Далее излагаются основные методы и электромеханические средства измерений электрических величин. Аналоговые электронные вольтметры, осциллографы и цифровые приборы будут рассмотрены в отдельном курсе.

2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН АНАЛОГОВЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ

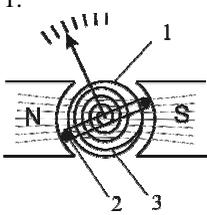
Аналоговые электромеханические СИ включают в себя измерительную цепь, измерительный механизм, отсчётное устройство со шкалой. Измерительный механизм преобразует входной электриче-

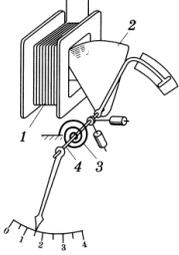
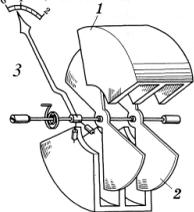
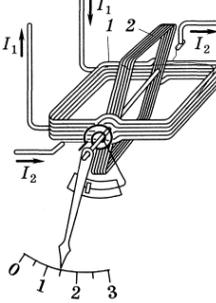
ский сигнал в механическую энергию перемещения подвижной части. Перемещение, в основном, представляет собой поворот подвижной части относительно неподвижной оси на какой-либо угол α .

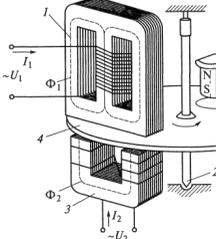
Отсчётное устройство – указатель (стрелка), перо, жёстко связанное с подвижной частью измерительного механизма и неподвижной шкалой (бумажным носителем, совмещающим функции шкалы и носителя регистрируемой информации). Подвижная часть преобразует угловое перемещение механизма в перемещение указателя, при этом величина α отсчитывается в единицах деления шкалы.

Вращающий момент $M_{вр}$, действующий на подвижную часть, определяется производной от энергии поля по углу отклонения подвижной системы СИ по формуле: $M_{вр} = dW_i / d\alpha$, где W_i – энергия магнитного поля системы контуров с токами или энергия электрического поля системы заряженных тел. В зависимости от характера явления, используемого для создания вращающего момента, различают следующие системы электромеханических СИ (табл. 2.1): магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, индукционную. В любом из этих СИ действуют также уравновешивающий противодействующий момент M_{α} , зависящий от α и направленный в сторону, противодействующую $M_{вр}$. В зависимости от способа создания противодействующего момента M_{α} электромеханические СИ подразделяются на две группы:

2.1. Основные типы измерительных механизмов аналоговых электромеханических приборов

Измерительный механизм	Символ	Принцип действия	Область применения
<p>1.</p>  <p>Магнитоэлектрический механизм</p>		<p>В результате взаимодействия поля рамки (катушки) 2 с током и магнитным полем 1 постоянного магнита возникает вращающий момент, пропорциональный измеряемой величине, уравновешиваемый противодействующим моментом спиральной пружины 3</p>	<p>Измеряет постоянные токи и напряжения. Пределы измерений с применением добавочных сопротивлений и шунтов составляют соответственно 15 мВ – 600 В, 10 мкА – 400 А. При измерении переменных токов и напряжений используется выпрямитель</p>

Измерительный механизм	Символ	Принцип действия	Область применения
<p>2.</p>  <p>Электромагнитный механизм</p>		<p>В поле неподвижной катушки 1 с током находится подвижный ферромагнитный сердечник 2, закреплённый на оси 4. Сила их взаимодействия вызывает вращающий момент. Противодействующий момент создаётся пружиной 3</p>	<p>Измеряет постоянные и переменные токи и напряжения. Приборы имеют неравномерную шкалу. Требуется защита от внешнего магнитного поля</p>
<p>3.</p>  <p>Электростатический механизм</p>		<p>Электростатические силы взаимодействия заряженных электродов 1 и 2 создают вращающий момент, отклоняющий указатель. Противодействующий момент создаётся спиральной пружиной 3</p>	<p>Измеряемые величины – напряжение постоянного тока и электрический заряд. Пределы измерения напряжения 0,1 ... 10 кВ. Потребляемая мощность 10^{-15} Вт</p>
<p>4.</p>  <p>Электродинамический механизм</p>		<p>Взаимодействие полей подвижной катушки 2 и неподвижной катушки 1 вызывает вращающий момент, пропорциональный произведению токов I_1 и I_2 в катушках</p>	<p>Применяется, главным образом, для измерения электрической мощности. Потребляемая мощность 1–2 Вт</p>

Измерительный механизм	Символ	Принцип действия	Область применения
<p>5.</p>  <p>Индукционный механизм</p>		<p>Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 магнитопроводов 1 и 3 индуцируют в алюминиевом диске 4 вихревые токи. Диск способен вращаться на оси 2. Сила взаимодействия токов и магнитных потоков вызывает появление вращающего момента, пропорционального произведению $I_2 I_1$. Магнитный поток постоянного магнита 5 при вращении диска индуцирует в нём токи и вызывает появление силы и противодействующего момента</p>	<p>Применяется в счётчиках электрической энергии</p>

- с механическим противодействующим моментом;
- с электрическим противодействующим моментом (логометры).

2.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ [8]

2.2.1. Общие сведения

Электрические цепи представляют собой совокупность соединённых друг с другом элементов – источников электрической энергии и нагрузок в виде резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов. При определённых допущениях эти нагрузки можно рассматривать как линейные пассивные двухполюсники с сосредоточенными постоянными, характеризующиеся некими идеальными параметрами – сопротивлением R , индуктивностью L , ёмкостью C .

При измерении, однако, не всегда удаётся определить значение того или иного параметра, соответствующее идеальному, совершенному виду элемента. Несовершенство конструкции и характеристик применяемых материалов является причиной появления так называемых остаточных (паразитных) параметров элементов. Так, наряду с главным параметром – индуктивностью катушка индуктивности обладает собственной ёмкостью и активным сопротивлением; резистор, обладая активным сопротивлением, имеет также определённую индуктивность и т.п.

С учётом остаточных параметров конденсатор, катушку индуктивности или резистор можно характеризовать некоторым эффективным значением ёмкости, индуктивности, сопротивления, которые зависят от частоты. Поэтому эффективные параметры компонентов необходимо измерять на рабочих частотах, если их влиянием на результат измерения нельзя пренебречь.

В зависимости от объекта измерений, требуемой точности результата, диапазона рабочих частот и других условий для измерения параметров двухполюсников применяют различные методы и средства измерений. Наиболее распространёнными являются следующие методы измерения: вольтметра-амперметра, непосредственной оценки, мостовой, резонансный и дискретного счёта.

2.2.2. Метод вольтметра-амперметра

Измерение методом вольтметра-амперметра сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым двухполюсником и последующему расчёту его параметров по закону Ома. Метод может быть использован для измерения активного и полного сопротивления, индуктивности и ёмкости.

Измерение активных сопротивлений производится на постоянном токе, при этом включение резистора R_x в измерительную цепь возможно по схемам, представленным на рис. 2.1, а и б. Обе схемы включения приводят к методическим погрешностям ΔR , зависящим от величины сопротивления приборов.

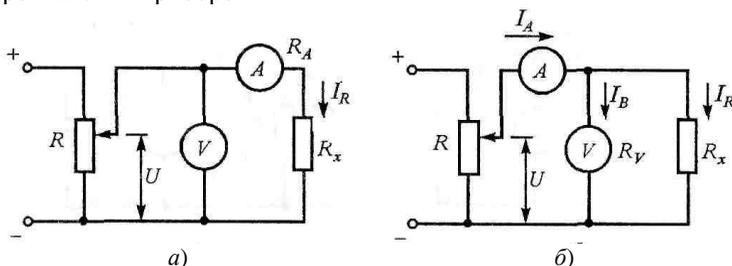


Рис. 2.1. Измерение активных сопротивлений методом вольтметра-амперметра

Очевидно, что в схеме на рис. 2.1, *а* методическая погрешность тем меньше, чем меньше сопротивление амперметра (при $R_A \rightarrow 0$, $\Delta R \rightarrow 0$), а в схеме на рис. 2.1, *б* эта погрешность тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра (при $R_V \rightarrow \infty$, $\Delta R \rightarrow 0$). Таким образом, схемой, приведённой на рис. 2.1, *а*, следует пользоваться для измерения больших сопротивлений, а схемой, приведённой на рис. 2.1, *б* – для измерения малых сопротивлений.

Измерение полного сопротивления Z_x выполняется на переменном токе частотой f (рис. 2.2). По показаниям вольтметра и амперметра определяют модуль полного сопротивления:

$$|Z_x| = U_V / I_A,$$

где U_V , I_A – показания вольтметра и амперметра.

Выполнив анализ методической погрешности, придём к выводу, что схему, представленную на рис. 2.2, *а*, целесообразно применять при $Z_x \ll Z_V$, а на рис. 2.2, *б* – при $Z_x \gg Z_V$.

Измерение ёмкости методом вольтметра-амперметра может быть выполнено по схемам, представленным на рис. 2.3.

Ёмкостное сопротивление конденсатора

$$X_C = 1/\omega C_x = U_C / I,$$

откуда

$$C_x = I/\omega U_C,$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота тока в цепи; U_C – напряжение, измеряемое вольтметром.

Следовательно, при измерении ёмкости этим методом необходимо знать частоту источника питания f . Для измерения больших ёмкостей рекомендуется схема, приведённая на рис. 2.3, *а*; а малых ёмкостей – на рис. 2.3, *б*.

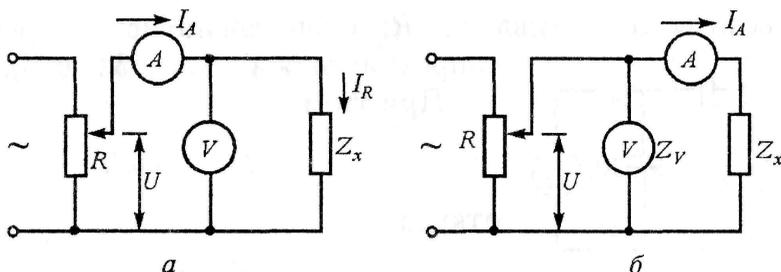


Рис. 2.2. Измерение полного сопротивления двухполюсника

Для измерения очень малых ёмкостей применяют вариант метода вольтметра-амперметра (метод двух вольтметров), схема которого приведена на рис. 2.4.

Питающее напряжение U_1 измеряется вольтметром V_1 . Вольтметр V_2 измеряет напряжение на конденсаторе C_0 , ёмкость которого известна:

$$U_2 = I / \omega C_0.$$

Ток I определяется выражением

$$I = U_1 / (1 / \omega C_x + 1 / \omega C_0),$$

откуда

$$C_x = C_0 U_2 / (U_1 - U_2).$$

Для уменьшения погрешности измерения необходимо выполнить условие $C_0 \gg C_x$, тогда можно упростить выражение для C_x :

$$C_x = C_0 U_2 / U_1.$$

Метод двух вольтметров позволяет измерять ёмкости от долей пикофард.

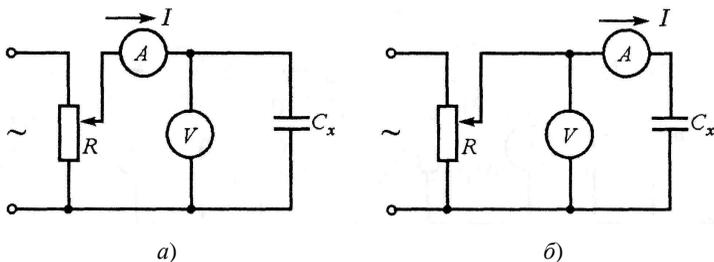


Рис. 2.3. Измерение ёмкости методом вольтметра-амперметра

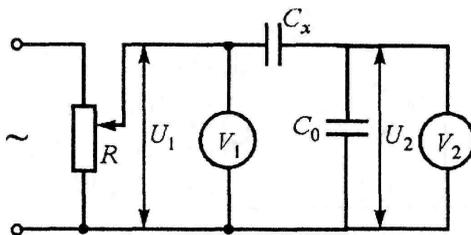


Рис. 2.4. Измерение ёмкости методом двух вольтметров

Измерение индуктивности катушки методом вольтметра-амперметра возможно, если её сопротивление R_L значительно меньше реактивного сопротивления X_L (рис. 2.5, а, б). При этом

$$I = U_L / \omega L ,$$

откуда

$$L = U_L / \omega I .$$

Если требуется получить более точный результат, то необходимо учесть сопротивление катушки. Так как

$$Z = \frac{U_L}{I} = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2} ,$$

то

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R_L^2} .$$

Погрешности измерения параметров элементов цепей методом вольтметра-амперметра на низких частотах составляют 0,5 ... 10% и определяются погрешностью используемых приборов, а также наличием паразитных параметров. Погрешности измерения возрастают с увеличением частоты.

Метод непосредственной оценки. Метод непосредственной оценки реализуется в приборах для измерения сопротивления постоянному току – электромеханических и электронных омметрах. Электромеханические омметры строятся на основе приборов магнитоэлектрической системы и в зависимости от величины измеряемого сопротивления могут быть выполнены по схеме с последовательным (рис. 2.6, а) либо параллельным (рис. 2.6, б) включением измеряемого сопротивления.

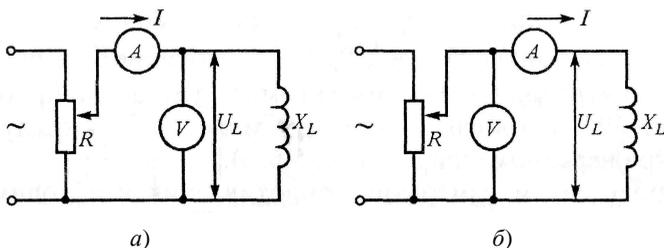


Рис. 2.5. Измерение индуктивности катушек

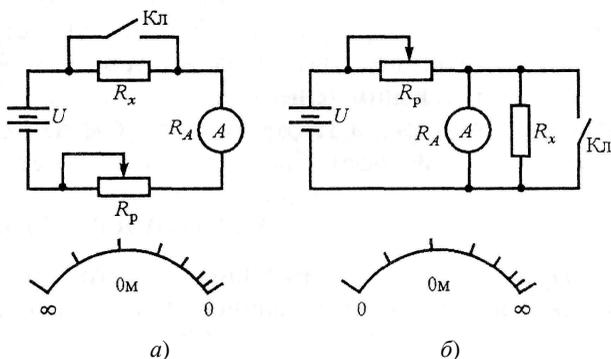


Рис. 2.6. Электромеханический омметр

Источником питания омметра обычно служит гальванический элемент. Ток, протекающий через магнитоэлектрический прибор в омметре с последовательным включением при разомкнутом ключе Кл, определяется по формуле

$$I = \frac{U}{R_x + R_A + R_p},$$

где R_A – сопротивление прибора; R_p – регулировочный резистор.

При постоянных значениях R_A , R_p и U отклонение стрелки прибора α определяется измеряемым сопротивлением R_x , т.е. шкала прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления. Как следует из вышеприведённой формулы, шкала омметра неравномерна (рис. 2.6).

Перед проведением измерения сопротивления необходимо установить «размах» шкалы, т.е. отрегулировать омметр так, чтобы при $R_x = \infty$ и $R_x = 0$ стрелка прибора устанавливалась бы на начальную и конечную отметки шкалы. При незамкнутых входных зажимах омметра и разомкнутом ключе Кл (что соответствует $R_x = \infty$) стрелка прибора находится в крайнем левом положении. Следовательно, эта отметка шкалы будет соответствовать $R_x = \infty$. Далее, замкнув ключ Кл, т.е. моделируя $R_x = 0$, наблюдают отклонение стрелки прибора и в том случае, если стрелка не доходит до конечной отметки шкалы или переходит за нее, регулируют резистором R_p ток через прибор до достижения стрелкой конечной отметки. После этого, разомкнув ключ, можно выполнить измерение сопротивления R_x . Характер шкалы подсказывает, что омметр такого типа предпочтительно использовать для измерения сравнительно больших сопротивлений (до не-

скольких килоом), так как при малых значениях R_x этот омметр имеет малую чувствительность.

Для измерения небольших сопротивлений применяются омметры, выполненные по схеме с параллельным включением измеряемого сопротивления, уравнение шкалы для которых имеет вид

$$I = U / [R_p + R_A R_x / (R_A + R_x)]. \quad (2.1)$$

Как и в схеме с последовательным включением, здесь отклонение стрелки прибора зависит только от R_x при условии, что остальные члены уравнения (2.1) постоянны. Перед проведением измерения также необходимо установить размах шкалы, моделируя ситуацию $R_x = 0$ и $R_p = \infty$ и регулируя ток I сопротивлением резистора R_p . Для омметра с параллельным включением нулевое положение указателя совпадает с нулевым значением измеряемого сопротивления, а крайнее правое положение стрелки соответствует $R_x = \infty$. Шкала такого омметра изображена на рис. 2.6, б.

Омметры, выполненные по схемам на рис. 2.5, а, б, выпускаются как отдельные приборы, а также входят в состав комбинированных приборов (тестеров, авометров). Класс точности омметров не ниже 2,5.

2.2.3. Электронные омметры

При построении электронных омметров используются два метода измерения: метод стабилизированного тока в цепи делителя и метод преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение.

Схема измерения сопротивления по методу стабилизированного тока приведена на рис. 2.7, а.

Делитель напряжения, составленный из известного образцового $R_{обр}$ и измеряемого R_x сопротивлений, питается от источника опорного напряжения $U_{оп}$. Падение напряжения на образцовом резисторе усиливается усилителем $У$ с большим входным сопротивлением. Выходное напряжение усилителя $U_{вых}$ зависит от значения сопротивления R_x . В качестве индикатора обычно применяется микроамперметр магнитоэлектрической системы, шкала которого градуируется в единицах сопротивления. Если усилитель имеет коэффициент усиления K и входное сопротивление $R_{вх} \gg R_{обр}$, то измеряемое сопротивление определяется выражением

$$R_x = (KU_{оп} / U_{вых} - 1)R_{обр}.$$

Этот вариант схемы омметра применяется для измерения достаточно больших сопротивлений, когда $R_x > R_{обр}$.

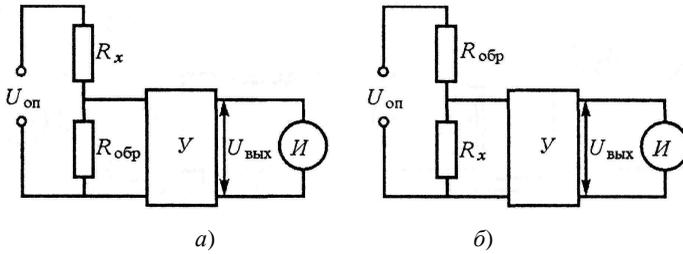


Рис. 2.7. Измерение сопротивления по методу стабилизированного тока

Для измерения малых сопротивлений ($R_x < R_{обр}$) используется схема, представленная на рис. 2.7, б. Измеряемое сопротивление здесь определяется выражением

$$R_x = R_{обр} / (KU_{оп} / U_{вых} - 1).$$

Эта схема реализована в ряде выпускаемых промышленностью миллиомметров, обеспечивающих измерение активных сопротивлений в диапазоне $10^{-4} \dots 10^2$ Ом с погрешностью 1,5 ... 2,0%.

Измерение средних и больших (до 10^{18} Ом) сопротивлений осуществляется с использованием преобразования измеряемого сопротивления в пропорциональное ему напряжение. В основу метода положен принцип работы операционного усилителя ОУ постоянного тока с отрицательной обратной связью (рис. 2.8).

Для схемы, представленной на рис. 2.8, а, измеряемое сопротивление R_x определяется выражением

$$R_x = R_{обр} U_{оп} / U_{вых},$$

где $U_{вых}$ – выходное напряжение усилителя; $R_{обр}$ – образцовый резистор.

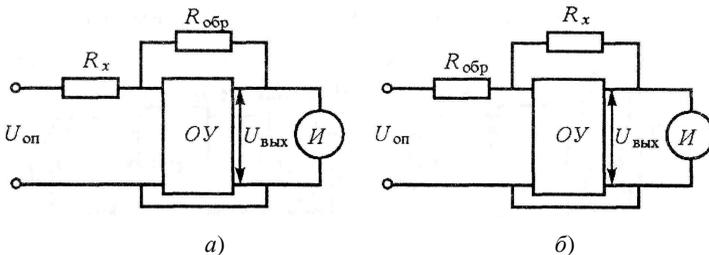


Рис. 2.8. Схемы омметров на основе операционных усилителей

При постоянных значениях $U_{\text{оп}}$ и $R_{\text{обр}}$ напряжение $U_{\text{вых}}$ будет зависеть только от R_x и, следовательно, шкала микроамперметра может быть отградуирована в единицах сопротивления. Указанная схема применяется в основном для измерения больших сопротивлений в приборах, называемых тераомметрами.

Поменяв местами R_x и $R_{\text{обр}}$, получим схему (рис. 2.8, б), пригодную для измерения малых сопротивлений (от единиц ом). Измеряемое сопротивление в такой схеме определяется выражением

$$R_x = R_{\text{обр}} U_{\text{вых}} / U_{\text{оп}}.$$

Применение в одном приборе обоих вариантов схем позволяет создать измерители сопротивления с диапазоном измерения от единиц ом до нескольких десятков мегаом с погрешностью не более 10%.

2.2.4. Измерительные мосты постоянного тока

Важным классом средств измерения, предназначенных для измерения параметров элементов электрических цепей методом сравнения, являются мосты. Сравнение измеряемой величины (сопротивления, ёмкости, индуктивности) с образцовой мерой при помощи моста в процессе измерения может осуществляться вручную или автоматически, на постоянном или на переменном токе. Мостовые схемы обладают большой точностью, высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых значений параметров. На основе мостовых методов измерения строятся средства измерения, предназначенные как для измерения какой-либо одной величины, так и универсальные аналоговые и цифровые приборы.

Одиарный мост постоянного тока. Такой мост (рис. 2.9) содержит четыре резистора, соединённых в кольцевой замкнутый контур. Резисторы R_1 , R_2 , R_3 и R_4 этого контура называются плечами моста, а

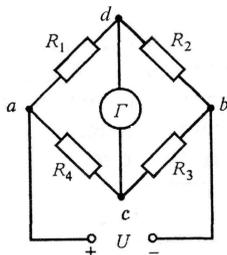


Рис. 2.9. Схема одиарного моста постоянного тока

точки соединения соседних плеч – вершинами моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называют диагоналями. Диагональ ab содержит источник питания и называется диагональю питания. Диагональ cd , в которую включен индикатор Γ , называется измерительной диагональю. В мостах постоянного тока в качестве индикатора обычно используется гальванометр. Мосты постоянного тока предназначены для измерения активного сопротивления.

В общем случае зависимость протекающего через гальванометр тока I_{Γ} от сопротивлений плеч, сопротивления гальванометра R_{Γ} и напряжения питания U имеет вид

$$I_{\Gamma} = \frac{U(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{[R_{\Gamma}(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)]}. \quad (2.2)$$

Измерение сопротивления может производиться в одном из двух режимов работы моста: уравновешенном либо неуравновешенном. Мост называется уравновешенным, если разность потенциалов между вершинами c и d равна нулю, а, следовательно, и ток через гальванометр равен нулю.

Из (2.2) следует, что $I_{\Gamma} = 0$ при

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0. \quad (2.3)$$

Это условие равновесия одинарного моста постоянного тока (2.3) можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы мост был уравновешен, произведения сопротивлений противолежащих плеч моста должны быть равны. Если сопротивление одного из плеч моста (например, R_4) неизвестно, то уравновесив мост путём подбора сопротивлений плеч R_1 , R_2 и R_3 , находим из условия равновесия

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

В реальных мостах постоянного тока для уравновешивания моста регулируются отношение R_1/R_2 и сопротивление плеча R_3 , которые, соответственно, называют плечами отношения и плечом сравнения.

В состоянии равновесия моста ток через гальванометр равен нулю и, следовательно, колебания напряжения питания и сопротивления гальванометра влияния на результат измерения не оказывают (важно лишь, чтобы чувствительность гальванометра была достаточной для надёжной фиксации состояния равновесия). Поэтому основная погрешность уравновешенного моста определяется чувствительностью гальванометра, чувствительностью схемы, погрешностью сопротивлений плеч, а также сопротивлениями монтажных проводов и контактов. При измерении малых сопротивлений существенным источником погрешности может явиться сопротивление проводов, с помощью которых измеряемый резистор подключается к входным зажимам моста, так как оно полностью входит в результат измерения. Поэтому нижний предел измерения одинарного моста постоянного тока ограничен значениями сопротивления порядка 1 Ом. Верхний же предел измерения $10^6 \dots 10^8$ Ом ограничивается чувствительностью гальванометра. При больших значениях измеряемого сопротивления токи в плечах моста очень малы и чувствительности гальванометра недостаточно для чёткой фиксации равновесия.

В режиме неуравновешенного моста измерение сопротивления производится по показаниям гальванометра, предварительно в комплекте с мостовой схемой отградуированного в единицах сопротивления. Неуравновешенные мосты часто применяются в устройствах для разбраковки изделий по сопротивлению (резисторов, обмоток реле и т.п.). Так, если при изготовлении резисторов необходимо отобрать из партии резисторы с сопротивлением $R = R_{\text{ном}} \pm \Delta R$, то, уравновесив предварительно мост с помощью образцового магазина сопротивления при $R_x = R_{\text{ном}}$, изменяют сопротивление магазина на $\pm \Delta R$ и фиксируют соответствующие отклонения стрелки гальванометра $\pm \alpha$ (гальванометр с нулём посередине шкалы). Затем вместо магазина сопротивления к входу моста подключаются контролируемые резисторы, и если стрелка гальванометра выходит за допустимые пределы, резистор бракуется.

Неуравновешенные мосты по точности значительно уступают уравновешенным, так как на результат измерения кроме факторов, указанных для уравновешенных мостов, оказывают влияние колебания напряжения питания и сопротивления гальванометра.

2.2.5. Измерительные мосты переменного тока

Для измерения ёмкости, индуктивности, взаимной индуктивности и тангенса угла потерь конденсаторов применяются мосты переменного тока, схемы которых отличаются большим разнообразием. Кроме простых четырёхплечих мостовых схем существуют и более сложные мостовые схемы. Эти схемы путём последовательных эквивалентных преобразований могут быть приведены к простой четырёхплечей схеме, которая является, таким образом, основной.

Схемы одинарного четырёхплечевого моста переменного тока приведены на рис. 2.10. Так как мост питается напряжением переменного тока, то в качестве индикатора в нём применяются электронные милливольтметры переменного тока либо осциллографические индикаторы нуля.

В общем случае сопротивления плеч моста переменного тока представляют собой комплексные сопротивления вида $\dot{Z}_i = R_i + jX_i$.

Аналогично соотношению (2.3) условие равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид:

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4.$$

Запишем это выражение в показательной форме:

$$Z_1 e^{j\varphi_1} Z_2 e^{j\varphi_2} = Z_3 e^{j\varphi_3} Z_4 e^{j\varphi_4}, \quad (2.4)$$

где Z_i , – модуль комплексного сопротивления; φ – фазовый сдвиг между током и напряжением в соответствующем плече.

Соотношение (2.4) распадается на два скалярных условия равновесия:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 Z_3 &= Z_2 Z_4; \\ \varphi_1 + \varphi_3 &= \varphi_2 + \varphi_4. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Отсюда следует, что в схеме моста переменного тока равновесие наступает только при равенстве произведений модулей комплексных сопротивлений противолежащих плеч и равенстве сумм их фазовых сдвигов. При этом нужно иметь в виду, что при изменении значений активных и реактивных составляющих одновременно изменяются и модуль, и фаза, поэтому мост переменного тока можно привести к состоянию равновесия лишь большим или меньшим числом переходов от регулирования одного параметра к регулированию другого. Второе уравнение (2.5) показывает, какими должны быть сопротивления плеч мостовой схемы, чтобы обеспечить возможность её уравнивания. Так, например, если в двух смежных плечах включены активные сопротивления ($\varphi = 0$), то в двух других смежных плечах обязательно должны быть сопротивления одного характера – или индуктивности, или ёмкости.

Для измерения ёмкости конденсаторов без потерь используется мостовая схема, приведённая на рис. 2.10, *а*. Условие равновесия для этой схемы имеет вид

$$R_1 / \omega C_{\text{обр}} = R_2 / \omega C_x,$$

где $C_{\text{обр}}$ – образцовый конденсатор переменной ёмкости, откуда

$$C_x = (R_2 / R_1) C_{\text{обр}}.$$

Мостовая схема для измерения индуктивности приведена на рис. 2.9, *б*. В качестве плеча сравнения здесь также используется конденсатор переменной ёмкости $C_{\text{обр}}$. Полагая, что активное сопротивление катушки пренебрежимо мало ($R_L = 0$), получим условие равновесия

$$\omega L_x / \omega C_{\text{обр}} = R_2 R_4,$$

откуда

$$L_x = R_2 R_4 C_{\text{обр}}.$$

Погрешность моста переменного тока определяется погрешностями значений элементов образующих мост, переходных сопротивлений контактов, чувствительностью схемы и индикатора. Мосты переменного тока больше, чем мосты постоянного тока, подвержены влия-

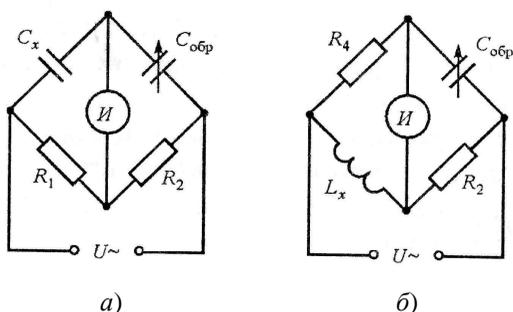


Рис. 2.10. Измерение сопротивления и ёмкости мостом переменного тока

нию помех и паразитных связей между плечами, плечами и землей, мостом и оператором. Именно поэтому, даже при тщательном экранировании моста и принятии других мер защиты, погрешности мостов переменного тока больше, чем погрешности мостов постоянного тока. Промышленностью выпускаются мосты переменного тока классов точности от 0,1 до 5,0.

Мосты переменного тока работают обычно на низких частотах 100 Гц и 1000 Гц. При работе на повышенных частотах погрешности измерения резко возрастают.

2.2.6. Резонансный метод измерения

Резонансный метод измерения основывается на определении резонансной частоты колебательного контура, составленного из образцового и измеряемого элементов (индуктивностей или ёмкостей). Этот метод применяется для измерения индуктивностей и ёмкостей только на высокой частоте, так как в области низких частот резонансные явления проявляются недостаточно резко, что не позволяет получить высокую точность измерения. Известно несколько вариантов резонансного метода, на основе которых построены средства измерения параметров двухполюсников. Рассмотрим принцип действия прибора, называемого измерителем добротности или куметром. Схема измерителя добротности (см. рис. 2.11) включает источник питания – высокочастотный генератор (ГВЧ), последовательный колебательный контур, образуемый катушкой L с активным сопротивлением R_L и конденсатором $C_{обр}$. Напряжение на выходе генератора и на конденсаторе $C_{обр}$ измеряется вольтметрами с высокоомным входом V_1 и V_2 .

Изменением частоты ГВЧ или ёмкости конденсатора $C_{обр}$ можно настроить колебательный контур в резонанс. Из теории электрических

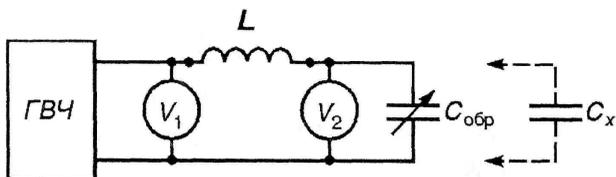


Рис. 2.11. Принцип действия измерителя добротности

цепей известно, что при резонансе напряжение на конденсаторе и на индуктивности оказывается в Q раз больше, чем напряжение питания U_1 . Здесь Q – добротность контура

$$Q = 1 / \omega C_{\text{обр}} R_L \quad (2.6)$$

или

$$Q = \omega L / R_L. \quad (2.7)$$

Измерение индуктивности производится следующим образом: катушка, индуктивность L_x которой необходимо измерить, подсоединяется к зажимам L и при заданной частоте питания f контур настраивается в резонанс изменением ёмкости $C_{\text{обр}}$. При резонансе отклонение стрелки вольтметра V_2 будет максимальным. Приравняв (2.6) и (2.7), получим

$$L_x = 1 / \omega^2 C_{\text{обр}},$$

где значение $C_{\text{обр}}$ отсчитывается по шкале конденсатора переменной ёмкости.

При измерении ёмкости к зажимам L подсоединяется образцовая катушка индуктивности $L_{\text{обр}}$ и измерение выполняется в два этапа. Вначале изменением частоты генератора контур $L_{\text{обр}} C_{\text{обр}}$ настраивается в резонанс. Резонансная частота в этом случае

$$f_{\text{рез}} = 1 / (2\pi \sqrt{L_{\text{обр}} C_{\text{обр}1}}). \quad (2.8)$$

Далее конденсатор, ёмкость которого C_x необходимо измерить, подключается параллельно конденсатору $C_{\text{обр}}$ и, не меняя частоты генератора, контур снова настраивают в резонанс изменением ёмкости образцового конденсатора. Так как резонансная частота (частота питающего напряжения) не изменилась, то

$$f_{\text{рез}} = 1 / 2\pi \sqrt{L_{\text{обр}} (C_{\text{обр}2} + C_x)}. \quad (2.9)$$

Приравняв (2.8) и (2.9), получим

$$C_x = C_{\text{обр}1} - C_{\text{обр}2}.$$

При измерении добротности контура она может быть определена по показаниям вольтметров

$$Q = \frac{U_2}{U_1}.$$

Если поддерживать напряжение питания U_1 постоянным, то очевидно, что шкала вольтметра V_2 может быть проградуирована непосредственно в единицах добротности. Выпускаемые промышленностью измерители добротности обеспечивают проведение измерений на частотах от 1 кГц до 300 МГц с погрешностью в пределах 0,5 ... 5%.

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Линейные и угловые размеры, перемещения принято относить к *первой группе* механических величин. Как правило, это изометрические параметры различных деталей в обрабатывающей промышленности, характеристики профилей и шероховатостей поверхностей, уровни сыпучих веществ и жидкостей в различных сосудах (баках, танкерах, паровых котлах и т.п.), перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали, параметры износа трущихся частей различных механизмов, биения валов, расстояния и т.д.

Диапазон, охватываемый величинами этой группы, простирается от долей микрона до тысяч метров, т.е. составляет примерно десять порядков. Диапазон угловых размеров равен 3–4 порядкам.

Ко *второй* группе относятся различного рода силовые воздействия. Это механические напряжения в деталях и конструкциях машин и сооружений, силы, крутящие моменты, давления жидкостей и газов, акустические шумы, разности давлений и т.п.

Диапазоны значений величин этой группы, как правило, весьма широки. Например, в вакуумной технике приходится измерять давления до $1,3 \cdot 10^{-8}$ Па (10^{-10} мм рт. ст.), а в технике высоких давлений до 10^8 Па и выше, следовательно, диапазон давлений охватывает 16 порядков. Примерно такой же диапазон занимают значения сил, встречающихся в технике и научных исследованиях (10^{-8} ... 10^8 Н).

Третью группу механических величин представляют так называемые параметры движения. Это перемещения объектов в пространстве, линейные и угловые скорости и ускорения перемещений. Значения параметров этой группы могут достигать астрономических цифр (космические расстояния и скорости). В эту группу входят также параметры вибраций (вибрационные перемещения, скорости и ускорения), скорости вращения валов и т.д.

3.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Конструкция подавляющего большинства механических средств измерения состоит из последовательно расположенных элементов и устройств, каждое из которых в этой последовательности выполняет определённую задачу при измерении. Для того чтобы в дальнейшем при изучении средств измерения было легче представлять их действие, рассмотрим коротко эти устройства и их назначения.

Основание измерительного средства – это конструктивный элемент, на базе которого смонтированы все элементы данного действующего средства измерения. Например, штанга штангенциркуля, скоба микрометра, корпус индикатора часового типа.

Воспринимающий элемент – это часть средства измерения, которая осуществляет его соприкосновение с объектом измерения и воспринимает величину этого объекта, например измерительные губки штангенциркуля, измерительный наконечник индикатора. Часть воспринимающего элемента, непосредственно касающаяся поверхности объекта, иногда называют чувствительным элементом.

Размерный элемент – это одна из деталей средства измерения, которая обладает собственным точным, обычно многозначным, размером, с величиной которого в процессе измерения непосредственно сопоставляется воспринятая средством измерения величина объекта измерения (например, штанга со шкалой штангенциркуля: размер детали, воспринятый губками, сравнивается с ней).

Преобразующее устройство – это внутренний механизм или элемент средства измерения, который преобразует (видоизменяет) малые перемещения, воспринятые от объекта измерения, в большие перемещения на отсчётном устройстве так, что эти большие перемещения исполнитель может непосредственно наблюдать и отсчитывать (например, зубчатая передача в индикаторе часового типа).

Отсчётное устройство создаёт возможность отсчитывать показания средства измерения. В большинстве случаев отсчётные устройства имеют шкалу и указатель, которым служит отдельный штрих, группа штрихов или стрелка. В последнее время распространяются средства измерения с цифровыми отсчётными устройствами. Примером отсчётного устройства может быть нониус штангенциркуля, круглая шкала индикатора и стрелка индикатора часового типа, цифровое табло прибора с цифровой индикацией.

В зависимости от назначения и принципа действия конкретного средства измерения и его конструкции используются те или иные комплексы этих устройств и элементов, составляющих структуру этого средства измерения.

3.1.1. Линейка измерительная металлическая

Линейка измерительная представляет собой гибкую стальную полосу с нанесённой на ней прямой шкалой с ценой деления 1 мм. Линейки изготовляют со шкалами от 0 до 150 мм, от 0 до 300 мм, от 0 до 500 мм и от 0 до 1000 мм. Началом шкалы линейки является плоскость торца полосы; торец расположен перпендикулярно продольному ребру полосы. С торцом совпадает середина нулевого штриха шкалы. Конец штрихов шкалы выходит на продольное ребро. Каждый 5-й и 10-й штрих шкалы удлинён, каждый 10-й снабжён цифрой, показывающей расстояние в сантиметрах от этого штриха до начала шкалы. Второй конец полосы закруглён и снабжён отверстием для подвешивания линейки.

3.1.2. Штангенциркуль

На рисунке 3.1 показан штангенциркуль ШЦ-1, состоящий из штанги с линейкой, которая имеет шкалу с ценой деления 1 мм. По штанге 1 передвигается рамка 3 со вспомогательной шкалой-нониусом 5. Штангенциркуль снабжён губками 2 для наружных и внутренних измерений, а также зажимом 4. К рамке 3 прикреплена линейка глубиномера 6.

Нониус 7 (см. рис. 3.1) служит вспомогательной шкалой, позволяющей отсчитывать доли деления шкалы штанги. Он наносится на скошенной поверхности рамки или отдельной пластинке, укрепленной в окне рамки.

ГОСТ 166–80 предусматривает изготовление и использование трёх типов штангенциркулей: ШЦ-1 с ценой деления 0,1 мм, ШЦ-2 с ценой деления 0,05 мм и ШЦ-3 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.

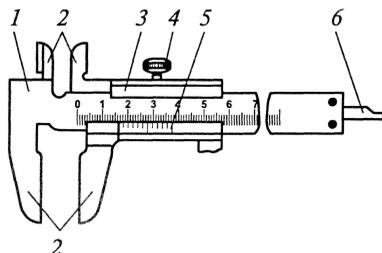


Рис. 3.1. Штангенциркуль ШЦ-1

Порядок отсчёта показаний штангенциркуля по шкалам штанги и нониуса:

– читают число целых миллиметров – для этого находят на шкале штанги штрих, ближайший меньший к нулевому штриху нониуса, и запоминают его числовое значение (на рис. 3.2 – 12 мм);

– читают долю миллиметра в отсчёте – для этого находят на шкале нониуса штрих, совпадающий со штрихом шкалы штанги, запоминают его порядковый номер и умножают этот номер на величину отсчёта по данному нониусу. Это будет искомая доля миллиметра в отсчёте (на рис. 3.2 совпадающий штрих нониуса имеет номер 8, а величина отсчёта по нониусу равна 0,1 мм, значит, доля миллиметра в отсчёте здесь равна $8 \cdot 0,1 \text{ мм} = 0,8 \text{ мм}$).

Погрешности измерения штангенинструментом. Погрешность измерения зависит в значительной мере от величины отсчёта и значения измеряемого размера. Погрешность измерения штангенциркулем наружных размеров до 500 мм при величине отсчёта 0,05 мм будет составлять 0,1 мм (т.е. равна удвоенному значению величины отсчёта). При измерении внутренних размеров тем же штангенциркулем погрешность измерения составляет 0,15 ... 0,25 мм для этого же диапазона размеров. При измерении штангенциркулем с отсчётом 0,1 мм наружных размеров в том же диапазоне, т.е. до 500 мм, погрешность составляет 0,15 ... 0,25 мм, а для внутренних размеров 0,2 ... 0,3 мм.

Необходимо обратить внимание на то, что указаны погрешности измерения, а не погрешности измерительного средства.

Погрешность только самого штангенинструмента в условиях его поверки, т.е. погрешность, которая нормируется, будет меньше (обычно не более величины отсчёта). Погрешность измерения штангенинструментом возникает в основном от двух причин – это, в первую очередь, погрешность отсчёта, вызванная параллаксом, а для штангенциркуля ещё и погрешность от нарушения принципа Аббе.

Поскольку эти источники погрешностей имеют место во многих измерительных средствах, рассмотрим их более подробно.

Параллакс (от греческого слова *parallaxis* – отклонение) – это видимое изменение относительного положения предметов вследствие перемещения глаза наблюдателя.

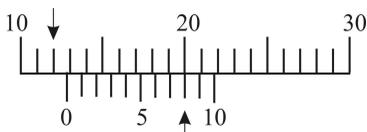


Рис. 3.2. Отсчёт по нониусу (12,8 мм)

Это изменение положения предметов имеет место при отсчёте, когда основная шкала и шкала нониуса расположены не в одной плоскости.

Шкала нониуса располагается над основной шкалой (пластинка или часть рамки, где нанесен нониус, имеет толщину), поэтому совпадение штрихов может казаться по-разному, в зависимости от того, под каким углом наблюдатель производит отсчёт.

На рисунке 3.3, а условно показан только один штрих на основной шкале и один штрих на нониусе и эти штрихи совпадают, если смотреть на них строго перпендикулярно плоскости шкалы (положение глаза наблюдателя). Если же смотреть на штрих под углом к плоскости основной шкалы, то будет казаться, что штрихи не совпадают, и чем больше угол зрения будет отличаться от прямого, тем больше будет погрешность отсчитывания из-за параллакса. Величина этой погрешности (на рис. 3.3, а — $\delta_{\alpha 1}$ и $\delta_{\alpha 2}$) зависит от положения по высоте штриха нониуса относительно штриха шкалы (т.е. от толщины пластинки h , на которой нанесён нониус, и зазора между плоскостью шкалы и этой пластинкой) и от угла, под которым смотрит наблюдатель, т.е. $\delta = h \operatorname{tg} \alpha$.

Принцип Аббе заключается в том, что при измерении размера методом сравнения с мерой погрешность измерения будет меньше, если меру и измеряемый размер располагать на одной прямой (последовательно, а не параллельно).

В штангенциркуле не соблюдается принцип Аббе, поскольку шкала и нониус располагаются на линии, параллельной линии измерения, на детали. Погрешность возникает из-за того, что при параллель-

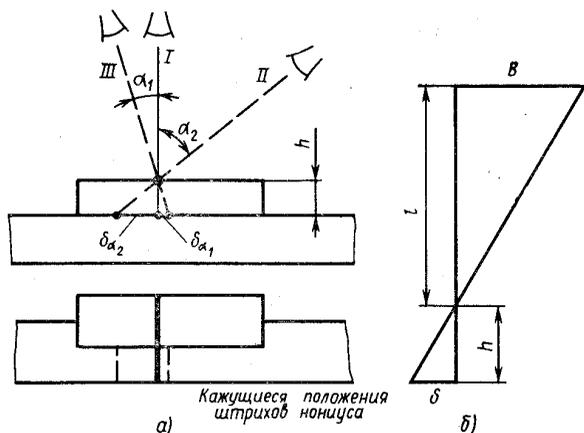


Рис. 3.3. Погрешность отсчёта из-за параллакса

ном расположении трудно обеспечить перпендикулярность измерительных поверхностей, как при изготовлении, так и при использовании из-за непрямолинейности направляющих (при перемещении рамки по штанге). При измерении цилиндрических или сферических деталей, когда контакт происходит у концов измерительных губок штангенциркуля, усилие поджима создаёт момент сил, который выбирает зазор между рамкой и штангой. Этим нарушается перпендикулярность измерительных поверхностей, которая вносит погрешность в результат измерения.

3.1.3. Микрометр гладкий

Основанием микрометра (рис. 3.4, *a*) является скоба 1, а передаточным (преобразующим) устройством служит винтовая пара, состоящая из микрометрического винта 3 и микрометрической гайки, укрепленной внутри стебля 5, которые часто называют микропарой. В скобу 1 запрессованы пятка 2 и стебель 5. Измеряемая деталь охватывается поверхностями микровинта 3 и пятки 2.

Барабан 6 присоединён к микровинту 3 корпусом трещотки 7. Для приближения микровинта 3 к пятке 2 его вращают за барабан или за трещотку 8 по часовой стрелке (от себя), а для удаления микровинта от пятки его вращают против часовой стрелки (на себя). Закрепляют микровинт в требуемом положении стопором 4.

При плотном соприкосновении измерительных поверхностей микрометра с поверхностью измеряемой детали трещотка проворачивается с лёгким треском, при этом ограничивается измерительное усилие микрометра. Результат измерения размера микрометра отсчитывается как сумма отсчётов по шкале стебля 5 и барабана 6. Следует помнить, что цена деления шкалы стебля 0,5 мм, а шкалы барабана 0,01 мм. Шаг резьбы микропары (микровинт и микрогайка) $P = 0,5$ мм. Число делений барабана 50. Если повернуть барабан на одно деление его шкалы, то торец микровинта переместится относительно пятки на 0,01 мм, так как $0,5 \text{ мм} / 50 = 0,01 \text{ мм}$.

В целях повышения удобства и ускорения отсчёта показаний микрометра выпускается гладкий микрометр с цифровой индикацией.

Показания по шкалам гладкого микрометра отсчитывают в следующем порядке: сначала по шкале стебля 5 читают значение штриха, ближайшего к торцу скоса барабана 6 (на рис. 3.4, *б* – это число 12,00 мм). Затем по шкале барабана читают значение штриха, ближайшего к продольному штриху стебля (на рис. 3.4, *б* – это число 0,45 мм). Сложив оба значения, получают показание микрометра (на рис. 3.4, *б* – это значение 12,45 мм).

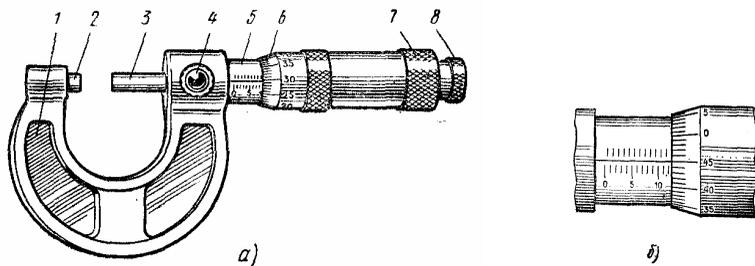


Рис. 3.4. Микрометр гладкий

Диапазоны измерения гладкого микрометра: 0 ... 24 мм; 25 ... 50 мм и т.д. до 275 ... 300 мм, дальше 300 ... 400; 400 ... 500 и 500 ... 600 мм.

Для установки на ноль все микрометры, кроме 0 ... 25 мм, снабжаются установочными мерами, размер которых равен нижнему пределу измерения. Цена деления микрометра – 0,01 мм.

Погрешности измерения микрометром. В общем случае погрешность измерения микрометром возникает от погрешности микрометра, от установочной меры или блока концевых мер, от непараллельности измерительных поверхностей, от разгиба скобы под действием усилия, погрешности от отсчёта показаний, погрешности от температурных и контактных деформаций.

Погрешность от микрометра проявляется полностью в том случае, если измерение производится с отсчётом полного размера по микропаре. Обычно погрешность микрометров нормируется равной от 4 до 10 мкм в зависимости от диапазона измерений при поверке по концевым мерам длины.

Погрешность от установочных мер входит в погрешность измерения микрометром с диапазоном измерения св. 25 мм. Точность измерения можно повысить при установке микрометра по блоку концевых мер. В этом случае погрешность микропары оказывает влияние только на небольшом используемом интервале. Экспериментально установлено, что эта величина находится в пределах 2 мкм.

Погрешность от разгиба скобы происходит из-за непостоянства измерительного усилия (колебания измерительного усилия порядка 200 сН). Обычно нормируется величина разгиба скобы под действием усилия в 10 Н в пределах 2 ... 12 мкм, т.е. колебание усилия может вызвать погрешность, равную 0,2 от нормируемой (0,4 ... 2,4 мкм). Эта относительно небольшая погрешность имеет место, когда при работе пользуются трещоткой. Однако очень часто при работе не пользуются

трещоткой и этим создают очень большую величину перепада измерительного усилия (30 Н и более), а это, в свою очередь, приводит к появлению большой погрешности и от разгиба скобы. Она составляет 0,01 ... 0,02 мм и более.

Погрешность от отсчёта показаний возникает из-за параллакса (шкалы на стебле и барабане расположены на разных плоскостях) и трудности отсчёта. Эта погрешность составляет ориентировочно 2 мкм.

Погрешность от температурных деформаций связана:

а) с деформацией из-за разности первоначальных температур детали, установочной меры и микрометра, с разными коэффициентами температурного расширения;

б) с деформацией микрометра, возникающей из-за нагрева его руками оператора.

Погрешность от нагрева руками нельзя практически определить в каждый конкретный момент времени, так как установить зависимость между температурой на поверхности микрометра и его деформациями не представляется возможным.

Величина и знак деформаций зависят от положения рук оператора на скобе. Например, если расположить руки на внутренней части скобы, т.е. обращённой к детали, то помимо общего изменения размера скобы произойдет её разгиб за счёт того, что температура, а, следовательно, и расширение материала с внутренней стороны скобы будет больше, чем с наружной. При расположении рук оператора с наружной стороны скобы помимо общего расширения скобы произойдет сжатие, т.е. эти деформации частично компенсируют друг друга.

Для уменьшения влияния рассмотренных деформаций на погрешность измерения обычно большие скобы оснащают теплоизоляционными накладками.

Погрешность от контактных деформаций возникает в основном при измерении сферических поверхностей (точечный контакт) из-за измерительного усилия. При измерении сферы радиусом 5 мм величина контактной деформации достигает 3 мкм, с радиусом свыше 5 мм – 2 мкм.

Общая погрешность измерения микрометра с учётом влияния рассмотренных составляющих погрешности измерения находится в пределах от 5...50 мкм в зависимости от типоразмера микрометра (первая цифра – для микрометра 0...25 мм, вторая – для микрометра 400...500 мм). Эти значения соответствуют определённым температурным условиям при использовании установочных мер, а микрометр при работе находится в руках. При установке микрометра в специальный штатив или при обеспечении надёжной изоляции скобы от тепла рук оператора погрешность измерения для типоразмеров, начиная с 25...50 мм, значительно сокращается (в 2 раза и более).

Проверка микрометров. Проверку микрометров производят с помощью концевых мер длины. При этом выясняется погрешность измерения микрометром размера детали с плоскими поверхностями. В связи с этим отдельно проверяют плоскостность и параллельность измерительных поверхностей с помощью плоскопараллельных стеклянных пластин.

3.1.4. Индикаторы часового типа

Внешне (да и по внутреннему устройству) (рис. 3.5) индикатор похож на карманные часы, почему и закрепилось за ним такое название (но неправильно называть его индикаторными часами – время им не измеряют).

Конструкция индикатора часового типа представляет собой измерительную головку с продольным перемещением наконечника. Основанием индикатора является корпус 13, внутри которого смонтирован преобразующий механизм – реечно-зубчатая передача. Через корпус 13 проходит измерительный стержень 1 с наконечником 4. На стержне нарезана зубчатая рейка. Движения измерительного стержня-рейки 1 передаются зубчатыми колёсами – реечным 5, передаточным 7 и трубкой 9

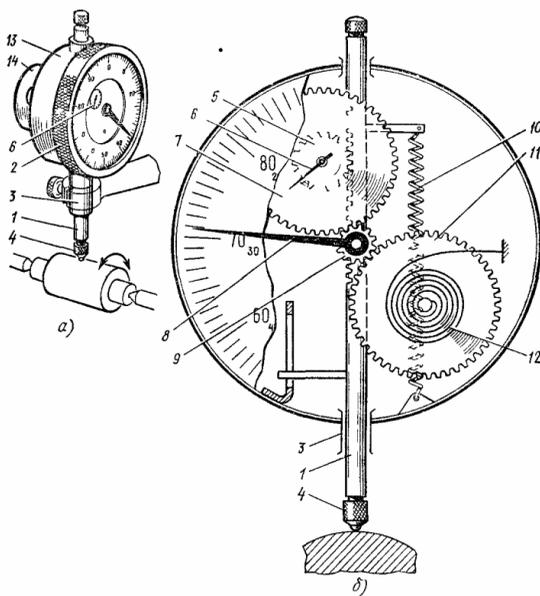


Рис. 3.5. Индикатор часового типа:
a – общий вид; *б* – схема зубчатой передачи

основной стрелке 8, величина поворота которой отсчитывается по круглой шкале-циферблату. Для установки на «0» круглая шкала поворачивается ободком 2.

Круглая шкала индикатора часового типа состоит из 100 делений, цена каждого деления – 0,01 мм. Это означает, что при перемещении измерительного наконечника на 0,01 мм стрелка индикатора перейдет на одно деление шкалы.

Положение стрелки 6 на малой шкале отсчётного устройства позволяет определить показания в миллиметрах. К этим показаниям следует прибавить результат измерения по круглой шкале – циферблату.

Прижимное усилие наконечника 4 к объекту контроля обеспечивает пружина 10. Спиральная пружина 12 и колечко 11 необходимы для устранения люфта в зубчатой передаче. Втулка 3 служит для закрепления индикатора вблизи объекта измерения.

Погрешность измерения индикатором. Погрешности индикатора нормируются в зависимости от используемого диапазона показаний (в зависимости от перемещения измерительного стержня). Обычно на участке в 0,1 мм погрешность находится в пределах 5 ... 8 мкм; на участке в 1 ... 2 мм – 10 ... 15 мкм; на участке до 3 мм – до 15 мкм; на участке до 5 ... 10 мм погрешность находится в пределах 18 ... 22 мкм.

Таким образом, на небольшом участке погрешности индикатора находится в пределах цены деления. На больших пределах погрешность превышает цену деления. Это показывает, что отсчитывать доли от цены деления (т.е. тысячные доли миллиметра – микрометры) на индикаторе часового типа нельзя.

3.1.5. Контроль калибрами [3]

Для выполнения операций технического контроля в условиях массового и крупносерийного производства широко используют контрольные инструменты в виде калибров. Калибры – это тела или устройства, предназначенные для проверки соответствия размеров изделий или их конфигурации установленным допускам.

С помощью предельных калибров определяют не численное значение контролируемого параметра, а выясняют, выходит ли этот параметр за предельные значения или находится между двумя допустимыми. При контроле деталь считается годной, если проходная сторона калибра (ПР) под действием усилия, примерно равного массе калибра, проходит, а непроходная сторона калибра (НЕ) не проходит по контролируемой поверхности детали. Если ПР не проходит, деталь относят к бракованным с исправимым браком. Если НЕ проходит, деталь относят к бракованным с неисправимым браком.

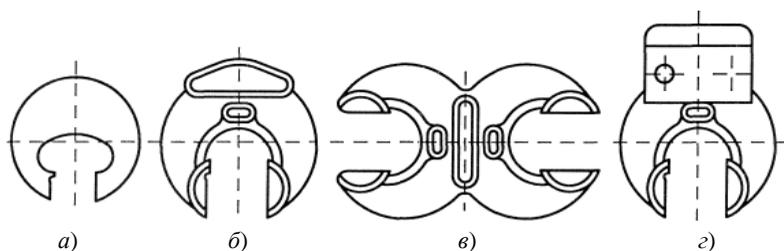


Рис. 3.6. Калибр-скобы для контроля валов:

a – листовые односторонние; *б* – штампованные односторонние;
в – двусторонние; *г* – односторонние с ручкой

Виды гладких калибров для цилиндрических отверстий и валов устанавливает ГОСТ 24851–81. В системе ИСО гладкие калибры стандартизованы ИСО-R1938–1971 [10, 11].

Стандарт предусматривает следующие гладкие калибры для валов и относящиеся к ним контрольные калибры:

ПР – проходной калибр-скоба;

НЕ – непроходной калибр-скоба;

К-ПР – контрольный проходной калибр для нового гладкого калибр-скобы;

К-НЕ – контрольный непроходной калибр для нового гладкого калибр-скобы;

К-И – контрольный калибр для контроля износа гладкого проходного калибр-скобы.

Для контроля отверстий предусмотрены:

ПР – проходной калибр-пробка;

НЕ – непроходной калибр-пробка.

Калибры отличаются разнообразием конструкций и исполнений. Для примера на рис. 3.6 показаны калибр-скобы для контроля валов листовые односторонние (рис. 3.6, *a*), штампованные односторонние (рис. 3.6, *б*) и двусторонние (рис. 3.6, *в*) и односторонние с ручкой (рис. 3.6, *г*).

3.2. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ

Оптико-механическими называются средства измерения геометрических величин, действие которых основано на использовании законов геометрической оптики (измерительные микроскопы, оптиметры) или явлений интерференции когерентных пучков света (интерференционные микроскопы).

Распространёнными приборами для линейных и угловых измерений в микроэлектронике и смежных отраслях являются измерительные проекторы и измерительные микроскопы.

Измерительные проекторы предназначены для проецирования теневого изображения (контура) изделий на экран и измерения их линейных и угловых размеров путём непосредственного сравнения теневого изображения с чертежом, исполненным в соответствующем масштабе, или с вычерченным контуром изделия. Выпускаются проекторы с несколькими размерами экранов (от 250×250 до 600×700 мм).

Стол проектора, на котором устанавливается изделие, имеет возможность перемещаться в продольном, поперечном направлениях и по вертикали. Перемещение стола отсчитывается по соответствующим шкалам с ценой деления 0,01 ... 0,002 мм. Погрешность при измерении длин с помощью проектора не превышает $\pm(0,003 \dots 0,005)$ мм.

Некоторые типы современных проекторов снабжаются устройствами цифрового отсчёта перемещения измерительного стола.

Измерительные микроскопы предназначены для измерений длин и углов различных деталей сложной формы в прямоугольной или полярной системах координат.

Различают несколько типов микроскопов: малый микроскоп инструментальный, большой микроскоп инструментальный, а также универсальный микроскоп.

Несмотря на конструктивные различия принципиальная схема измерения во всех микроскопах общая – визирование различных точек деталей, перемещаемых для этого по взаимно перпендикулярным направлениям, и измерение этих перемещений посредством микрометрических или иных отсчётных устройств. Для обеспечения лучшего визирования микроскопы снабжаются сменными объективами различной степени увеличения.

Измерительный микроскоп состоит из основания, на котором укреплены две меры длины вдоль двух взаимно перпендикулярных осей координат, из стола для закрепления измеряемого изделия и визирного микроскопа.

Измеряемое изделие устанавливается на столе микроскопа. Точки отсчёта определяются по показаниям визирного микроскопа. При визировании ось микроскопа совмещается со штрихами на изделии или с его краями. Для этого перемещают стол с изделием или сам микроскоп относительно изделия. Перемещение соответствует измеряемой длине или расстоянию и определяется как разность между начальным и конечным положением стола. Для удобства работы выпускают измерительные микроскопы с цифровым отсчётом и внешней установкой показания на нуль. При отсчёте начального показания от нуля результат измерения фиксируется на табло сразу без пересчёта.

Схема компаратора на базе двух измерительных микроскопов показана на рис. 3.7 [5].

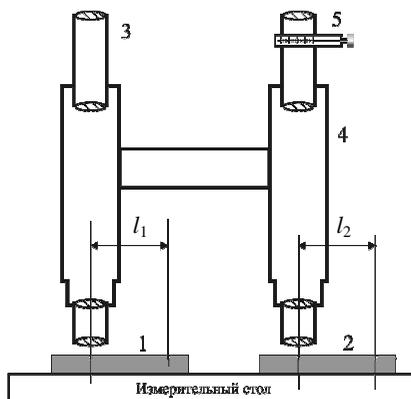


Рис. 3.7. Схема компаратора

Рабочий эталон 1 длиной l_1 (рис. 3.7) сравнивается с объектом контроля 2 длиной $l_2 = l_1 + \Delta l$. В исходном состоянии в перекрестье окуляров обоих микроскопов 3 и 4 находятся исходные точки (как на рисунке). Смещением измерительного стола добиваются попадания в перекрестье левого микроскопа 3 конечной точки рабочего эталона. Далее смещением микрометрического винта 5 окуляра правого микроскопа 4 с перекрестьем этого микроскопа совмещают конечную точку объекта контроля 2 . По показаниям микрометрического винта определяют разность длин объекта контроля и эталона.

Высокую точность измерений перемещений позволяют получить методы, основанные на применении оптоэлектрических преобразователей и источников оптического излучения, например методы раstra и муара.

В методе раstra используются две плоские пластины с параллельными штрихами. Расстояние между штрихами на каждой пластине постоянно, но для двух пластин незначительно отличается. При наложении пластин (растр) друг на друга и их просвечивании наблюдаются зоны сгущения и разряжения штрихов (рис. 3.8, *a*). Перемещение одного раstra относительно другого в направлении, перпендикулярном штрихам, вызывает перемещение указанных зон сгущения штрихов в том же направлении, но значение этого перемещения y оказывается гораздо больше, чем значение измеряемого перемещения x , т.е. происходит оптическая редукция. Если расстояния между штрихами на пластинах равны a и b (рис. 3.8, *a*), то

$$y = \frac{x}{(1 - b/a)}.$$

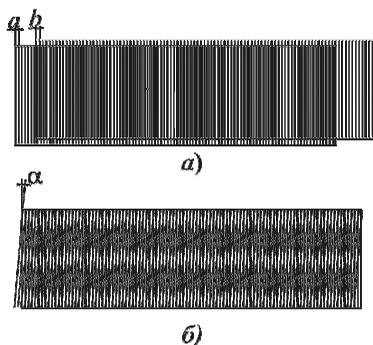


Рис. 3.8. Растровый (а) и муаровый (б) преобразователи перемещений

В методе муара растры на двух пластинах имеют одинаковый шаг, но расположены под небольшим углом α друг к другу (рис. 3.8, б). При наложении растров и их просвечивании наблюдаются светлые и тёмные полосы, идущие поперек штрихов и называемые комбинационными, или муаровыми, полосами. Перемещение одного из растров вызывает значительно большее смещение муаровых полос в направлении, перпендикулярном направлению движения растра, т.е. также происходит оптическая редукция. Значения этих перемещений связаны соотношением

$$y = x / \sin \alpha .$$

Наличие оптической редукции в методах растра и муара позволяет достигнуть высокой чувствительности к измеряемому перемещению.

При измерениях перемещений от долей микрометра до метра используются лазерные интерферометры. В этих приборах производится сложение двух световых потоков, излучаемых лазером, один из которых проходит постоянный путь, а второй – путь, зависящий от измеряемого расстояния. Сложение потоков приводит к усилению или ослаблению суммарного потока в зависимости от разности фаз потоков, т.е. в зависимости от измеряемого расстояния.

На рисунке 3.9 показано устройство лазерного интерферометра. Лазер излучает световой поток Φ , который разделяется на два потока (Φ_1 и Φ_2) с помощью полупрозрачного наклонного зеркала 2.

Поток Φ_1 , отражаясь от зеркала 2, а затем от зеркала 3, попадает на фотоэлемент 1. Поток Φ_2 проходит через зеркало 2, отражается от объекта 4, затем от зеркала 2 и попадает на фотоэлемент 1. В фотоэлементе 1 потоки складываются, и при изменении расстояния до объекта 4 периодически будет изменяться сигнал (фототок) фотоэлемента.

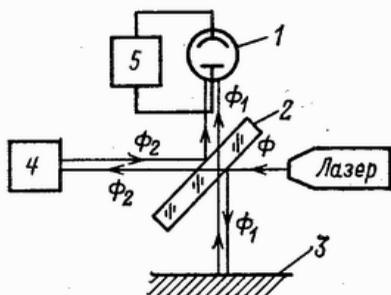


Рис. 3.9. Лазерный интерферометр

Число подсчитанных с помощью счётчика 5 периодов k фототока и перемещение объекта на расстояние x связаны соотношением

$$x = k\lambda / 2 ,$$

где λ – длина волны света.

При измерении перемещений до 1 м погрешность составляет 0,1 ... 1 мкм.

Существуют интерферометры с визуальным отсчётом показаний по шкале, наблюдаемой в окуляр. В качестве указателя используется чёрная интерференционная полоса, по обе стороны которой видны окрашенные полосы убывающей интенсивности. Изменение размеров объекта контроля или его перемещение вызывает смещение чёрной полосы относительно отметок шкалы отсчётного устройства, проградуированной в единицах длины.

Для измерения больших расстояний (сотен метров и более) применяются лазерные дальнометры, работающие в импульсном или непрерывном режиме. В первом случае измеряется интервал времени между излученным и отражённым импульсами, во втором – сдвиг фаз между излученным и отражённым сигналами.

Оптические преобразователи перемещений очень широко используются для измерения других величин, которые могут быть преобразованы в перемещение. Например, они применяются в атомно-силовой микроскопии, которая как метод контроля поверхностей в нанометровом диапазоне возникла в 1986 г. В основе атомно-силового микроскопа находится миниатюрная консольная балка – кантилевер (см. рис. 3.10), на одном из концов которой установлен пьезоманипулятор, а на другом укреплен очень тонкий наконечник (алмазный или кремниевый с упрочняющим покрытием). Первоначально был реализован контактный метод, при котором кончик зонда непрерывно находился в контакте с исследуемой поверхностью. При всей кажущейся простоте реа-

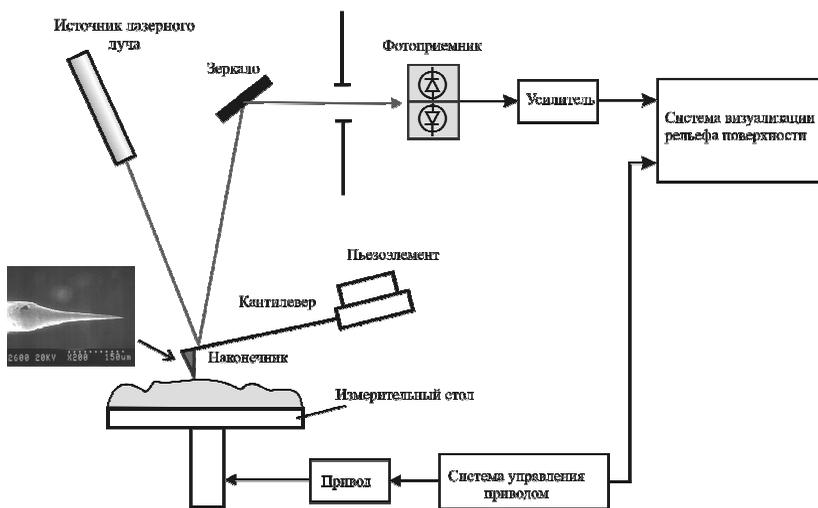


Рис. 3.10. Функциональная схема атомно-силового микроскопа

лизации этот способ обладает серьёзным недостатком: в нём велика вероятность повреждения поверхности образца и кончика иглы.

В 1995 г. был предложен «неконтактный» режим, позволивший достичь истинно атомного разрешения и снизить нагрузку на кончик зонда и исследуемую поверхность. Этот режим реализуется путём измерения параметров собственных колебаний кантилевера (резонансной частоты, затухания, сдвига фазы между приложенной возбуждающей силой и смещением), игла которого находится достаточно далеко от поверхности (десятки – сотни ангстрем) и взаимодействует с ней посредством дальнедействующих сил Ван дер Ваальса. Колебания кантилевера возбуждают при помощи пьезоманипулятора. Типичные размеры кантилеверов лежат в диапазоне 10 ... 100 мкм (длина), 3 ... 10 мкм (ширина) и 0,1 ... 1 мкм (толщина). Эквивалентный радиус закругления современных игл из алмаза или кремния, покрытого алмазной плёнкой, имеет типичное значение 10 ... 30 нм, что в благоприятных условиях достаточно для достижения атомного разрешения. Однако стойкость иглы пока является серьёзной проблемой. Деформация кантилевера измеряется оптическим методом, а именно, по отклонению лазерного луча, падающего на его тыльную поверхность, отразившегося от неё, а затем при помощи зеркала, направленного через щель на дифференциальный фотоприёмник (фотодиодную матрицу). Сигнал фотоприёмника зависит, таким образом, от высоты исследуемой поверхности. Перемещая стол вместе с объектом контроля относительно зонда, регистрируют одновременно сигнал фотоприёмника и

сигнал управления приводом стола, получая таким образом зависимость высоты исследуемой поверхности от перемещения измерительного стола, т.е. профиль поверхности. Совокупность таких зависимостей позволяет получить трёхмерное изображение рельефа поверхности объекта контроля.

3.3. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ [4]

В пневматических приборах для линейных измерений используется зависимость между площадью f проходного сечения канала истечения и расходом G сжатого воздуха. Площадь канала истечения изменяется за счёт измеряемого линейного перемещения.

Таким образом, $G = \varphi(p, f)$, где p – давление воздуха, под которым он истекает через проходное сечение канала площадью f .

Измеряя расход G при постоянном давлении p , мы можем судить о размере контролируемой детали.

Пневматический прибор в общем виде может быть представлен структурной схемой на рис. 3.11.

В этой схеме первичный пневматический преобразователь (П) – это устройство, которое воспринимает линейные перемещения детали l и преобразовывает их в соответствующие изменения расхода воздуха. Измерительная пневматическая схема (ИС) предназначена для преобразования сигнала первичного преобразователя в удобный для измерения расхода другой газовой параметр – давление. Указательное устройство (Ук) служит для воспроизведения измеряемой величины в принятых единицах измерения. Командное устройство (К) предназначено для подачи сигналов команд для управления технологическим процессом. Стабилизатор давления (С), фильтр очистки воздуха (Ф), источник сжатого воздуха (ИВ) обеспечивают бесперебойное функционирование схемы.

Пневматические приборы обладают высокой точностью, позволяют производить дистанционные измерения, малогабаритная пневматическая измерительная оснастка позволяет производить измерения в

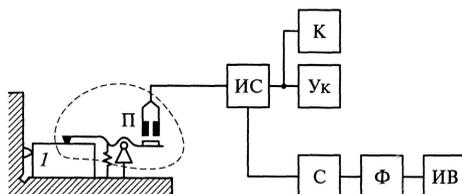


Рис. 3.11. Структурная схема пневматического прибора

относительно труднодоступных местах и создавать наиболее простые конструкции многомерных устройств для контроля практически любых линейных параметров деталей.

Однако для работы пневматических приборов необходима воздушная сеть с определённым давлением воздуха, подготовка которого требует особого внимания в процессе эксплуатации прибора. Пневматические приборы обладают значительной инерционностью, снижающей их производительность.

Последний недостаток иногда является положительным качеством прибора, так как создаёт нечувствительность его к вибрациям.

При бесконтактном измерении детали пневматический преобразователь, показанный на рис. 3.12, *a*, представляет собой измерительное сопло 2, в качестве заслонки которого служит контролируемая деталь. Расход воздуха f_2 в данном случае будет определяться площадью кольцевого зазора, образованного торцом измерительного сопла с диаметром проходного сечения d_2 и поверхностью контролируемой детали:

$$f_2 = \pi d_2 Z.$$

Практически измерение возможно при условии

$$\pi d_2 Z \leq \frac{\pi d_2^2}{4}, \text{ т.е. } Z \leq 0,25 d_2.$$

В противном случае изменение площади канала истечения не будет зависеть от изменения Z . Преобразователи с плоской заслонкой могут быть выполнены и для контактных измерений (рис. 3.12, *б*, *в*, *г*). Из-за простоты изготовления эти преобразователи очень широко применяются в пневматических приборах.

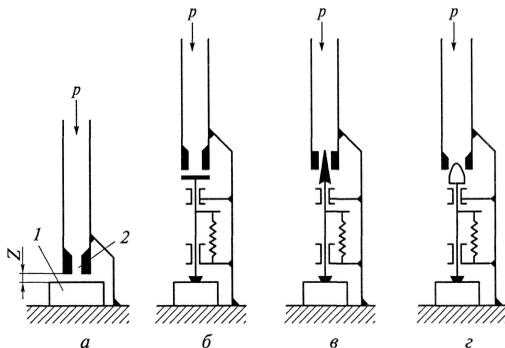


Рис. 3.12. Принципиальные схемы пневматических преобразователей:
a, б – с плоской заслонкой; *в* – с конической заслонкой; *г* – с заслонкой – параболоидом вращения; *1* – контролируемая деталь; *2* – измерительное сопло; *Z* – зазор между соплом и деталью

3.4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

Измерительными средствами с электрическим преобразованием для измерения линейных размеров называются измерительные средства, в которых преобразование измерительной информации, т.е. информации, содержащей сведения об измеряемом размере, осуществляется через преобразование в параметры электрического тока.

Обычно в электрических измерительных цепях выделяется первичный измерительный преобразователь, т.е. преобразователь, находящийся первым в измерительной (электрической) цепи, который воспринимает изменение размера и вырабатывает сигнал измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя.

Первичный преобразователь наиболее часто выделяют в отдельный конструктивный узел, который больше известен под названием датчик.

Помимо первичного преобразователя – датчика, электрическая цепь приборов имеет ещё несколько видов преобразователей. Обычно все преобразователи, кроме датчика, конструктивно оформляются в отдельный узел, который часто называют электронным блоком.

Достоинства приборов с электрическим принципом действия:

1. Аналоговый (непрерывный) характер выдаваемой измерительной информации.
2. Измерительная информация может быть использована для считывания по шкале или цифровой индикации, или регистрироваться записывающими («печатными») устройствами, или подвергаться математической обработке с помощью микропроцессорной техники или персонального компьютера.
4. Дистанционность измерения без ограничения расстояния.
5. Возможность разработки датчиков малых габаритов.
6. Универсальный источник питания – электрический ток.
7. Возможность иметь в одном приборе несколько цен делений и диапазонов показаний.
8. Возможность использования отдельно функциональных блоков, узлов и деталей, применяемых в общей электротехнике и радиотехнике.

Недостатки приборов с электрическим принципом действия:

1. Сложные схемы и конструкции по сравнению с механическими и пневматическими приборами, требующие для обслуживания специалистов узкого профиля.
2. Высокая относительная стоимость приборов.

3. Для некоторых видов приборов необходима высокая стабилизация питания. Необходимость для большинства приборов питания от сети ограничивает область их применения.

4. Недостаточно высокая надёжность.

Наибольшее распространение имеют средства измерений перемещений с электроконтактными, ёмкостными, индуктивными и реостатными датчиками.

Первый тип датчиков применяется только в средствах автоматизации технологических процессов и в настоящем пособии не рассматривается.

Приборы с ёмкостным датчиком. Под *прибором с ёмкостным датчиком* понимается измерительное средство с электрическим преобразованием, в котором линейные (или угловые) перемещения преобразуются в изменения электрической ёмкости электрической цепи.

Электрическая ёмкость – это электрическая характеристика проводника или системы проводников. Электрической ёмкостью одного проводника называется физическая величина C , равная отношению электрического заряда q , который сообщается проводнику, к его электрическому потенциалу φ :

$$C = q/\varphi.$$

Взаимная электрическая ёмкость двух проводников (в частности конденсаторов) зависит от их формы, размеров, взаимного расположения и от диэлектрической проницаемости среды.

Датчик в этих приборах в принципе является электрическим конденсатором. Электронный блок представляет собой устройство, предназначенное для измерения электрической ёмкости. Схемы этих блоков аналогичны и для ёмкостных, и для индуктивных датчиков и рассмотрены ниже.

Виды ёмкостных датчиков. Ёмкостным датчиком называется устройство для преобразования механических перемещений в электрический сигнал и представляющее собой плоскопараллельный или цилиндрический электрический конденсатор, у которого при изменении линейного или углового размера меняется зазор между пластинами или площадь их взаимного перекрытия.

Ёмкостные датчики разделяются на недифференциальные и дифференциальные.

Недифференциальным ёмкостным датчиком (рис. 3.13, *а, б*) называется датчик, состоящий из одного конденсатора, включающего подвижную и неподвижную обкладки, разделённые воздушным зазором, причём подвижная обкладка связана с измерительным наконечником, воспринимающим изменение размера.

У недифференциального датчика, работающего по изменению зазора между параллельными обкладками (рис. 3.13, *a*), изменение ёмкости C [пФ] связано следующей зависимостью с изменением расстояния между обкладками l , т.е. изменением измеряемого размера:

$$C = \frac{\varepsilon S}{l},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость; S – полезная площадь обкладок.

Недифференциальный датчик, работающий по изменению площади перекрытия (рис. 3.13, *б*), чаще всего представляет собою два коаксиальных цилиндра с зазором, значительно меньшим, чем диаметры. У этих датчиков изменение ёмкости C связано следующей зависимостью с изменением длины перекрытия l , т.е. с изменением измеряемого размера:

$$C = 27,8 \cdot 10^{-3} \frac{\varepsilon l}{D-d},$$

где D и d – диаметры наружной и внутренней обкладок, мм.

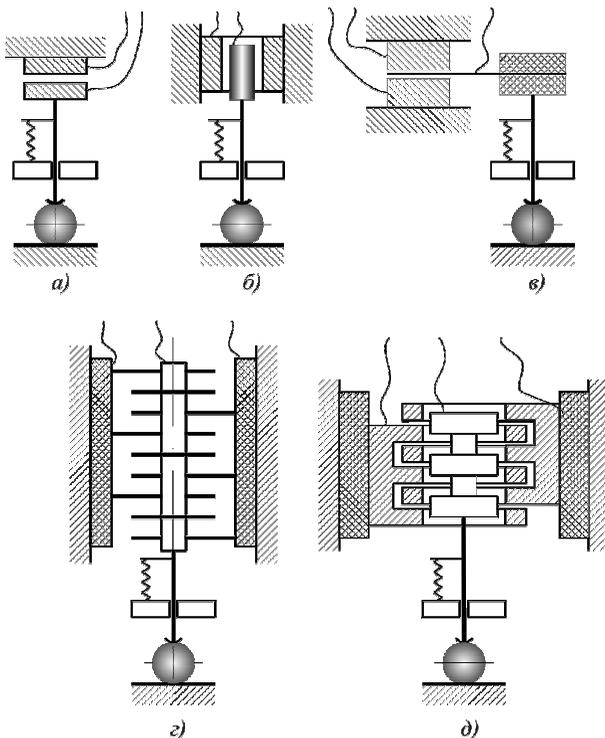


Рис. 3.13. Схемы ёмкостных датчиков:

a, б – недифференциальные; *в, г, д* – дифференциальные;
a, в, г – по изменению зазора; *б, д* – по изменению площади

Наибольшее применение имеют дифференциальные датчики, хотя они и более сложные. Эти датчики обладают более высокой чувствительностью, имеют более линейную характеристику (изменение показания прибора от изменения размера выражается прямой линией), погрешность их в меньшей мере зависит от внешней среды.

Дифференциальным ёмкостным датчиком называется датчик, содержащий два или более (чётное число) конденсаторов, ёмкости которых изменяются с разным знаком, причём подвижная обкладка связана с измерительным наконечником, воспринимающим изменение размера (рис. 3.13, в, з, д).

Дифференциальные ёмкостные датчики, работающие по принципу изменения зазора (рис. 3.13, в), имеют рабочие конденсаторы, состоящие как минимум из двух плоских неподвижных пластин круглой или прямоугольной формы и как минимум одной подвижной пластины, расположенной между ними (т.е. как бы два конденсатора).

Датчики, работающие по принципу изменения полезной площади, также имеют две неподвижные и одну подвижную обкладки цилиндрической формы.

Для повышения полезной ёмкости датчиков их чаще всего делают состоящими из нескольких пластин с сохранением принципа действия по зазору (рис. 3.13, з) или из нескольких цилиндров (рис. 3.13, д) при работе по перекрытию площадей.

В рассмотренных дифференциальных датчиках значение измеряемого размера зависит от результирующего воздействия, связанного с увеличением электрической ёмкости на одном конденсаторе при одновременном уменьшении на другом. При дифференциальных схемах измерения многие влияющие факторы (например, питание сети) одновременно воздействуют на оба конденсатора и поэтому практически не оказывают влияния на соотношение их параметров, т.е. на значение измеряемого размера.

Ёмкостные приборы иногда применяют в качестве бесконтактных средств измерения, когда одной обкладкой конденсатора является поверхность измеряемой детали, например, при измерении вибрации или радиального биения вращающейся детали, когда подвижной обкладкой является цилиндрическая поверхность детали, вибрацию или биение которой измеряют.

Достоинства приборов с ёмкостным датчиком:

1. Высокая линейность выходной характеристики (отклонение от линейности можно обеспечить в пределах 0,0001 ... 0,00001%).
2. Высокая чувствительность, т.е. может быть получена малая цена деления.
3. Возможность обеспечить большой диапазон показаний.
4. Возможность обеспечения малых измерительных усилий и даже бесконтактных измерений.

Недостатки приборов с ёмкостным датчиком:

1. Большое выходное электрическое сопротивление, что усложняет схему электронного блока и его конструкцию.

2. Большая чувствительность к внешним условиям и элементам электрической цепи (колебание температуры изменяет полезную площадь конденсаторов и расстояние между ними, внешние присоединительные кабели воздействуют как дополнительная ёмкость, влажность изменяет диэлектрическую проницаемость и т.д.).

3. Необходимость снимать сигнал с подвижного элемента (с подвижной обкладки).

Указанные недостатки привели к тому, что ёмкостные приборы, несмотря на то что они появились давно, используются редко в качестве универсальных средств измерения линейных размеров.

Приборы с индуктивным датчиком. Под *приборами с индуктивным датчиком* понимают измерительные средства с электрическим преобразованием, в которых линейные или угловые перемещения преобразуются в изменения индуктивности электрической цепи.

Электрическая схема этого вида приборов состоит из датчика, в котором механические перемещения вызывают изменение индуктивности, и параметров элементов цепи, представляющих собою электрическую цепь измерения индуктивности.

Виды индуктивных датчиков. Индуктивным датчиком называют устройство для преобразования механических перемещений в электрический сигнал, а именно изменение индуктивности катушки с магнитопроводом и подвижным ферромагнитным сердечником (якорем), положение которого относительно магнитопровода зависит от геометрического размера объекта контроля.

Индуктивность (от латинского слова induction – наведение, возбуждение) – это физическая величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи. Ток, текущий в проводящем контуре, создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, причём магнитный поток Φ , пронизывающий контур, прямо пропорционален силе тока I , т.е. $\Phi = LI$. Коэффициент пропорциональности L называют индуктивностью, или коэффициентом самоиндукции контура. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, от магнитной проницаемости проводников, образующих цепь, и окружающей среды.

Схема индуктивного датчика состоит из катушки индуктивности, т. е. проводника, свёрнутого в спираль, магнитопровода, состоящего из сердечника (постоянной части) и якоря, который при измерении размера смещается относительно катушки и этим самым изменяет магнитную проницаемость (сопротивление) сердечника, а, следовательно, изменяет индуктивность катушки.

В принципе, как и в ёмкостных датчиках, изменение индуктивности происходит либо в результате изменения зазора между подвижной частью магнитопровода (якоря) и сердечником, либо в результате изменения площади. Индуктивные датчики так же, как и ёмкостные, могут быть либо недифференциальными, либо дифференциальными.

Изменение индуктивности происходит от изменения параметров зазора по следующей зависимости:

$$L = \frac{w^2}{\sum_{i=1}^N \mu_0 S_{0i} + \sum_{j=1}^k \mu_j S_j},$$

где w – число витков катушки; l_{0i} , S_{0i} – длина и площадь i -го воздушно-го участка магнитной цепи; l_j , S_j – длина и площадь j -го ферромагнитного участка магнитной цепи; μ_0 , μ_j – магнитная проницаемость соответственно воздуха и материала j -го участка магнитной цепи; N – число воздушных участков магнитной цепи; k – число ферромагнитных участков магнитной цепи.

Если якорь индуктивного датчика механически связать с объектом контроля, то изменение размера объекта или перемещение его в пространстве приведёт к изменению длины или площади немагнитных участков цепи магнитного потока, а значит, и к изменению индуктивности катушки.

Датчики подобного типа применяются для контроля размеров деталей, а также для измерения толщины покрытия из немагнитных материалов, при условии, что под ним находится ферромагнитное вещество. На этом принципе построена работа прибора типа ИЗС (см. рис. 3.14), который применяется для неразрушающего контроля расстояния от поверхности бетонных плит до расположенной в них металлической арматуры. Роль якоря выполняет стержень 3 арматуры и в зависимости от глубины его залегания изменяется толщина немагнитного слоя бетона l_0 , а, следовательно, индуктивность катушки датчика L .

Таким образом, показания вторичного прибора (ВП), подключённого к преобразователю 4, зависят от толщины слоя l_0 бетона до арматуры.

Для повышения чувствительности индуктивных преобразователей применяют дифференциальные индуктивные датчики. На рисунке 3.15 показана схема дифференциального индуктивного датчика, работающего по принципу измерения длины немагнитного зазора. Здесь перемещение якоря l приводит к увеличению индуктивности одной катушки (например L_1) и уменьшению индуктивности другой катушки (L_2). Эти катушки включены в мост переменного тока, поэтому напряжение разбаланса моста зависит от положения якоря.

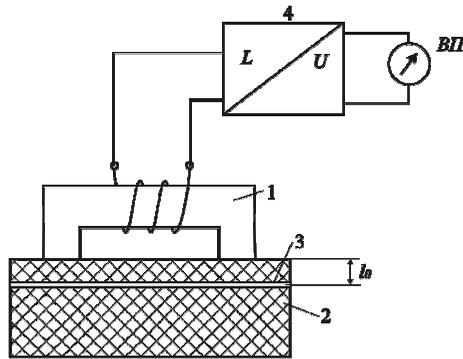


Рис. 3.14. Функциональная схема толщиномера защитного слоя бетона

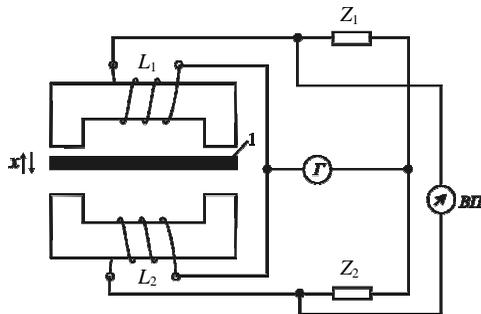


Рис. 3.15. Схема дифференциального индуктивного датчика

Широкое применение получили соленоидные контактные преобразователи. В этих датчиках положение измерительного стержня, зависящее от контролируемого параметра, определяет взаимное положение якоря и катушек датчика, а значит, их индуктивность. Контактные индуктивные датчики могут быть простыми или дифференциальными. Верхний торец измерительного стержня *1* воздействует на якорь *2*, подвешенный на плоской пружине *3*. Изменение положения якоря, определяемое размером контролируемой детали *6*, вызовет изменение воздушного зазора между якорем *2* и катушкой *5* простого датчика или перераспределение воздушного зазора между катушками *5* и *7* и якорем *2* дифференциального датчика (рис. 3.16, б). При уменьшении зазора между якорем и катушкой *5* зазор между якорем и катушкой *7* увеличивается. Изменяется одновременно индуктивность обеих катушек, поэтому чувствительность дифференциального датчика вдвое выше, чем простого. Измерительное усилие создаётся пружиной *4*. Металлические части *8* и *9* корпуса выполняют также функцию экранирования катушек индуктивности от внешних магнитных полей.

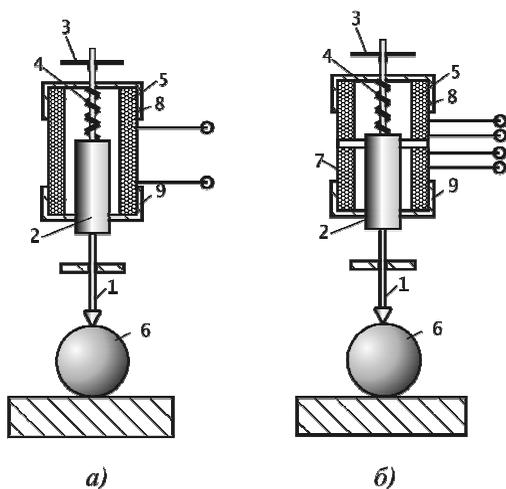


Рис. 3.16. Конструкции соленоидных преобразователей

Сила магнитного притяжения в простом датчике может быть значительной и измерительному стержню, перемещающему якорь, приходится её преодолевать, что вызывает необходимость увеличения измерительного усилия и является одним из недостатков простого индуктивного датчика.

В дифференциальном датчике силы магнитных притяжений в воздушных промежутках уравниваются, и измерительный стержень должен преодолевать лишь силу тяжести подвижной системы датчика и усилие в пружинном шарнире.

Схема включения индуктивного датчика перемещений осуществляет его согласование с электрическим вторичным измерительным преобразователем и преобразует изменение полного сопротивления датчика в изменение электрического тока или напряжения. Электрические вторичные измерительные преобразователи индуктивных измерительных устройств являются общими для самых разнообразных электрических устройств, предназначенных для измерения различных неэлектрических величин. Такие преобразователи достаточно подробно рассмотрены в литературе. Поэтому ниже мы ограничимся рассмотрением только схем включения индуктивных датчиков перемещений, нашедших применение в современных индуктивных измерительных устройствах.

В любую схему включения индуктивный датчик размера может входить либо непосредственно, либо в составе резонансного контура, параллельного или последовательного. Применение включения датчи-

ка в резонансный контур позволяет в ряде случаев повысить чувствительность измерения и улучшить линейность характеристики датчика. С этой точки зрения все схемы включения индуктивных датчиков можно разделить на безрезонансные, в которых индуктивный датчик включен в схему непосредственно, и резонансные, в которых индуктивный датчик входит в схему в составе колебательного контура.

Независимо от предыдущего деления применяют следующие типы схем включения индуктивных датчиков:

- последовательную (схема генератора тока);
- схему делителя напряжения;
- мостовую;
- частотную;
- трансформаторную.

Схема включения датчика с трансформатором (рис. 3.17, а). В этой схеме катушки датчика с индуктивностями L_1 и L_2 образуют мостовую схему вместе с первичными обмотками трансформатора Тр1. Эти обмотки трансформатора имеют $w_1 = w_2$. В исходном положении, т.е. в среднем положении якоря $L_1 = L_2$, поэтому токи, протекающие по первичным обмоткам трансформатора, равны и магнитные поля обмоток w_1 и w_2 взаимно компенсируются, а поэтому напряжение на выходе Тр1 равно нулю. При перемещении якоря изменяются индуктивности L_1 и L_2 , и тогда ток в одном плече уменьшится, а в другом увеличится. По трансформатору пойдет ток I , который вызовет отклонение стрелки на вторичном приборе ВП, пропорциональное перемещению измерительного стержня датчика. Дополнительный трансформатор Тр2 установлен в качестве усилителя тока от датчика, и он питается обычно от сети с частотой 50 Гц или от генератора с большей частотой.

Эту схему целесообразно использовать при датчиках с большим сопротивлением. Погрешность таких схем составляет 2 ... 3% от измеряемой величины.

Схема включения датчика с реостатом. Один из простейших вариантов этой схемы приведен на рис. 3.17, б. Индуктивности L_1 и L_2 дифференциального датчика образуют вместе с потенциометром R мостовую схему, в диагонали которой расположен прибор ВП или регистрирующее устройство. При среднем положении якоря датчика $L_1 = L_2$, при среднем положении движка потенциометра мост находится в сбалансированном состоянии и выходное напряжение равно нулю. При изменении положения якоря изменяется индуктивность его катушек и в диагонали моста появляется ток.

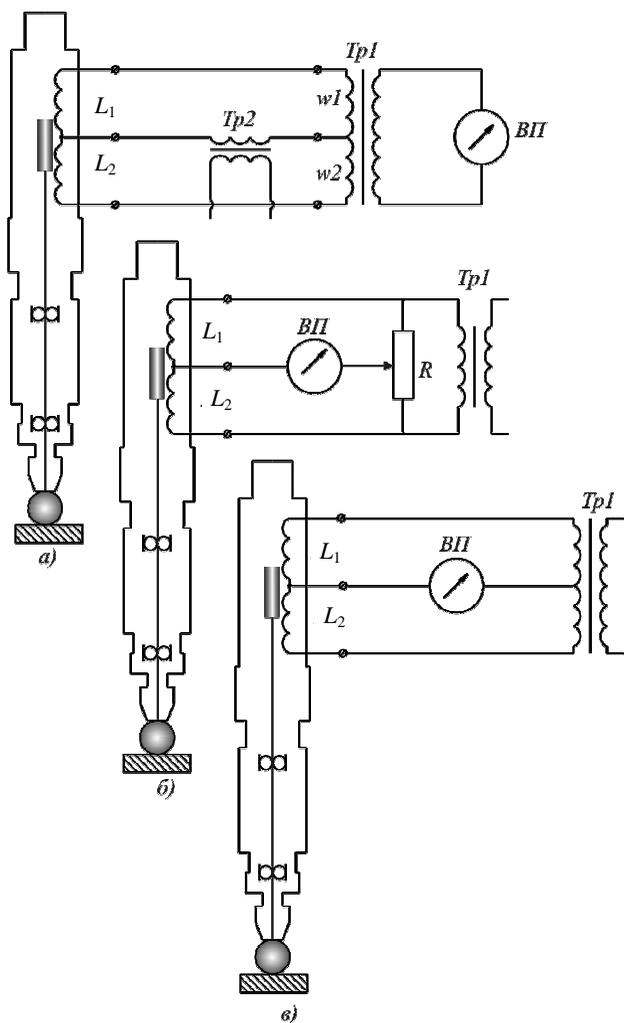


Рис. 3.17. Схемы включения индуктивных преобразователей

В принципе возможны два режима работы прибора с мостовой схемой. В уравновешенном режиме добиваются условия нулевого напряжения в диагонали моста, т.е. на выходе. Это достигается тем, что при появлении тока в диагонали моста движок потенциометра R смещается до момента достижения баланса и производится отсчёт величины перемещения движка, которая пропорциональна величине смещения якоря датчика. По такой схеме, в частности, работают некото-

рые самописцы с индуктивным датчиком, у которых перо связано с движком потенциометра, а ток в диагонали моста подаётся на реверсивный двигатель, перемещающий перо через движок потенциометра.

В неуравновешенном режиме работы при изменении индуктивности катушек L_1 и L_2 от перемещения якоря в диагонали моста появляется ток, и напряжение этого тока измеряется пропорционально перемещению якоря, т.е. изменению размера. Погрешность этих схем измерения составляет 1 ... 3% от измеряемой величины.

Дифференциальные схемы. Эти схемы также являются мостовыми схемами (рис. 3.17, в), у которых вторичные обмотки трансформатора Тр1 являются плечами моста вместе с индуктивностями катушек L_1 и L_2 датчика. Через эти вторичные обмотки трансформатора осуществляется питание датчика. При перемещении якоря датчика и изменении индуктивности L_1 и L_2 снимается выходное напряжение со средних точек вторичных обмоток трансформатора и датчика.

Частотная схема включения. Для преобразования индуктивности датчика в частоту переменного тока применяют генераторные схемы (рис. 3.18).

Основой генераторной схемы является колебательный контур, составленный индуктивностью датчика L_d и постоянной ёмкостью C . Контур включен в схему электронного генератора Г, который генерирует переменное напряжение с частотой, равной собственной частоте колебательного контура. При изменении индуктивности датчика изменяется частота на выходе генератора, измеряемая частотомером. Частота генератора зависит в основном от индуктивности датчика и не зависит от его сопротивления потерь (это верно только в первом приближении). Поскольку сопротивление потерь датчика обычно в большой степени зависит от различных внешних факторов, то избавление от его влияния на результаты измерения повышает точность измерений.

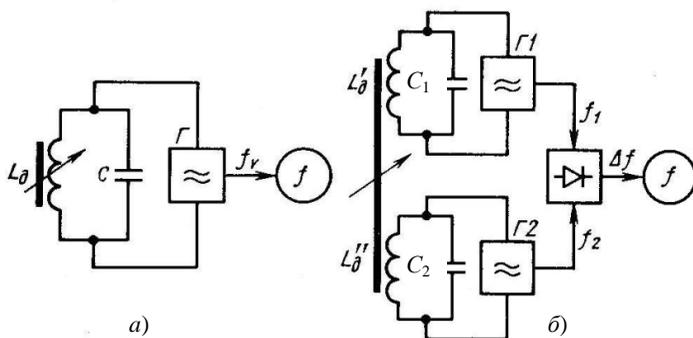


Рис. 3.18. Частотные схемы включения

Генераторная схема может применяться для включения как недифференциальных датчиков (рис. 3.18, *a*), так и дифференциальных (рис. 3.18, *б*). В последнем случае имеются два колебательных контура, составленных каждой обмоткой датчика и конденсаторами C_1 и C_2 , и два генератора Γ_1 и Γ_2 . Частоты с обоих генераторов f_1 и f_2 поступают на смеситель, который выделяет разностную частоту. Эта разностная частота, в свою очередь, измеряется частотомером.

Подбором ёмкостей C_1 и C_2 генераторы настраиваются так, чтобы в одном из крайних положений измерительного стержня датчика выполнялось условие $f_1 = f_2$ и $\Delta f = 0$. Тогда показания частотомера будут пропорциональны величине смещения измерительного стержня из крайнего положения.

Номенклатура приборов с индуктивным датчиком и основные технические характеристики. В приборах с индуктивным датчиком в отличие от приборов с механическим преобразованием имеется возможность иметь в одном приборе несколько значений цен делений и соответственно несколько диапазонов показаний. Обычно стремятся создать гамму приборов с индуктивным датчиком с учётом удовлетворения потребностей в средствах измерения при различных случаях использования. Для индуктивных систем эти цены делений бывают от 0,00001 до 0,05 мм (0,00001; 0,0001; 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,010; 0,050 мм).

Реостатные преобразователи перемещений. Реостатный преобразователь – это прецизионный реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой величины. Входной величиной преобразователя является угловое или линейное перемещение движка, выходной – изменение его сопротивления.

Устройство преобразователя показано на рис. 3.19. Он состоит из каркаса 1, на который намотан провод 2, изготовленный из материала с

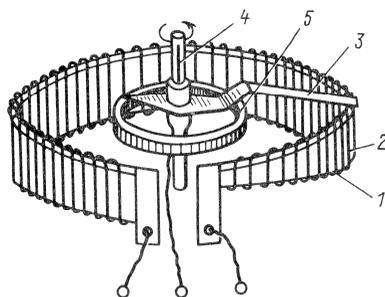


Рис. 3.19. Конструкция реостатного преобразователя

высоким удельным сопротивлением, и токосъёмного движка 3, укрепленного на оси 4. Движок касается провода 2. Для обеспечения электрического контакта в месте касания обмотка зачищается от изоляции. В показанной конструкции контакт с подвижным движком осуществляется с помощью неподвижного токосъёмного кольца 5.

Обмотка делается обычно из провода, изготовленного из манганина, константана, фехраля. Для повышения точности и надёжности она выполняется из платино-иридиевого сплава.

Для обеспечения хорошего контакта движок должен прижиматься к обмотке силой $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Н. Сила создаётся благодаря упругости движка. При измерении переменных величин, при переходе с одного витка на другой движок подсакивает, возникает пульсирующая сила, которая может нарушить контакт. По этой причине, если преобразователь служит для измерения переменных величин или работает при вибрации, сила прижатия должна быть увеличена. Большая сила нежелательна, поскольку при её увеличении возрастает сила трения, препятствующая перемещению движка и увеличивающая износ обмотки и контактирующей поверхности движка. В измерительной технике требуются реостатные преобразователи, как с линейной, так и с нелинейной функцией преобразования. Одним из способов построения преобразователей с нелинейной функцией преобразования является использование каркаса с переменной высотой.

4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ [6]

При измерении отклонений формы применяют дискретные измерения, поэтому при любом методе необходимо определение числа и расположения точек и линий измерения в зависимости от контура плоскости и размеров нормируемого участка. Для прямоугольного контура число точек n_1 измерения в продольном направлении (большая длина) в зависимости от длины L_1 нормируемого участка определяют по табл. 4.1. Число точек на линии измерения в поперечном направлении

$$n_2 = \frac{L_2}{L_1}(n_1 - 1) + 1,$$

где L_2 – ширина нормируемого участка.

Следовательно, общее наименьшее число точек измерения

$$n = n_1 n_2.$$

Точки для измерения на непрямоугольных контурах определяют вписыванием рассматриваемого контура в прямоугольник.

4.1. Число точек измерения для прямоугольного контура

Длина нормируемого участка L_1 , мм	n_1	Длина нормируемого участка L_1 , мм	n_1
До 100	5	Св. 2500 до 4000	17
Св. 100 до 160	7	Св. 4000 до 6300	19
Св. 160 до 250	7	Св. 6300 до 10 000	21
Св. 250 до 400	9	Св. 10 000 до 16 000	23
Св. 400 до 630	9	Св. 16 000 до 25 000	25
Св. 630 до 1000	11	Св. 25 000 до 40 000	27
Св. 1000 до 1600	13	Св. 40 000 до 63 000	29
Св. 1600 до 2500	15	Св. 63 000 до 100 000	31

При непрерывном измерении по линиям измерения число дискретных значений ординат определяют так, чтобы исключить влияние шероховатости поверхности, а именно, шаг дискретности выбирают равным или несколько меньшим 20% предельной длины волны шероховатости. Если шаг дискретности определён по другим критериям, то предельную длину волны шероховатости выбирают в 5 раз большей шага дискретности.

Для механической фильтрации шероховатости поверхности накопник измерительного прибора выбирают сферической формы с радиусом $r \geq 25$ мм, а при электрической фильтрации $r \leq 0,25$ мм.

4.1. КОНТРОЛЬ ПЛОСКОСТНОСТИ

4.1.1. Контроль при помощи поверочной плиты или линейки

Поверочные линейки выполняются двух основных типов: лекальные и линейки с широкими рабочими поверхностями.

Проверка прямолинейности поверхности деталей лекальными линейками производится, как правило, по способу «световой щели» («на просвет»). При этом лекальную линейку накладывают острой кромкой на проверяемую поверхность, а источник света помещают за деталью. Линейку держат строго вертикально на уровне глаз. Наблюдая за просветом между линейкой и поверхностью детали в разных местах по длине линейки, определяют степень прямолинейности поверхности: чем больше просвет, тем больше отклонение от прямолинейности.

Проверка прямолинейности и плоскостности линейками с широкими рабочими поверхностями выполняется обычно способом «пятен» – «на краску». При проверке «на краску» рабочую поверхность линейки покрывают тонким слоем краски (суриком, сажей), затем осторожно накладывают линейку на проверяемую поверхность и плавно, без нажима перемещают её. После этого линейку также осторожно снимают и по расположению и количеству пятен краски на проверяемой поверхности судят о её плоскостности. При хорошей плоскостности пятна краски располагаются равномерно по всей поверхности. Чем больше пятен на поверхности квадрата 25×25 мм, тем лучше плоскостность.

Поверочные плиты применяют главным образом для проверки больших поверхностей деталей способом «на краску», а также используют в качестве вспомогательных приспособлений при контроле деталей. Проверка плоскостности поверхностей деталей «на краску» при помощи поверочных плит производится так же, как и линейками с широкими рабочими поверхностями.

На рисунке 4.1 показан способ контроля плоскостности при помощи поверочной плиты 4 и измерителя 3. Объект контроля 1 устанавливается на опоры 2 одинаковой высоты и в зазор между плитой и объектом помещают измеритель 3. В заданных точках контроля регистрируют показания измерителя, после чего производится их статистическая обработка. Масса изделия не должна быть больше предельной, при которой происходит недопустимая деформация плиты.

Все рассмотренные поверочные инструменты имеют очень точно обработанные рабочие поверхности и поэтому требуют осторожного и бережного обращения. Необходимо предохранять рабочие поверхности инструментов от коррозии и механических повреждений. Во время работы надо класть инструменты только на деревянные или другие нежёсткие подставки. По окончании работы следует протирать их чистой ветошью или ватой и смазывать безкислотным вазелином. Хранят эти инструменты обычно в специальных футлярах.

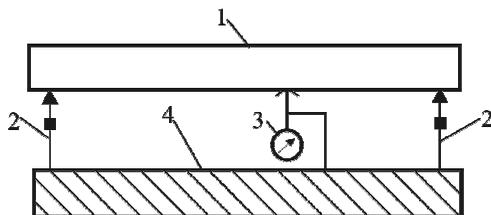


Рис. 4.1. Контроль плоскостности при помощи поверочной плиты и прибора для измерения длин

Для примера рассмотрим технологию испытаний асбестовых фрикционных накладок для целей сертификации на соответствие требованиям технических условий к отклонению от плоскостности торцевых поверхностей накладок.

Фрикционные накладки 2 испытывают под давлением с помощью нажимных колец 3. Метод испытаний основан на измерении под давлением с помощью набора щупов по ТУ 2-034-225-87 зазора между рабочей (торцевой) поверхностью фрикционной накладки и поверхностью поверочной плиты 1 (рис. 4.2), на которой размещена накладка.

Размеры нажимного кольца выбирают таким образом, чтобы на подвергаемую испытаниям фрикционную накладку создавалось давление $(1,5 \pm 0,2)$ кПа. Накладку размещают на поверочной плите и сверху устанавливают нажимное кольцо или набор колец, обеспечивающих давление на накладку $(1,5 \pm 0,2)$ кПа. Контроль отклонения от плоскостности накладок проводят с помощью набора щупов с максимальным размером, на 0,01 мм превышающим установленное в технической документации допускаемое отклонение от плоскостности. Зазор между поверхностью накладки и поверочной плитой контролируют по длине всей окружности наружного диаметра накладки.

За результат испытаний принимают максимальный размер щупа, который входит в зазор между торцевой поверхностью накладки и поверочной плитой без усилия на глубину не менее одной третьей части ширины поля накладки.

После контроля отклонения от плоскостности для одной торцевой поверхности накладки её переворачивают, кладут на другую торцевую поверхность, сверху устанавливают нажимное кольцо (или нажимные кольца) и аналогичным образом контролируют отклонение от плоскостности для второй торцевой поверхности.

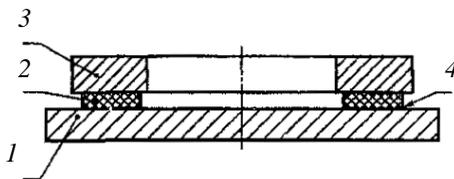


Рис. 4.2. Схема контроля отклонения от плоскостности фрикционных накладок:

- 1 – поверочная плита по ГОСТ 10905 не ниже 2-го класса точности;
2 – фрикционная накладка; 3 – нажимное кольцо из стали по ГОСТ 1050, твёрдость НРС, 57-63; 4 – зона контроля отклонений от плоскостности (по всей длине окружности)

4.1.2. Контроль при помощи гидростатического уровня

Один из самых простых и надёжных методов контроля плоскостности объектов 1 (см. рис. 4.3) является контроль при помощи гидростатического уровня 2, который состоит из двух мерных сосудов, заполненных жидкостью и соединённых между собой шлангом. Разность отсчётов уровней жидкости в сосудах является мерой отклонения от плоскостности. Среднее квадратическое отклонение разности отсчётов во всех точках контроля может служить показателем качества, характеризующим плоскостность поверхности изделия.

Метод применим для протяжённых объектов. Однако размеры объекта ограничиваются кривизной поверхности Земли и длиной шлангов.

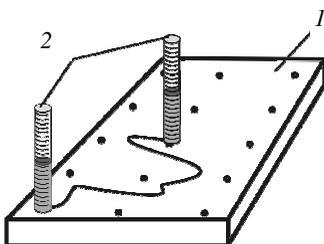


Рис. 4.3. Контроль плоскостности при помощи гидростатического уровня

4.1.3. Контроль при помощи зрительной трубы

Контроль производится при помощи зрительной трубы 3 (см. рис. 4.4), имеющей указатель центра, которая устанавливается по уровню 2 и наводится на цель – рейку 4 со шкалой длины. Рейка устанавливается в заданные точки контроля объекта, и каждый раз определяются показания по шкале рейки, после чего производится их статистическая обработка. Метод применим для крупных горизонтальных объектов длиной до 15 000 мм, а при учёте влияния окружающей среды и до 100 000 мм. Иногда в качестве указателя применяется узконаправленный луч лазерного излучения.

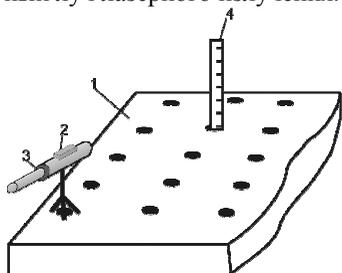


Рис. 4.4. Контроль плоскостности при помощи зрительной трубы

4.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ КРУГЛОСТИ

Процесс контроля отклонений от круглости встречает серьёзные трудности в реализации. Ведь для измерения этих отклонений необходимо сравнить реальную форму профиля поперечного сечения детали с измерительной базой – эталонной окружностью, центр которой совпадает с центром профиля детали. Но в природе нет естественных объектов – эталонов круглости (в то время, как, например, эталоном прямолинейности могут служить луч лазера или натянутая струна). Эталонная окружность может быть получена только путём очень точного вращения.

Приборы, построенные по двухточечному принципу, т.е. приборы, которые контролируют диаметр детали, а не радиус, принципиально не могут обнаружить отклонения от круглости деталей с нечётным числом граней (диаметры такого профиля во всех направлениях одинаковы, ГОСТ 24642–81).

При измерении отклонений от круглости стоит задача выбора плоскости измерения. Если она не задана, то измерение производят в нескольких плоскостях. Число плоскостей для задач контроля отклонений от круглости может определяться в соответствии с табл. 4.2. При этом первое и последнее сечения должны иметь расстояние $l/2N$ от края, а расстояние между сечениями принимается равным l/N . При использовании круглограмм для определения отклонения от круглости следует иметь в виду, что из-за различных увеличений по радиальному и тангенциальному направлениям форма профилограммы не совпадает с формой реального профиля.

4.2. Выбор числа плоскостей измерений

l , мм	До 50			Св. 50 до 200			Св. 200		
	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3
N	1	2	3	2	3	4	3	4	5

4.2.1. Контроль при помощи образца круглости

Изделие 1 (рис. 4.5) помещают в образец круглости 2 соответствующего диаметра с отверстием, в которое встроены воспринимающий элемент измерителя длины 3. Поворачивая изделие заданное число раз, регистрируют показания измерителя в каждом положении изделия.

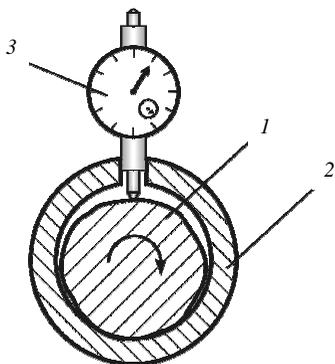


Рис. 4.5. Контроль при помощи образца круглости

Такой вид контроля применим для валов и отверстий с допуском на диаметр от 4 до 8 квалитетов. Для контроля отверстий образец круглости помещается внутрь. Данный метод очень часто используется для контроля колец подшипников качения. Погрешность контроля определяется погрешностью образцов и измерителя, а также величиной зазора в случае применения нерегулируемых образцов круглости.

4.2.2. Контроль круглости по радиальным биениям

Объект контроля *1* (рис. 4.6) зажимается в центрах окружности боковых торцов. Датчик перемещений *2* воспринимает изменение положение поверхности объекта в заданном сечении при его вращении. Возможен непрерывный контроль, при котором сигнал датчика поступает на электронный блок *3* и далее на самописец *4*. Погрешность контроля определяется в основном погрешностью расположения оси опорных элементов относительно центра окружностей торцов объекта контроля, биениями в подшипниках, деформацией самого объекта. В связи с этим выделить из результатов измерений собственно отклонение от круглости очень сложно.

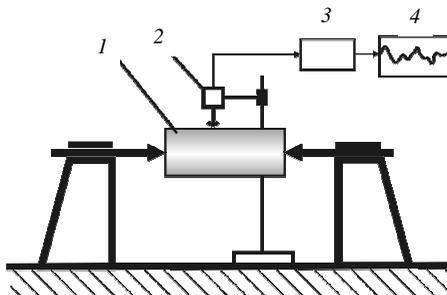


Рис. 4.6. Схема стенда контроля круглости по биениям

4.2.3. Контроль накладным кругломером

Накладные кругломеры позволяют полуавтоматически измерять отклонения формы поверхностей объектов с высокой точностью и производительностью при вращении детали *1* (рис. 4.7). Погрешность контроля определяется в основном погрешностью средства измерения.

Подключённый к кругломеру компьютер с входящим в комплект специальным программным обеспечением позволяет автоматически формировать и хранить протоколы измерений. Наличие функции гармонического анализа позволяет выявить технологические причины недопустимых отклонений формы в случае их регулярного возникновения.

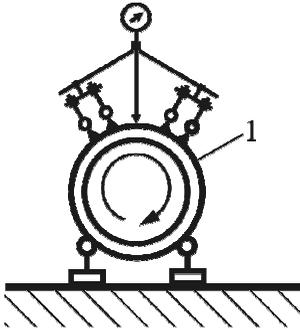


Рис. 4.7. Схема накладного кругломера

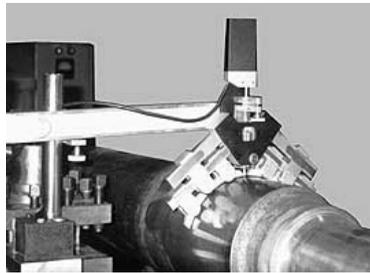


Рис. 4.8. Внешний вид датчика современного накладного кругломера

4.3. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПРИ ПОМОЩИ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

При контроле деталей сложных конструкций используются координатные измерительные машины. Особенности измерений на координатно-измерительных машинах (КИМ) зачастую определяются особенностями их построения.

На координатно-измерительных машинах производят измерение координат отдельных точек поверхностей (рис. 4.9) объекта *1* в принятой системе координат (прямоугольной, цилиндрической или сферической) и последующее определение необходимых геометрических параметров (размеров, формы и взаимного расположения поверхностей) путём математической обработки измеренных координат.

КИМ – устройство, обеспечивающее установку измеряемой детали, взаимное перемещение системы ощупывания и детали, измерение этих перемещений по координатам, обработку данных измерений и

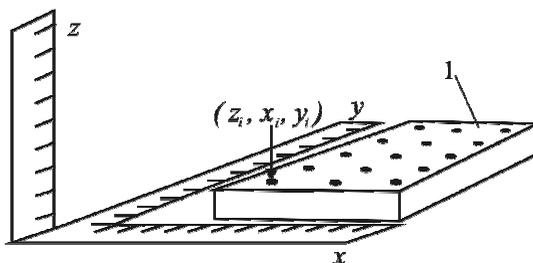


Рис. 4.9. Принцип контроля при помощи КИМ

представление результатов расчётов измеряемых геометрических параметров.

Блок координатных перемещений (БКП) имеет базовую поверхность и узлы координатных перемещений и, таким образом, образует устройство взаимодействия (УВ) измерительной машины с деталью, например взаимное перемещение измеряемой детали и измерительной головки (ИГ), установленной на одном из узлов машины.

Координатные перемещения отсчитываются посредством измерительных преобразователей (ИП) и преобразуются затем в показания блока цифровой индикации (БИН) координатных перемещений и сигналы, используемые в ЭВМ для расчёта и представления измеряемых геометрических параметров деталей.

Взаимные перемещения узлов БКП и УВ производятся либо вручную, либо электромеханическими приводами (ЭМП). В последнем случае управление осуществляется либо от блока управления электроприводами (БУП) (автоматический режим), либо от пульта (П) (механический режим).

Функции устройства преобразования (УПС) зависят от типа используемой измерительной головки. При использовании головки касания в момент соприкосновения измерительного наконечника головки с измеряемой поверхностью детали устройством УПС подаётся электрический сигнал на отсчёт перемещений по координатам от ИП и на останов и реверс взаимного перемещения детали и УВ. УПС кроме выдачи сигнала на отсчёт перемещений по координатам воспринимает, усиливает и подготавливает для передачи в ЭВМ сигналы ИП, встроенных в ИГ отклонения. Эти сигналы пропорциональны отклонению наконечника измерительной головки от некоторого нулевого положения.

Для обеспечения доступа к измеряемым поверхностям деталей и упрощения измерений в полярной, цилиндрической и сферической системах координат базовая часть КИМ снабжена поворотными столами (ПС).

Алгоритм обработки сигналов ИП и ИГ определяется тем, что КИМ можно рассматривать как прибор для сравнения координаты

точки измеряемой поверхности детали с координатной шкалы ИП. Сравнение указанных величин может проводиться нулевым методом, дифференциальным методом и методом противопоставления.

При нулевом методе координаты точки детали отсчитываются по показаниям ИП в момент касания ИГ с деталью.

При дифференциальном методе корпус ИГ выводится в заданное положение по показаниям ИП, а отклонение от этого положения отсчитывается по показаниям ИГ. При работе по методу противопоставления корпус и наконечник ИГ выводятся приблизительно в нулевое положение. Координата точки поверхности детали определяется суммированием одновременно произведённых отсчётов с ИП и ИГ. Подавляющее большинство КИМ (до 90%) оснащено оптическими преобразователями. Значительно реже используются индуктивные датчики.

Принцип работы оптических преобразователей с растровыми измерительными линейками основан на модуляции светового потока, проходящего через два взаимно подвижных растра (см. рис. 3.8), и превращении его в квазисинусоидальные электрические сигналы в цепи фотоприёмника. Минимальное значение погрешности измерительных преобразователей составляет 1–2 мкм. Погрешность в пределах шага равна 0,02 ... 0,05 шага, который для прецизионных систем составляет 8 ... 20 мкм. Дискретность отсчёта, зависящая от шага и числа интерполяции, достигает 0,1 мкм.

КИМ могут применяться для контроля практически всех встречающихся в машиностроении типов деталей, однако каждый тип деталей требует своего специфического программного обеспечения, измерительной оснастки, изменений в конструкции КИМ, а также специфической технологии измерений. Все эти вопросы должны учитываться при выборе КИМ.

К специфическим типам деталей можно отнести: корпусные детали, зубчатые колеса, кулачки, лопатки турбин, ходовые винты.

Современные координатно-измерительные машины требуют развитого программно-математического обеспечения (ПМО). Это требование обусловлено разнообразием функций, различием возможностей представления результатов измерений, уровнем автоматизации измерений, различным числом измерительных головок (1 ... 5), наличием дополнительных функций КИМ (автоматическая замена измерительных наконечников, разнообразие конструкций КИМ).



Рис. 4.10. Мобильная координатно-измерительная машина фирмы FARO Technologies Inc

В последнее время все большее применение находят мобильные компактные контрольно-измерительные машины, выполненные в виде манипуляторов (рис. 4.10). Они позволяют контролировать изделия как простой геометрии, так и сложной, например, формообразующие поверхности штампов и пресс-форм путём сравнения реальных поверхностей с компьютерной САД-моделью. Преимуществом мобильных КИМ по сравнению со стационарными является возможность контроля геометрических параметров неподвижных и крупногабаритных изделий, а также контроля непосредственно в ходе технологического процесса. Длина измерения при помощи такой машины составляет от 1,2 до 3,7 метров, но существует ряд способов её увеличения. Погрешность измерения зависит от расстояния до места контроля и находится в пределах от 0,005 до 0,4 мм.

4.4. ОСОБЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, ОСНАЩЁННЫХ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ [7]

Информационно-измерительная система (ИИС), построенная на базе ЭВМ с использованием технического зрения, является актуальным решением по автоматизации контрольно-измерительных высокоточных операций, проводимых как в лабораторных, так и в производственно-цеховых условиях. Область применения ИИС может быть самой разнообразной и зависит от пакета прикладных программ. Система позволяет решать широкий спектр задач, таких как регистрация наличия объекта в поле зрения видеодетектора, подсчёт числа объектов, измерение геометрических параметров объекта (периметра, площади, линейных и угловых размеров, определение центра тяжести и т.д.), определение физических параметров объекта по излучательной способности его поверхности и др.

Информационно-измерительная система контроля линейных размеров с видеодетектором в качестве первичного датчика должна решать следующие задачи:

- восприятие оптического сигнала и формирование изображения;
- предварительная обработка изображения в целях ослабления влияния шумов, улучшения контрастности, коррекции искажений, сжатия информации и т.д.;
- сегментация изображения контролируемой сцены на составные части – выделение нужных объектов, их фрагментов или характерных особенностей. При этом используются эталонные изображения объектов, а также их конструктивных узлов. Для точного измерения геометрических параметров объектов необходима предварительная калибровка;

– описание изображений – расчёт их геометрических и других характеристик, вычисление классифицирующих признаков, определение местоположения и ориентации;

– качественная оценка изображения с распознаванием образов объектов и принятием решения о действии над ним.

Основным элементом системы технического зрения является видеокамера 2, совместимая с персональным компьютером 3 (рис. 4.11), в поле зрения которой находится неподвижный или перемещающийся объект контроля 1.

Современные цифровые видеокамеры способны передавать в компьютер видеоинформацию через скоростной порт Universal Serial Bus (USB). В случае использования аналоговых видеокамер и видеоманитофонов необходимо иметь специальные устройства для оцифровки видеосигнала – фреймграбберы, представляющие собой аналого-цифровые преобразователи и одновременно декодеры сигнала изображения.

В персональном компьютере должно быть также установлено специальное программное обеспечение для анализа и обработки изображений. На рисунке 4.12 показан результат определения системой технического зрения геометрических параметров металлической скобы. Одним из лучших программных продуктов среди существующих является среда визуального программирования LabView с библиотекой компонент обработки и анализа изображений IMAQ Vision фирмы National Instruments (США).

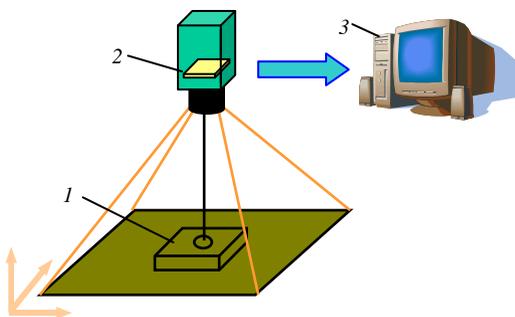
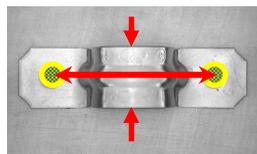


Рис. 4.11. Состав системы технического зрения

Рис. 4.12. Пример определения системой технического зрения расстояния между центрами отверстий и ширины скобы



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, испытания и контроль – основные методы оценки соответствия и управления качеством. Особенности их применения определяются задачами, которые решает испытательная лаборатория при сертификации.

Данное учебное пособие по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» будет состоять из нескольких частей, раскрывающих многообразие измерительных задач и видов измерений.

В первой части пособия рассмотрены основные виды измерений, контроля и испытаний при сертификации продукции. Главное внимание уделено средствам и методам измерения следующих физических величин, наиболее часто применяемых на практике:

1) средства и методы измерения электрических величин. Приведены устройство, принцип действия, характеристики и область применения электромеханических приборов, а также методы измерения электрических величин;

2) средства и методы измерения механических величин. Рассматриваются классификация механических величин, механические, оптические, электрические средства измерения геометрических размеров, перемещений, контроля плоскостности и формы объектов. Приводится их классификация, информация о принципе действия и конструкции.

Знание особенностей конструкции и принципа действия средств измерения поможет будущим специалистам обоснованно решать измерительные задачи в инструментальном контроле качества.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютная погрешность – погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины.

Градуировочная характеристика – зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально.

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Дополнительная погрешность – составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального её значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений.

Действительное значение физической величины – значение физической величины, полученное экспериментальным путём и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Задача испытания – получение количественных или качественных оценок характеристик продукции, т.е. оценивание способности объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях.

Значение физической величины – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для неё единиц.

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

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) – функционально объединённая совокупность средств измерений, ЭВМ и вспо-

могательных устройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Измерительная машина (ИМ) – измерительная установка крупных размеров, предназначенная для точных измерений физических величин, характеризующих изделие.

Измерительный прибор (ИП) – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительная задача – задача, заключающаяся в определении значения физической величины путём её измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений.

Измерительная система – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещённых в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

Измерительная установка (ИУ) – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте, например, установка для измерения характеристик транзистора, установка для измерения мощности в трёхфазных цепях и др.

Измерительное устройство – часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение.

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

Контроль – процедура оценивания соответствия путём наблюдений и суждений, сопровождаемых соответствующими измерениями, испытаниями и калибровкой.

Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

Мера физической величины – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Метод измерений замещением – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.

Метод измерений – приём или совокупность приёмов сравнения измеряемой физической величины с её единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля.

Объект испытаний – продукция, подвергаемая испытаниям.

Основная погрешность – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях.

Относительная погрешность – безразмерная величина, определяющаяся отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой ФВ.

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

Прибор с емкостным датчиком – измерительное средство с электрическим преобразованием, в котором линейные (или угловые) перемещения преобразуются в изменения электрической ёмкости электрической цепи.

Прибор с индуктивным датчиком – измерительное средство с электрическим преобразованием, в котором линейные или угловые перемещения преобразуются в изменения индуктивности электрической цепи.

Приведённая погрешность средства измерения – погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всём диапазоне измерений или в части диапазона.

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение физической величины (ФВ) получают непосредственно.

Размер физической величины – количественная определённая физическая величина, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных наблюдениях одной и той же неизменяющейся ФВ.

Система физических величин – совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин.

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности результатов измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в повторных наблюдениях, проведённых с одинаковой тщательностью одной и той же неизменяющейся (детерминированной) ФВ.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноимённых величин, при которых искомые значения величин определяют путём решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Совместные измерения – измерения, проводимые одновременно для двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними.

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

Универсальные осциллографы – электронно-лучевые осциллографы, в которых исследуемый сигнал подаётся на вертикально отклоняющую систему, а горизонтальное отклонение осуществляется генератором развёртки.

Условия испытаний – совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях.

Физическая величина (ФВ) – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РМГ 29–99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
2. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
3. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебное пособие / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
4. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 3-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
5. Харт, Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт ; пер. с нем. – М. : Мир, 1999. – 391 с.
6. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В.В. Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.
7. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю.В.Визильтер, С.Ю. Желтов, В.А. Князь, А.Н. Ходарев, А.В. Моржин. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 464 с.
8. Атамаян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин : учебное пособие для втузов / Э. Г. Атамаян. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2005. – 415 с.
9. Сергеев, А.Г. Сертификация : учебное пособие для студентов вузов / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев. – М. : Издательская корпорация «Логос», 2000. – 248 с.
10. ГОСТ 24851–81. Калибры гладких для цилиндрических отверстий и валов.
11. ИСО 1938–71. Допуски и посадки по системе ИСО. Часть 2. Контроль гладких деталей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ КУРСА	4
1.1. Основные понятия	4
1.2. Классификация средств измерений	9
1.3. Погрешности измерений и характеристики средств измерений	12
1.4. Виды измерений	19
1.5. Методы измерений	21
1.6. Виды контроля	25
1.7. Виды испытаний	27
2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	37
2.1. Измерение электрических величин аналоговыми электромеханическими измерительными приборами	37
2.2. Измерение параметров элементов электрических цепей	40
2.2.1. Общие сведения	40
2.2.2. Метод вольтметра-амперметра	41
2.2.3. Электронные омметры	46
2.2.4. Измерительные мосты постоянного тока	48
2.2.5. Измерительные мосты переменного тока	50
2.2.6. Резонансный метод измерения	52
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	54
3.1. Механические средства измерения	55
3.1.1. Линейка измерительная металлическая	56
3.1.2. Штангенциркуль	56
3.1.3. Микрометр гладкий	59
3.1.4. Индикаторы часового типа	62
3.1.5. Контроль калибрами	63
3.2. Оптико-механические средства измерения длины	64
3.3. Пневматические методы контроля размеров	70
3.4. Средства измерения линейных размеров с электрическим преобразованием	72
4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ	84
4.1. Контроль плоскостности	85
4.1.1. Контроль при помощи поверочной плиты или линейки	85
4.1.2. Контроль при помощи гидростатического уровня ...	88

4.1.3. Контроль при помощи зрительной трубы	88
4.2. Технология измерения отклонений от круглости	89
4.2.1. Контроль при помощи образца круглости	89
4.2.2. Контроль круглости по радиальным биениям	90
4.2.3. Контроль накладным кругломером	91
4.3. Контроль формы при помощи координатно- измерительной машины	91
4.4. Особенности информационно-измерительных систем, оснащенных системой технического зрения	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
ГЛОССАРИЙ	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	101

Учебное издание

ДИВИН Александр Георгиевич,
ПОНОМАРЕВ Сергей Васильевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Часть 1

Учебное пособие

Редактор Т.М. Г л и н к и н а
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Ф и л а т о в а

Подписано в печать 27.04.2011
Формат 60 × 84/16 6,04 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 180

Издательско-полиграфический центр ГОУ ВПО ТГТУ
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14