

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

В. А. Олещук, А. С. Верещагина

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ
И КОНТРОЛЯ**

Утверждено в качестве учебного пособия
Учёным советом Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Комсомольск-на-Амуре
2015

УДК 006.91
ББК 30.10я7
О-539

Рецензенты:

Кафедра информационной безопасности, информационных систем
и физики ФГБОУ ВПО «АмГППУ», и.о. зав. кафедрой
кандидат педагогических наук, доцент Н. Я. Салангина;
М. Н. Кость, инженер по метрологии
Комсомольского-на-Амуре филиала ЗАО «ГСС»

Олещук, В. А.

О-539 Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб.
пособие / В. А. Олещук, А. С. Верещагина. – Комсомольск-на-Амуре :
ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 92 с.
ISBN 978-5-7765-1134-9

Приведены основные понятия метрологии, рассмотрены методы и средства измерительной техники, а также особенности измерений различных электрических и неэлектрических величин. Рассмотрены устройства, метрологические характеристики, принципы действия параметрических и генераторных преобразователей, а также рекомендуемые области их применения. Описаны применяемые в настоящее время в промышленности методы измерения различных параметров. Изложены принципы построения измерительных систем и приборов, особенности их проектирования, виды модуляции измерительных сигналов, законы передачи, преобразования и сохранения измерительной информации.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 221700.62 – «Стандартизация и метрология» очной и заочной форм обучения.

УДК 006.91
ББК 30.10я7

ISBN 978-5-7765-1134-9

© ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ.....	4
1.1. Основные понятия и определения курса	4
1.2. Этапы процесса контроля.....	7
1.3. Классификация систем контроля.....	8
1.3.1. Классификация по уровню автоматизации процесса контроля	8
1.3.2. Классификация по характеру воздействия на технологический процесс	10
1.3.3. Классификация по назначению	20
2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	20
2.1. Датчики	21
2.2. Признаки, характеризующие датчиковую аппаратуру	21
2.3. Классификация датчиков.....	24
2.3.1. Классификация по типу воспринимающих элементов	25
2.3.2. Классификация по типу задающих элементов.....	26
2.3.3. Классификация по необходимости использования источника питания	27
2.3.4. Классификация по способу преобразования измерительного сигнала.....	27
3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	79
3.1. Классификация приборов.....	79
3.2. Общие детали приборов	83
3.2.1. Корпус	83
3.2.2. Отсчётное устройство	83
3.2.3. Корректор	86
3.2.4. Успокоители.....	86
3.3. Приборы для измерения веса	86
3.4. Приборы для измерения тепловых величин.....	87
3.5. Приборы для измерения неэлектрических величин	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	91

ВВЕДЕНИЕ

Анализ технологических процессов изготовления любого изделия показывает, что процесс контроля параметров и характеристик изделия на всех стадиях его производства является наиболее трудоёмким. Качество выпускаемой продукции в значительной мере определяется рациональной организацией процедуры контроля, т.к. одной из сложнейших проблем при обработке изделий в серийном и единичном производстве является их контроль.

Процесс контроля является неотъемлемой частью любого технологического процесса. Его основной задачей является управление качеством выпускаемой продукции. В ходе контроля определяется годность детали или изделия в целом для дальнейшего использования. В процессе изготовления изделия, его испытаний и эксплуатации необходимо контролировать огромное количество параметров и характеристик. Средства измерения, используемые в процессе контроля, должны обеспечивать объективность, требуемую точность измерений и высокую производительность труда. Кроме того, у потребителя пользуется спросом высокотехнологичная продукция, снабжённая автоматическими средствами управления и диагностики. Следовательно, появилась необходимость в разработке и внедрении таких систем контроля характеристик изделия (автомобиля, самолета, яхты, стиральной машины и т.д.), которые обеспечивают возможность работы этого изделия в автоматическом режиме самоподстройки и саморегулировки.

Контроль, как правило, составляет значительную долю затрат времени на изготовление любого изделия.

Устойчивость производственного процесса и всей производственной системы в целом может быть обеспечена только при условии комплексного подхода к процедуре контроля.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ

1.1. Основные понятия и определения курса

Измерение – нахождение физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств. Абсолютные измерения основаны на прямых измерениях основных величин. Относительные измерения определяют отношение измеряемой величины к одноименной величине, играющей роль единицы или принятой за исходную.

Контроль – процесс, состоящий в установлении соответствия заданного и действительного (полученного в процессе измерения) параметров. Проверка соответствия заканчивается принятием решения: «Соответствует»

норме – не соответствует норме», «изделие годное – изделие бракованное».

Технический контроль – проверка соответствия продукции установленным техническим требованиям. При контроле размеров устанавливают, находится ли физическая величина между двумя заданными границами (в пределах поля допуска).

Приёмочный контроль – контроль готовой продукции, по результатам которого принимается решение о её пригодности к поставке и использованию.

Сортировка – распределение измеряемой величины по группам. Граница группы определяется размером, вероятность попадания которого в смежные группы равна 0,5. Разность размеров, соответствующих границам смежных сортировочных групп, называется интервалом сортировки.

Физическая величина – особенность физических объектов или явлений, общая для них в качественном отношении и используемая для количественного выражения. Например: диаметр, масса, скорость, длина.

Размер физической величины – количественное выражение конкретной физической величины. Например: диаметр отверстия, габаритные размеры, толщина пластины.

Действительный размер – размер, установленный измерением с допустимой погрешностью. Чем меньше погрешность, тем в большей степени действительный размер приближается к истинному, идеально отображающему количественное выражение физической величины.

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

Измерительный прибор – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Показывающий измерительный прибор – измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний и предназначенный для информирования наблюдателя.

Цифровой измерительный прибор – измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Аналоговый измерительный прибор – измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины.

Измерительный преобразователь – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для её

передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не подающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь может входить в состав измерительного прибора (измерительной системы, установки) или применяться вместе с каким-либо средством измерения.

Измерительная система – совокупность средств измерений и дополнительных устройств, соединённых между собой каналами связи. Она предназначена для автоматической обработки, передачи и использования измерительной информации в автоматических системах управления.

Измерительная цепь средств измерений – совокупность преобразовательных элементов средств измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. Структурная схема измерительной цепи отображает характер её построения и соподчинённость элементов, входящих в цепь.

Измерительная информация – информация о значениях измеряемых физических величин.

Измерительный сигнал – сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной.

Устройства отображения информации – это шкалы, индикаторы, мониторы, графопостроители.

Принцип действия средств измерений – физическое явление, положенное в основу построения средств измерений данного вида.

В измерительной технике встречается большое количество физических величин, подлежащих измерению, при этом реализуется большое число схем, используемых для реализации процесса измерения. Часто измеряемая величина определяется на основе измерения других параметров, функционально связанных с искомой. Поэтому всегда следует различать цель измерения и те вспомогательные параметры, которые необходимо непосредственно измерить. С учётом цели и задач объектов измерения, а также всех параметров, функционально связанных с измеряемой величиной, различают следующие виды измерения: *прямое, косвенное, совокупное, совместное*.

Прямое измерение – это такой вид измерения, при котором искомая величина находится с помощью измерительного средства.

При прямом измерении выполняется следующая функциональная зависимость: $Y = X$, т.е. цели и задачи измерения совпадают. Прямое измерение является наиболее распространённым видом измерения.

Косвенное измерение – такой вид измерения, при котором искомая величина находится путём прямого измерения ряда параметров, связанных с искомой величиной функциональной зависимостью.

Косвенный метод измерения используется в следующих случаях:

- когда применение прямого измерения невозможно;

- когда необходимо получить высокую точность результатов измерения.

Совокупный метод – одновременное измерение одноимённых величин.

Совместный метод – одновременное измерение неоднородных величин.

Кроме этого различают **статические и динамические** методы измерения, т.е. постоянные во времени и переменные во времени.

Кроме того, в измерительной технике применяются следующие методы измерения:

- непосредственной оценки;
- сравнения с мерой;
- дифференциальный;
- нулевой;
- совмещения;
- совпадения.

При **непосредственном методе измерения** (непосредственной оценки) результат измерения определяется по отчётному устройству средства измерения. При использовании метода непосредственной оценки точность результата измерения зависит от метрологических характеристик СИ. Этот метод наиболее распространён в измерительной технике.

При методе **сравнения с мерой** измеряемую величину время от времени (дискретно) или постоянно сравнивают с мерой (образцовой деталью, эталоном). Результаты сравнения оценивают по сравнивающему устройству.

1.2. Этапы процесса контроля

Процесс контроля состоит из следующих этапов (рис. 1.1):

- измерение;
- сравнение (анализ);
- выводы.



Рис. 1.1. Блок-схема процесса контроля

На первом этапе происходит измерение контролируемого параметра (размера) с помощью различных СИ или измерительных приборов.

На втором этапе выполняется сравнение результата, полученного в процессе измерения, с заданными значениями контролируемого параметра

или размера. Выявляется, находится ли данный параметр или размер в пределах поля допуска или выходит за него. В системах диагностики выясняется тенденция изменения контролируемых параметров или размеров по ходу технологического процесса.

На этом этапе определяется точность обработки и решается вопрос получения годной детали, этот же этап оказывает решающее влияние на производительность процесса обработки.

На третьем этапе принимается решение по результатам измерения. Если значения контролируемого параметра или размера выходят за пределы поля допуска, происходит разбраковка уже готового изделия, осуществляется поднастройка оборудования, регулировка параметров технологического процесса. Самым простым решением является решение о прекращении работы и вызове наладчика или оператора.

1.3. Классификация систем контроля

Применяемые в промышленности разнообразные средства контроля можно классифицировать по следующим признакам:

- по уровню автоматизации процесса контроля;
- характеру воздействия на технологический процесс;
- назначению.

1.3.1. Классификация по уровню автоматизации процесса контроля

В зависимости от степени участия человека в процедуре контроля и времени, затрачиваемого на ручные операции, различают следующие виды контроля:

1) *Ручной контроль* – все три этапа процесса контроля полностью выполняются человеком с помощью различных СИ. Рабочий или контролёр вручную с помощью измерительных инструментов, механизированных приспособлений производит измерение требуемого параметра, сравнивает полученный результат с заданным или нормативным значением контролируемого параметра, анализирует и делает выводы о результатах контроля.

Ручной контроль характеризуется низкой производительностью, значительным влиянием на результаты контроля «субъективных» факторов (квалификации контролёра, его внимания, физиологического состояния и т.д.) и условий работы. Можно отметить и другие недостатки. Например, для увеличения производительности контроля часто применяются различные калибры. При использовании в процессе контроля калибров проверяется не действительное значение измеряемого параметра, а лишь принадлежность измеряемой величины к категории годности или дефектности.

Такой контроль часто приводит к перебраковке и в тоже время не исключает пропуск брака.

Кроме того, измерение некоторых параметров вообще исключает возможность использования ручного контроля. Например, при измерении температуры расплава металла в мартеновской печи, качества сварных швов, электрических параметров, скорости вращения шпинделя станка и т.д.

2) *Автоматизированный* – это такой контроль, при котором часть функций процесса контроля выполняется человеком (базирование, транспортировка на позицию контроля, анализ результатов контроля, принятие решений на основе полученных результатов и др.), при условии что оставшаяся часть функций (например, измерение, подналадка и т.д.) выполняется автоматически специальными устройствами и механизмами.

Основным этапом процесса контроля является измерение. Чаще всего в автоматизированных системах контроля без участия человека выполняется именно измерение.

К простейшим автоматизированным средствам измерения можно отнести ручные измерительные универсальные приборы с цифровым отсчётом, которые ранее были основаны на механическом принципе действия: штангенциркули, микрометры, измерительные головки и т.д. Сочетание устоявшихся элементов конструкции удобных ручных приборов с цифровой электронной техникой не только облегчает и упрощает считывание показаний, снижает погрешность отсчёта за счёт уменьшения дискретности показаний и повышает объективность измерений, которые в данном случае практически не зависят от квалификации и остроты зрения оператора, но и расширяет функциональные возможности ручных приборов.

В конструкцию многих приборов введены:

- «плавающий ноль», обеспечивающий сброс показаний и установку начала отсчёта в любой точке диапазона измерений;
- кнопка памяти, позволяющая сохранять результаты предыдущего измерения на определённое время, что, в частности, необходимо для измерения в труднодоступных местах;
- малогабаритный микропроцессор в виде БИС, обеспечивающий элементарную обработку результатов измерений, например, нахождение экстремального и среднеарифметического размера.

Многие приборы имеют специальные разъёмы для подключения к стандартным микрокалькуляторам или ЭВМ с целью обработки результатов измерений и работают как от автономного источника питания, так и от электросети.

В качестве примера на рис. 1.2 показан ручной электронный прибор для автоматизации процесса измерения параметров шероховатости.

Прибор снабжён устройством печатания результатов измерений.

Применение автоматизированных приборов и приспособлений в производственных условиях позволяет значительно повысить производительность и качество процесса контроля.

Степень участия человека в процедуре автоматизированного контроля определяется прежде всего экономической целесообразностью, финансовыми возможностями предприятия.

3) *Автоматический* – все три этапа процесса контроля выполняются без участия человека с помощью специальных средств измерений.

Система автоматического контроля (САК) – это комплекс устройств, осуществляющих автоматический контроль одной или нескольких измеряемых величин. В подавляющем большинстве случаев САК совмещают функции контроля и измерения и являются контрольно-измерительными, т.е. осуществляют также процесс измерения с формированием результата в виде численного значения измеряемой величины или в виде аналогового сигнала, используемого в системах автоматического управления процессом или оборудованием.



Рис. 1.2. Электронный прибор для измерения параметров шероховатости

Основная цель внедрения автоматического контроля – сокращение времени, затрачиваемого на контроль, устранение субъективности оценки качества контролируемого параметра, автоматическая поднастройка параметров технологических процессов и оборудования.

Экономическая эффективность автоматического контроля зависит от конкретных условий производства.

1.3.2. Классификация по характеру воздействия на технологический процесс

В зависимости от характера воздействия на ход технологического процесса и решаемых задач различают следующие виды контроля:

1) *Пассивный контроль*. Пассивным, или приёмочным, контролем называют контроль готовой продукции, при котором принимают решения о её пригодности к дальнейшему использованию. В процессе пассивного контроля происходит разбраковка продукции на «годное изделие», «брак исправимый», «брак неисправимый». Разбраковка (сортировка) деталей производится с большим сдвигом во времени после их изготовления.

Полученная информация используется для регулирования процесса при значительной величине периода подналадки.

Основное назначение пассивного контроля – отделить бракованные детали, не допуская их проникновения на сборку, и обеспечить таким способом качество продукции. Средства пассивного контроля не воздействуют непосредственно на ход технологического контроля. Пассивный контроль не предупреждает появление брака.

Пассивный контроль только констатирует результаты измерения, не влияя на ход технологического процесса, состояние объекта или среды при возникновении отклонений.

Как правило, пассивный (приёмочный) контроль выполняется в специализированных контрольных отделениях – отделениях технического контроля (ОТК), оснащённых различными средствами измерения – после завершения обработки или части технологического процесса.

Оснащённость таких отделений определяется метрологической службой предприятия.

Выбор метрологических характеристик средств измерения (инструментов и приборов), их необходимое количество, степень автоматизации, конструктивные особенности, стоимость и т.п. определяются следующими факторами:

- конструктивными и технологическими особенностями выпускаемой продукции;
- типом производства, т.е. производительностью производственных подразделений (участков, цехов);
- гибкостью производства, т.е. насколько часто происходит обновление выпускаемой продукции;
- финансовыми возможностями предприятия.

На рис. 1.3 показан электронный микрометр, предназначенный для автоматизации процесса пассивного контроля, оснащённый мини-процессором, который позволяет произвести статистическую обработку результатов.

Подключённый принтер даёт возможность простой, быстрой и бесшумной распечатки данных.

Автоматизированные мерительные инструменты позволяют свести до минимума влияние субъективных факторов на точность измерений, повысить производительность процесса контроля, кроме того, они являются универсальными.

Помимо измерительных инструментов ОТК оснащаются специальными контрольными приспособлениями.

На рис. 1.4 показано специальное автоматизированное контрольное приспособление на базе прибора для измерения отклонений от формы.



Рис. 1.3. Электронный микрометр, оснащённый мини-процессором и принтером

Прибор имеет большой дисплей и встроенный принтер. Микропроцессор прибора позволяет оперативно обрабатывать результаты измерения.

Простой в эксплуатации, универсальный прибор позволяет значительно увеличить эффективность пассивного контроля.

Применение пассивных САК резко снижает количество работников, осуществляющих технологический контроль на производстве, позволяет значительно повысить производительность и качество контроля.

В некоторых случаях, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий или при освоении новой продукции, для сокращения времени переналадки приёмочный контроль выполняется непосредственно на рабочем месте. В этом случае к измерительным средствам предъявляется ряд дополнительных требований:

- удобство в эксплуатации;
- возможность регистрации и записи результатов измерений.

Автоматизация пассивного контроля в условиях *массового* производства сегодня с технической стороны не представляет особой сложности, т.к. этот процесс зародился достаточно давно, его принципы отработаны и хорошо известны.

В условиях массового производства широко применяют контрольно-сортировочные много- и однопозиционные полуавтоматы и автоматы.



Рис. 1.4. Специальное контрольное приспособление для измерения отклонений от формы

Контрольные полуавтоматы представляют собой устройства, обеспечивающие автоматическое выполнение контрольной операции, но при этом загрузка деталей на измерительную позицию и выгрузка их осуществляются вручную.

С помощью *контрольных автоматов* все элементы процесса контроля, включая загрузку и выгрузку, выполняются автоматически. В зависимости от числа измерительных позиций контрольные автоматы могут быть одно- и многопозиционными.

В условиях *гибкого*, переналаживаемого производства повышение уровня автоматизации процесса пассивного контроля требует принципиально новых подходов.

Особое место среди автоматических средств пассивного (послеоперационного) контроля в условиях гибкого производства занимают координатно-измерительные машины с ЧПУ, позволяющие автоматизировать многопараметрический контроль сложных корпусных деталей даже в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Координатно-измерительными машинами (КИМ) с ЧПУ называют автоматические средства для определения линейных и угловых размеров, а также отклонений формы и расположения поверхностей и осей сложных корпусных деталей.

Процесс пассивного контроля, осуществляемый с помощью КИМ, является полностью автоматическим.

В настоящее время на предприятиях применяется широкая номенклатура КИМ, имеющих различные функции и возможности. На рис. 1.5 показана стационарная КИМ, предназначенная для послеоперационного контроля деталей различной сложности.

Крупногабаритные КИМ устанавливаются в специализированных помещениях, а сам процесс контроля строго регламентирован.

Стационарные КИМ применяются для автоматического пассивного контроля крупногабаритных деталей, имеющих сложный профиль. Применение таких измерительных комплексов позволяет на несколько порядков повысить производительность контроля, снизить его себестоимость.

Последние годы в промышленности широко используются переносные КИМ, которые позволяют выполнять пассивный контроль изделий непосредственно в производственных условиях.

На рис. 1.6 показан процесс пассивного контроля крупногабаритной детали сложного профиля переносной координатно-измерительной машиной с ЧПУ типа «рука».



Рис. 1.5. Стационарная КИМ

На заднем плане хорошо виден монитор компьютера, с помощью которого записываются, обрабатываются и представляются в форме, удобной для анализа, результаты контроля.

Контроль параметров изделия непосредственно в цехе позволяет оперативно получить информацию о выполнении планового задания.

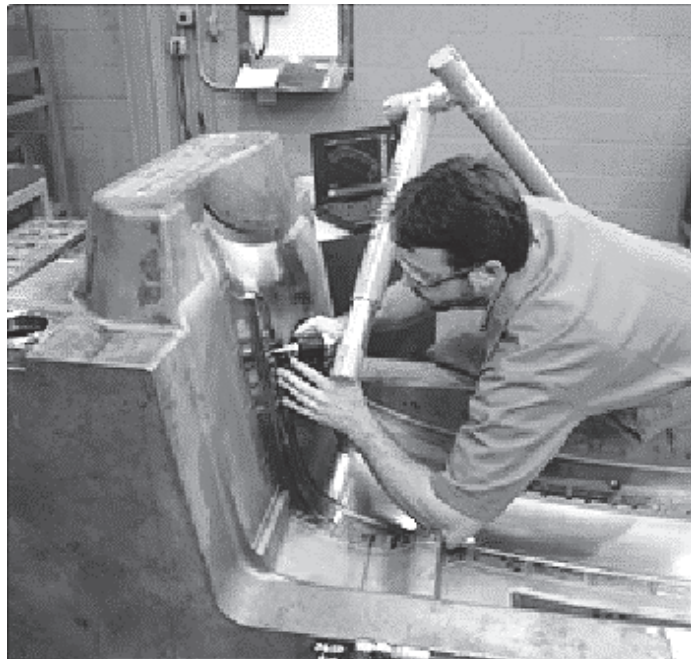


Рис. 1.6. Процесс пассивного контроля крупногабаритной детали с помощью КИМ с ЧПУ типа «рука»

2) *Активный контроль*. Активным, или управляющим, контролем называют измерение параметров объекта, обрабатываемой заготовки, технологического процесса, режущего инструмента и т.д., которое осуществляется по ходу технологического процесса. Результаты измерений используют для управления технологическим процессом, осуществления подналадки.

Для таких систем характерен контроль хода технологического процесса, состояния объекта управления, всех его блоков и узлов.

Процесс активного контроля может быть проиллюстрирован блок-схемой (рис. 1.7).

Для осуществления активного контроля необходимо наличие обратной связи – информации о действительном состоянии объекта или значениях контролируемого параметра. Эта информация получается в процессе измерения параметров и характеристик системы или объекта.

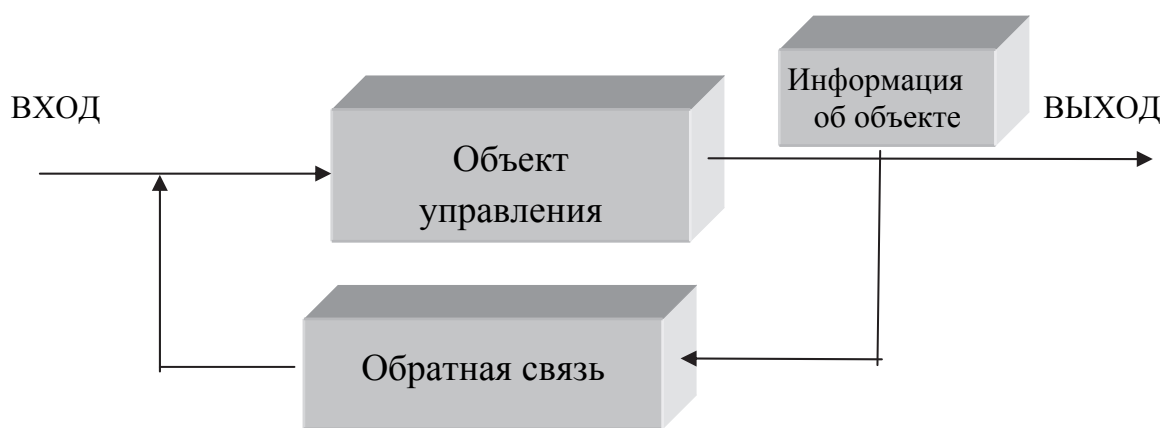


Рис. 1.7. Блок-схема процесса активного контроля

На вход системы управления объектом (станка, самолёта, мартеновской печи и т.д.) подаётся управляющая информация. Задаются сведения о характере движения рабочих органов, их синхронизации, режимах работы (например, режимах резания), различные технологические и другие команды, необходимые для получения требуемых характеристик изделия (например, геометрических размеров, требуемых параметров шероховатости, допустимых отклонений и т.д.). Такая информация, как правило, содержится в технологии.

В процессе изготовления изделия, т.е. по ходу технологического процесса, возникают различные отклонения (износ инструмента, изменение температуры в зоне обработки, повышение уровня вибраций и т.д.), которые могут привести к браку. В системах активного контроля имеется дополнительный канал информации – канал обратной связи. Источником информации о действительном состоянии объекта, о фактическом положе-

нии и скорости движения рабочих органов, деформациях в технологической системе, температуре в зоне резания и т.д. является сам объект или технологический процесс.

Таким образом, система обратной связи позволяет вести постоянный контроль качества выполнения технологического процесса и состояния объекта. В том случае, если значение действительного параметра отклоняется от его заданного значения, происходит подналадка системы.

Если оператор вручную управляет технологическим оборудованием в соответствии с разработанной технологией, он посредством сигналов образует цепь управления технологическим оборудованием. По ходу выполнения технологического процесса оператор фиксирует фактическое выполнение команд управления, образуя тем самым цепь обратной связи.

Например, информацию о состоянии режущего инструмента квалифицированный рабочий может получить по целому ряду косвенных признаков, используя различные информационные каналы:

- зрительный – оператор видит, что стружка меняет свой цвет;
- слуховой – он слышит, что появляется высокий звук;
- обоняние – появляется запах разогретого металла;
- тактильный – появляются дополнительные вибрации, изменяется шероховатость обрабатываемой поверхности.

Эта информация (обратная связь) даёт возможность оператору сделать качественную оценку происходящим в зоне резания процессам. На основании полученной совокупной информации он принимает решение – заменить затупившийся инструмент или изменить режимы резания. Таким образом, оператор постоянно корректирует ход технологического процесса для обеспечения требуемого качества изделия и исключения появления брака.

Однако эта оценка носит исключительно субъективный характер, в значительной степени зависит от квалификации оператора и не даёт количественной характеристики величине износа режущего инструмента.

Системы активного автоматического контроля в процессе обработки выполняют задачу управления (регулирования) производственным процессом, освобождая оператора от выполнения этих функций и обеспечивая заданную точность обработки. Название «*активный*» этот вид контроля получил по степени влияния на ход технологического процесса обработки.

При обработке деталей на металлорежущих станках погрешности, вызываемые износом инструмента, силовыми и тепловыми деформациями технологической системы, приводят к рассеиванию размеров деталей, а подчас и выходу их за пределы допуска. Предвидеть влияние этих погрешностей заранее и учесть их при наладке станка или заложить в управляющую программу станка с ЧПУ чрезвычайно сложно. Применение активного контроля в этом случае позволяет значительно повысить технологи-

ческую точность за счёт компенсации возникающих погрешностей. В условиях современного автоматизированного производства при обработке на станках с ЧПУ рабочий не может вмешиваться в ход технологического процесса. Современные модели высокопроизводительных, высокоскоростных станков имеют кабинетную компоновку, и оператор не имеет доступа в рабочую зону.

Такие станки снабжаются системами автоматического активного контроля. В устройствах автоматического активного контроля процесс получения и обработки информации об объекте контроля автоматизирован, т.е. совершается по заданной программе без участия человека. Для получения информации обратной связи используются датчики различного принципа действия, преобразователи измерительных сигналов. Если выявляются нарушения нормального хода процесса, проявляющиеся в выходе контролируемых параметров объектов контроля за установленные границы, то производится подналадка, т.е. регулируется ход процесса в автоматическом режиме.

Оператор и наладчик освобождаются от непрерывного наблюдения за ходом технологического процесса, исключается возможность проявления «субъективных» факторов. Повышается производительность труда за счёт сокращения вспомогательного времени и точность обработки.

Иногда активный контроль отождествляют с автоматическим регулированием размеров. Они действительно схожи, т.к. при их осуществлении с помощью средств измерений значения контролируемых размеров сравниваются с их первоначально заданными значениями. В том и другом случае имеются так называемые «размерные обратные связи». Это означает, что информация, полученная при измерении детали, передаётся на системы управления станком, т.е. на вход технологической системы. Однако понятие «активный контроль» гораздо шире по сравнению с «регулированием размеров», т.к. далеко не всякую разновидность активного контроля можно отнести к регулированию.

Все средства активного контроля, применяемые при обработке деталей на металлорежущих станках, можно разделить:

- на устройства для прямых методов измерений;
- устройства для косвенных методов измерений.

Приборами, реализующими первый метод, контролируют непосредственно размер изготавливаемой детали.

На многоцелевых станках контроль геометрических параметров обрабатываемых заготовок обычно выполняется непосредственно на станке специальными датчиками – щуповыми головками (рис. 1.8).

Датчик устанавливается в одно из гнезд инструментального магазина или револьверной головки и как инструмент автоматически подаётся в рабочий шпиндель. Контролируется размер обрабатываемой заготовки, и в

зависимости от его значения путём передачи воздействий от исполнительного элемента на рабочий орган станка переключаются режимы, производится подналадка или прекращается обработка.

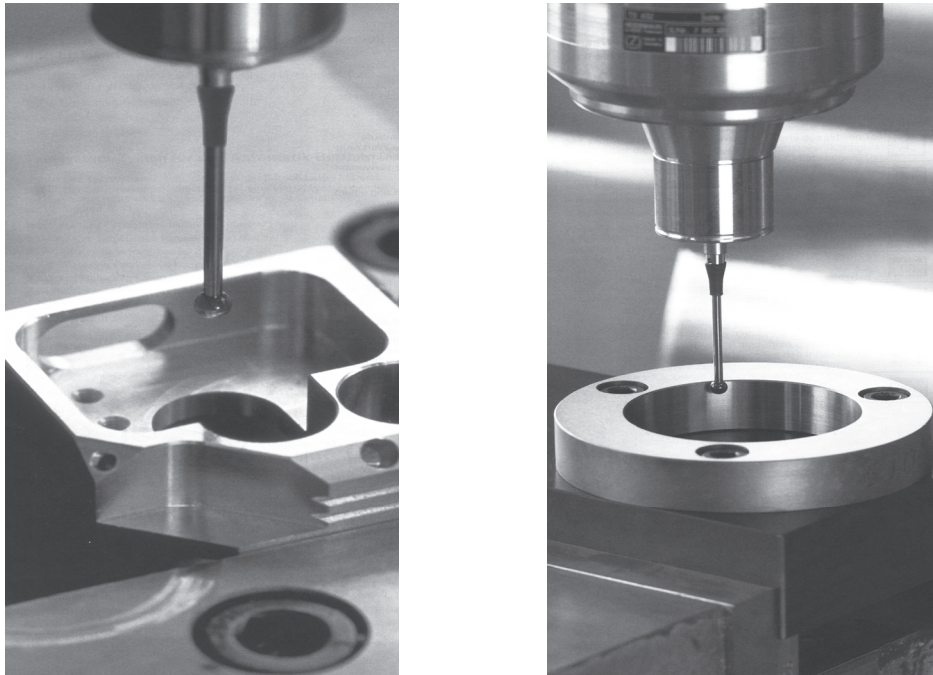


Рис. 1.8. Активный контроль геометрических параметров заготовки щуповой головкой

Конструкций измерительных щуповых головок как отечественного, так и зарубежного производителя в настоящее время в промышленности используется множество. Конструктивно они отличаются принципом действия, возможностями, габаритами, стоимостью и т.д.

При *косвенном* методе ход технологического процесса и, следовательно, качество готового изделия могут контролироваться следующим образом:

- определением крутящего момента на валу двигателя;
- определением сил резания при обработке;
- проверкой стойкости инструмента;
- уровнем вибраций и т.д.

Современные высокоскоростные многоцелевые металлорежущие станки оснащены самыми современными средствами активного автоматического контроля. При этом для контроля того или иного параметра применяются датчики, имеющие различные принципы действия, каждый из которых выполняет свою функцию. Микропроцессор станка анализирует информацию, поступающую от всех датчиков, и вырабатывает стратегию корректировки.

Одной из характеристик протекания процесса обработки заготовки является величина крутящего момента в процессе резания. Увеличение величины крутящего момента может происходить по следующим причинам: износ режущего инструмента, отклонение припусков заготовки от расчётных, несанкционированное увеличение режимов резания и т.д. Для контроля крутящего момента измеряют силу тока, потребляемого электродвигателем привода главного движения, который пропорционален крутящему моменту. Для этого на валу двигателя устанавливается *специальный датчик*, позволяющий отслеживать динамику изменения величины крутящего момента.

Для измерения осевой силы резания, например при сверлении, в одной из подшипниковых опор шпинделя, воспринимающей осевую нагрузку, устанавливается *тензометрический датчик*, который выдаёт сигналы, пропорциональные силе резания.

Стойкость инструмента контролируют сравнением действительного времени работы инструмента со стойкостью инструмента данного типа, которая определена опытным путём и значение которой введено в систему управления. При работе инструмента время резания считывается с первоначально введённой стойкости, и при достижении предельного значения стойкости выдаётся соответствующий сигнал на блокировку или замену инструмента.

Физический износ инструмента контролируется с помощью контактных датчиков или с помощью лазерного сканера и т.д.

При косвенном методе значение проверяемого размера оценивается по контролируемому положению режущей кромки инструмента, исполнительных органов станка либо по положению поверхности детали по отношению к базе установки прибора, т.е. в измерительную цепь прибора помимо размера контролируемой детали включаются также размерные параметры самого станка. Следует учитывать, что косвенный метод измерения обладает большими погрешностями, чем прямой, т.к. на его точность влияют тепловые и силовые деформации технологической системы.

Внедрение систем активного контроля является необходимым условием повышения уровня автоматизации технологических процессов и всего производства в целом.

Необходимо отметить, что внедрение систем активного контроля не исключает применения пассивного контроля. Повышения эффективности процесса контроля в целом и, следовательно, повышения качества изделия в целом можно достичь только при условии экономически обоснованного сочетания систем.

3) *Диагностика* – это контроль текущего состояния объекта или среды с целью выработки алгоритма по устранению отклонений. Основной

задачей диагностики является исключение вероятности возникновения отклонения.

4) *Тестовый* – контроль с помощью установления предельно-допустимых параметров. Целью тестового контроля является исключение вероятности достижения требуемым параметром критического значения, которое может повлечь за собой появление брака или аварийной ситуации. В рекомендациях по применению средств контроля, измерений и испытаний оговаривается область рекомендуемого применения. Тестовый контроль является одним из ключевых видов контроля, обеспечивающих надёжность, долговечность средств измерений и сохранение их метрологических характеристик.

1.3.3. Классификация по назначению

1) Меры – средства для воспроизведения физической величины в единицах измерения либо в виде дольных и кратных единиц. Меры в виде отдельных элементов составляют набор.

2) Измерительный преобразователь – СИ, предназначенное для выработки измерительного сигнала измерительной информации в форме, удобной для восприятия наблюдателем, обработки, хранения и ввода в ЭВМ в том случае, если измерительная информация не может быть воспринята наблюдателем.

3) Измерительный прибор – СИ, предназначенное для выработки измерительного сигнала в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателя.

4) Измерительные информационные системы – это системы измерения, предназначенные для представления измерительной информации в автоматическом режиме в виде, удобном для использования в системах управления и регулировки.

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Система контроля *состоит из ряда элементов, каждый из которых выполняет определённую функцию.*

Однако в любой системе автоматического контроля независимо от её сложности и назначения можно выявить три основных элемента:

1) *Датчик* – измерительный элемент, представляющий собой различного типа преобразователи, изменяющие измерительный сигнал в форму, удобную для наблюдателя.

2) *Усилитель (модулятор)* – усилительно-преобразующее устройство, промежуточное звено, служащее для усиления и преобразования

(модуляции) измерительного сигнала в форму, удобную для управления процессом или оборудованием.

3) *Исполнительный элемент* – комплекс механизмов, непосредственно осуществляющих управление оборудованием или процессом.

Измерительный элемент измеряет величину контролируемого параметра и преобразует её в определённый сигнал. Например, термопара – датчик измерения разности температур – преобразует эту разность в электрический сигнал.

Сигнал от измерительного элемента поступает в усилитель, в котором он усиливается и воздействует на исполнительный элемент. Последний воспринимает сигнал, возникающий в результате измерения контролируемой величины, и реагирует на него. Происходит либо изменение режимов работы оборудования, либо его поднастройка. В качестве исполнительного элемента могут применяться различные приводы, механизмы станков, системы автоматики.

2.1. Датчики

Устройство, предназначенное для восприятия изменений размера контролируемой детали или параметра процесса и преобразования их в видимые перемещения указателя на шкальных приборах или в импульсы для управления системой сигнализации или системой управления рабочими органами станка, называется датчиком.

Датчик – это первичный преобразователь измеряемой величины.

Датчики должны удовлетворять общим требованиям, предъявляемым ко всем автоматическим устройствам, т.е. должны обладать чувствительностью, надёжностью в работе, стабильностью, быстродействием, помехозащищённостью и не оказывать влияния на измеряемый объект (намагничивание и царапины при контакте). Кроме того, датчики должны быть удобными в эксплуатации.

2.2. Признаки, характеризующие датчиковую аппаратуру

Во всех средствах активного и пассивного контроля в качестве измерительного устройства используют *первичные преобразователи (датчики)*. С помощью датчиков изменения контролируемого линейного размера преобразуются в сигнал, используемый для управления технологическим процессом.

Одним из самых первых датчиков, получивших широкое распространение в практике измерений и, как это ни удивительно, применяемых до сих пор, является крешерный прибор (рис. 2.1). С развитием огне-

стрельного оружия и в частности артиллерии возникла необходимость измерения давления пороховых газов при выстреле.

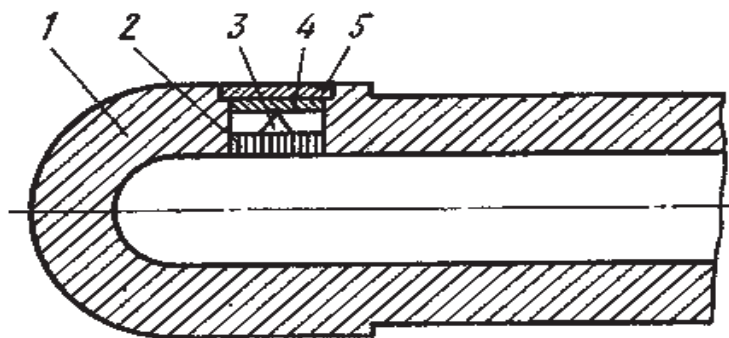


Рис. 2.1. Крешерный прибор: 1 – ствол орудия; 2 – поршень; 3 – пуансон; 4 – прокладка; 5 – заглушка

Эта задача решалась следующим образом: в стволе орудия *1* сверлили цилиндрическое отверстие, в которое вставлялся цилиндрический поршень *2* с заостренным коническим пуансоном *3*. Отверстие снаружи закрывали заглушкой *5*, а между пуансоном и заглушкой помещали пластическую прокладку *4*, которую пуансон деформировал при выстреле.

По геометрическим параметрам отпечатка судили о максимальной величине давления; для градуировки этого прибора к пуансону прикладывали силу известного значения, например, с помощью груза.

Этот датчик появился задолго до того, как были открыты средства передачи информации на расстояние при помощи электричества.

И хотя в настоящее время подавляющее большинство датчиков относится к электрическим преобразователям неэлектрических величин, именно этот «неэлектрический» датчик удобно использовать для выяснения совокупности основных отличительных признаков, характеризующих датчиковую аппаратуру.

Прежде всего отметим, что *датчик представляет собой часть измерительной системы*, имеющую самостоятельное конструктивное оформление, но вместе с тем обеспечивающую достижение полезного эффекта только при наличии всех других средств, входящих в систему.

Так, в нашем примере крешерный прибор представляет собой вполне самостоятельное, законченное техническое устройство.

Однако для получения информации с помощью такого устройства необходимо располагать еще двумя устройствами, входящими в эту систему:

- устройством измерения размера отпечатка;
- устройством градуировки крешерной прокладки.

Датчик осуществляет преобразование вида энергии сигнала, идущего от объекта, в другой вид, удобный для передачи информации в пространстве и хранения в течение определённого времени.

Рассматриваемый крешерный прибор преобразует изменение механической энергии (давления газов) в изменение химической энергии деформируемого материала прокладки. При этом нас интересует не столько энергетический аспект этого процесса, сколько возможности по использованию этих изменений энергетического состояния для передачи информации.

Таким образом, с энергетической точки зрения роль датчика заключается в том, чтобы отобрать некоторую мощность у объекта для создания измерительного сигнала и передать её с такими изменениями, которые не нарушили бы на всём пути следования сигнала адекватность модели и объекта.

Этим объясняется крайне нелогичная, на первый взгляд, последовательность изменения мощности сигнала при измерениях неэлектрических величин электрическими методами, когда сигнал сначала ослабляют во много раз, а затем вновь усиливают. Изменение вида энергии сигнала существенно изменяет как долю мощности шума, проникающего в каналы связи, так и возможности усиления сигнала в процессе этого и последующих преобразований. Вполне естественно, что этот мощный метод борьбы с искажениями в первую очередь нашёл применение в тех устройствах, которые находятся в наиболее тяжёлых условиях эксплуатации, т.е. в датчиках.

Наконец, следует отметить то обстоятельство, что *датчик всегда располагается в зоне объекта*, о котором мы хотим получить измерительные данные.

Этот наиболее очевидный признак считался рядом авторов единственно необходимым и достаточным признаком датчиковой аппаратуры, хотя очевидно, что и «не датчики» могут располагаться на объекте, например, телеметрическая система с автономной регистрацией целиком размещается на борту испытываемого самолета.

Таким образом, здесь необходимо подчеркнуть, что датчик, находясь на объекте или в зоне объекта, где действуют все неблагоприятно влияющие факторы, представляет собой, в отличие от электронной преобразующей аппаратуры, такую конструктивную *совокупность преобразователей*, которая обладает способностью воспринимать естественно закодированную (через значения физических параметров) информацию о состоянии объекта.

С учётом всего сказанного можно сформулировать следующее определение понятия «датчик».

Датчиком называется часть измерительной (или управляющей) информационной системы (ИИС), представляющая собой конструктивную совокупность измерительных преобразователей, включающую преобразователь вида энергии сигнала, размещённую в зоне действия влияющих факторов объекта и воспринимающую естественно закодированную информацию от этого объекта.

Так, рассмотренный выше крешерный прибор хотя и включает в себя преобразователь давления в усилие и регистрирующее устройство с обработкой информации в виде пуансона с пластичной прокладкой, составляет лишь часть ИИС. Рассматриваемый прибор располагают в зоне действия влияющих факторов объекта, в непосредственной близости от камеры орудия, где действуют и высокая температура, и термоудар, и вибрация. Вместе с тем он воспринимает естественно закодированную информацию объекта – давление газов при выстреле.

Таким образом, крешерный прибор обладает всеми признаками датчика, хотя и появился на заре развития измерительной техники.

В измерительной технике, в промышленности, в медицине и т.п. применяется огромное количество датчиков самого разного назначения, конструкции, принципа действия.

Принципом действия датчика называется физическое явление, положенное в основу работы датчика.

Выбор наиболее приемлемого для конкретной ситуации датчика возможен только на основании тщательного анализа всех достоинств и недостатков, присущих датчикам, которые могут быть применены для измерения данного размера или параметра.

Для этой цели следует воспользоваться классификацией датчиковой аппаратуры.

2.3. Классификация датчиков

Датчики классифицируются по следующим признакам:

- 1) по типу воспринимающих элементов;
- 2) типу задающих элементов;
- 3) необходимости использования источника питания;
- 4) способу преобразования измерительного сигнала.

2.3.1. Классификация по типу воспринимающих элементов

По типу воспринимающих элементов датчики подразделяются:

- на контактные;
- бесконтактные.

Измерение может производиться либо при непосредственном контакте измерительного устройства с контролируемым объектом (деталью, поверхностью, средой), либо без непосредственного контакта, т.е. на расстоянии.

Контактные датчики.

Принцип действия датчика, основанного на контактном методе измерения, заключается в том, что его измерительный элемент (щуп, губки, головка и т.п.) постоянно находится в непосредственном контакте с контролируемым объектом (поверхностью, средой и т.п.).

Например, при измерении размера заготовки, обрабатываемой на станке, штангенциркулем или микрометром, необходимо непосредственное соприкосновение заготовки и измерительных поверхностей штангенциркуля. При измерении напряжённого состояния объекта с помощью тензодатчиков, их необходимо наклеить на поверхность контролируемого объекта, т.е. обеспечить их непосредственный контакт с объектом.

К числу датчиков, принцип действия которых основан на контактном методе измерения, относятся:

- механические (штангенциркули, микрометры, индикаторы и т.п.);
- электрические (электроконтактные, ёмкостные, индуктивные, температурные, тензодатчики, пьезодатчики и т.п.).

Датчики, работающие на контактном методе измерения, имеют определённые достоинства и недостатки.

К достоинствам датчиков этого типа следует отнести: простоту конструкции, высокую точность измерения (при соблюдении правил эксплуатации), высокую надёжность, сравнительно невысокую цену.

Недостатками контактных датчиков являются:

- повышенный износ измерительного элемента, постоянно находящегося в контакте с измеряемым объектом;
- влияние на точность измерения наличия на поверхности контролируемого объекта загрязнения, частиц СОТС, мелкой стружки и т.п.;
- невозможность производить измерения в процессе обработки, т.е. при движении контролируемого объекта (при вращающемся шпинделе нельзя измерять заготовку) и т.п.

Бесконтактные датчики

В основу принципа действия датчика, работающего на *бесконтактном* методе измерения, положены различные физические явления. При работе такого датчика нет непосредственного контакта его элементов и

объекта измерения. К датчикам, работающим не бесконтактном методе измерения, можно отнести фотодатчики, звуковые датчики, гидравлические и пневматические, радиационные и некоторые электрические датчики.

Бесконтактные датчики находят широкое применение в промышленности. Выбор того или иного датчика зависит от тщательного анализа достоинств и недостатков, рекомендуемых областей применения.

Достоинствами бесконтактных датчиков являются:

- отсутствие непосредственного контакта измерительных элементов датчика с контролируемым объектом, а следовательно, отсутствие их износа;
- возможность измерения параметров процесса или объекта во время обработки (т.е. на высоких скоростях, при высоких температурах и т.п.);
- возможность выполнения неразрушающего контроля;
- возможность измерения параметров, которые нельзя измерить контактным методом (качество сварных швов, наличие внутренних повреждений объекта и т.п.);
- возможность измерения параметров на расстоянии (например, температуры в жерле вулкана и т.п.).

Недостатками бесконтактных методов измерения являются:

- необходимость применения специальной аппаратуры;
- зависимость точности измерения от параметров окружающей среды;
- необходимость преобразования результатов измерения;
- влияние на точность измерения различных наводок и шумов;
- высокая стоимость.

2.3.2. Классификация по типу задающих элементов

По типу задающих элементов датчики делятся:

- на предельные;
- амплитудные.

Предельные датчики служат для фиксации выхода размера из поля допуска. На выходе датчика измерительный сигнал имеет дискретные (прерывистые) значения.

Амплитудные датчики способны, кроме этого, измерить отклонения геометрической формы и взаимного расположения поверхностей. На выходе амплитудного датчика формируется гармонический сигнал (синусоида), который имеет три информационных параметра – амплитуду, частоту, фазу.

2.3.3. Классификация по необходимости использования источника питания

Для выработки измерительного сигнала и преобразования его необходима энергия. В зависимости от *потребности в источнике питания* датчики подразделяются:

- на параметрические;
- генераторные.

Для использования датчиков *параметрического типа* требуется источник питания, т.е. источник опорного сигнала. Параметрическими называют датчики, которые под воздействием измеряемой величины меняют какие-либо электрические параметры. В частности, к этим параметрам относят сопротивление, ёмкость, индуктивность, фазовый сдвиг и т.п.

В качестве источника питания могут использоваться батареи, аккумуляторы или сеть переменного тока. Подключение к сети может производиться напрямую или через блок питания. К датчикам такого типа относятся: некоторые конструкции механических датчиков, большинство электрических, пневматические, гидравлические и др.

Генераторные датчики под воздействием измеряемого физического параметра сами вырабатывают электрическую энергию, т.е. датчики этого типа в процессе работы сами вырабатывают измерительный сигнал. Они не нуждаются в источнике питания для работы. К генераторным датчикам относятся: термопары, пьезодатчики, некоторые типы электрических и фотодатчиков.

Большое количество измеряемых параметров, широта диапазона их изменения, разнообразие методов преобразования неэлектрической величины в её электрический эквивалент, реализуемых датчиками, требует применения самых различных способов преобразования величин, характеризующих контролируемые объекты (процессы), в измерительные сигналы, которые либо регистрируются соответствующими приборами, либо используются в системах управления различными объектами.

Измерительный сигнал – это сигнал, функционально связанный с измеряемой величиной с заданной точностью.
--

2.3.4. Классификация по способу преобразования измерительного сигнала

По способу преобразования измерительного сигнала датчики можно подразделить:

- 1) на механические;
- 2) электрические;
- 3) фотодатчики;

- 4) пневматические;
- 5) радиационные;
- 6) звуковые;
- 7) прочие.

Существующие преобразователи (датчики) информации о контролируемом объекте (среде, процессе) в измерительный сигнал основаны на различных принципах действия.

Принципом действия датчика является физическое явление, положенное в основу работы датчика, способ преобразования одного вида энергии в другой.

Механические датчики

К механическим можно отнести: штангенциркули, микрометры, калибры-скобы, калибры-пробки, индикаторы часового типа. Их достоинства: использование прямого измерения, простые условия эксплуатации, надёжность, невысокая стоимость. Недостатки – влияние субъективного фактора, износ измерительных элементов, невозможность проведения измерения по ходу технологической операции, невозможность передачи результатов измерения на расстояние и во времени. Все механические датчики основаны на контактном методе измерения, т.е. это датчики контактного типа.

Электрические датчики

Электрические датчики нашли широкое применение для измерения неэлектрических величин, например, размеров детали, веса изделия, уровня вибрации и т.п. В конструкциях датчиков этого типа используются самые различные явления.

Принцип работы рассматриваемых СИ основан на преобразовании изменений измеряемой физической величины в электрический сигнал, поскольку именно электрический сигнал может быть и аналоговым, и цифровым.

Кроме того, электрический сигнал используется как управляющий в системах управления, регулировки и настройки.

Электрическим датчиком называется датчик, в котором происходит преобразование изменения измеряемой физической величины в электрический сигнал на выходе.

Эти устройства состоят из первичного преобразователя и электронного блока, который с помощью соответствующей схемы усиливает сигнал и преобразует его в форму, удобную для индексации или регистрации.

Принцип измерения, положенный в основу работы того или иного датчика, определяет область его применения.

Наиболее распространёнными являются следующие электрические датчики:

- электроконтактные;
- ёмкостные;
- индуктивные;
- тензодатчики;
- пьезодатчики.

Электроконтактные датчики

Электроконтактные преобразователи (датчики) посредством замыкания или размыкания электрических контактов преобразуют линейные перемещения измерительного стержня (щупа) в электрические сигналы (команды). Они широко применяются в системах автоматического контроля благодаря простоте их конструкции, схемы включения и обслуживания. Это преобразователи дискретного действия.

По типу задающих элементов электроконтактные датчики подразделяются:

- на предельные;
- амплитудные.

Предельные датчики служат для фиксации выхода размера из поля допуска. Они осуществляют формирование сигналов по достижении контролируемым размером заданных предельных значений. На выходе датчика измерительный сигнал имеет дискретные (прерывистые) значения.

Амплитудные датчики применяются для контроля не только размеров, но и отклонений формы, профиля деталей. На выходе датчиков этого типа формируются сигналы, когда отклонение от размера или геометрической формы детали достигло допустимого значения.

В приборах активного контроля применяют только предельные электроконтактные преобразователи. Их же чаще применяют и в средствах автоматического контроля. Электроконтактные датчики (рис. 2.2) широко применяются в системах автоматизированного и автоматического как пассивного, так и активного контроля.

Датчик настраивается на предельные значения измеряемой величины. В том случае, если предельные значения не достигнуты, датчик не подаёт сигнала. Но как только измеряемый параметр достигает предельного значения или выходит за пределы поля допуска, подаётся соответствующий сигнал.

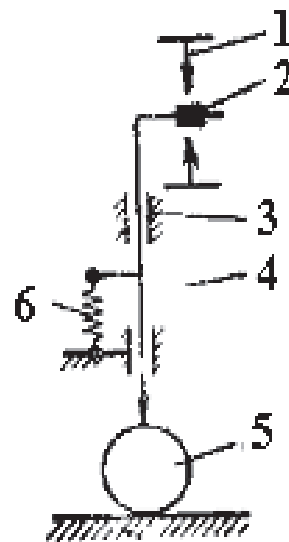


Рис. 2.2. Схема двухпредельного электроконтактного датчика

ющий сигнал, срабатывает блокирующее работу оборудование или производится подналадка.

Деталь 5 на измерительной позиции попадает под измерительный наконечник 4 датчика, который перемещается в зависимости от изменения размера детали в направляющих 3. Измерительный наконечник соединён с угловым рычагом 2, который располагается между двумя неподвижными регулируемыми контактами 1, расстояние между которыми устанавливается в соответствии с полем допуска на контролируемый размер. Измерительное усилие создаётся пружиной 6.

Если размер детали находится в поле допуска, то рычаг занимает нейтральное положение и не соприкасается ни с одним из контактов. Если размер детали достиг нижнего или верхнего предельного значения, то произойдёт замыкание одного из контактов датчика. Цепь замыкается, датчик фиксирует факт выхода размера за пределы поля допуска.

Настройку датчика осуществляют по блокам концевых мер с размерами, соответствующими предельным размерам контролируемой детали. Помещая под измерительный наконечник блоки концевых мер, поворотом настроечных микровинтов добиваются такого неустойчивого положения, при котором малейший выход размера за границы допуска вызывает замыкание соответствующих контактов.

Такие преобразователи широко применяют в многомерных контрольных приспособлениях, контрольно-сортировочных автоматах, на станках для автоматизации процесса контроля.

На рис. 2.3 показаны щуповые головки с электроконтактными датчиками, применяемые в промышленности.

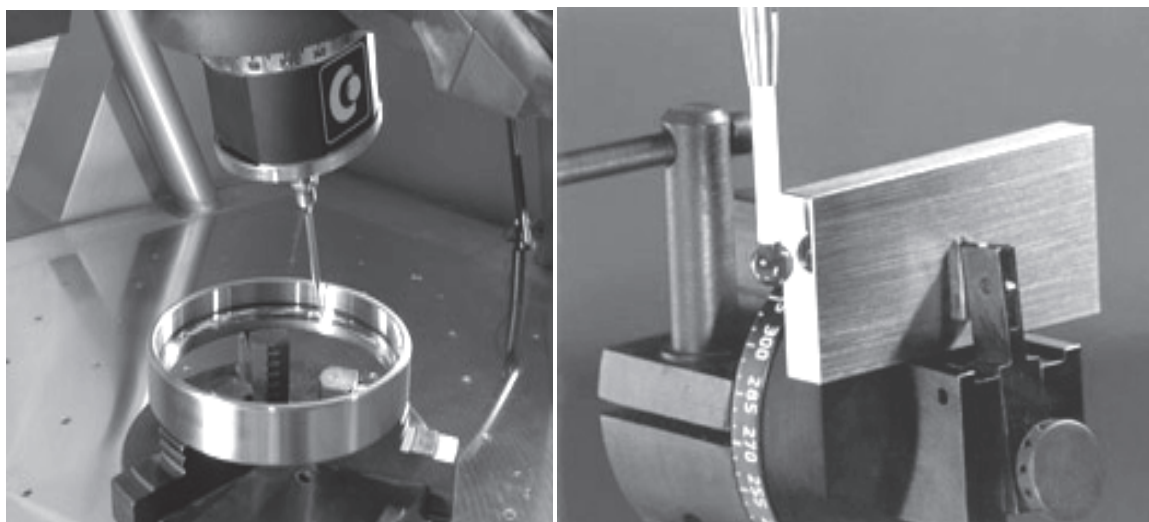


Рис. 2.3. Электроконтактные измерительные щуповые головки

В результате *постоянного* контакта измерительного наконечника датчика с поверхностью измеряемого объекта происходит повышенный износ измерительного наконечника.

Для уменьшения влияния износа измерительного наконечника на точность измерения его изготавливают из особо твёрдых, износостойких материалов – искусственных алмазов, рубинов или минералокерамики.

Электроконтактные датчики, которые являются основой измерительных щуповых головок (как отечественных, так и зарубежных производителей), изготавливают с рубиновыми измерительными наконечниками. На рис. 2.3 хорошо виден рубиновый измерительный наконечник.

Недостатки электроконтактных датчиков:

- *Пригорание контактов*, которое может привести к потере сигнала.

Пригорание контактов является общим недостатком всей релейной и контактной автоматики.

При замыкании контакта на его поверхности из-за высокого переходного сопротивления выделяются значительные температуры. Разогретый металл контакта взаимодействует с кислородом окружающего воздуха, и на его поверхности образуется окисная пленка, которая не является токопроводящей. В результате датчик как бы теряет сигнал. Контакты замкнулись, а сигнала в сети нет.

Решающее значение для стабильной работы электроконтактных датчиков имеет правильный выбор конструкции и материала контактов. Попытки решить эту проблему путём применения для контактов металлов, имеющих малое переходное сопротивление (серебро, золото, платина, вольфрам и т.д.) не дали желаемого результата.

- *Внешние факторы* – влияние на точность измерения наличия на поверхности контролируемого объекта загрязнения, частиц СОТС, мелкой стружки и т.п.

Попадание между измерительным наконечником и поверхностью контролируемой детали частиц СОТС, мелкого абразива, стружки приводит к возникновению значительных погрешностей измерения.

- *Невозможность производить измерения в процессе обработки*, т.е. при движении контролируемого объекта (при вращающемся шпинделе нельзя измерять заготовку).

- *Низкая чувствительность*.

В настоящее время многие измерительные системы, контрольные и контрольно-сортировочные автоматы, выпускаемые отечественной промышленностью, оснащены электроконтактными преобразователями, укомплектованными командными и светофорными устройствами, позволяющими осуществлять визуальные наблюдения и автоматическое управление исполнительными органами станков. Кроме того, все электрокон-

тактные щуповые головки снабжены интерфейсами для связи с системой ЧПУ станка.

Следует помнить, что проводить измерения с помощью электродных щуповых головок непосредственно на рабочем месте следует только после полной остановки всех подвижных исполнительных органов оборудования и при отключённой СОТС.

Ёмкостные датчики

Ёмкостным датчиком называют преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение ёмкостного сопротивления.

Обычно ёмкостный датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из обкладок которого испытывает подвергаемое контролю перемещение, вызывая изменение ёмкости. Неэлектрические величины, подлежащие измерению и контролю с помощью ёмкостных датчиков, весьма многочисленны и разнообразны.

Ёмкостные преобразователи могут быть использованы при измерении различных величин по трём направлениям в зависимости от функциональной связи измеряемой неэлектрической величины со следующими параметрами:

1) Изменяющимся расстоянием между обкладками δ – применяются ёмкостные преобразователи, принцип действия которых основан на изменении параметров электрического сигнала в результате *изменения расстояния между обкладками конденсатора*. При перемещении их относительно друг друга незаменимы для измерения малых и сверхмалых перемещений (долей миллиметров, микрометров и менее).

Ёмкостные датчики, работающие за счёт изменения расстояния между обкладками конденсатора, могут быть как *контактными*, так и *бесконтактными*.

Схемы некоторых типов ёмкостных датчиков, работающих на контактном методе измерения, показаны на рис. 2.4.

При бесконтактном методе измерения контролируемая деталь непосредственно включается в электрическую цепь в качестве одной из пластин конденсатора.

2) Площадь перекрытия обкладок S . Ёмкостные преобразователи с переменной площадью электродов более удобны для измерения больших перемещений (единицы, десятки и сотни миллиметров).

3) Переменной диэлектрической проницаемостью среды ϵ . В ёмкостных преобразователях, в которых измеряемая неэлектрическая величина функционально связана с диэлектрической проницаемостью среды, измеряемым параметром является функция свойств вещества. При этом естественной входной величиной преобразователя будет состав вещества,

заполняющего пространство между пластинами. При изменении влажности, отчасти температуры, среды или вещества диэлектрическая проницаемость среды меняется и, как следствие, пропорционально меняется ёмкость конденсатора и параметры электрического сигнала на выходе.

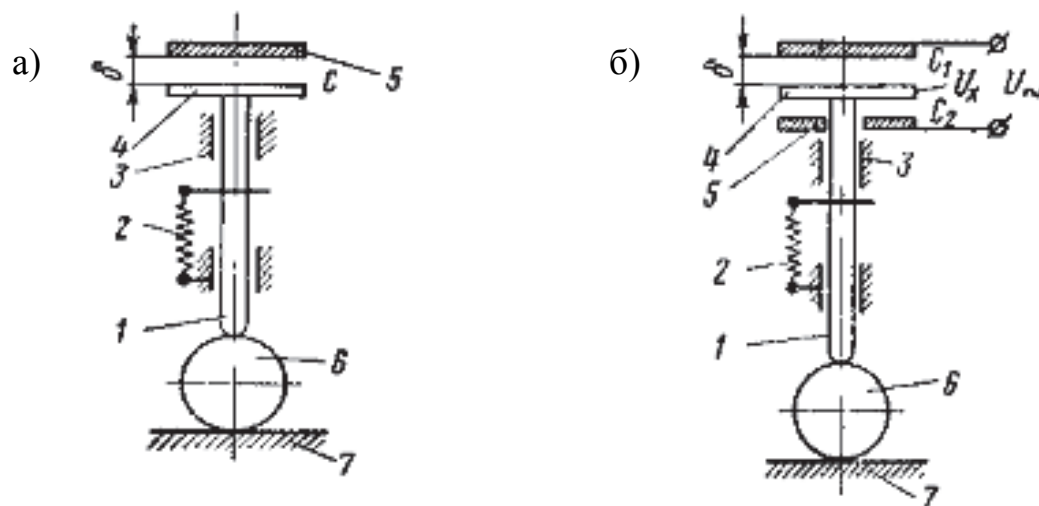


Рис. 2.4. Схемы контактных ёмкостных датчиков:

- а – простой ёмкостной датчик; б – дифференциальный ёмкостной датчик;
 1 – измерительный стержень; 2 – пружина; 3 – направляющие;
 4 – подвижная пластина; 5 – неподвижная пластина; 6 – контролируемая деталь; 7 – стол для установки контролируемого изделия

Особенно широко ёмкостные преобразователи этого типа применяются при измерении влажности твёрдых и жидких тел, уровня жидкости, а также для определения геометрических размеров небольших объектов.

Области применения ёмкостных датчиков

Возможные области применения ёмкостных датчиков чрезвычайно разнообразны. Они используются в системах регулирования и управления производственными процессами почти во всех отраслях промышленности. Ёмкостные датчики применяются для контроля заполнения резервуаров жидким, порошкообразным или зернистым веществом, как конечные выключатели на автоматизированных линиях, конвейерах, роботах, обрабатывающих центрах, станках, в системах сигнализации, для позиционирования различных механизмов и т.д.

Ёмкостные датчики уровня находят применение в системах контроля, регулирования и управления производственными процессами в пищевой, фармацевтической, химической, нефтеперерабатывающей промышленности. Они эффективны при работе с жидкостями, сыпучими материалами, пульпой, вязкими веществами (проводящими и непроводящими), а также в условиях образования конденсата, запылённости.

Ёмкостные преобразователи линейных перемещений

Ёмкостные датчики линейных перемещений являются одними из наиболее распространённых приборов, широко используемых в машиностроении. Они эффективны при измерении параметров шероховатости. Зазор между обкладками конденсатора изменяется в зависимости от перемещения измерительного наконечника.

Большинство современных профилометров в качестве первичного преобразователя используют ёмкостные датчики.

Ёмкостные преобразователи для измерения малых перемещений отличаются высокой чувствительностью, малой инерционностью, линейностью характеристик и в тоже время простотой конструкции и лёгкостью подвижной части.

Ёмкостные преобразователи угловых перемещений

Ёмкостные измерительные преобразователи угловых перемещений подобны по принципу действия ёмкостным датчикам линейных перемещений, причём датчики с переменной площадью более целесообразны в случае не слишком малых диапазонов измерения (начиная с единиц градусов), а ёмкостные датчики с переменным угловым зазором могут с успехом использоваться для измерения малых и сверхмалых угловых перемещений. Обычно для угловых перемещений используют многосекционные преобразователи с переменной площадью обкладок конденсатора.

В таких датчиках один из электродов конденсатора крепится к валу объекта и при вращении смещается относительно неподвижного, меняя площадь перекрытия пластин конденсатора. Это в свою очередь вызывает изменение ёмкости, что фиксируется измерительной схемой.

Инклинометры

Сравнительно новыми приборами, доведёнными до широкого промышленного применения в последние годы, стали малогабаритные ёмкостные инклинометры с электрическим выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика.

Инклинометр (датчик крена) представляет собой дифференциальный ёмкостной преобразователь наклона, включающий в себя *чувствительный элемент в форме капсулы*.

Устройство ёмкостного инклинометра показано на рис. 2.5.

Капсула состоит из подложки с двумя планарными электродами 1, покрытыми изолирующим слоем, и герметично закреплённого на подложке корпуса 2. Внутренняя полость корпуса частично заполнена проводящей жидкостью 3, которая является общим электродом чувствительного элемента. Общий электрод образует с планарными электродами дифференциальный конденсатор. Выходной сигнал датчика пропорционален величине ёмкости дифференциального конденсатора, которая линейно зависит от положения корпуса в вертикальной плоскости.

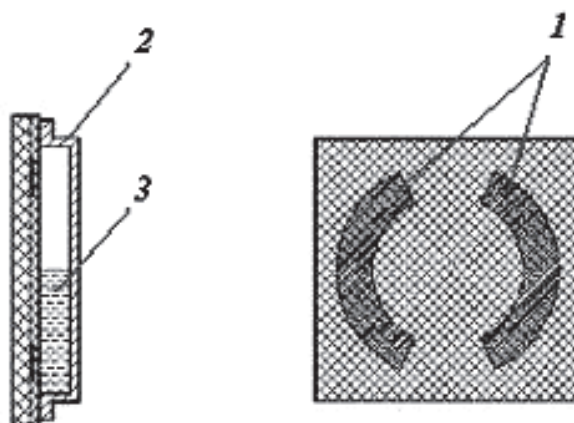


Рис. 2.5. Ёмкостной инклинометр: 1 – планарные электроды; 2 – корпус; 3 – проводящая жидкость

Для определения положения плоскости в пространстве используются два расположенных под углом 90° друг к другу инклинометра.

В качестве основных можно считать следующие области применения инклинометров:

- определение крена автомобилей, кораблей и подводных роботов, подъёмников и кранов, экскаваторов, сельскохозяйственных машин. На приборной доске автомобилей выведен дисплей, показывающий положение машины относительно линии горизонта;
- контроль углов наклона автомобильных и железных дорог при их строительстве, ремонте и эксплуатации;
- определение углового перемещения различного рода вращающихся объектов – валов, колёс, механизмов редукторов как на стационарных, так и на подвижных объектах, например, валков прокатных станков на сталелитейных предприятиях;
- использование в системах горизонтирования платформ;
- определение величины прогибов и деформаций различного рода опор и балок.

Инклинометр спроектирован так, что имеет линейную зависимость выходного сигнала от угла наклона в одной (так называемой рабочей) плоскости и практически не изменяет показания в другой (нерабочей) плоскости, при этом его сигнал практически не зависит от изменения температуры.

Ёмкостные преобразователи приближения (присутствия)

В настоящее время наиболее широкое распространение получили датчики приближения (присутствия), которые помимо своей надёжности имеют широкий ряд преимуществ. Имея сравнительно низкую стоимость, датчики приближения охватывают огромный спектр направленности по своему применению во всех отраслях промышленности.

Типичными областями использования ёмкостных датчиков этого типа являются:

- сигнализация о заполнении ёмкостей из пластика или стекла;
- контроль уровня заполнения прозрачных упаковок;
- сигнализация обрыва обмоточного провода;
- регулирование натяжения ленты;
- поштучный счёт любого вида и др.

Эти датчики обладают высокой надёжностью.

Ёмкостные преобразователи давления

Ёмкостные датчики находят применение в различных отраслях промышленности для измерения абсолютного и избыточного давления. На рис. 2.6 показаны ёмкостные датчики давления, выпускаемые промышленностью.

Ёмкостной преобразователь давления состоит из металлической ячейки, разделённой на две части туго натянутой плоской металлической диафрагмой, с одной стороны которой расположен неподвижный изолированный от корпуса электрод. Электрод с диафрагмой образуют переменную ёмкость, которая включена в измерительную схему. Когда давление по обеим сторонам диафрагмы одинаково, датчик сбалансирован. Изменение давления в одной из камер деформирует диафрагму и изменяет ёмкость, что фиксируется измерительной схемой.



Рис. 2.6. Ёмкостные датчики давления, выпускаемые промышленностью

В дифференциальной конструкции диафрагма перемещается между двумя неподвижными пластинами. В одну из двух камер подаётся опорное

давление, что обеспечивает прямое измерение дифференциального (избыточного или разностного) давления с наименьшей погрешностью.

Ёмкостные датчики для измерения влажности

Ёмкостные преобразователи используются для измерения влажности различных веществ: зерна, пряжи, кожи, волокна, бумаги и т.д.

Цилиндрический конденсатор заполняется исследуемым веществом и включается в одно из плеч измерительного моста.

Так как вода имеет очень высокую относительную диэлектрическую проницаемость по сравнению с другими веществами, то в зависимости от влажности испытуемого вещества диэлектрическая проницаемость, а следовательно, и ёмкость конденсатора будут изменяться.

Достоинства и недостатки ёмкостных датчиков

Ёмкостные датчики обладают целым рядом преимуществ по сравнению с датчиками других типов.

Достоинства:

- высокая чувствительность;
- малая инерционность;
- низкое потребление энергии;
- простота изготовления, использование недорогих материалов для производства;
- малые габариты и вес;
- отсутствие контактов (в некоторых случаях – один токосъём);
- долгий срок эксплуатации;
- потребность весьма малых усилий для перемещения подвижной части ёмкостного датчика;
- простота приспособления формы датчика к различным задачам и конструкциям.

Недостатки:

- сравнительно небольшой коэффициент передачи (преобразования);
- высокие требования к экранировке деталей;
- необходимость работы на повышенной (по сравнению с 50 Гц) частоте. Необходимость применения высокочастотных генераторов.

Параметры конденсатора зависят только от геометрических характеристик и не зависят от свойств используемых материалов, если эти материалы правильно подобраны. Следовательно, можно сделать пренебрежимым влияние температуры на изменения площади поверхности и расстояния между обкладками, если правильно подбирать марку металла для обкладок и изоляцию для их крепления. Остаётся лишь защищать датчик от тех факторов окружающей среды, которые могут ухудшить изоляцию между обкладками, – от пыли, коррозии, влажности, ионизирующей радиации.

Изменение влажности воздуха следует учитывать при измерениях ёмкостными датчиками. Если, например, градуировка прибора производилась в сухом помещении, а измерения будут производиться при влажном воздухе, то может возникнуть систематическая погрешность из-за изменения диэлектрической проницаемости воздушного промежутка датчика.

Индуктивные датчики

Индуктивный датчик – это преобразователь параметрического типа, принцип действия которого основан на изменении индуктивности катушки L вследствие изменения магнитного сопротивления RM магнитной цепи датчика, в которую входит якорь.

Индуктивный датчик представляет собой катушку индуктивности с магнитопроводом, подвижной элемент которого, а именно якорь, перемещается под воздействием измеряемой величины.

Принцип действия основан на изменении параметров магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности (рис. 2.7).

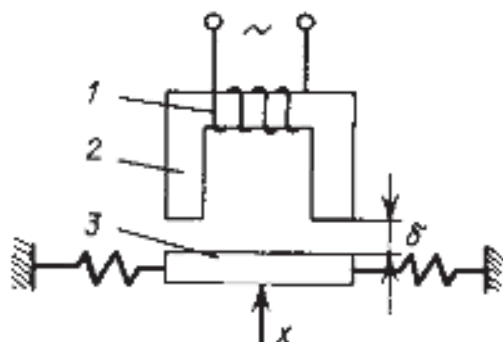


Рис. 2.7. Схема индуктивного датчика: 1 – обмотка катушки; 2 – неподвижный сердечник катушки; 3 – якорь катушки

Изменение воздушного зазора приводит к изменению магнитного сопротивления цепи и, следовательно, индуктивной составляющей сопротивления обмотки I катушки.

Между индуктивным сопротивлением обмотки и длиной воздушного зазора существует функциональная зависимость

$$\omega L = f(\delta),$$

где ω – количество витков катушки; L – индуктивность катушки; δ – длина воздушного зазора, мм.

В системах автоматики используются одинарные и дифференциальные индуктивные датчики перемещений (рис. 2.8).

Для практических применений наиболее удобны дифференциальные датчики, выходной параметр которых – ЭДС.

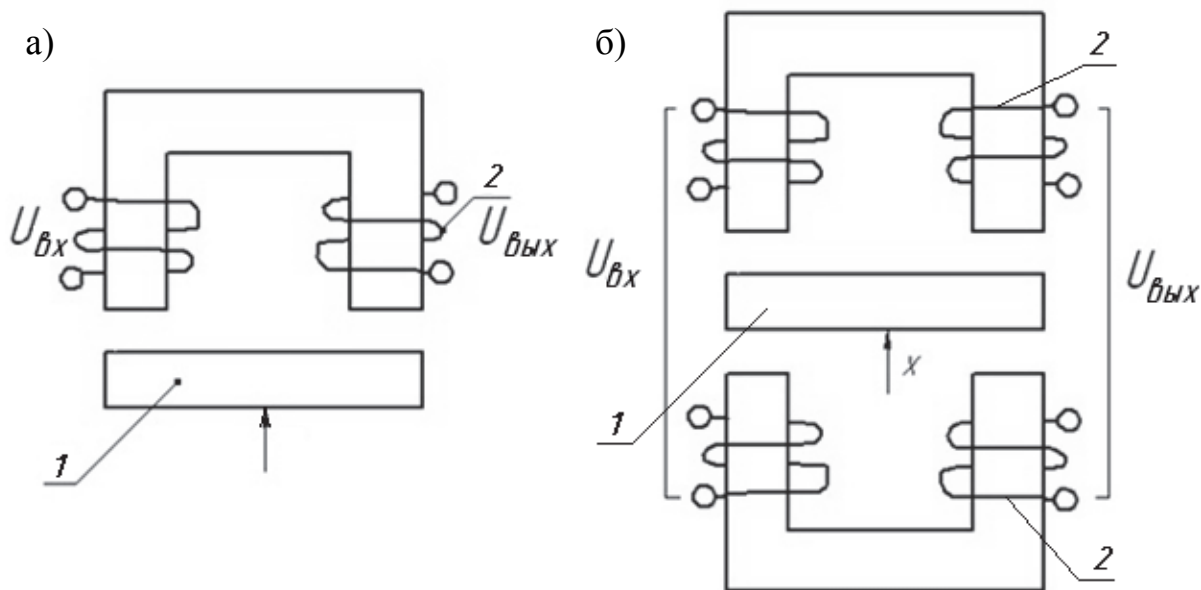


Рис. 2.8. Индуктивный датчик перемещений:
 а – одинарного типа; б – дифференциального типа;
 1 – якорь; 2 – обмотки катушки

При отсутствии перемещения якоря 1 в обмотках 2 катушки индуцируются одинаковые ЭДС, сумма которых ввиду их встречного соединения равна нулю. При появлении перемещения в одной половине магнитной цепи за счёт уменьшения воздушного зазора возрастает магнитный поток, увеличивается наводимая ЭДС во вторичной обмотке. Аналогично уменьшается ЭДС во второй половине датчика ввиду увеличения воздушного зазора. Возникающая результирующая (суммарная) ЭДС пропорциональна значению перемещения измерительного наконечника.

Дифференциальные индуктивные датчики представляют собой совокупность двух нереверсивных датчиков и выполняются в виде системы, состоящей из двух магнитопроводов с общим якорем и двумя катушками. Для дифференциальных индуктивных датчиков необходимы два отдельных источника питания, для чего обычно используется разделительный трансформатор.

Дифференциальные датчики более чувствительны по сравнению с одноэлементными.

Поскольку принцип работы индуктивного датчика основан на определении токов взаимной индукции, такие датчики очень устойчивы к воздействию немагнитических предметов и помех, связанных с различными промышленными загрязнениями.

Промышленностью выпускаются индуктивные датчики (рис. 2.9), имеющие широкий спектр применения.

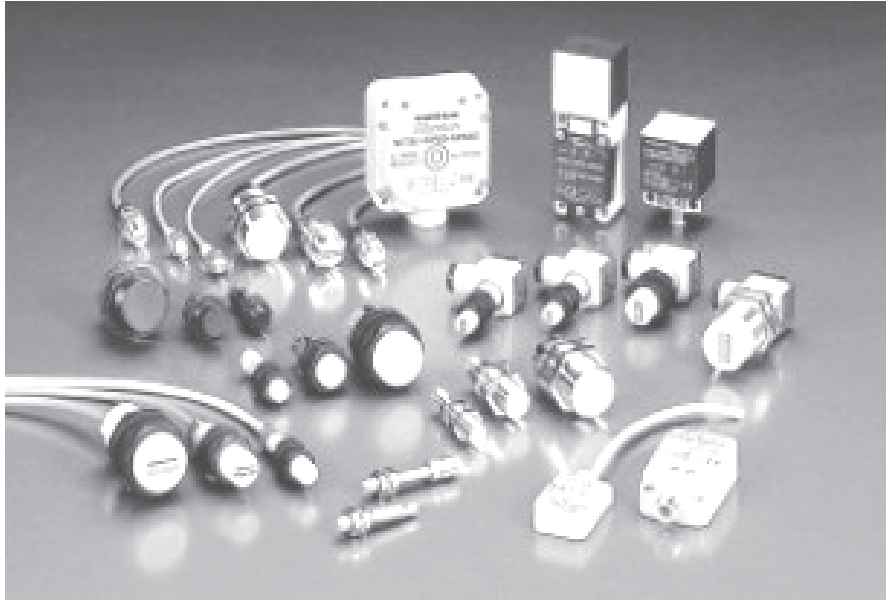


Рис. 2.9. Индуктивные датчики, выпускаемые промышленностью

Индуктивные датчики могут работать как на контактном, так и на бесконтактном методах измерения.

Контактные индуктивные датчики

Измерительный наконечник соприкасается с поверхностью контролируемой детали (изделия). Изменение размера детали приводит к перемещениям этого наконечника. Конструктивно измерительный наконечник связан с якорем катушки, и при его перемещении зазор между якорем (сердечником) катушки и её обмотками изменяется. Чтобы увеличить индуктивность, катушку, как правило, выполняют с ферромагнитным магнитопроводом.

Бесконтактные индуктивные датчики

Наиболее распространёнными бесконтактными индуктивными датчиками являются датчики приближения. В качестве бесконтактных выключателей с малым временем срабатывания они используются для определения конечных и промежуточных положений частей машин и механизмов, совершающих различные виды движения.

Область применения индуктивных преобразователей

Индуктивные датчики находят самое широкое применение в системах автоматики на транспорте, в промышленности, в авиации и т.д. Их применяют там, где требуется высокая скорость и точность срабатывания:

- в промышленности – для измерения перемещений сверхмалых значений (0,001...20 мм), например, для измерения параметров шероховатости. Измеряемый параметр с помощью различных чувствительных элементов преобразуется в изменение перемещения измерительного наконеч-

ника, а затем эта величина подводится к индуктивному измерительному преобразователю;

- в автоматических линиях, станках и т.п. – в качестве конечных выключателей, т.к. они срабатывают только на проводящие материалы (металлы) и нечувствительны ко всем остальным;

- для измерения уровней расхода газа, жидкости и т.д.;

- для измерения давлений, сил. В случае измерения давлений чувствительные элементы датчика выполняются в виде упругих мембран, сильфонов, и т.д.;

- в качестве датчиков приближения, которые служат для обнаружения различных металлических и неметаллических объектов бесконтактным способом по принципу «да» или «нет».

Существует множество типов индуктивных датчиков, отличающихся по назначению, электрическим параметрам, конструкции, размерам, степеням защиты и другим характеристикам.

Индуктивные датчики наиболее эффективны, по сравнению с датчиками другого типа, при использовании в качестве конечных выключателей в автоматических линиях, станках, т.к. они срабатывают только на проводящие материалы и нечувствительны ко всем остальным. Это увеличивает их защищённость от помех. Введение в зону чувствительности индуктивного датчика рук оператора, эмульсии, воды, смазки и т.д. не приведёт к ложному срабатыванию.

Чувствительный элемент индуктивного датчика приближения – это индуктивность, которая является колебательным контуром генератора, к выходу которого подключен дискриминатор и усилитель. Катушка контура определяет размер и форму активной поверхности индуктивного датчика. Генератор вырабатывает высокочастотные колебания, переменное магнитное поле которых излучается катушкой с открытой стороны ферритового сердечника. При приближении металлического предмета на определённое расстояние к индуктивности из колебательного контура поглощается энергия на вихревые токи и перемагничивание в данном металлическом объекте.

Важнейшим техническим параметром индуктивного датчика приближения является частота срабатывания, или частота коммутаций.

Достоинства индуктивных преобразователей:

- высокая скорость срабатывания;
- высокая чувствительность;
- простота и прочность конструкции;
- отсутствие скользящих контактов;
- возможность подключения к источникам промышленной частоты;
- высокая помехозащищённость;
- относительно большая выходная мощность (до десятков ватт).

Недостатки:

- точность работы зависит от стабильности питающего напряжения по частоте;
- возможна работа только на переменном токе;
- погрешность от влияния внешних электромагнитных полей. Является случайной составляющей общей погрешности. Возникает из-за индуктирования ЭДС в обмотке датчика внешними полями и из-за изменения магнитных характеристик магнитопровода под действием внешних полей. В производственных помещениях с силовыми электроустановками обнаруживаются магнитные поля, которые могут привести к значительным погрешностям в процессе измерения, к ложному срабатыванию датчика и т.д.;
- погрешность от соединительного кабеля. Возникает из-за нестабильности электрического сопротивления кабеля под действием температуры или деформаций и из-за наводок ЭДС в кабеле под действием внешних полей. Является случайной составляющей погрешности. Для уменьшения влияния этой погрешности в качестве соединительных проводов рекомендуется применения коаксиального кабеля;
- погрешность от старения датчика. Эта составляющая погрешности вызывается, во-первых, износом подвижных элементов конструкции датчика и, во-вторых, изменением во времени электромагнитных характеристик магнитопровода датчика. Электромагнитные свойства материалов изменяются во времени.

В большинстве случаев определяющими являются погрешность от нелинейности характеристики и температурная погрешность индуктивного преобразователя.

Пьезодатчики

Принцип действия пьезодатчиков основан на явлении пьезоэффекта.

Некоторые диэлектрики при воздействии на них механического усилия подвергаются электрической поляризации, т.е. при механическом воздействии на поверхность пьезокристалла в направлении электрической оси на его поверхности генерируются электрические заряды.

При этом пьезоэффект обладает знакочувствительностью, т.е. при изменении направления механического напряжения изменяется полярность электрических зарядов и при изменении полярности электрического поля меняется направление механической деформации диэлектрика.

Пьезодатчики являются датчиками генераторного типа.

Пьезоэффект может быть прямым и обратным.

Прямой пьезоэффект заключается в возникновении электрических зарядов на гранях пьезокристаллов при воздействии на него механической силы, вызывающей напряжение в материале. При снятии силы заряды исчезают.

Обратный пьезоэффект проявляется в том, что пьезоэлектрик, помещённый в электрическое поле, изменяет свои размеры.

Материалом для этих датчиков чаще всего является кварц, из которого вырезают ориентированные по отношению к осям кристалла пластинки в форме цилиндров или параллелепипедов. Пластинки помещают между металлическими электродами.

В качестве токосъёмников используется латунная фольга. Сигнал с кварцевых пластин снимается при помощи латунных электродов и по кабелю подаётся на вход измерительного усилителя.

Для увеличения заряда в пьезодатчике кристаллические шайбы собирают в столбик, соединяя их параллельно.

Датчик (рис. 2.10, а) представляет собой набор из 10...15 шайб, диаметром 5...10 мм, толщиной 1...2 мм, изготовленных из кварца. Шайбы, заключённые между латунными электродами (токосъёмниками), помещены в корпус, деформирующийся вместе со столбиком, составленным из шайб. Зависимость сопротивления от приложенного усилия показана на рис. 2.10, б.

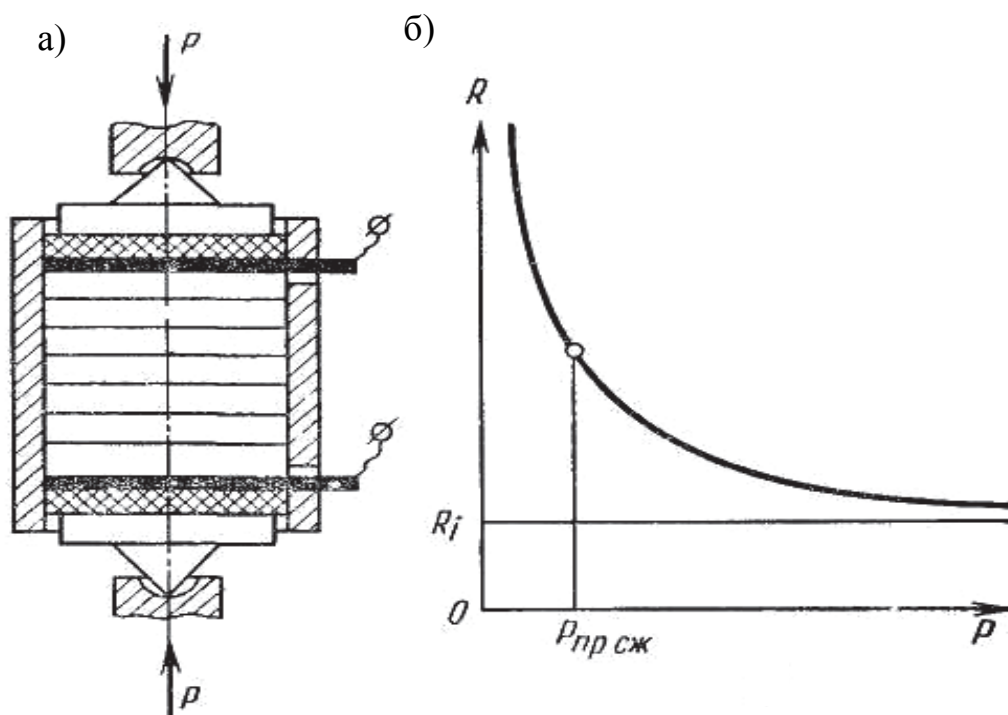


Рис. 2.10. Схема пьезодатчика (а) и его характеристика (б)

При измерении статических сил возникающий электрический заряд утекает через сопротивление измерительной цепи, следовательно, исключается возможность их регистрации. Иными словами, заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента под действием силы P , сохраняется лишь при

отсутствии утечки, т.е. при бесконечно большом входном сопротивлении измерительной цепи.

Практически это условие невыполнимо, а поэтому пьезоэлектрические преобразователи для измерения статических сил не применяются.

При действии динамических, т.е. переменных во времени, сил количество электричества на гранях всё время восполняется и становится возможным потребление тока измерительной цепью. Поэтому практически датчики этого типа применяются для регистрации лишь динамических сил, быстро протекающих динамических процессов, они удобны для измерения знакопеременных нагрузок (вибрации).

Следует отметить, что мощность, развиваемая пьезоэлементом, чрезвычайно мала, ввиду этого измерительная цепь датчика тщательно экранируется от помех и наводок.

Материалы, используемые для пьезокристаллических датчиков

Одним из вопросов при проектировании пьезоэлектрических преобразователей является выбор материала для чувствительного элемента датчика. Пьезоэлектрическая постоянная материала чувствительного элемента определяет величину электрического заряда, генерируемого при приложении определённой силы.

Чувствительностью пьезоэлектрического датчика называется отношение электрической выходной величины к механической входной величине.

Кроме того, при выборе пьезоэлектрического материала датчика, предназначенного для работы в широком диапазоне температур, определяющим фактором является получение наименьшего изменения его чувствительности к температуре.

Среди кристаллических материалов особое место занимает кварц, который благодаря стабильности электромеханических характеристик находит широкое применение в пьезоэлектрических датчиках. Кроме кварца к материалам, обладающим пьезоэффектом, можно отнести сегнетовую соль и другие кристаллические вещества.

В группе искусственных пьезокерамик можно выделить три разновидности: титанат бария (BaTiO_3), титанат свинца, цирконат свинца. Отличительной особенностью этих материалов является высокое значение пьезоэлектрической постоянной.

Применение волокон углерода и силиконовых эластомеров способствует *миниатюризации* пьезорезистивных датчиков, делает технологию их изготовления сравнимой с технологией изготовления интегральных схем. Эти датчики рассчитаны на широкий диапазон измерения и допускают значительные перегрузки.

Области применения пьезодатчиков:

1) Измерение акустического давления.

В последнее время развитие ряда отраслей техники, таких как авиационная, космическая, автомобильная и др., поставило перед метрологами вопрос о точном измерении звуковых давлений высокой интенсивности.

Например, Евросоюз закрыл воздушное пространство для самолётов, двигатели которых издадут шум выше установленного предела. Следовательно, производители двигателей должны иметь надёжные средства измерения уровня звукового давления для обеспечения конкурентоспособности своей продукции.

В технической акустике принято оценивать звуковое давление чаще всего не в абсолютных, а в относительных логарифмических единицах – децибелах.

При работе современных технических устройств возникают уровни звуковых давлений до 200 Па (140 дБ) и выше. Такие уровни давлений приводят к неправильной работе измерительной и навигационной аппаратуры, разрушению самолётной обшивки и т.п.

Даже при производстве детских звуковых игрушек следует соблюдать требование – сила звукового давления не должна превышать 65 дБ. В противном случае игра ребенка с игрушкой, которая изготовлена с нарушением этого требования, может иметь серьёзные негативные последствия. Для проверки партии игрушек, поступающих в продажу, используются датчики акустического давления.

Можно сформулировать общие требования, стоящие перед разработчиками при проектировании датчиков акустического давления:

- датчик должен удовлетворять требованию минимального искажения акустического поля;
- иметь широкий диапазон рабочих частот, давлений;
- стабильно работать в широком диапазоне температур.

Пьезоэлектрические преобразователи удовлетворяют большинству из этих требований. Им можно придать практически любую форму и размеры, они достаточно прочны, имеют высокую чувствительность и широкий частотный диапазон, работают в широком диапазоне температур.

В датчиках звукового давления получили распространение пьезоэлементы из титаната бария и из цирконата свинца.

Эта пьезокерамика по своей структуре является поликристаллической, пьезоэлементы из неё могут быть изготовлены любой формы и размеров, а затем поляризованы в нужном направлении. Поэтому в пьезоэлементах могут возбуждаться любые виды колебаний, например радиальные колебания в цилиндрах, шарах.

2) *Измерение давления.*

Пьезоэлектрические датчики находят широкое применение для измерения быстроменяющихся (динамических) давлений в диапазоне $10^4 \dots 10^7$ Па в частотном диапазоне от единиц герц до десятков килогерц.

3) *Измерение ускорений.*

Наиболее широкое применение пьезоэлектрические преобразователи нашли в датчиках акселерометров для измерения импульсных ускорений знакопеременного характера.

Если на акселерометр действует ускорение в направлении, перпендикулярном к оси поляризации пьезоэлемента, то на обкладках его возникают заряды, которые определяют поперечную чувствительность датчика. Поперечная чувствительность зависит от положения акселерометра относительно направления действия ускорения.

Тензодатчики

Тензометрический измерительный преобразователь (тензодатчик) – параметрический резистивный преобразователь, который преобразует деформацию твёрдого тела, вызванную приложенным к нему механическим напряжением, в электрический сигнал.

Тензорезистор (от лат. *tensus* – напряжённый и *resisto* – сопротивляюсь) – резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации.

Такой преобразователь, будучи приклеенным к испытываемому объекту, воспринимает деформации его поверхностного слоя. Таким образом, естественной входной величиной наклеиваемого преобразователя является деформация поверхностного слоя объекта, на который он наклеен, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации.

Деформация детали ведёт к деформации проволоки, изменяется её длина, сечение и удельное электрическое сопротивление, что в конечном счёте ведёт к изменению электрического сопротивления всего участка проволоки.

При измерении различных механических величин (веса, крутящего момента, силовых нагрузок и т.д.) с помощью тензодатчиков необходимо преобразовать изменение сопротивления датчика, возникающее в результате растяжения или сжатия проволоки датчика, в электрический сигнал. При растяжении проволоки поперечное сечение её уменьшается и, как следствие, увеличивается сопротивление проводника, а при сжатии наоборот.

При этом считается, что сопротивление проводника или полупроводника зависит (при неизменном объёме) от его длины l :

$$R = r \cdot l / S = r \cdot l / V,$$

где r – удельное сопротивление материала, Ом/см; S – площадь поперечного сечения, мм².

Таким образом, при механическом воздействии на проводник изменение его сопротивления вызывается изменением его длины $\Delta l/l$, площади поперечного сечения $\Delta S/S$ или удельного сопротивления $\Delta r/r$.

Эффект изменения удельного сопротивления металлического проводника под действием всестороннего сжатия (гидростатического давления) был обнаружен в 1856 году лордом У. Т. Кельвином и в 1881 году О. Д. Хвольсоном.

Типы тензодатчиков

Конструктивно тензорезисторы выполняют из проволоки, фольги, наклеенных на тонкую бумагу или плёнку лака, или прямоугольников полупроводникового материала.

Все существующие тензометрические преобразователи можно разделить на три основных типа (рис. 2.11):

- а) проволочные;
- б) фольговые;
- в) полупроводниковые.

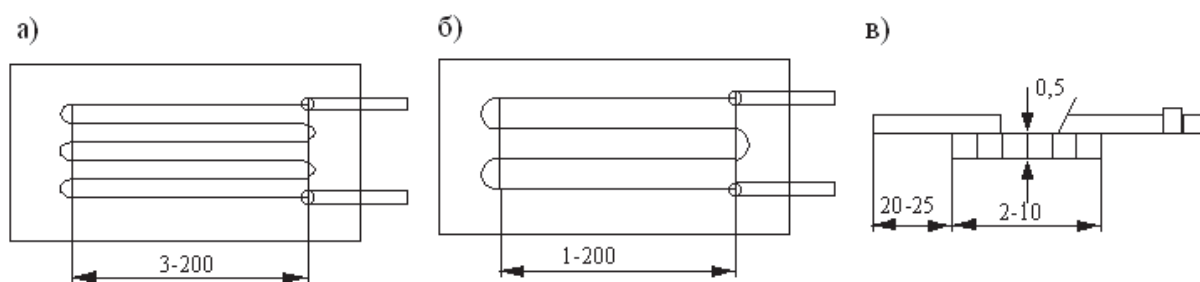


Рис. 2.11. Устройство тензорезисторов: а – проволочного; б – фольгового; в – полупроводникового

Проволочные тензодатчики

В современном виде тензометрический измерительный преобразователь конструктивно представляет собой тензорезистор, чувствительный элемент которого выполнен из тензочувствительного материала (проволоки, фольги и др.), закреплённый с помощью связующего состава (клея, цемента) на исследуемом объекте. Для присоединения чувствительного элемента в электрическую цепь в тензорезисторе имеются выводные проводники. Для удобства установки тензодатчиков на измеряемый объект они имеют подложку, расположенную между чувствительным элементом и исследуемой деталью, а также защитный слой, расположенный поверх чувствительного элемента.

Устройство наиболее распространённого типа наклеиваемого проволочного тензодатчика показано на рис. 2.12.

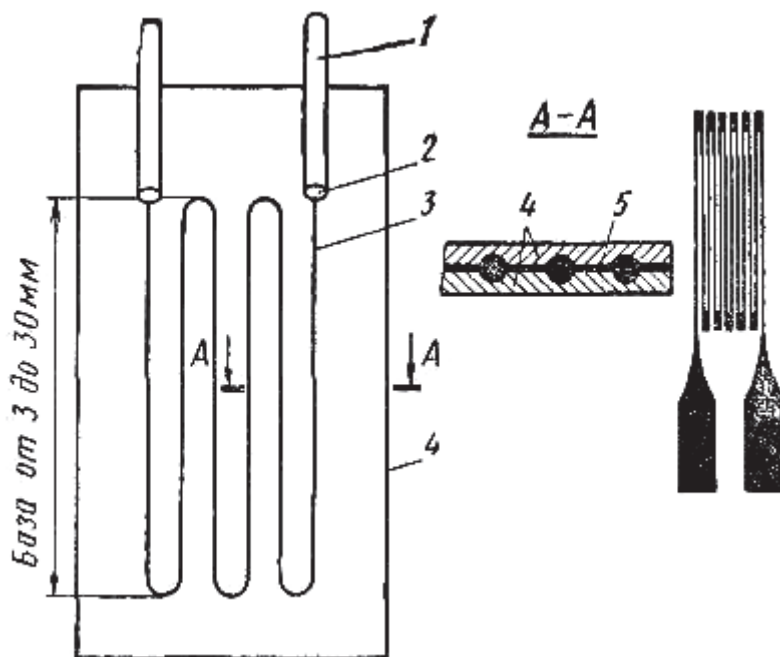


Рис. 2.12. Проволочный тензодатчик: 1 – выводные провода; 2 – припой; 3 – проволока; 4 – база; 5 – слой клея

На специальную подложку 4 (базу) наклеена тензочувствительная проволока 3 диаметром 0,02...0,03 мм зигзагообразной формы.

Зигзагообразную часть тензорезистора называют решёткой. Сечение и длина проволоки рассчитываются. К концу проволоки приварены выводные провода 1. Сверху провода защищены слоем лака.

Датчик наклеивается на поверхность измеряемого объекта и вместе с ней деформируется, преобразуя механическое напряжение в изменение омического сопротивления проволоки, и, следовательно, изменение параметров электрического сигнала на выходе.

Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом. Чем меньше размер базы, тем чувствительнее датчик.

Датчик обычно устанавливается так, чтобы его наиболее длинная сторона была ориентирована в направлении измеряемой силы.

Фольговые тензодатчики

Фольговые тензодатчики являются наиболее популярной версией наклеиваемых тензодатчиков.

Они представляют собой ленту из фольги толщиной 4...12 мкм, на которой часть металла выбрана травлением (методом вакуумной возгонки)

таким образом, что оставшаяся его часть образует решётку с выводами. При изготовлении можно предусмотреть любой рисунок решётки, что является существенным достоинством фольговых тензопреобразователей.

На рис. 2.13, *а* показан внешний вид преобразователя из фольги, предназначенного для измерения линейных напряжённых состояний; на рис. 2.13, *б* – наклеиваемый на мембрану; на рис. 2.13, *в* – фольговый преобразователь, наклеиваемый на вал, для измерения крутящих моментов.

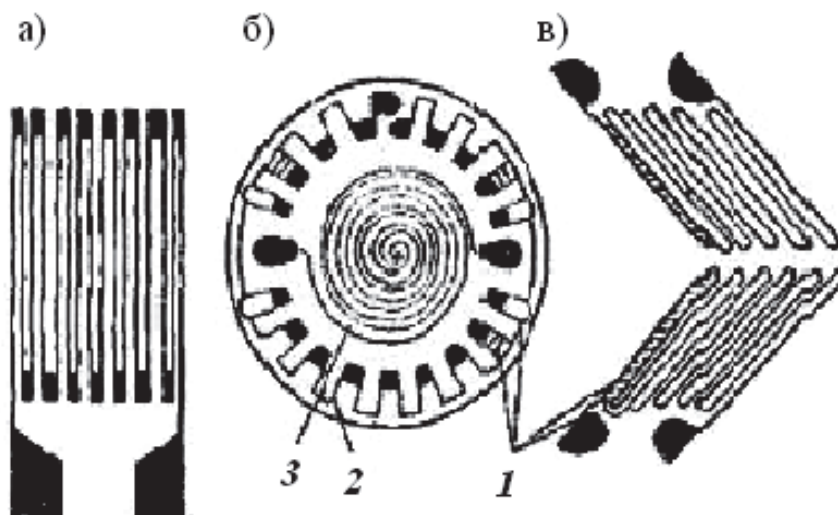


Рис. 2.13. Фольговые преобразователи: а – для измерения линейных напряжённых состояний; б – наклеиваемый на мембрану; в – наклеиваемый на вал преобразователь для измерения крутящих моментов; 1 – подгоночные петли; 2 – витки, чувствительные к растягивающим мембрану усилиям; 3 – витки, чувствительные к сжимающим мембрану усилиям

Тензодатчики из фольги допускают относительно большие силы токов. Серьёзным преимуществом преобразователей из фольги является возможность увеличивать сечение концов преобразователя; приваривание (или припаивание) выводов можно в этом случае осуществить значительно надёжнее, чем в преобразователях из проволоки.

Фольговые тензодатчики по сравнению с проволочными имеют большее отношение площади поверхности чувствительного элемента к площади поперечного сечения (чувствительность) и более стабильны при критических температурах и длительных нагрузках. Большая площадь поверхности и малое поперечное сечение также обеспечивают хороший температурный контакт чувствительного элемента с образцом, что уменьшает саморазогрев датчика.

Плёночные тензодатчики

В последние годы появился еще один способ массового изготовления приклеиваемых тензодатчиков, заключающийся в вакуумной возгонке тензочувствительного материала и последующей конденсации его на подложку, напыляемую непосредственно на деталь. Такие тензодатчики получили название плёночных.

Малая толщина таких тензопреобразователей (15...30 мкм) даёт существенное преимущество при измерениях деформаций в динамическом режиме в области высоких температур, где измерения деформации представляют собой специализированную область исследований.

Целый ряд плёночных тензопреобразователей на основе висмута, титана, кремния или германия выполняется в виде одной проводящей полоски (рис. 2.14).

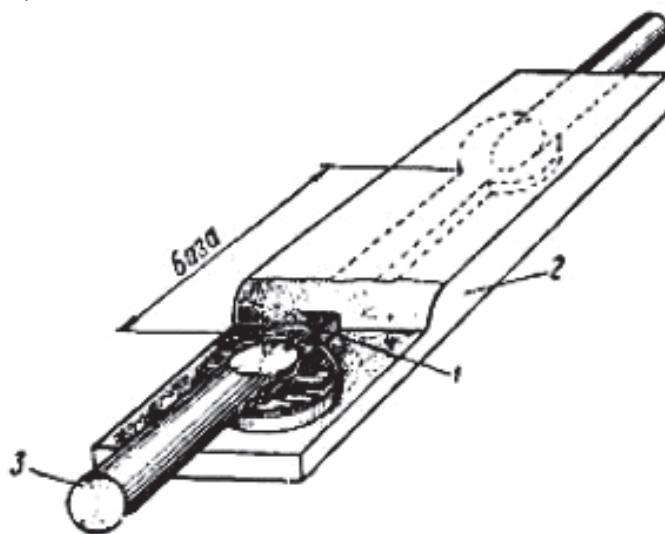


Рис. 2.14. Плёночный тензодатчик: 1 – тензочувствительная плёнка; 2 – плёнка лака; 3 – выводной проводник

Такие преобразователи не имеют недостатка, заключающегося в уменьшении относительной чувствительности преобразователя по сравнению с чувствительностью материала, из которого выполнен преобразователь.

Тензометрический коэффициент преобразователя, выполненного на основе металлической плёнки, равен 2...4, а его сопротивление колеблется в диапазоне 100...1000 Ом. Преобразователи, выполненные на основе полупроводниковой плёнки, имеют коэффициент порядка 50...200, и поэтому они более чувствительны к прикладываемому напряжению. При этом нет необходимости использовать усилительные схемы, поскольку выходное напряжение полупроводникового тензометрического моста составляет примерно 1 В.

Области применения тензодатчиков

При всём многообразии задач, решаемых с помощью тензометрических измерительных преобразователей, можно выделить две основные области их использования:

- для измерения механических величин – применение тензодатчиков в качестве первичных преобразователей (механических напряжений, давлений, крутящих моментов, веса и т.д.), преобразуемых в деформацию упругого элемента;
- исследования физических свойств материалов, деформаций и напряжений в деталях и конструкциях.

Для измерения механических напряжений и давлений обычно наклеивают два тензорезистора, которые включают в мостовую цепь (рис. 2.15). Это вызвано необходимостью увеличения чувствительности преобразователя и температурной стабилизацией параметров цепи.

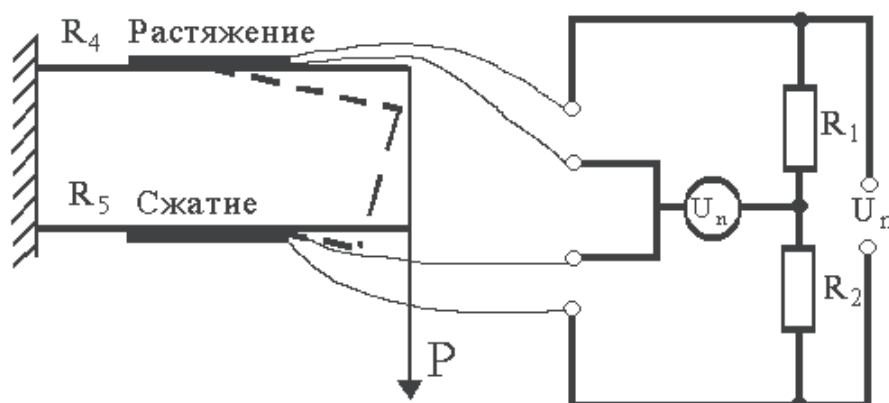


Рис. 2.15. Мостовая схема включения тензорезисторов

При наклеивке двух тензорезисторов по оси действия измеряемого напряжения вдвое повышается чувствительность измерительной цепи, а температурное изменение сопротивления одного тензорезистора компенсируется противоположным изменением сопротивления другого тензорезистора.

Если на исследуемый объект два тензорезистора наклеить невозможно, то один из них крепят на аналогичный материал и помещают в те же условия, что и рабочий.

На рис. 2.16 показана мостовая схема измерения величины силы F , действующей на балку.

На балку наклеены четыре тензодатчика: R_1 и R_3 – со стороны растягивающихся волокон, R_2 и R_4 – со стороны сжимающихся.

В равновесном состоянии, т.е. когда к балке не приложена нагрузка, соблюдается равенство

$$R_1 + R_2 = R_3 + R_4. \quad (1.1)$$

При приложении нагрузки балка изгибается, при этом проволока тензодатчиков R_1 и R_2 растягивается пропорционально растяжению поверхности балки, а тензодатчиков R_3 и R_4 – сжимается. Поперечное сечение проволок датчиков меняется (R_1 и R_3 – уменьшается, а R_2 и R_4 – увеличивается) и, как следствие, меняется их сопротивление.

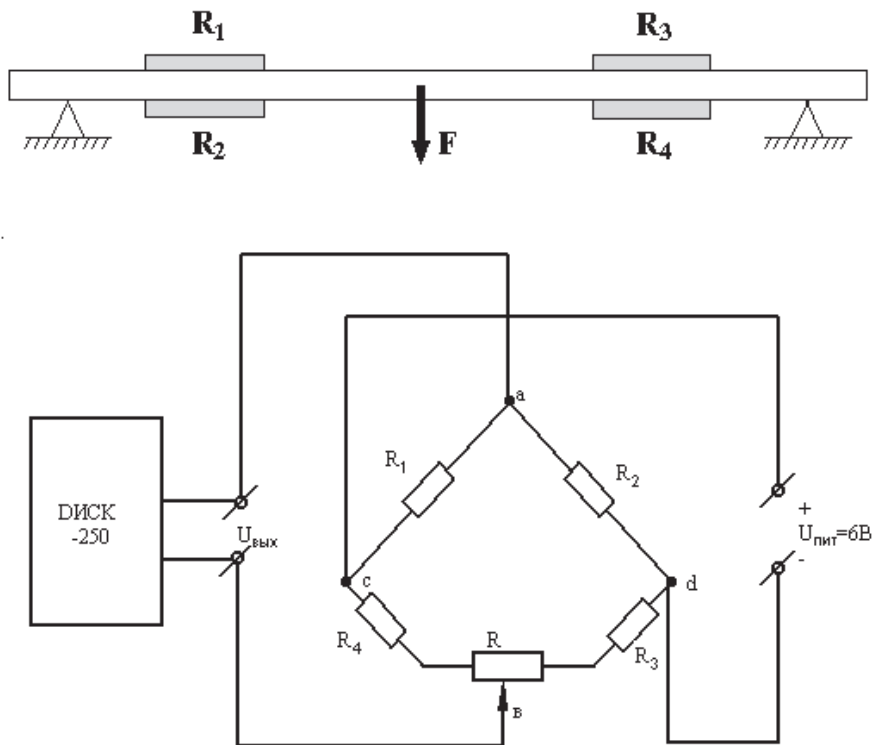


Рис. 2.16. Схема измерения величины силы, прилагаемой к балке с помощью тензодатчиков, включённых в мостовую схему

В результате, равенство (1.1) нарушается, т.е.

$$R_1 + R_2 \neq R_3 + R_4.$$

Плечи моста выходят из равновесия, на выходе формируется электрический сигнал, который в свою очередь изменяет напряжение в измерительной цепи пропорционально величине приложенной нагрузки.

Благодаря простоте конструкции, дешевизне тензодатчики широко применяются для измерения различных нагрузок в самых разнообразных объектах – конструкциях самолётов, автомобилей, мостов, лифтов и т.д.

Пример применения тензодатчиков для измерения различных силовых нагрузок, крутящих моментов и реакции конструкции фюзеляжа самолёта на них при проведении лётных испытаний и в процессе эксплуатации самолёта показан на рис. 2.17.

На рисунке видно, что датчики наклеены непосредственно на предварительно подготовленную поверхность фюзеляжа самолета. Датчики включены в мостовую схему. Измерительные сигналы от датчиков поступают в бортовой компьютер и обрабатываются. Такие измерения позволяют выявить наиболее нагруженные зоны фюзеляжа (крыльев, киля) и слабые места в конструкции самолёта ещё на стадии проведения лётных испытаний.

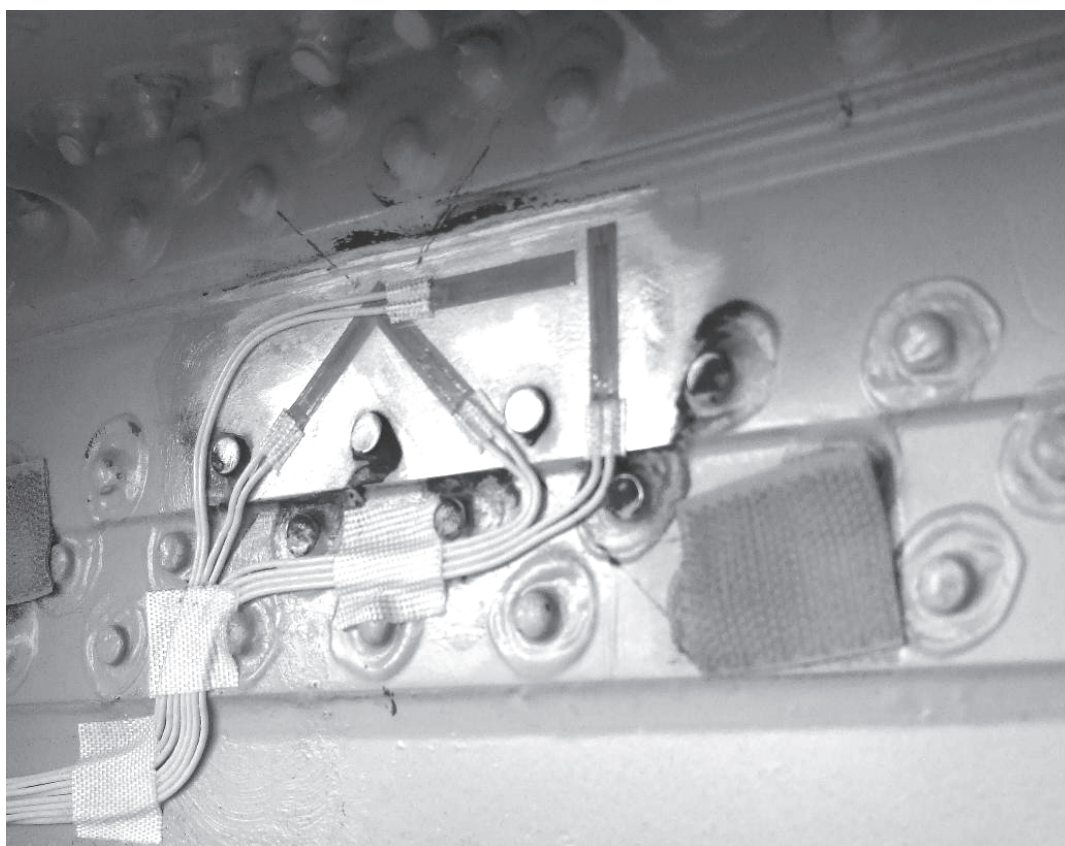


Рис. 2.17. Применение тензодатчиков для измерения различных нагрузок на фюзеляж самолёта при проведении лётных испытаний

Для установления зависимости изменения величины сопротивления тензодатчиков, а следовательно, и напряжения в измерительной цепи от изменения величины прилагаемой нагрузки, проводится процедура градуировки датчика и строится градуировочный график. С помощью этого графика производится расшифровка и анализ полученных результатов.

Для измерения механических напряжений, давления и тяговых усилий в сельскохозяйственных машинах, на железнодорожном транспорте, в авиации, горнодобывающей промышленности и т.д. используются упругие кольцевые элементы (рис. 2.18).

На внутренней поверхности кольца наклеены четыре тензорезистора.

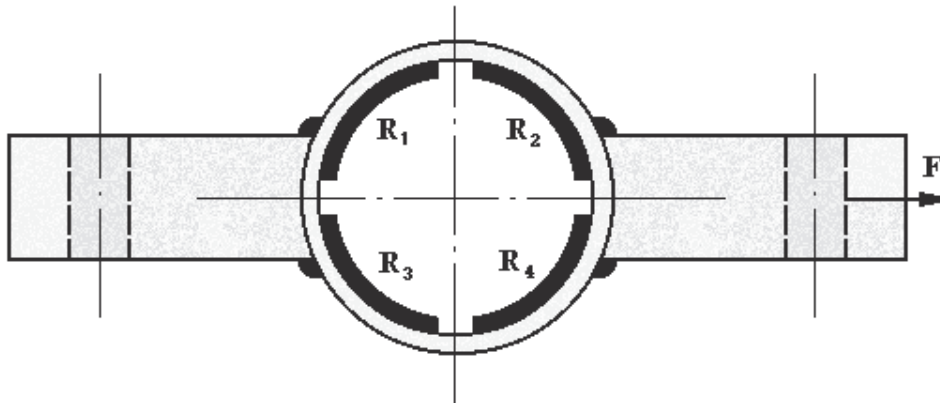


Рис. 2.18. Кольцевой упругий элемент

Комплект таких элементов позволяет измерить тяговые усилия в диапазоне $10^3 \dots 10^6$ Н.

Применение тензодатчиков для измерения крутящих моментов

В процессе эксплуатации исполнительные механизмы различных машин и оборудования, например, коленчатые валы автомобилей, сельскохозяйственных машин и агрегатов, шпиндели станков, валы гидроагрегатов и т.д., испытывают значительные крутящие моменты. Для измерения величин крутящих моментов, и в первую очередь для исключения возникновения аварийных ситуаций в том случае, если значения крутящих моментов превышают допустимые значения, применяют тензодатчики. При этом их наклеивают на вал по линии действия напряжения кручения.

Наибольшие напряжения кручения при передаче момента валом отмечаются в его сечении, расположенном под углом 45° к образующей. В направлениях, параллельных и перпендикулярных образующей вала, действует только деформация сдвига.

Поэтому и датчики наклеиваются под углом 45° (рис. 2.19).

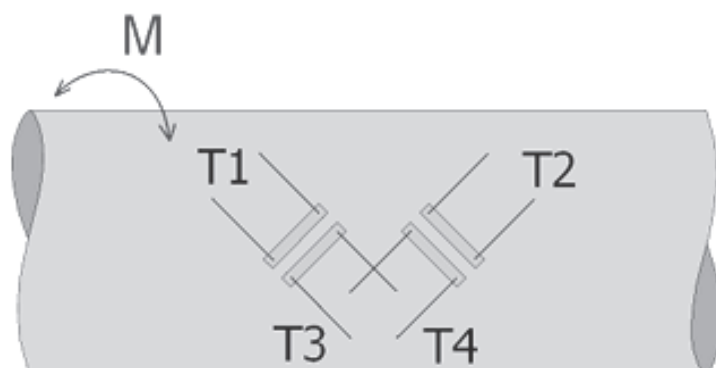


Рис. 2.19. Схема наклейки датчиков на вал при измерении крутящих моментов

При измерении крутящихся моментов почти не используются схемы с одним и двумя тензорезисторами, а применяются мостовые цепи с четырьмя резисторами.

Такие схемы (рис. 2.20) позволяют получить на выходе моста мощный сигнал, исключить влияние изгиба вала и деформаций сгиба. Кроме того, мостовые цепи обеспечивают почти полную температурную стабилизацию параметров электрической цепи.

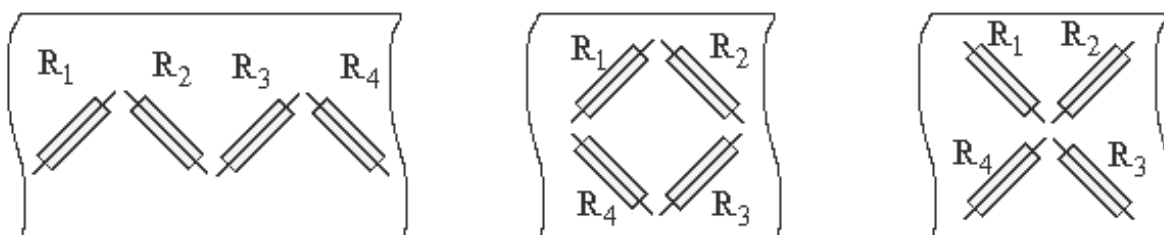


Рис. 2.20. Схемы наклейки тензодатчиков для измерения крутящих моментов

Применение тензодатчиков для измерения давления

В тензометрических преобразователях давлений используются упругие элементы в виде мембран (рис. 2.21).

В корпусе 1 такого преобразователя укреплена мембрана 2, на которую наклеен тензодатчик 3.

Для максимальной чувствительности форма и размеры тензорезистора должны соответствовать диаметру мембраны. Мембрану в этом случае выбирают, по возможности, меньшего диаметра и меньшей толщины.

Преобразователи с тензорезисторами позволяют измерять абсолютные давления в диапазоне 0...2,5 МПа.

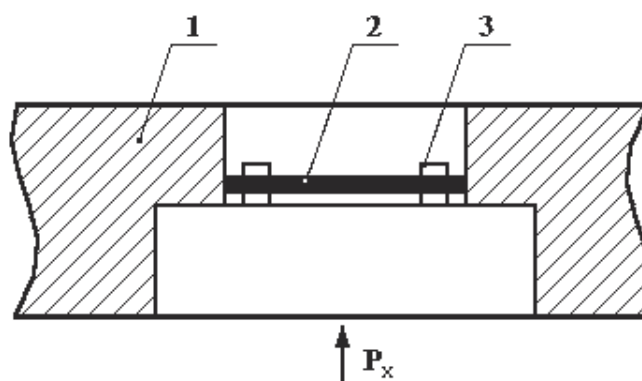


Рис. 2.21. Преобразователь давления с тензорезистором

Применение тензодатчиков для измерения веса

Тензометрическими датчиками оснащены электронные весы большинства российских и зарубежных производителей весов.

Весы на тензодатчиках применяются в различных отраслях промышленности: цветная и черная металлургии, химическая, строительная, пищевая и другие отрасли.

Тензодатчик – это основной элемент весоизмерительной техники. Он преобразует механическую деформацию чаши весов, возникающую под воздействием веса измеряемого объекта, в электрический сигнал, который в свою очередь преобразуется в сигнал на индикационном табло весового терминала.

Весовой терминал представляет собой прибор, который принимает электрический сигнал с тензодатчиков для дальнейшего аналого-цифрового преобразования, обработки и индикации результата взвешивания.

На рис. 2.22 показаны весовые терминалы, в конструкциях которых в качестве преобразователей используются тензодатчики. Сигналы от тензодатчиков преобразуются в микропроцессоре и выводятся на дисплей.



Рис. 2.22. Весовые терминалы с тензорезисторными преобразователями

В конструкциях платформенных весов с небольшой нагрузкой на платформу (до 6 кг), а также в фасовочном и дозирующем оборудовании применяют одноточечные датчики, т.е. один тензодатчик наклеивается в центре весовой платформы.

В весах большой грузоподъёмности (до нескольких сотен тонн) используются четыре датчика, наклеенных по углам платформы.

Достоинства тензодатчиков:

- простота конструкции, дешевизна и простота в применении;
- малые габариты и вес;
- безынерционность, что даёт возможность измерять быстропеременные нагрузки;
- возможность размещения их в труднодоступных местах;
- линейная характеристика и высокая стабильность показаний;

- возможность дистанционно и во многих точках проводить измерения;
- способ установки их на исследуемую деталь не требует сложных приспособлений и не искажает поле деформаций исследуемой детали;
- применение тензодатчиков позволяет производить контроль целого ряда параметров методом неразрушающего контроля;
- невысокая стоимость;
- простота изготовления, не требующая сложного технологического оборудования.

Достоинства фольговых тензодатчиков:

- хороший механический и тепловой контакт с контролируемой деталью;
- более высокая теплоотдача вследствие большой площади стыка полосок датчика с деталью, что позволяет применить фольгу большего сечения и осуществить хорошую приклейку;
- более высокие по сравнению с проволочными тензодатчиками чувствительность и точность за счёт лучшей передачи деформации от детали к фольге;
- возможности пропускать через датчик большой измерительный ток;
- возможность изготовления решёток сложного рисунка;
- большая прочность выводов.

Недостатки проволочных датчиков:

- малая величина относительного изменения сопротивления, что вызывает необходимость иметь измерительные схемы высокой чувствительности. Для увеличения чувствительности применяют мостовые схемы с двумя или четырьмя одинаковыми датчиками, которые наклеиваются на испытываемую деталь таким образом, что когда один из датчиков работает, например, на сжатие, то другой датчик, имеющий с первым смежное плечо, работает на растяжение;
- температурная чувствительность;
- проволочные тензодатчики являются, по сути дела, одноразовыми преобразователями.

Недостатки фольговых датчиков:

- малая механическая прочность;
- разброс параметров даже в одной партии достигает до $\pm 20\%$;
- изменение сопротивления со временем достигает $2...3\%$.

Требования к материалам тензодатчиков

Основным требованием к материалу тензодатчиков является обеспечение возможно большего значения чувствительности. Объясняется это тем, что относительное изменение сопротивления у большинства материалов тензодатчиков очень мало и не превышает значения $(5...7) \cdot 10^{-3}$. Изме-

нение удельного сопротивления при деформации связано с деформацией кристаллической решётки. При этом изменяется положение уровня Ферми, что сказывается на концентрации свободных электронов. Следовательно, нагрев тензодатчика может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением.

Поэтому для изготовления тензодатчиков рекомендуется применять сплавы, обладающие низким температурным коэффициентом сопротивления.

Чувствительность тензорезистора (коэффициент тензочувствительности) всегда больше единицы и определяется свойствами материала тензорезистора и способностью его при деформировании изменять геометрические размеры (длину и сечение) и удельное сопротивление.

При выборе материала следует учитывать, что характеристика его зависит в большей степени не только от состава материала, но и от технологии изготовления.

Для изготовления тензорезисторов используют константан, нихром, никель, висмут, а также кремний и германий:

- *константан* используется в большинстве тензодатчиков благодаря неизменности тензочувствительности и отсутствию существенных изменений при переходе от упругих деформаций к пластическим. Он обладает высоким удельным сопротивлением и температурной стабильностью;

- *нихром* V применяют в узкоспециальных приложениях, связанных с высокими температурами, при которых приобретает существенное значение устойчивость к окислительным процессам.

Наиболее употребительным материалом для изготовления тензорезисторов является константановая проволока диаметром 20...30 мкм.

Наибольшее значение коэффициента тензочувствительности (St) из перечисленных материалов имеют полупроводники. Так, у р-кремния значение St достигает 170. Кроме того, кремний имеет наименьший температурный коэффициент сопротивления.

Для изготовления *полупроводниковых* тензодатчиков применяют следующие тензолитовые материалы:

- графит + тонкий кварцевый песок + смола;
- графит + мел + шеллак (или канифоль);
- уголь (или сажа) + бакелитовый лак.

Тензолитовые датчики не нашли большого применения.

За последнее время стали применяться *кристаллические полупроводниковые материалы*. Наиболее сильно проявляется тензоэффект в таких полупроводниковых материалах, как германий Ge, кремний Si, антимонид индия InSb, фосфид индия InP, арсенид галлия GaAs, антимонид галлия GaSb и др. Наибольшее практическое применение получили датчики, изготовленные из германия и кремния. Следует отметить, что кремний облада-

ет высокой чувствительностью, химически инертен, механически прочен и выдерживает нагрев до 540 °С. Кроме того, из кремния можно изготавливать и датчики различных форм.

Фольговые датчики изготавливаются из золотосеребряных сплавов, нержавеющей сталей и других материалов. Лучшим материалом считается фольга из золотосеребряного сплава и медно-никелевая фольга.

В последние годы появились некоторые разновидности фольговых тензодатчиков. Так, титановый датчик, изготовленный из фольги титанового сплава (например, титан-алюминиевый сплав марки 48Т-2), обеспечивает измерение относительной деформации до 12 % при чувствительности датчика порядка 0,2. Датчики, выполненные из титанового сплава, могут работать в агрессивных средах при температурах до 200 °С.

В конструкциях *плёночных тензодатчиков* используются висмут, титан, кремний или германий.

Несущая основа

Большое влияние на величину тензочувствительности имеет качество подложки и клея.

В качестве основы (подложки) используется плотная папиросная бумага или слой лака, которые не вносят погрешность в измерение, и тензорезисторы называют соответственно бумажными или лаковыми.

В последние годы стали применяться акриловые, полиамидные, эпоксидно-стеклянные, эпоксидные, эпоксидно-полиамидные материалы.

В большинстве случаев применяется полиамидная плёнка, отличающаяся прочностью, гибкостью и совместимостью с большинством связующих.

Применяется плёнка из эпоксидной смолы. Её особенности:

- линейно-упругое поведение материала;
- отсутствие гистерезиса.

Полимеры, армированные стекловолокном, применяются в датчиках для работ в циклических деформациях.

В датчиках, работающих при повышенных температурах, используются основы из эпоксидных и фенольных смол, армированных стекловолокном.

Клей для приклеивания тензодатчиков

Комбинация датчика (его несущая основа и клей) требует самого серьёзного внимания.

Клей, с помощью которого приклеивают тензодатчик на образец, должен обладать прочностью, линейной упругостью и стабильностью в течение длительного периода времени.

В зависимости от типа применяемых тензодатчиков, материала исследуемой детали и условий испытаний применяют различные сорта клеев. Наибольшее распространение получила технология приклейки про-

волоочных датчиков с помощью клея БФ-2 или БФ-4. Это объясняется тем, что сами датчики выполняются на бакелитовом клее, и поэтому при простой технологии качество приклейки получается надёжным.

Часто для наклейки тензорезисторов используются специальные безусадочные клеи:

- отечественные (ВН-15Т, В-58Т);
- зарубежные фирмы предлагают специальные клеи для решения самого широкого спектра задач; все они обладают хорошей адгезией в широком диапазоне температур.

Последнее время в качестве клея широко используются метил-2-цианоакриад, эпоксидная смола, полимид и некоторые виды керамики.

Цианоакриад не требует ни нагрева, ни отвердителей для инициирования полимеризации. Для ускорения полимеризации на одну из поверхностей может быть нанесён катализатор.

Благодаря очень быстрой полимеризации этот клей является идеальным компонентом для тензодатчиков общего назначения. Минутного нажатия большим пальцем и двухминутной паузы оказывается достаточно для фиксации. Он может использоваться в диапазоне температур $-32...+65$ °С. Он обеспечивает правильное измерение деформации не выше 6 %. Прочность клея снижается со временем из-за поглощения влаги, поэтому его необходимо защищать при длительной эксплуатации.

Датчики, выполненные на бумажной подложке и без подложки (проволочные и фольговые), наклеиваются клеем БФ-2, который обеспечивает надёжное сцепление с металлическими деталями и обладает высоким (порядка 1000 мОм) сопротивлением изоляции в пределах температур $+20...140$ °С и малой ползучестью.

Наклейка полупроводниковых тензодатчиков принципиально не отличается от наклейки проволочных и фольговых тензодатчиков. Если тензодатчик изготовлен на плёнках БФ-2, ВЛ-7, слюде и других подложках, их следует приклеивать соответственно теми же клеями.

Защита от воздействия окружающей среды

Чувствительные элементы после их приклеивания должны защищаться от воздействий окружающей среды, чтобы препятствовать, прежде всего, воздействию влажности. Для этого после отверждения, по возможности ещё в тёплом состоянии, они покрываются защитными лаками. Чтобы воспрепятствовать образованию сквозных пор, такую операцию повторяют, как правило, несколько раз. Такая защита необходима для предохранения тензорезисторов от механических повреждений и поддержания неизменным сопротивления изоляции.

Технология наклейки

Основным методом крепления тензорезисторов к исследуемому объекту является приклейка.

Приклеенный тензодатчик, представляет собой преобразователь разового действия, и его параметры и характеристики во многом зависят от технологии и качества наклейки на исследуемый объект. Поверхность контролируемого объекта перед приклеиванием тщательно очищается механическими и химическими средствами, а затем к ней приклеивают тензорезисторы на слой соответствующих клеящих и изолирующих веществ.

При наклеивании тензодатчика на контролируемый объект недопустимо появление пузырьков воздуха между поверхностью объекта и подложкой датчика.

После отверждения клеев тензодатчики должны быть покрыты герметиком (лаком, парафином, каучуком и т.п.).

На рис. 2.23 показан пример наклейки датчика на поверхность контролируемого объекта.



Рис. 2.23. Пример наклейки тензодатчика на деталь

На рисунке видны база датчика, припой, выводные провода и слой лака, защищающий датчик от повреждения.

Температурные датчики

С температурой мы сталкиваемся ежедневно, и это наиболее знакомая нам физическая величина. Среди прочих температурные датчики отличаются особенно большим разнообразием типов и являются одним из самых распространённых видов датчиков.

Температурой называется статистическая величина, характеризующая тепловое состояние тела и пропорциональная средней кинематической энергии молекул тела.

За единицу абсолютной температуры в СИ принят Кельвин (К). Температура может быть также представлена в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Значе-

ние температуры по шкале Цельсия (t °С) связано с абсолютной температурой соотношением $t = T - 273,15$ К (1 °С = 1 К). Нуль шкалы Кельвина равен абсолютному нулю, поэтому все температуры по этой шкале положительные.

Температура – одна из самых старых измеряемых величин. Первые средства измерения температуры (жидкостные термометры) появились в XVI веке. Диапазон значений измеряемых температур очень широк (от -270 °С до нескольких сотен тысяч градусов Цельсия). В промышленности, в различных технологических процессах верхний предел, как правило, ограничивается 300 К.

Для измерения температуры в зависимости от конкретно поставленной задачи и достижения необходимой точности применяются различные средства и методы измерения, основанные на различных физических принципах действия. Изучением различных физических явлений, положенных в основу работы средств для измерения температур во всех диапазонах занимается термометрия.

Термометрия – раздел прикладной физики, посвящённый разработке методов и средств измерения температуры.

Термометрия также является разделом метрологии, в её задачу входит обеспечение единства и точности температурных измерений:

- установление температурных шкал;
- создание эталонов;
- разработка методик градуировки и поверки приборов для измерения температуры.

Температуру всегда определяют косвенно.

Измерения температуры производятся с использованием разнообразных методов, которые основаны:

- на тепловом расширении жидких, газообразных и твёрдых тел (*термомеханический эффект*);
- на изменении давления внутри замкнутого объёма при изменении температуры (*манометрические*);
- на изменении электрического сопротивления тел при изменении температуры (*терморезисторы*);
- на *термоэлектрическом* эффекте;
- на использовании электромагнитного излучения нагретых тел.

Все приборы для измерения температуры условно можно разделить на две большие группы:

- *контактные*, т.е. датчик температуры непосредственно контактирует с измеряемой средой;
- *бесконтактные*, которые применяются для измерения температуры там, где прямой контакт с измеряемой средой невозможен по тем или

иным причинам, например, температуру стали в доменных или мартеновских печах, температуру лавы в жерле вулкана, температуру сред (жидкости, газа), находящихся в недоступных прямому измерению местах и т.д.

Для измерения температуры используют различные *первичные преобразователи (датчики)*, отличающиеся способом преобразования температуры в промежуточный сигнал.

В промышленности наибольшее применение получили следующие первичные преобразователи параметров температуры:

- термометры сопротивления (термопары);
- термометры расширения;
- манометрические термометры;
- термоэлектрические пирометры и пирометры излучения.

Все они, за исключением пирометров, в процессе эксплуатации находятся в контакте с измеряемой средой.

Термометры сопротивления (термопары)

В автоматизированных и автоматических системах контроля наибольшее применение нашли термометры сопротивления – термопары.

Термопара – старейший и до сих пор наиболее распространённый в промышленности температурный датчик.

Это объясняется тем, что термопары являются первичными преобразователями, которые преобразуют изменение температуры на входе датчика в электрический сигнал на его выходе, удобный для дистанционной передачи. Полученный электрический сигнал может быть использован как для регистрации параметров температуры, так и в качестве управляющего сигнала в автоматических системах поднастройки и подналадки. Поэтому в измерительную цепь за термопарой может быть сразу включён измерительный прибор. Для измерения термоЭДС термопары обычно применяют автоматические потенциометры.

Термопара – термочувствительный элемент в устройствах для измерения температуры в системах управления и контроля.

Состоит из двух последовательно соединённых (спаянных) между собой разнородных проводников или (реже) полупроводников. Если спаи находятся при разных температурах, то в цепи термопары возникает ЭДС (термоЭДС), величина которой однозначно связана с разностью температур «горячего» и «холодного» спаев.

Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение из-за надёжной конструкции датчика, возможности работать в широком диапазоне температур и дешевизны. Широкому применению термопары обязаны в первую очередь своей простоте, удобству монтажа, возможности измерения локальной температуры. Они гораздо более линейны, чем многие другие датчики, а их нелинейность на сегодняшний день хорошо изучена и описана в специальной литературе.

Принцип действия термопары

Действие термопары основано на эффекте, который впервые был открыт и описан Томасом Зеебеком в 1822 г. Наиболее правильное определение этого эффекта следующее: если гомогенный материал, обладающий свободными зарядами, имеет разную температуру на измерительных контактах, то между контактами возникает разность потенциалов.

Для нас более привычно обычно приводимое в литературе несколько другое определение эффекта Зеебека – в спае из разнородных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термоЭДС), приблизительно пропорциональная разности температур между самим спаем и его выводами, при этом *в цепи генерируется электрический ток*. Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока.

При этом не требуется дополнительный источник питания, т.к. выходное напряжение возникает вследствие термоэлектрических свойств материалов, входящих в состав термопары. ТермоЭДС возникает между проводниками, отличающимися по своим химическим или физическим свойствам.

Термопара – датчик генераторного типа.

Под термоэлектрическим эффектом понимается генерирование термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов и сплавов.

Принцип действия термопары показан на рис. 2.24.

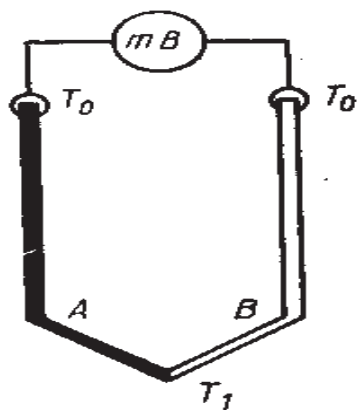


Рис. 2.24. Термопара:

А, В – проводники;

T_1 – точка горячего спаея;

T_0 – точка холодного спаея

Два проводника А и В соединены между собой таким образом, что в месте их соединения образуется спай. Один из спаев, горячий спай (T_1), помещён непосредственно в зону измерения температуры, другой, холодный спай (T_0), выведен из контролируемой зоны.

Из-за разности температур спаев возникает ЭДС, в цепи течёт ток. Величина возникающего напряжения тем больше, чем выше разность температур спаев.

Соединение проводов, изготовленных из разных металлов, выполняется таким образом, чтобы получилось небольшое по размеру соединение – спай.

Провода можно просто скрутить, однако такое соединение ненадёжно и имеет большой уровень шумов. Сварку металлов иногда заменяют пайкой, однако верхний температурный диапазон такой термопары ограничен температурой плавления припоя.

При температурах, близких к температуре плавления припоя, контакт разнородных металлов в термопаре может нарушаться.

Промышленностью выпускаются термопары трёх различных конструкций: с открытым спаем (рис. 2.25, а), с изолированным незаземленным спаем (рис. 2.25, б) и с заземленным спаем (рис. 2.25, в).

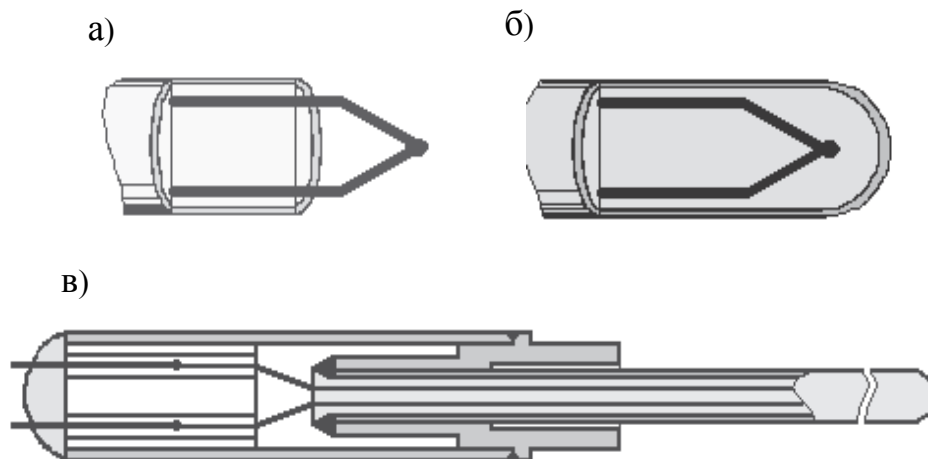


Рис. 2.25. Конструктивное исполнение термопар:
а – с открытым спаем; б – с изолированным незаземлённым спаем; в – с заземлённым спаем

Термопары с открытым контактом имеют малую постоянную времени, но плохую коррозионную стойкость. Термопары двух других типов применимы для измерения температуры в агрессивных средах.

Особенностью термопар по сравнению с другими типами термодатчиков является то, что температурный коэффициент зависит только от материала, из которого изготовлена термопара и не зависит от её конструкции (термопары выполняются в форме щупа, прокладки, бронированного зонда и т.п.). Это делает термопары взаимозаменяемыми без дополнительной подстройки.

На рис. 2.26 представлены примеры конструкций термопар, выпускаемых промышленностью.

В зависимости от диапазона измеряемых температур по специальным таблицам подбирают соответствующую пару проводников (медь – константан; хромель – копель; алюмель – копель и т.п.).

Так как напряжение, генерируемое термопарой, мало (10...50 мВ), то для передачи электрического сигнала от термопары к исполнительным механизмам или измерительным устройствам требуется его усиление. Для усиления сигнала, полученного от термопары, применяются специальные усилители.

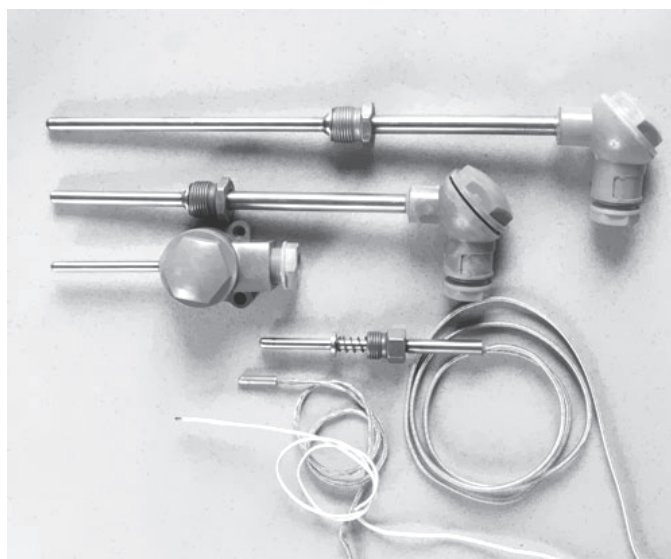


Рис. 2.26. Конструкции термопар, выпускаемых промышленностью

Для подключения термопар к измерительным устройствам и приборам используется специальный (*коаксиальный*) кабель с термоэлектрической компенсацией, который позволяет защитить слабый сигнал от различного вида наводок и помех.

Каждая термопара снабжается градуировочной характеристикой.

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов, равной нулю. При температуре, отличной от нуля, возникает дополнительная погрешность. При градуировке термопар для исключения погрешности от непостоянства внутреннего сопротивления прибора (мВ), последний градуируется совместно с датчиком.

Преимущества термопар:

- широкий диапазон измерения рабочих температур ($-200...+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$), это самый высокотемпературный из контактных датчиков;
- высокая точность измерения значений температуры во всех диапазонах (вплоть до $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- спай термопары может быть непосредственно заземлён или приведён в прямой контакт с измеряемым объектом;
- простота изготовления, надёжность и прочность конструкции;
- дешевизна.

Недостатки термопар:

- для получения высокой точности измерения температуры во всех диапазонах (до $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) требуется индивидуальная градуировка термопары;
- необходимость контроля температуры холодных спаев. В современных конструкциях измерителей на основе термопар используется измерение температуры блока холодных спаев с помощью встроенного термистора или полупроводникового сенсора и автоматическое введение поправки к измеренной термоЭДС;

- материал электродов не является химически инертным и при недостаточной герметичности корпуса термопары может подвергаться влиянию агрессивных сред, атмосферы и т.д.;

- возникновение термоэлектрической неоднородности в проводниках и, как следствие, изменение градуировочной характеристики из-за изменения состава сплава в результате коррозии и других химических процессов;

- на показания влияет температура свободных концов, на которую необходимо вносить поправку;

- на большой длине термопарных и удлинительных проводов может возникать эффект «антенны» для существующих электромагнитных полей;

- зависимость термоЭДС от температуры существенно не линейна. Это создаёт трудности при разработке вторичных преобразователей сигнала.

Источники погрешности термопар

Принцип действия термопар и особенности преобразования и передачи сигнала приводят к следующим возможным проблемам при их эксплуатации, вызывающим ошибку в определении температуры:

- дефекты формирования рабочего спая термопары;
- возникновение термоэлектрической неоднородности по длине термоэлектродов и изменение градуировочной характеристики термопары;
- электрическое шунтирование проводников изоляцией и возможное возникновение гальванического эффекта;
- тепловое шунтирование;
- электрические шумы и утечки.

Типы термопар

При выборе термопары для производства замеров температуры в требуемом диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона.

Технические требования к термопарам определяются ГОСТ 6616-94.

Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров (НСХ), классы допуска и диапазоны измерений приведены в стандарте МЭК 60584-1,2 и в ГОСТ Р 8.585-2001 «Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».

В промышленности широко применяются термопары (ТП) следующих типов:

- R – ТПП (13 % платина – родий/платина);
- S – ТПП (10 % платина – родий/платина);
- В – ТПР (30 % платина – 6 % родий);
- J – ТЖК (железо/медь – никель (железо/константан));
- T – ТМК (медь/медь – никель (медь/константан));
- E – ТХКн (никель – хром/медь – никель (хромель/константан));

- К – ТХА (никель – хром/никель – алюминий (хромель/алюмель));
- N – ТНН (никель – хром – кремний/никель – кремний (нихро-сил/нисил));
- L – ТХК (хромель/копель).

Термопары из благородных металлов очень широко используются во всех отраслях промышленности. Они дешёвы и просты в обращении, устойчивы к вибрациям, могут выпускаться во взрывозащищённом исполнении. Особенно удобны в обращении кабельные термопары, электроды которых заключены в специальный герметичный гибкий кабель с минеральной изоляцией. Такая конструкция позволяет расположить термопару в самых сложных конструктивных узлах объекта.

Термометры расширения

Действие термометров расширения основано на свойстве металлических тел изменять электрическое сопротивление при изменении температуры.

Термометры расширения представляют собой первичные преобразователи с удобным для дистанционной передачи сигналом – электрическим сопротивлением.

У металлических термометров расширения с возрастанием температуры сопротивление увеличивается практически линейно, у полупроводниковых, наоборот, уменьшается.

Металлические термометры расширения изготавливают (рис. 2.27) из тонкой медной или платиновой проволоки 1, помещённой в электроизоляционный корпус 2. Зависимость электрического сопротивления от температуры (для медных термометров $-50...+180$ °С, для платиновых $-200...+750$ °С) весьма стабильна и воспроизводима.

Это обеспечивает взаимозаменяемость термометров сопротивления.

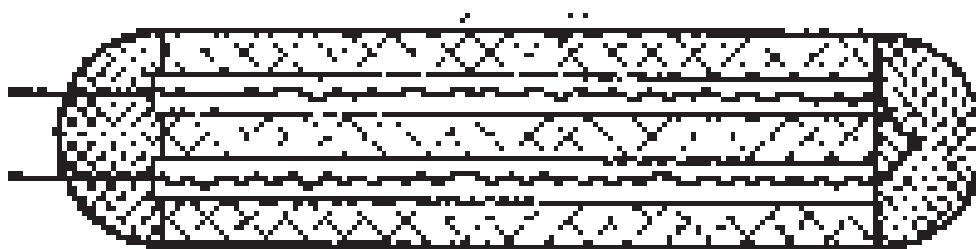


Рис. 2.27. Металлический термометр расширения

Для защиты металлических термометров расширения от воздействия параметров окружающей среды применяют защитные чехлы.

Приборостроительная промышленность выпускает много модификаций защитных чехлов, рассчитанных на эксплуатацию термометров при различном давлении, различной агрессивности измеряемой среды, обладающих разной инерционностью и глубиной погружения.

Полупроводниковые термометры расширения (термисторы) для измерений в промышленности применяют редко, хотя их чувствительность гораздо выше, чем проволочных термометров расширения. Это объясняется тем, что градуировочные характеристики термисторов значительно отличаются друг от друга, что затрудняет их взаимозаменяемость.

Для измерения такого сигнала обычно применяют автоматические уравновешенные мосты. При необходимости выходной сигнал термометра расширения может быть преобразован в унифицированный. Для этого в измерительную цепь включают промежуточный преобразователь. В этом случае измерительным будет прибор для измерения постоянного тока.

Фотодатчики.

Принцип действия фотодатчиков основан на явлении фотоэлектронной эмиссии. Основой фотоэлектрического датчика является фотоэлемент.

Различают фотоэлементы с внешним фотоэффектом, с внутренним фотоэффектом, вентильные.

Фотоэлектронная эмиссия, или внешний фотоэффект – это физическое явление, при котором с поверхности фотоэлемента под воздействием энергии фотонов светового потока от источника света эмитируют (вылетают) свободные электроны. То есть при попадании на поверхность фотоэлемента, фотон, обладающий определённой кинетической энергией, ударяясь о поверхность фотоэлемента, передаёт часть своей энергии электронам кристаллической решётки материала фотоэлемента. Скорость движения и энергия электронов увеличиваются настолько, что они не в состоянии удержаться на своих орбитах, и они эмитируют (вылетают) с поверхности фотоэлемента, образуя облачко свободных электронов.

Для вылета электронов из физического тела (фотоэлемента) им необходимо преодолеть энергетический барьер. Поскольку кинетическая энергия фотонов пропорциональна hc/λ (где h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны света), то чем короче длина волны облучающего света, тем большую энергию получают электроны и тем легче им преодолеть энергетический барьер.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом (рис. 2.28) представляет собой вакуумный баллон с двумя электродами.

Металлический анод 1 имеет форму кольца или пластинки, расположенной

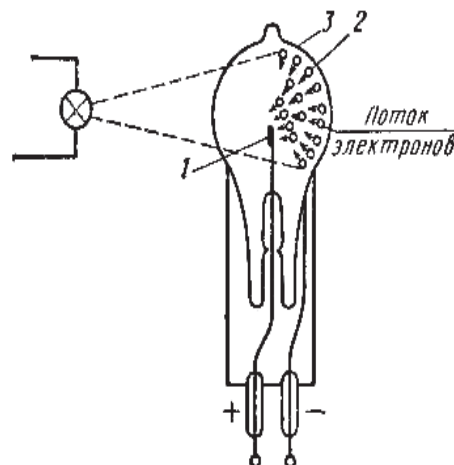


Рис. 2.28. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом (фотодиод):

- 1 – металлический анод,
- 2 – катод, 3 – стеклянная колба (корпус фотоэлемента)

против центра катода 2, фоточувствительный слой (выполненный из селена, сернистого таллия и т.п.) нанесён непосредственно на стекло колбы (корпуса фотоэлемента) 3. Он занимает около половины сферической поверхности.

Под влиянием кинетической энергии светового потока от источника света, падающего на катод 2, с его поверхности выделяются (эмитируют) свободные электроны. Привлечённые положительным зарядом анода 1, отрицательно заряженные электроны образуют фототок в электрической цепи фотоэлемента. С увеличением светового потока, падающего на катод, увеличивается число имитированных электронов, т.е. увеличивается сила тока.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления)

Принцип действия таких фотоэлементов основан на использовании эффекта фотопроводимости – изменения электрического сопротивления физического тела при облучении его светом.

Среди материалов, обладающих эффектом фотопроводимости: ZnS, CdS, GaAs, Ge, PbS и др. Максимум спектральной чувствительности CdS приходится приблизительно на свет с длиной волны 500...550 нм, что соответствует приблизительно середине зоны чувствительности человеческого глаза.

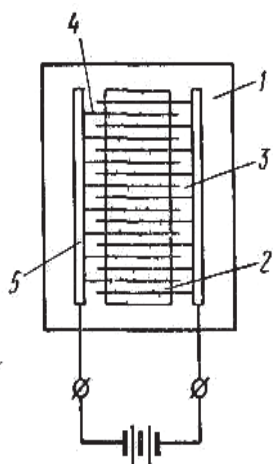


Рис. 2.29. Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фотосопротивление)

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (рис. 2.29) изготавливают путём нанесения на стеклянную пластину 1 тонкого слоя полупроводника 2 (селена, сернистого таллия и т.п.) на решетки 3 и 4 из тонких проводников.

Металлические электроды 5 присоединены к выводам, включаемым последовательно с источником питания.

Под действием светового потока в селене появляются свободные электроны, увеличивающие его проводимость. По силе тока в цепи фотосопротивления или по напряжению на нагрузочном сопротивлении можно судить о силе светового потока. Увеличение проводимости освещённого полупроводника объясняется тем, что фотоны лучистой энергии выбивают электроны из кристаллической решётки полупроводника и превращают их в свободные электроны проводимости.

Эти электроны под влиянием электрического поля, созданного между электродами, образуют первичный фототок, последний достигает сравнительно больших значений и разрушает первоначальную кристалличе-

скую решётку, что вызывает появление вторичного фототока за счёт образования новых свободных электронов при разрушении кристаллической решетки. Вторичный фототок зависит от приложенного напряжения и температуры.

Фотосопротивления имеют высокую чувствительность не только в области видимой части излучения, но и в области инфракрасных (тепловых) лучей.

К недостаткам фотосопротивлений следует отнести нелинейность световых характеристик, инерционность (замедленная реакция – 50 мс и более), температурную погрешность и наличие теневого тока при отсутствии освещённости.

Вентильные фотоэлементы

Вентильный фотоэлемент работает на использовании вентильного фотоэффекта (рис. 2.30), который заключается в возникновении ЭДС на выводах р-п-перехода в облучаемом светом полупроводнике. Под воздействием света внутри р-п-перехода появляются свободные электроны и дырки и генерируется ЭДС. То есть свободные электроны переходят из слоя освещённого в слой неосвещённого вещества, отделённого тонким изоляционным или «запирающим» слоем. Ввиду недостатка электронов в одном слое и избытка в другом между слоями возникает ЭДС.

Вентильный фотоэлемент (с запирающим слоем) состоит из стальной пластинки 1, на которую нанесён слой селена 2, а на последний нанесён тонкий (полупрозрачный) слой серебра или золота 4. К слою из серебра или золота прижато контактное кольцо 5. Фотоэлемент размещён в кожухе 6. На границе золота (серебра) образуется запирающий слой 3, особенностью которого является его односторонняя проводимость.

Вентильные фотоэлементы не требуют посторонних источников тока, т.к. сами вырабатывают электроэнергию. Световая характеристика вентильного селенового фотоэлемента зависит от величины внешнего сопротивления, на которое он работает. С увеличением сопротивления внешней нагрузки световая характеристика вентильного фотоэлемента приближается к линейной.

Фотохимические датчики представляют собой электролитические устройства, реагирующие по-разному на свет и темноту. Под действием света изменяется давление, и контакты размыкаются.

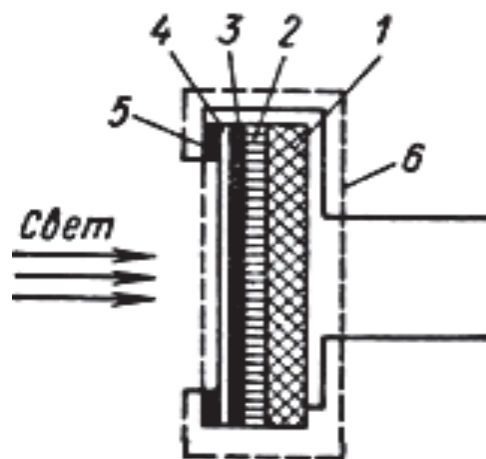


Рис. 2.30. Вентильный фотоэлемент

Характер излучения зависит от вида излучателей, которые отличаются как излучательной способностью, так и шириной спектра.

В фотоэлектрических преобразователях используются малогабаритные источники излучения: миниатюрные лампы накаливания, газоразрядные импульсные лампы, светоизлучающие полупроводниковые диоды.

В некоторых случаях в качестве источника излучения используются маломощные лазеры и осциллографические трубки.

Фотоэлектрические датчики являются приборами высокой чувствительности. Они имеют малые габаритные размеры, простую конструкцию и их легко встраивать в системы автоматического регулирования.

Достоинства и недостатки фотодатчиков

По сравнению с другими типами датчиков, фотодатчики обладают рядом преимуществ. Диапазон действия фотодатчиков существенно превосходит индуктивные, ёмкостные, магнитные и ультразвуковые. Высокая чувствительность даже при миниатюрном исполнении и многочисленные варианты конструкций корпуса позволяют фотодатчикам решать практически любые задачи:

- возможность бесконтактного измерения объекта;
- возможность (при соответствующей оптике) измерения объектов как с чрезвычайно большими, так и с необычайно малыми размерами;
- возможность дистанцировать место измерения и место получения результата;
- высокая скорость отклика;
- простота в эксплуатации;
- высокая точность;
- удобство применения интегральной технологии (оптические датчики, как правило, твердотельные и полупроводниковые), обеспечивающей малые размеры и большой срок службы;
- не требуют посторонних источников тока, т.к. сами вырабатывают электроэнергию;
- обширная сфера использования: измерение различных физических величин, определение формы, распознавание объектов и т.д.

Наряду с преимуществами оптические датчики обладают и некоторыми *недостатками*:

- они весьма чувствительны к загрязнению окружающей среды (задымлённость, загазованность, запылённость);
- подвержены влиянию постороннего света, светового фона;
- подвержены влиянию температурных параметров окружающей среды, её влажности;
- среди них мало найдётся таких, которые обладали бы достаточной чувствительностью во всём световом диапазоне. Большинство датчиков

имеет оптимальную чувствительность в довольно узкой зоне: или ультрафиолетовой, или видимой, или инфракрасной части спектра.

Для уменьшения влияния параметров окружающей среды, её загрязнения на точность измерения рекомендуется вместо полихромного (белого) света использовать монохромный источник света. Наиболее часто применяется лазер.

Области применения фотодатчиков

Фотодатчики распространены повсеместно и используются в нашей каждодневной жизни. Они помогают:

- бесконтактно включать и выключать воду в раковине в местах общественного пользования, например, в аэропортах и на вокзалах;
- включать и выключать освещение улиц;
- контролировать движение эскалатора;
- открывать двери в супермаркете;
- определять победителя на различных соревнованиях (*фотофиниш*) и т.д.

Она находят широкое применение в промышленности в системах автоматизации для контроля размеров, форм и цвета изделий.

Оптические датчики, работающие на эффекте фотопроводимости (вентильные фотоэлементы), рекомендуется использовать в экспонометрах фото- и кинокамер, в автоматических выключателях и регуляторах света, обнаружителях пламени и др.

Системы лазерного слежения стали эталоном, по которому определяется эффективность других систем. Сегодня эти системы работают по всему миру во многих отраслях промышленности, где не обойтись без крупномасштабной метрологии и юстировок.

Задачи, стоящие перед современным авиационным, автомобильным, судостроительным производствами, предусматривают оцифровку измерения и контроль качества крупногабаритных изделий различных конфигураций, в том числе деталей заготовительно-штамповочного производства.

В качестве примера одной из систем, наиболее полно отвечающих указанным требованиям, можно привести применение 3D-сканирования при контроле отклонений.

Данное направление достаточно молодое, первые разработки 3D-сканеров появились в 1995 году. Несмотря на высокую стоимость этих измерительных средств, предприятия всё чаще используют их для контроля благодаря неоспоримым преимуществам, которые они обеспечивают.

Современные сканеры позволяют полностью оцифровывать крупногабаритные детали (лонжероны, нервюры, панели, гребные винты и т.д.) в достаточно сжатые сроки (6...10 ч) с высочайшей точностью (5...10 мкм).

Для увеличения точности измерения, а также упрощения процесса сканирования и обратного инжиниринга возможно применение бескон-

тактных лазерных сенсоров, которые существенно упрощают процесс работы, увеличивают точность, уменьшают затраты времени и устраняют возможность повреждения детали во время измерения.

На рис. 2.31 показано применение стационарного 3D-сканера в производственных условиях для измерения геометрии гребного винта.



Рис. 2.31. Применение стационарного 3D-сканера для измерения геометрии гребного винта

Удобный дизайн, возможность температурной компенсации результатов измерений, виброустойчивость, невосприимчивость к ударам, а также наличие перезаряжаемого бесперебойного источника питания позволяют применять 3D-сканеры непосредственно в цеховых условиях.

Сканеры бывают различных типов:

- стационарные – для измерения крупногабаритных изделий, в которых используется лазерная система сканирования (см. рис. 2.31). Длина измерения со стационарной позиции составляет 1,2...3,7 метров, но существует ряд приспособлений для её увеличения;
- сканеры, в которых измерительная часть устанавливается на манипуляторе (достаточно мобильна) и перемещается вдоль детали;

- деталь устанавливается внутрь сканера и вращается, измерительная часть стационарна. Такие сканеры позволяют измерить небольшие по габаритам детали (до 300 мм) сложной конфигурации.

Специальное программное обеспечение может быстро просчитать отклонения по всем точкам поверхности.

Варианты применений специальных оптических датчиков

Дополнительно к фотодатчикам стандартного типа существует несколько специальных типов фотодатчиков. Эти специальные типы используются для решения нестандартных задач, таких как регистрация изменения цвета объекта, невидимых знаков на объекте, регистрация пористых объектов, в системах охраны и безопасности и т.д.

Цвет – разработано множество конструкций и модификаций детекторов цвета. Базовая конструкция – это одноканальные программируемые датчики с возможностью задавать один цвет для различения. Более сложные одноканальные модели могут различать до 10 и более цветов, а также тени на базе этих цветов.

Выходной контроль качества – типичный вариант применения объектов с разноцветной поверхностью. Ещё один вариант – это программирование множества оттенков или цветов на одном канале. В датчике можно запомнить цвета из стандартной палитры цветов, а затем такой датчик используется в процессе определения качества и точности цвета покрытия изделия.

Контраст – датчики контраста используются при необходимости сделать выбор между двумя цветами или средами. В датчик записываются два параметра, соответствующих двум различным цветам или средам. Типичный вариант использования датчиков контраста – *определение метки* при разрезании бумаги в упаковочной индустрии.

Люминесценция (свечение) – люминесцентные датчики используются для определения (различения) чернил, смазочных веществ, красок и других веществ, имеющих люминесцентные свойства. Метки на неровных поверхностях, видимые и невидимые, легко регистрируются при помощи датчиков с ультрафиолетовым источником излучения. Типичный вариант применения люминесцентных датчиков – *определение прозрачной запечатывающей пленки* на упаковках лекарств или определение меток на товаре, сделанных мелом (например, на деревянных упаковочных ящиках).

Световые решётки – передатчик излучает массив лучей, а приёмник их, соответственно, принимает, образуется своеобразный световой щит. Используются, например, в системах безопасности.

Миниатюрные световые решетки с высоким разрешением используются для подсчёта мелких предметов (частиц). Световые решётки большего размера применяют, например, для определения отсутствия детали в матрице прессы перед следующим циклом прессования.

Световые решётки используются для создания периметра безопасности перед станком с тем, чтобы оператор не имел доступа к потенциально опасным частям или зонам станка.

Пассивные инфракрасные (ИК) датчики применяются для контроля за перемещением объекта внутри зоны действия датчика. Термин пассивный используется потому, что датчик не испускает никакого света – он регистрирует ИК излучение объекта (используется принцип разности температур объекта и окружающей среды). Пассивные инфракрасные датчики часто используются в системах контроля *открытия автоматических дверей*, в системах автоматического включения света.

Сканеры пространства, так же как и пассивные ИК датчики, предназначены для определения присутствия объекта или его движения.

Пневматические датчики

Пневматические приборы впервые были использованы в машиностроении для измерения линейных размеров в 1928 году. В конце 40-х годов с началом автоматизации и механизации производственных процессов интерес к пневматическим методам измерений значительно возрос и началось интенсивное внедрение малогабаритных приборов высокого давления, в особенности дифференциальных, выгодно отличающихся по своим показателям от других пневматических средств измерений.

В настоящее время они находят широкое применение при контроле размеров наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, малых отверстий, конусов, а также геометрической формы деталей, расстояний между осями отверстий, малых перемещений, суммы или разности отклонений нескольких размеров. Наиболее широко пневматические измерительные приборы применяют в качестве средств активного контроля на финишных операциях.

Принцип пневматического измерения является основой действия многих приборов автоматического пассивного и активного контроля, контрольно-измерительных и сортировочных автоматов, измерительных приспособлений и систем.

Пневматические приборы надёжны в работе, обладают высокой точностью (цена деления шкалы может достигать 0,0001 мм), отличаются простотой обслуживания и низкой стоимостью. Поскольку эти приборы позволяют выполнять измерения бесконтактным методом, то с их помощью можно определять размеры легко деформируемых деталей, изготовленных из эластичных материалов, и тонкостенных деталей.

Кроме того, при использовании пневматического метода измерительная информация может быть передана на значительные расстояния без искажений. Это даёт возможность помещать в удобное для оператора место отсчётное устройство, оставив в зоне измерения лишь миниатюрное измерительное сопло.

Необходимость наличия системы сжатого воздуха, специальной аппаратуры для его очистки и стабилизации давления, а также относительно высокая инерционность пневматических приборов несколько сужают область их применения.

Принцип действия рассматриваемых приборов (пневматических преобразователей) основан на следующем (рис. 2.32).

В камеру датчика подаётся очищенный сжатый воздух под давлением P . Величина давления на входе в камеру датчика рассчитывается. Сжатый воздух может подаваться либо из цеховой сети, либо от компрессорной установки. Если находящийся под давлением в камере (воздухопроводе) воздух выпускать через небольшое отверстие (сопло) в атмосферу, то количество выходящего в единицу времени воздуха (расход) будет зависеть от давления в камере и площади рабочего сечения сопла. При постоянном давлении в камере расход зависит только от размеров выходного отверстия. Если рядом с соплом поставить какой-либо предмет, мешающий выходу воздуха, то давление в камере возрастёт. Оно будет тем больше, чем ближе к торцу сопла находится этот предмет, и снижается при увеличении зазора между ними. Такое сочетание сопла и устанавливаемого около него предмета получило название «сопло-заслонка».

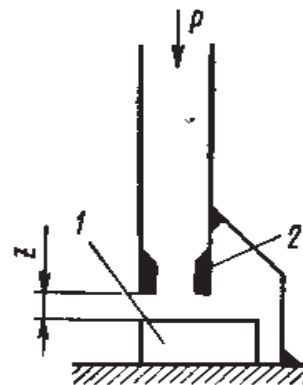


Рис. 2.32. Схема измерения пневматическим датчиком:
1 – измеряемая деталь;
2 – сопло

Контактный метод измерения

Если применяется контактный метод, заслонкой может служить элемент прибора, который меняет свое положение относительно сопла с изменением контролируемого размера.

Бесконтактный метод измерения

При пневматических измерениях бесконтактным методом в качестве заслонки используется поверхность измеряемой детали 1 (см. рис. 2.32).

В зависимости от изменения размера детали меняется зазор между её поверхностью и поверхностью сопла 2.

В результате давление воздуха P на выходе датчика меняется.

По расходу воздуха через зазор Z судят о размере контролируемой детали.

В зависимости от принципа преобразования различают следующие пневматические датчики:

- измеряющие изменение давления;
- измеряющие изменение расхода воздуха.

Датчики, измеряющие изменение давления

Приборы, работающие по принципу измерения изменения давления, называются *манометрическими*, они измеряют зазор между соплом и заслонкой по изменению давления в камере или воздухопроводе. Изменение давления регистрируется по шкале манометра, проградуированной в единицах длины.

Принципиальная схема прибора манометрического типа приведена на рис. 2.33.

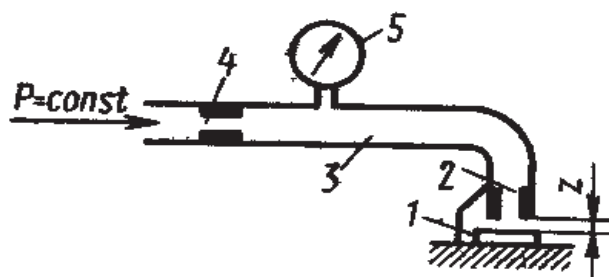


Рис. 2.33. Принципиальная схема пневматического датчика манометрического типа: 1 – измеряемая деталь; 2 – сопло; 3 – измерительная камера; 4 – входное сопло; 5 – манометр

Сжатый и очищенный воздух под постоянным давлением P через входное сопло 4 поступает в измерительную камеру 3 и далее через измерительное сопло 2 выходит в атмосферу.

При этом расход воздуха будет зависеть от размера зазора Z между соплом 2 и заслонкой (поверхностью детали 1). Изменение давления, пропорциональное значениям зазора Z , контролируют по манометру 5.

Для автоматизации процесса контроля манометр снабжается подвижными электрическими контактами, располагающимися на границах допустимых отклонений проверяемых размеров. При выходе контролируемого размера за пределы поля допуска манометр подаёт электрический сигнал, который может быть использован подналадчиком или другим управляющим исполнительным механизмом.

Датчики, измеряющие расход воздуха

В датчиках, работающих по принципу измерения расхода воздуха, воздух по трубопроводу поступает к измерительному соплу. В зависимости от зазора между соплом и поверхностью контролируемой детали изменяется расход воздуха, проходящего через этот зазор. Значение расхода воздуха регистрируется соответствующими приборами. По этому принципу работают пневматические длинномеры.

Достоинства пневматических измерительных систем:

- высокая производительность;
- простота конструкции;

- бесконтактный метод измерения, что позволяет производить измерение в процессе выполнения технологической операции;
- высокая точность и высокая чувствительность измерительной системы;
- конструкция датчика позволяет удалять все частицы загрязнений и СОТС с измеряемой поверхности струёй сжатого потока воздуха.

Недостатки:

- при расширении диапазона измерения падает чувствительность датчика. Поэтому в машиностроении пневматические датчики чаще применяются на отделочных операциях, т.е. там, где пределы измерений малы;
- образование конденсата в трубопроводах в результате перепада температур в рабочих помещениях может привести к искажению результатов измерений. Для устранения этого недостатка требуется применение специальной аппаратуры для очистки и осушения воздуха;
- нестабильность характеристик датчика при перепаде давления воздуха в сети. Современные конструкции датчиков снабжены эжекторами (дросселями), которые позволяют обеспечить стабильность давления на выходе из сопла. Это делает конструкцию датчика сложнее и несколько дороже, однако значительно улучшает метрологические характеристики датчиков.

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Для наблюдения за технологическими процессами на производстве, в медицине, во время научных исследований, при выполнении экспериментальных работ требуется не только измерять те или иные параметры, физические величины, но и автоматически фиксировать их значение. Для этих целей используются измерительные приборы. По результатам измерений можно определить текущее значение измеряемого параметра, определить тенденцию его изменения во времени или пространстве, установить функциональные связи между различными параметрами, которые определяют ход этого процесса.

3.1. Классификация приборов

Измерительные приборы классифицируются по следующим признакам:

- по принципу действия;
- способу образования показания;
- точности;
- условиям применения;
- степени защищённости от электромагнитных и электрических полей;

- прочности и устойчивости против механических воздействий;
- стабильности показаний;
- чувствительности;
- пределам и диапазонам измерения.

По некоторым из этих признаков классификация различных приборов одинакова, по другим она различна. Некоторые из перечисленных признаков применимы к одним средствам измерений и не применимы к другим.

Принцип действия

Ту или иную величину или параметр можно измерить при помощи средств измерения, которые отличаются друг от друга по принципу действия. Различия этих признаков связаны с использованием различных физических явлений. Например, для измерения параметров шероховатости могут использоваться приборы на основе ёмкостных, индуктивных, оптических датчиков. Кроме того, могут быть различные способы использования одного и того же явления. По принципу действия приборы могут быть механическими, оптико-механическими, электромеханическими, электро-тепловыми, электронно-кинетическими, электрохимическими и т.д. Принцип действия или система прибора определяют способ преобразования измерительного сигнала в зависимости от изменения контролируемой величины или параметра. В зависимости от требований к точности и другим характеристикам прибора может быть выбран тот или иной принцип действия.

Способ образования показаний

По способу образованию показаний приборы можно подразделить на две основные группы:

- 1) показывающие;
- 2) самопишущие.

Показывающие – такие приборы, которые, если на них воздействует измеряемая величина, дают показания, не требуя от наблюдателя каких-либо дополнительных действий. Указатель отсчётного устройства без всякого воздействия человека перемещается и даёт показания, наблюдаемые визуально. Перемещение указателя пропорционально изменению измеряемой величины. В других случаях для перемещения этого указателя могут использоваться дополнительные источники питания (потенциометр, сбалансированный мост и т.д.). К показывающим приборам можно отнести и стрелочные приборы, и с цифровым отсчётом.

Самопишущие (регистрирующие) приборы кроме шкалы имеют специальный механизм, записывающий показания прибора. В зависимости от формы регистрации различают: приборы, производящие запись в виде диаграмм; приборы, в которых предусмотрено печатание показаний в цифровой форме (до 2500 знаков в минуту). Запись может быть непрерывной, т.е.

такой, что значение измеряемой величины записывается сплошной линией на диаграмме, или точечной, при которой значение измеряемой величины регистрируется на диаграмме точками, расположенными друга от друга на определённом расстоянии. Запись может производиться на бумаге в виде движущейся ленты или наложенной на барабан.

Классификация по точности

Точность измерения является важнейшей характеристикой результатов измерений, определяющей возможность использования полученных результатов для тех целей, для которых проводятся измерения. Одним из решающих факторов точности измерений является точность применяемых СИ, приборов. Точность некоторых СИ зависит не только от точности их градуировки, но и от некоторых свойств механических частей, определяемых наличием подвижных элементов. Одной из причин вариаций показаний таких СИ является трение в опорах подвижных частей.

Погрешность СИ, выявляемая при «нормальных» внешних условиях, называется *основной погрешностью*.

В качестве «нормальных» условий эксплуатации измерительных приборов обычно принимают:

- температуру окружающей среды 20...22 °С.
- окружающее атмосферное давление либо 750 мм рт. ст., либо $1,13 \cdot 10^5$ Па.
- влажность воздуха 70 %.

Все СИ делятся на классы точности в зависимости от значений предельно допустимых основных погрешностей. Для каждого вида СИ устанавливаются свои классы точности, и им присваиваются специальные обозначения: числа, буквы, пентаграммы и т.п.

Условия применения

Нормальные условия эксплуатации, при которых проявляются основные погрешности, не являются *обычными* условиями применения СИ. Для каждого СИ устанавливаются границы их допустимого применения. При этом имеется в виду, что в пределах этих границ нормируются и обеспечиваются те их свойства, которые определяют точность измерения.

Наибольшее значение для большинства СИ имеет соблюдение температурного интервала, причём для каждого класса точности СИ устанавливается свой диапазон температуры.

Не для всех СИ нормируется температура. Для целого ряда приборов нормируется атмосферное давление, которое указывается в миллиметрах ртутного столба; иногда для некоторых приборов указывается не давление, а высота над уровнем моря. Для многих радио- и электроизмерительных приборов, устройств существуют ещё две величины, которые определяют условия эксплуатации прибора и обязательно нормируются: рабочее напряжение в сети, диапазон частот, при которых данный прибор может использоваться.

Степени защищённости от электромагнитных полей

Магнитное поле Земли действует постоянно, влияя на СИ. В каждой точке поверхности Земли оно примерно постоянное. Магнитное поле Земли и другие магнитные поля влияют на показания СИ, принцип действия которых основан на использовании электромагнитных и электрических явлений. Магнитные поля, возникающие в современных технических устройствах, во много раз сильнее магнитного поля Земли. Поэтому необходимо предусмотреть специальную защиту от этих полей.

Для всех электрических и радиоприборов устанавливаются степени защиты от влияния электромагнитных полей. Установлено две степени защиты – две категории (I и II категории). Эти категории нормируются с помощью ГОСТ 9736-91.

Прочность и устойчивость против механических воздействий

Существуют такие внешние воздействия, которые не приводят к искажению показаний приборов, однако они могут привести к нарушению действия механизма прибора и его порче.

На средства измерения, приборы могут воздействовать жидкости, воздух, пыль, газы и т.д. От воздействия этих факторов приборы защищаются специальными кожухами или корпусами специальных конструкций с различного рода покрытиями, обладающими защитными свойствами.

По степени защищённости от внешних воздействий все приборы подразделяются:

- на обыкновенные;
- пылезащитные;
- брызгозащитные;
- водозащитные;
- герметичные;
- газозащищённые;
- взрывобезопасные.

Взрывобезопасными приборами (взрывозащищёнными) называются приборы, конструкция которых исключает появление искры.

На СИ могут оказывать воздействие механические силы: тряска, вибрации, удары. Последствия таких воздействий могут быть различны. Они могут привести к искажению показаний, невозможности их отсчёта во время снятия показаний. При снятии этих воздействий все свойства СИ восстанавливаются. Для защиты от этих воздействий разрабатываются специальные конструкции приборов. В этом случае в конструкции приборов вводится дополнительный узел – *успокоитель*.

В паспорте данного прибора обязательно указываются основные характеристики механических воздействий: вид воздействия, амплитуда, частота, вид кривой и формы её колебания.

Все электрические измерительные приборы в обязательном порядке проверяются на прочность изоляции. Все электрические измерительные приборы тестируются на величину напряжения пробоя.

3.2. Общие детали приборов

Несмотря на различия принципов действия, служебного назначения, конструктивных особенностей и т.д. все приборы имеют общее для них детали и узлы (рис. 3.1):

- корпус;
- отсчётное устройство (шкала, указатель);
- устройство для установки указателя на ноль (регулятор нуля);
- успокоители.

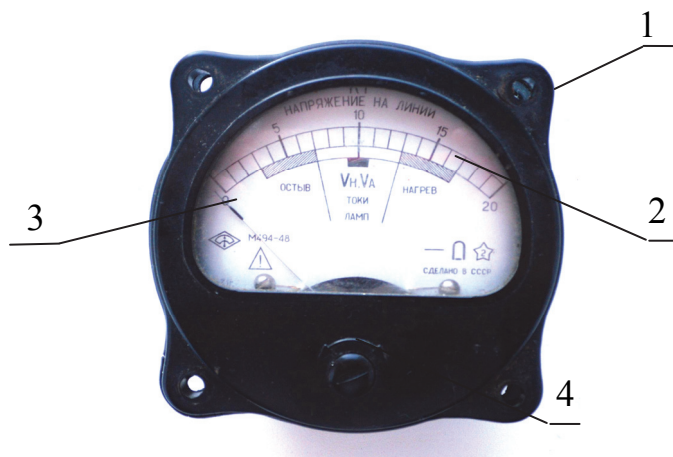


Рис. 3.1. Общий вид измерительного прибора:
1 – корпус; 2 – шкала; 3 – указатель; 4 – регулятор нуля

3.2.1. Корпус

Корпус измерительного прибора предназначен для защиты механизмов и элементов прибора от загрязнений, попадания влаги, воздействия различных элементов газовой среды, от механических повреждений всех конструктивных элементов прибора. Корпуса изготавливаются из металла, пластмассы, дерева, стекла и т.п.

3.2.2. Отсчётное устройство

Отсчётное устройство служит для наблюдения значения измеряемой величины и состоит:

- из шкалы;
- указателя.

Шкала

Шкала измерительных приборов служит для количественной оценки величин. Шкала прибора представляет собой совокупность отметок, соответствующих отдельным значениям измеряемой величины.

Расстояние между осями двух соседних отметок шкалы называется делением шкалы, а изменение значения измеряемой величины, вызывающее отклонение указателя относительно шкалы на одно деление, называется ценой деления.

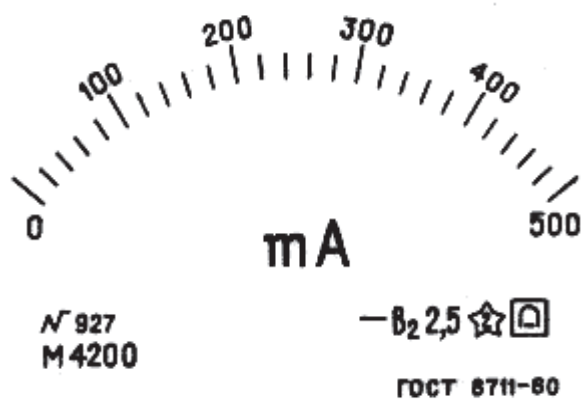


Рис.3.2. Равномерная шкала

Цена деления, как правило, выбирается больше погрешности прибора. Шкалы приборов могут быть равномерными и неравномерными. Приборы с равномерными шкалами более удобны в работе (рис. 3.2).

Устройство шкалы должно быть в соответствии с десятичной системой счисления, а цена деления – кратной величинам 1, 2, 5. Линейка числовых значений может быть нанесена на прямую линию, на окружность или часть окружности.

Кроме делений на шкале прибора (на его лицевой стороне) наносятся различные обозначения:

- единицы измеряемой величины (миллиамперы, килограммы на площадь);
- класс точности (2, 2,5...);
- система прибора;
- рабочее положение прибора;
- степень защищённости от электромагнитных полей;
- испытательное напряжение изоляции;
- год выпуска;
- заводской номер.

Указатели

Для получения численного значения измеряемой величины в приборах шкального типа обязательно наличие движущегося по шкале указателя.

Указатели должны быть лёгкими и достаточно прочными.

Этим условиям удовлетворяют дюралевые стрелки (рис. 3.3).

Форма стрелки определяется назначением прибора.

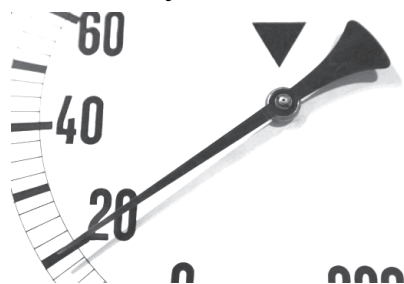


Рис. 3.3. Стрелочный указатель

Электромеханические приборы имеют копьевидные и ножевидные указатели.

Для приборов, работающих в условиях низкой освещённости, в ночных условиях, указатели покрывают специальным светящимся составом.

Точность отсчёта зависит от расстояния между шкалой и указателем.

При больших расстояниях между стрелкой и шкалой возникает погрешность в результате *параллакса* (уклонения), т.е. разных отсчётов при неподвижной стрелке, в зависимости от точки нахождения наблюдателя, точки наблюдения.

Для уменьшения этой погрешности применяют зеркальные шкалы или зеркальные вставки, которые позволяют производить отсчёт при таком положении глаза, когда отражение стрелки в зеркале и сама стрелка совпадают (рис. 3.4).

Отсчётные устройства для получения показаний в дискретно-цифровой форме разнообразны, имеют различные назначения и применяются в приборах для измерения как электрических, так и не электрических величин. Такие устройства обычно подекадно подсчитывают количество импульсов в единицу времени, число которых пропорционально абсолютной величине измеряемого параметра.

По способу образования цифр цифровые индикаторы делятся:

- на фигурные, в которых цифры изображены заранее;
- мозаичные, в которых цифры состояются из набора точек, полос и т.д.

Фигурные индикаторы могут быть механическими, электромеханическими, светотехническими и электронными.

Механические цифровые индикаторы изготавливаются обычно в виде роликового счётного механизма. Число роликов определяется числом десятичных разрядов измеряемой величины.

Светотехнические индикаторы выполняются в виде световых табло, проекционных устройств и т.д. Широкое применение нашли цифровые многоэлектродные газоразрядные лампы (декатроны). Конструктивно они выполняются в виде стеклянных баллонов, заполненных нейтральным газом (неон, криптон), в котором расположен сетчатый анод и проволочный катод. На сетчатом аноде отображаются цифры, нанесённые заранее (от 0 до 9 и знаки «+», «-»). При подаче напряжения между анодом и като-



Рис. 3.4. Зеркальная вставка на шкале прибора для уменьшения параллакса

дом возникает газовый разряд и на стенке или на торце лампы появляются цифры.

В качестве индикаторных устройств используются электронно-лучевые трубки (кинескопы). Цифры на экране воспроизводятся в виде мозаики, в виде точек. Чем больше точек (*пикселей*), тем более качественное изображение.

3.2.3. Корректор

Корректор служит для установки перед началом работы (измерений) стрелки отсчётного устройства, которая под влиянием различных факторов (температуры, остаточного напряжения в деталях и т.д.) может смещаться от нулевой отметки.

3.2.4. Успокоители

Успокоители служат для уменьшения времени движения подвижной части отсчётного устройства перед достижением ею установившегося положения. Время переходного режима или процесса уменьшается обычно с помощью воздушных или магнитных успокоителей.

3.3. Приборы для измерения веса

Весы предназначены для измерения массы тела через измерение его веса. На Руси в конце XVI века широкое распространение получили контарь (весы с постоянной точкой опоры и подвижной гирей) и безмен (весы с подвижной точкой опоры и неподвижной гирей). Во времена Петра I русские меры веса были заменены и приведены в соответствие с английской системой мер. Единицей веса стал фунт, равный 0,4095 кг. Разновидности весов:

- 1) в зависимости от вида грузоприёмного устройства – платформенный, бункерные, крюковые, конвейерные, монорельсовые;
- 2) в зависимости от способа взвешивания – статистические, динамические, для взвешивания в движении;
- 3) в зависимости от объекта взвешивания – автомобильные, вагонные, вагонеточные, конвейерные и т.п.

В зависимости от веса груза размер платформы может быть различным. Самые маленькие (торговые) весы имеют маленькую платформу (200×300 мм) и *наибольший предел взвешивания (НПВ)* 3, 6, 15 кг. Самые большие (автомобильные и вагонные) имеют размер платформы 3×20 м и НПВ 10...200 т. Платформенные весы с НПВ до 100 кг чаще всего имеют один датчик, наклеенный в центре платформы. Платформы больших весов

чаще всего опираются на 4 датчика, закреплённых по углам. На многих производствах, в особенности в перерабатывающей промышленности, приходится иметь дело со взвешиванием сыпучих и жидких продуктов, которые с точки зрения механики представляют собой сплошные среды (взвешивание молока, подсолнечного масла, нефтепродуктов и т.п.). Среди сыпучих продуктов наиболее часто приходится иметь дело со взвешиванием сахара, муки, комбикорма, строительных материалов. Обычно для взвешивания таких грузов применяются бункерные весы (грузоприёмное устройство – бункер). Для подачи и выпуска продукции бункер снабжен заслонками: верхней (впускной) и нижней (выпускной). Взвешивание продукта происходит равными порциями. Время взвешивания осуществляется настройкой терминала весов. Время взвешивания может колебаться от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от скорости и темпа подачи груза, скорости работы заслонки и т.д. Самыми типичными представителями этих весов являются элеваторные весы. Взвешивание многих сыпучих продуктов часто связано с необходимостью приготовления их смеси, а следовательно, с дозированием всех компонентов этой смеси. Дозаторы, в которых готовятся смеси из нескольких компонентов, называются многокомпонентными. Важным классом дозаторов являются фасовочные. Они выполняют одновременно функцию дозирования и расфасовки.

В настоящее время происходит смена классов и поколений весов. Механические весы уступают место электронным. Электронные весы – это весы с уравновешивающим устройством в виде преобразователя массы груза в электрический сигнал.

Они обладают следующими принципиальными отличиями:

- почти полное отсутствие подвижных механических частей и деталей, а следовательно, более высокая надёжность;
- существенное увеличение функций, позволяющих в значительной степени сократить вероятность появления ошибки и обмана;
- более высокая точность взвешивания;
- возможность выдачи информации в компьютерные системы и локально-вычислительные сети.

3.4. Приборы для измерения тепловых величин

В средствах измерения температурная шкала имеет в качестве единицы измерения Кельвин, равную $1/273,16$. В науке, технике, медицине и т.д. приходится измерять температуру в широких диапазонах. Для каждого диапазона температур применяются различные СИ, основанные на принципиально разных физических явлениях. Можно выделить 5 диапазонов измерения температуры:

- 1) $0 \dots 10$ К – сверхнизкие температуры;

- 2) 10...800 К – низкие температуры;
- 3) 800...6000 К – средние температуры;
- 4) 6000...10 000 К – высокие температуры;
- 5) 10 000...10 0000 К и выше – сверхвысокие температуры.

1) *Сверхнизкие температуры.* Эти температуры создаются с помощью жидкого гелия. Для измерения температуры в этом диапазоне используются методы магнитной термометрии. Термометр, реализующий этот принцип, представляет собой катушку индуктивности, внутри которой в однородном магнитном поле расположен сердечник (образец) из железозокалийных или железоалюминиевых квасцов. Катушка включается в мостовую схему, и при изменении температуры окружающей среды меняется индуктивность катушки.

2) *Низкие температуры.* При измерении низких температур используются термометры, которые часто строятся на основе полупроводниковых сопротивлений. Датчик кварцевого термометра представляет собой кристаллический резонатор, выполненный в виде тонкого диска или гильзы, помещённых в герметичный корпус, который заполнен для большей надёжности и повышения теплопроводности жидким гелием под давлением 0,1 мм рт. ст. Термокварцевые и пьезокварцевые термопреобразователи (ТПП), в отличие от других полупроводников, обладают высокими метрологическими характеристиками и линейной температурной зависимостью. Эти термопреобразователи целесообразно применять в системах автоматического сбора информации, например, при геодезических исследованиях при съёмке на нефть.

3) *Средние и высокие температуры* – в этой области находят применение термоэлектрические преобразователи с использованием различных материалов – термопары.

Применяются термопары с различными метрологическими характеристиками: ТХА (хромель-алюмель) – 50...1000 °С; ТХК (хромель-копель) – 50...600 °С; ТПП (платинородиевые) – 20...1300 °С; ТПР (платинородиевые) – 300...1000 °С.

Для измерения температур расплава металла на металлургических предприятиях применяются термопары из благородных металлов и их сочетаний. При измерении температур с помощью термопар датчик помещается в расплав металла на время, безопасное для его работы – 0,4...0,6 с.

4) *Сверхвысокие температуры.* Область этих температур начинается от 2500 °С и практически не имеет верхнего предела. Вещество при этих температурах находится в состоянии плазмы, и здесь применяются разновидности яркостных и цветных методов. Средства измерения, применяемые для таких температур, подразделяются:

- а) на контактные;
- б) бесконтактные:

- радиационные (20...4000 °С);
- оптические яркостные (10...10 000 °С);
- цветовые (например, Спектр-РАПИР) (900...3000 °С).

Приборы, основанные на бесконтактных методах измерения, используют энергию излучения нагретых тел без непосредственного контакта с объектом измерения. Достоинства этих приборов в том, что они не искажают температурное поле объекта измерения и не имеют предела расширения диапазона измерения.

3.5. Приборы для измерения неэлектрических величин

Измерение линейных параметров и размеров

Линейные измерения охватывают широкий диапазон размеров и подразделяются на 4 поддиапазона:

1) От долей микрона и ангстремов (Å) до нескольких метров. В основном используются в машиностроении для измерения геометрических параметров изделий и шероховатости. *При измерении параметров шероховатости* применяются ёмкостные и индуктивные преобразователи. Наибольшее применение нашли индуктивные преобразователи, потому что порог их срабатывания составляет 0,1 мкм.

Отечественными и зарубежными производителями выпускается широкий спектр профилометров и профилографов, которые позволяют автоматизировать процесс контроля и имеют высокую производительность (до 10 000 измерений в час).

2) От ста миллиметров до ста метров. Эти размеры имеют место, например, при измерении уровня горючего в баках автомобилей и самолётов, в хранилищах различного уровня, при измерении верхнего и нижнего бьефов в водохранилище гидростанций и т.п.

При измерении уровня жидких сред используются поплавковые, буйковые, ёмкостные, резонансные, пьезометрические и другие датчики. При изменении уровня жидкости поплавков перемещается вверх и вниз и приводит в движение либо указатель, либо пружинный двигатель, угол поворота которого пропорционален уровню жидкости. Более совершенное устройство для измерения уровня жидкости – уровнемеры с буйком. Большую точность обеспечивают ёмкостные уровнемеры, которые представляют собой 2 электрода, помещённые один внутри другого. В зависимости от уровня жидкости изменяется интегральная диэлектрическая проницаемость и, соответственно, ёмкость. Ёмкостные преобразователи для измерения больших уровней выполняются в виде дискретных элементов, каждый из которых отвечает за свой уровень резервуара. Пьезометрические уровнемеры основаны на изменении величины давления на пьезоэлемент в зависимости от уровня жидкости при постоянной её плотности.

3) От нескольких десятков и сотен метров до десятка тысяч километров и более. Эти измерения используются в астрофизических и геодезических измерениях.

При измерении больших расстояний находят применение методы, позволяющие подсчитывать число оборотов какой-либо точки (элемента, сцепляющего с дорогой).

Для измерения пути, пройденного автомобилем, необходимо измерить число оборотов в единицу времени или время в пути.

Приборами этой группы могут быть *тахометры или спидометр*.

Тахометры

Тахометры представляют собой приборы для определения скорости, с которой происходит вращение отдельных элементов (колеса или вала) различных механизмов.

В зависимости от того, как производятся измерения, выделяют несколько модификаций тахометров. Самыми простыми из них являются счётчики оборотов. К более совершенным устройствам относятся приборы, которые могут показывать текущую скорость. Такие тахометры используются в автомобилях и в промышленных процессах.

Виды тахометров

По различиям в конструкции и принципе действия также выделяются несколько разновидностей тахометров:

- *Механические*. В тахометрах такого типа есть вал с установленной на нём скользящей муфтой, перемещение которой позволяет определить количество оборотов и, следовательно, рассчитать скорость. Такие приборы встречаются чаще всего.

- *Электрические*. Данные тахометры бывают двух типов: электронные или электромашинные. Такие устройства обладают самым сложным принципом действия.

- *Магнитные*. В основе действия таких приборов лежит взаимодействие двух магнитных полей, одно из них является постоянным, а другое создаётся ротором, который вращается. В движение ротор приводят вихревые токи, воздействующие на диск, находящийся на валу ротора.

4) При измерении очень больших расстояний применяются методы радиолокации или светолокации.

В настоящее время разработана *глобальная система навигации (GPS)*, позволяющая определять скорость и положение крупных объектов, таких как наземные и морские транспортные средства, при помощи радиосигналов от большого числа спутников. Определение скорости и положения таких объектов вычисляется по времени распространения сигналов, полученных разными спутниками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любой производственный процесс характеризуется большим числом параметров, изменяющихся в широких пределах. Для поддержания требуемого режима технологического процесса необходимо измерение указанных параметров. При этом чем достовернее осуществляется измерение технологических параметров, тем лучше качество целевого выходного продукта. Получение и обработка измерительной информации предназначены не только для достижения требуемого качества продукции, но и организации производства, учёта и составления баланса количества вещества и энергии, затрачиваемых на производство данной продукции.

В современных производственных системах задача получения и обработки измерительной информации усложняется настолько, что её эффективное решение становится возможным только при условии оптимизации выбора средств и методов измерения с учётом необходимых критериев.

Усложнение технологии производства, развитие научных исследований привели к необходимости измерения и контроля сотен и тысяч параметров одновременно. Появился новый класс информационно-измерительной техники – измерительные информационные системы, осуществляющие сбор, обработку, передачу, хранение, отображение и воздействие информации на объект исследования.

В данном пособии описан широкий класс СИ, основанных на различных способах и методах измерений. Указаны их достоинства и недостатки, приведены рекомендации по наиболее рациональным областям их применения.

Знание теоретических аспектов курса, устройства и характеристик различных СИ позволит оптимизировать выбор средств измерений и контроля для получения необходимой измерительной информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ранеев, Г. Г. Методы и средства измерений физических величин / Г. Г. Ранеев, А. П. Тарасенко. – М. : МГОУ, 2010. – 293 с.
2. Строителев, В. Н. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб. для вузов / В. Н. Строителев. – М. : Европейский центр по качеству, 2002. – 152 с.
3. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – М. : Высш. шк., 2001. – 382 с.
4. Евстихийев, Н. Н. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н. Н. Евстихийев. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 540 с.

5. Таланчук, П. М. Сенсоры в измерительной технике / П. М. Таланчук, С. П. Голубков, В. П. Маслов. – Киев : Техника, 2001. – 173 с.
6. Рябов В. П., Позняк Е. С. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб. пособие / В. П. Рябов, Е. С. Позняк. – М. : МГУП, 2009. – 157 с.
7. Дивин, А. Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учеб. пособие. В 5 ч. Ч. 1 / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 104 с.
8. Олещук, В. А. Автоматизация выбора средств измерений для контроля параметров технологических процессов на ОАО «Амурметалл» / В. А. Олещук, С. А. Кеба // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 53-58.

Учебное издание

Олещук Валентина Александровна
Верещагина Александра Сергеевна

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ
И КОНТРОЛЯ**

Учебное пособие

Научный редактор – доктор технических наук, профессор О. Ю. Еренков

Редактор Т. Н. Карпова

Подписано в печать 26.06.2015.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 65 г/м². Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,39. Тираж 50 экз. Заказ 27197.

Редакционно-издательский отдел
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.