



**Д.Г. Левашкин**

# **СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

---

*Учебное пособие*

---

Тольятти 2008

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
**Тольяттинский государственный университет**  
**Кафедра «Управление промышленной и экологической**  
**безопасностью»**

**Д.Г. Левашкин**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

**Учебное пособие**

Тольятти 2008

УДК 658.382

ББК 32.965

Л34

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, завкафедрой

«Оборудование и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинского государственного университета *В.И. Малышев*;

кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление промышленной

и экологической безопасностью» Тольяттинского государственного

университета *А.В. Грищенко*.

**Л34** Левашкин, Д.Г. Системы автоматического контроля : учеб. пособие / Д.Г. Левашкин. – Тольятти : ТГУ, 2008. – 128 с.

В данном учебном пособии представлен теоретический материал по дисциплине «Системы автоматического контроля», приведен блок самоконтроля, даны задания для самостоятельной работы и вопросы для зачета.

Предназначено для студентов специальности «Безопасность технологических процессов и производств» всех форм обучения.

Научный редактор: доктор педагогических наук, профессор *Л.Н. Горина*.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Тольяттинский государственный университет, 2008

© Д.Г. Левашкин, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Федеральный закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 г. направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, к локализации и ликвидации последствий указанных аварий. Он определяет основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов.

*Опасными производственными объектами* являются предприятия или их цехи, участки, площадки, а также иные производственные объекты.

К категории опасных производственных объектов относятся объекты, на которых:

1) получаются, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются следующие опасные вещества: воспламеняющие, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные; вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды;

2) применяется оборудование, работающее под давлением более 0,7 кгс/см<sup>2</sup> или при температуре нагрева воды более 115°C;

3) используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры;

4) получаются расплавы черных и цветных металлов и сплав на основе этих расплавов;

5) ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

Ни одно производство не обходится без использования систем контроля рабочих параметров производственного процесса. Любое сочетание опасных факторов на производстве всегда представляет потенциальную опасность. Именно для снижения производственных рисков и обеспечения безопасных условий труда применяют современные системы контроля, в том числе на основе автоматизации контроля технических параметров тех процессов производства, где есть опасность для присутствия человека. Это накладывает дополнительные требования к конструкции, устройству, принципам работы и обслуживанию таких систем, что требует повышения объемов работ по их подготовке и внедрению в производство.

Дисциплина «Системы автоматического контроля» изучает основные принципы контроля и устройства автоматизированных систем контроля, задействованных в производственных процессах с целью обеспечения их бесперебойной работы и безопасности, а также причины аварий в данных системах.

Реализация знаний по данному курсу гарантирует сохранение работоспособности и здоровья человека.

Основная задача дисциплины – вооружить обучаемых теоретическими знаниями и практическими навыками, необходимыми:

- для определения негативных факторов в процессе работы с производственными системами;
- разработки и реализации мер защиты человека в случае аварийной ситуации на производстве;
- обеспечения безопасной эксплуатации систем контроля, соблюдения технологических требований к производственному контролю;
- организации работы обслуживающего персонала и выполнения его обязанностей.

Дисциплина ориентирована на повышение технической составляющей при подготовке специалистов и базируется на знаниях, полученных при изучении общетехнических, естественно-научных дисциплин.

# 1. УРОВНИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

## 1.1. Назначение автоматических систем на производстве

Основной деятельностью любого предприятия, цеха, участка является *производственный процесс*, под которым понимают организованную совокупность взаимосвязанных трудовых и технологических процессов, при реализации которых исходные материалы и полуфабрикаты превращаются в законченные изделия. Производственный процесс машиностроительного предприятия включает получение заготовок, различные виды их обработки (механическую, термическую, химическую и др.), контроль качества, транспортирование, хранение, сборку машины, испытание, регулировку, окраску, отделку и упаковку.

Части производственного процесса, представляющие собой последовательность целенаправленных действий по получению из исходных материалов конечного продукта с требуемыми свойствами, называют *технологическим процессом*.

В применении к любому производственному процессу степень автоматизации характеризуется частичным или полным освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления производственными процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам. *Автоматическими* называют устройства, которые управляют различными процессами и контролируют их без непосредственного вмешательства человека. При этом не только высвобождается труд человека, но и повышается скорость и точность выполнения операций, значительно возрастает производительность и улучшаются условия труда, а также возможна сравнительно быстрая окупаемость первоначальных затрат за счет снижения эксплуатационных расходов и повышения объема и качества выпускаемой продукции.

*Автоматизацией* производственного процесса называют применение энергии неживой природы в производственном процессе (или его составных частях) для его выполнения и управления им без непосредственного участия людей.

Технические преимущества автоматически управляемых производственных систем по сравнению с аналогичными системами с ручным управлением следующие: более высокое быстродействие, позволяющее повышать скорости протекания процессов, а следовательно, и производительность производственного оборудования; более высокое и стабильное качество управления процессами, обеспечивающее высокое качество продукции при более экономном расходовании материалов

и энергии; возможность работы автоматов в тяжелых, вредных и опасных для человека условиях; стабильность ритма работы, возможность длительной работы без перерывов вследствие отсутствия утомляемости, свойственной человеку.

Экономические преимущества, достигаемые при использовании автоматических систем в производстве, являются следствием технических преимуществ. К ним можно отнести: возможность значительного повышения производительности труда; более экономичное использование ресурсов (труда, материалов, энергии); более высокое и стабильное качество продукции; сокращение периода времени от начала проектирования до получения изделия; возможность расширения производства без увеличения трудовых ресурсов.

Повышение производительности труда при автоматизации производства может быть достигнуто следующим образом: во-первых, благодаря более полному использованию календарного времени при круглосуточной автоматической работе оборудования; во-вторых, вследствие повышения скорости протекания процессов, которая не ограничивается возможностями человека; в-третьих, вследствие высвобождения обслуживающего персонала.

## 1.2. Уровни автоматизации производственных систем

Различают автоматизацию производства трех уровней: *частичную, комплексную и полную*.

*Частичная автоматизация* ограничивается автоматизацией отдельных операций технологического процесса, например, с использованием станков с автоматическим управлением, в том числе станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

*Комплексная автоматизация* – это автоматизация производственных процессов изготовления деталей и сборки с использованием автоматических систем машин: автоматических линий, гибких производственных систем (ГПС), т. е. независимых обрабатывающих комплексов, управляемых с помощью ЭВМ без участия человека.

*Полная автоматизация* – высшая ступень автоматизации, при которой все функции контроля и управления производством выполняются автоматами.

В настоящее время широко используется частичная и комплексная автоматизации. Но следует учесть, что современные станки как средство автоматизации – это сложные технические системы, состоящие из большого числа технических агрегатов, приводов различного типа, приспособлений, измерительных и решающих устройств. В основном они позволяют сократить вспомогательное время на обработку, а эффективность

их повышается, когда ими оснащают участки, цеха или когда их включают в автоматические линии, управление работой которых осуществляется от ЭВМ.

Тем не менее эти преимущества не позволяют исключить рабочего из технологического процесса, т. к. ни станок, ни органы управления еще не могут выполнять интеллектуальную работу, которая обеспечивает высокое качество изготовления. Одним из решений этой проблемы является применение *систем адаптивного управления*, позволяющих в зависимости от складывающихся производственных условий корректировать технологический процесс в автоматическом режиме без участия рабочего. Адаптивные системы с успехом выполняют ряд интеллектуальных функций рабочего, высвобождая его из технологического процесса и переводя в разряд наладчика.

Непрерывная автоматизация производственных процессов ведет, как правило, к усложнению системы управления. Но достижения в области математики, кибернетики, экономики, а также быстрое развитие средств вычислительной техники позволяют создавать новые высокоэффективные производственные и технологические процессы и методы управления ими.

На сегодняшний день основной задачей является развитие полной автоматизации, которая с помощью ЭВМ позволяет объединить всю производственную деятельность, начиная от конструирования изделия и до его изготовления.

### **1.3. Автоматические и автоматизированные процессы и оборудование**

Процесс, оборудование или производство, не требующие присутствия человека в течение определенного промежутка времени для выполнения ряда повторяющихся рабочих циклов, называют *автоматическим*.

Если часть процесса выполняется автоматически, а другая часть требует присутствия оператора, то такой процесс называют *автоматизированным*.

Возможные автоматические процессы в производстве:

- 1) автоматизация документооборота;
- 2) охраны труда;
- 3) складского учета;
- 4) управления производством и т. д.

Автоматизация технологической подготовки производства (ТПП) в настоящее время является одним из основных направлений ее совершенствования. Необходимость применения персональных компьютеров

(ПК) для решения технологических задач вызвана следующими причинами. Машины и приборы становятся все более сложными и точными, следовательно, усложняется их разработка и изготовление, увеличивается цикл и сложность подготовки их производства. За последние 20 лет период нахождения изделия в производстве сократился более чем в 3 раза, а средняя продолжительность цикла технологической подготовки увеличилась примерно в 2 раза и составляет от 0,5 до 5 лет. В условиях серийного и единичного производства срок технологической подготовки производства стал соизмеримым со сроками нахождения изделия в производстве, а часто и превышает его. Затраты на ТПП в единичном и серийном производствах могут составить 30% и более от общих затрат на выпуск изделия. Для большинства предприятий машино- и приборостроения характерен мелкосерийный характер выпускаемой продукции. В нашей стране ежегодно создается несколько тысяч новых изделий, причем доля машино- и приборостроения в общем объеме продукции неуклонно увеличивается, т. к. эти отрасли определяют темпы технического прогресса и интенсификации всего народного хозяйства.

Таким образом, рост трудоемкости и сложности технологической подготовки производства требует коренных изменений методов подготовки и использования вычислительной техники для этих целей.

Для выпуска высококачественной продукции с наименьшими затратами необходимо повышать качество технологических решений за счет технико-экономических обоснований, рассмотрения большого количества вариантов технологического процесса и выбора наилучшего. Особое внимание требуется уделять обработке рабочих поверхностей деталей. На рис. 1.1 схематично представлены все возможные варианты механической обработки поверхностей детали.

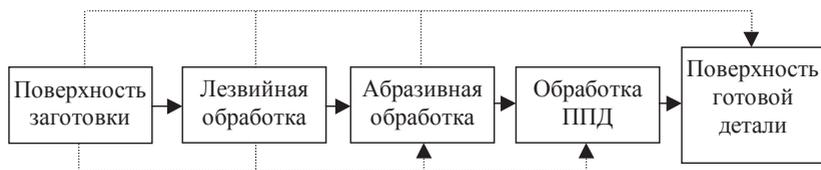


Рис. 1.1. Типовые варианты процесса обработки деталей

Выбор конкретного техпроцесса обработки поверхности детали непосредственно зависит от назначенных к ней требований, при этом усложнение техпроцесса ведет к увеличению затрат, необходимых для его реализации, но с другой стороны появляется возможность обеспечивать более жесткие технические требования к обрабатываемой поверхности, а следовательно, улучшать ее эксплуатационные показатели.

Таким образом, чем больше средств вложено в процесс обработки детали, тем выше ее долговечность и надежность работы в процессе эксплуатации. Такая зависимость может иметь вид, показанный на рис. 1.2а, из которого видно, что зависимость качества от стоимости обработки носит нелинейный характер. Кривой, отображающей эту зависимость, характерны точки перегиба. Так, на рис. 1.2 точка 1 характеризует границу, за пределами которой дальнейшее улучшение долговечности на ту же величину требует более высоких затрат, чем до точки 1; точка 2 наоборот характеризует границу, после которой идет повышение отдачи вложенных средств. Поэтому необходимо сопоставлять стоимость и качество обработки поверхности детали, чтобы достичь соответствия заданным требованиям с минимальными материальными затратами.

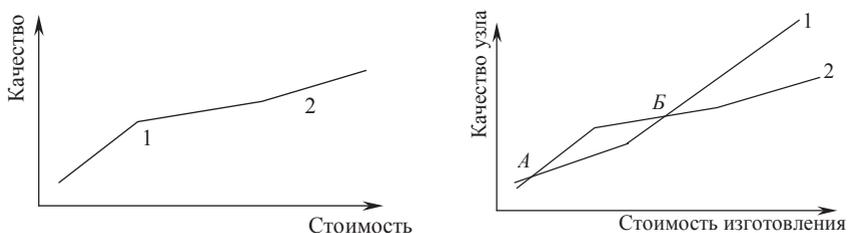


Рис. 1.2. Зависимость качества от стоимости изготовления:  
а) поверхности детали; б) узла машины

Но отдельную поверхность нельзя рассматривать как замкнутую систему, т. к. на ее эксплуатационные свойства в процессе работы влияют другие поверхности, контактирующие с ней. Поэтому долговечность и надежность работы любой детали зависит и от качества изготовления детали, работающей с ней в паре, например: манжетное уплотнение – вал. Надежность работы узла, приведенного в примере, зависит от того, какую поверхность имеет вал в месте контакта с уплотнением, а также от того какими характеристиками обладает рабочая кромка манжеты. Таким образом, увеличение надежности работы уплотнительного узла может вестись двумя путями: 1) повышением геометрических и физико-механических свойств шейки вала; 2) повышением эксплуатационных свойств кромки манжеты (см. рис. 1.2б). Видно, как влияют точки перегиба на соотношение надежности работы манжетного уплотнения и стоимости их изготовления. От точки А к точке В выгоднее вкладывать средства по улучшению качества манжеты, а от точки В и далее выгоднее повышать качество обработки вала. При рассмотрении же узла или всей машины в целом необходимо учитывать не двойные, а сложные интегрированные связи, возникающие между поверхностями деталей, входящих в конструкцию (см. рис. 1.2).

Такая комплексная оценка позволит добиться максимально возможного качества изделия в целом при определенных затратах.

Просчет нескольких вариантов достаточно сложен, и в условиях единичного и серийного производства обычно не производится; часто разрабатывают лишь маршрутную технологию. Применение средств вычислительной техники позволит более детально выполнять эту работу и создавать оптимальные технологические процессы.

В общем случае к производственным средствам автоматизации можно отнести: промышленные роботы, датчики систем автоматического контроля и устройства контроля качества изделий, загрузочно-транспортные устройства и т. д.

#### 1.4. Степень автоматизации производственных систем

От уровня развития машиностроения зависит прогресс всех отраслей промышленности. Поэтому повышению эффективности машиностроения и уровня автоматизации машиностроения отводится приоритетная роль. В свою очередь эффективность любого производства зависит от степени его автоматизации. Степень автоматизации производственного процесса определяется необходимой долей участия оператора в управлении этим процессом. При полной автоматизации присутствия человека в течение определенного периода времени вообще не требуется. Чем больше это время, тем выше степень автоматизации.

*Степень автоматизации* – безразмерный показатель, позволяющий количественно оценить уровень автоматизации отдельной машины, системы машин или производственного процесса. Степень автоматизации производственных процессов оценивается отношением времени автоматической работы к рассматриваемому периоду времени. В зависимости от того, какой промежуток времени рассматривается, различают *цикловую, рабочую и эксплуатационную* степени автоматизации.

*Цикловая степень автоматизации* – отношение времени автоматической работы  $t_a$  в течение цикла к полному времени цикла  $t_{\text{ц}}$ :

$$K_{\text{ц}} = \frac{t_a}{t_{\text{ц}}}. \quad (1.1)$$

*Рабочая степень автоматизации* – отношение доли штучного времени автоматической работы ко всему штучному времени:

$$K_{\text{р}} = \frac{t_a}{t_{\text{шт}}}. \quad (1.2)$$

*Эксплуатационная степень автоматизации* – отношение суммы времени автоматической работы в течение расчетного периода времени (смена, месяц, квартал, год) к расчетному периоду времени эксплуатации  $t_3$ :

$$K_9 = \frac{t_a}{t_3}. \quad (1.3)$$

Производственные процессы связаны с ориентацией объектов и совмещением основных и вспомогательных баз объектов, например заготовки и стола станка, инструмента и шпинделя и т. д. Погрешность совмещения баз должна находиться в пределах допуска. Соединение должно обладать необходимыми жесткостью и прочностью. Аналогия перечисленных выше процессов при сборке и обработке позволяет использовать единые методы расчета для устройств, автоматизирующих эти процессы.

Автоматическую сборку можно разделить на ряд последовательных этапов:

1) подготовку деталей и комплектующих изделий (промывку, очистку, предварительный или 100%-ный контроль комплектования и т. д.);

2) загрузку сопрягаемых деталей в бункерные, магазинные, кассетные и другие загрузочные устройства в предварительно или окончательно ориентированном положении;

3) захват, отсекание и подачу сопрягаемых деталей в ориентирующие и базирующие устройства сборочного приспособления;

4) ориентацию сопрягаемых деталей на сборочной позиции с точностью, обеспечивающей собираемость соединений;

5) ориентирование присоединяемой детали относительно базовой;

6) присоединение и закрепление детали;

7) контроль требуемой точности относительного положения сопряженных деталей или сборочной единицы;

8) освобождение рабочей зоны сборочного автомата от собранной сборочной единицы;

9) выполнение послесборочных операций (например, контроля на выходе, заправки смазочными материалами, топливом, испытания, регулирования, балансировки, маркировки, упаковки, счета, учета).

При разработке автоматизированного технологического процесса на производстве технолог или группа технологов должны определить состав выпускаемого изделия, технологический маршрут операций и приемы сборки, выбрать оборудование или разработать структуру

сборочного оборудования, выполнить экономический анализ, обоснование и расчет выбранного варианта автоматизации, рассчитать режимы оборудования, осуществить специальные исследования. Должны быть детально проработаны вопросы ориентации, базирования, транспортирования и контроля качества изделий, а также разработки технических заданий на конструирование специальных исполнительных устройств и оснастки. Проектные работы выполняют обычным способом или с использованием средств автоматизации проектирования технологических процессов.

Например, для осуществления автоматической сборки погрешности положения деталей перед сборкой должны быть меньше предельно допустимых значений, в противном случае при сближении деталей сборочный автомат может заклинить. Чем больше предельно допустимые отклонения в исходном положении деталей, тем легче осуществить сборку, особенно автоматическую.

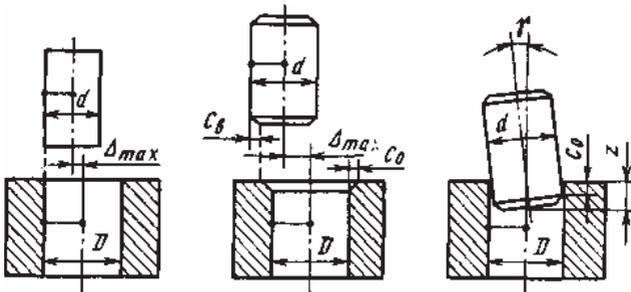


Рис. 1.3. Схема для определения максимально допустимого смещения (а, б) и угла поворота осей вала и отверстия во втулке перед сборкой (в)

Современное развитие автоматизированных процессов производства осуществляется при непосредственном развитии и внедрении систем автоматического контроля. При этом обеспечивается контроль параметров работы оборудования как в процессе его функционирования, так и на этапах контроля готовой продукции.

### 1.5. Контроль с применением систем программного управления

Для организации контроля и управления предметными потоками в производстве необходима различная информация о следующем: наличии необходимых заготовок и материалов, начале и окончании обработки конкретной заготовки на конкретном станке, достигаемой точности размеров, запасе стойкости режущих инструментов и расходе этих запасов, необходимой последовательности обработки,

режимах обработки, траектории движения режущего инструмента и многих других параметрах производственного процесса. Информация может быть представлена в различных видах и отображена на различных носителях. Информация о детали, подлежащей изготовлению, обычно представляется в виде чертежа. Технологическая информация представляется в виде текстовых документов и технологических эскизов. Чертежи, эскизы, текстовые документы предназначены для рабочих и не могут быть использованы непосредственно в автоматическом производстве. Для станка или робота та же информация должна быть представлена, например, в виде перфоленты с управляющей программой для устройства числового программного управления (ЧПУ).

В неавтоматизированном производстве многие информационные процессы оказываются скрытыми, неявными, поскольку они осуществляются людьми, которые могут дополнять недостающую информацию благодаря своим знаниям и опыту. Так, например, в серийном производстве технологические процессы изготовления простых деталей подробно не разрабатывают. Квалифицированный рабочий может сам изготовить на станке деталь, пользуясь только чертежом. При автоматизации производства с использованием станка с ЧПУ необходимо не только подробно указать все параметры обработки, включая режимы резания, траекторию перемещения инструментов и тому подобного, но и представить эту информацию в виде программы, пригодной для ввода в конкретную систему ЧПУ станка.

При автоматизации производства количество необходимой для производственного процесса информации резко возрастает. Особенно это касается ГПС с автоматической переналадкой станков на изготовление требуемого изделия.

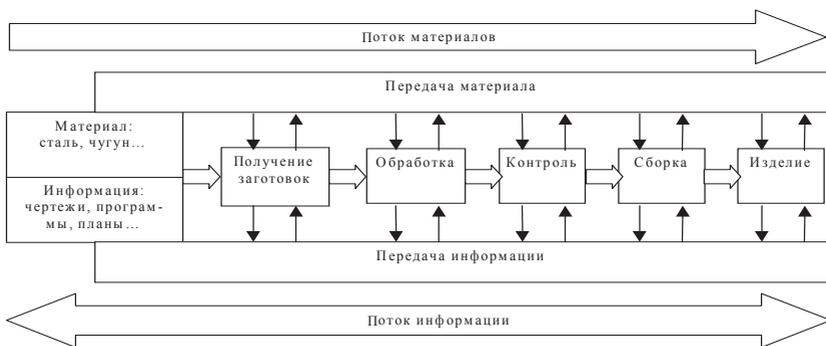


Рис. 1.4. Потоки заготовок, изделий и информации в производственном процессе

Автоматизация производства заключается в автоматизации предметных и информационных потоков. Автоматизация предметных потоков осуществляется с применением автоматических транспортных систем, автоматических складов и накопителей, устройств автоматической загрузки и выгрузки станков, автоматического технологического оборудования: станков, промышленных роботов, сборочных и других машин. Автоматизация информационных потоков осуществляется установкой различных автоматических измерительных средств: устройств активного контроля размеров и свойств деталей, контактных головок, координатно-измерительных машин, устройств отсчета перемещений, путевых выключателей и различных других датчиков, необходимых для получения нужной информации. Для автоматической передачи информации используют различные каналы связи: проводные, световолоконные, оптические, индуктивные, акустические, электромагнитные. Информацию можно передавать и механическим путем на различных носителях: перфолентах, перфокартах, магнитных дисках, штриховых кодовых этикетках и др. Для автоматического преобразования и использования информации применяют GR, устройства ЧПУ, программируемые контроллеры, различные устройства ввода и вывода информации и другие средства.

При автоматизации действующего производства необходимо: во-первых, выявить, проанализировать потоки предметов и информации, необходимым образом их контролировать или организовать другие потоки; во-вторых, выбрать из числа имеющихся или спроектировать и изготовить новые средства автоматического обеспечения требуемых потоков; в-третьих, обеспечить функционирование, взаимодействие и управление предметных и информационных потоков в автоматизированном производстве.

## 2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ. УСТРОЙСТВО

### 2.1. Классификация приборов в электрических измерениях

Исполнение систем контроля определяется целью, которую необходимо достичь путем измерения.

Перечень возможных целей:

– *Исследование.* Задачей проведения исследования является расширение нашего понимания различного рода природных и искусственных физических состояний и явлений. Поэтому при исследовании окружающей среды измерительные системы обычно должны быть способны осуществлять контроль параметров в широком диапазоне с хорошей линейностью и выходной динамической характеристикой.

– *Измерение расходуемых величин.* Измерения расхода выполняются, прежде всего, для количественного определения и регистрации полученной или поглощенной величины. Возьмем, к примеру, электрический счетчик (измеритель кВт·ч), имеющийся в каждом доме, или электронные весы в магазине. Наиболее важным аспектом для такого рода применений является точность измерения, поскольку потребитель должен правильно расплатиться за полученное количество. Поэтому регулярная калибровка оборудования часто является требованием закона.

– *Опасность.* Часто измерения предпринимаются для обеспечения безопасности людей и окружающей среды, например, измерения уровня радиации или концентрации токсичных веществ, скажем, в питьевой воде. Для этих систем безопасности решающим является фактор надежности; система всегда должна функционировать в соответствии с ее техническими характеристиками. Если, тем не менее, произойдет авария это не должно приводить к опасным ситуациям; система должна быть надежной.

– *Калибровка.* Здесь целью измерения является определение, соответствует ли продукция определенным требованиям. Это требует регулярной калибровки пределов интервала допустимых отклонений в измерениях, по результатам которых производится принятие или отбраковывание продукции.

– *Управление процессом.* В промышленности, например, целью многих измерений является получение информации о состоянии данного процесса. Тогда на основе этих измерений может быть проведена коррекция. Если по результатам измерений параметры измеряемого процесса варьируются, то измерительная система является частью петли

обратной связи. Решающей здесь становится динамическая характеристика измерительной системы, поскольку она будет влиять на стабильность или нестабильность системы текущего контроля.

Обычно в измерительной системе измеряемая физическая величина при первой возможности преобразуется в электрический сигнал. Это делается постольку, поскольку электрический сигнал легко можно преобразовать почти в любую желаемую форму. Разнообразие имеющихся электронных операций позволяет быстро и недорого реализовать необходимую обработку сигнала.

У быстрого развития электронной обработки сигналов имеется несколько причин. Прежде всего, с помощью электронных схем очень легко реализуется усиление сигнала. В процессе усиления увеличивается мощность сигнала без существенной потери информации. Поэтому, используя электронное оборудование, можно получить высокую чувствительность. Например, фотоумножитель позволяет легко достигать коэффициента усиления тока, равного  $10^6$ – $10^8$ .

Во-вторых, использование электроники дает возможность проводить измерения с минимальным воздействием на объект измерения. Например мощность, отбираемая из жидкости при измерении рН электромеханическим усилителем, менее  $10^{-15}$  Вт.

К тому же электронные схемы бесшумны, поскольку не имеют движущихся частей, свободны от износа и им присуще относительно низкое потребление энергии.

Вероятно, одним из наиболее значительных достоинств электронных систем является скорость, с которой они могут обрабатывать быстро протекающее явление, что связано с отсутствием движущихся частей, обладающих инерцией. Могут быть обнаружены даже события, происходящие в течение 100 пс. Частотный диапазон электронных схем может простирается выше 10 ГГц.

Кроме того, электронная обработка сигнала обладает значительной гибкостью; почти без ограничений можно реализовывать многочисленные функции и комбинировать их для создания более сложных функций. Измерительная информация легко передается на большие расстояния (телеметрия) в широкой полосе частот и с очень низкой чувствительностью к помехам.

Однако электронные приборы имеют все-таки свои недостатки: невозможна обработки сигнала большой мощности (для этого нужны гидравлические сигналы), надежность аппаратуры часто ниже требуемой и, наконец, она крайне чувствительна к таким внешним воздействиям, как температура, влажность, радиация и т. д.

В дальнейшем при рассмотрении измерительных преобразователей ограничимся датчиками, преобразующими неэлектрическую

физическую величину в электрическую величину (входные преобразователи), и, наоборот, преобразователями, осуществляющими преобразование электрической величины в неэлектрическую физическую величину (выходные преобразователи). Начнем с входных преобразователей, а с выходными преобразователями познакомимся в дальнейшем.

## 2.2. Устройство преобразователей сигнала регистрирующей аппаратуры

Перед обсуждением принципов преобразования, часто используемых и для измерения обычных физических величин, таких как перемещение, скорость, температура, магнитная индукция и так далее, сначала рассмотрим несколько методов, объединяющих преобразователи (датчики) с частными принципами преобразования в один-единственный составной преобразователь. Эти «композиционные методы» используются для уменьшения или даже полного исключения некоторых ограничений, связанных с отдельными преобразователями.

Широко распространен метод комбинирования преобразователей, при котором два идентичных преобразователя используются в балансной конфигурации (см. рис. 2.1а). Если оба преобразователя  $T$  и  $T'$  имеют одну и ту же передаточную характеристику  $y' = f(x')$ , то выход у балансной схемы имеет вид

$$y = f(x) - f(-x). \quad (2.1)$$

Здесь  $f(x)$  может быть нелинейной передаточной функцией, которую мы хотим линеаризовать.

Предположим, что функцию  $f(x)$  можно представить рядом Тейлора в следующем виде:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5 + \dots \quad (2.2)$$

Используя полученное выше уравнение для балансной схемы, получаем:

$$y = 2a_1x + 2a_3x^3 + 2a_5x^5 + \dots \quad (2.3)$$

Очевидно, что константа (или смещение)  $a_0$ , и четные члены  $a_2x^2$ ,  $a_4x^4$  исчезают при использовании в балансной схеме двух преобразователей.

Если нелинейность в функции  $f(x)$  не выражается никакими нечетными членами, то мы получим идеально линейную схему. В этом случае система относится к так называемой «разностной конфигурации». Однако обычно

балансирование улучшает линейность системы всего лишь в ограниченном диапазоне входной величины  $x$ . Такая система называется «дифференциальной конфигурацией». Балансная схема не чувствительна к внешним возмущениям, т. к. в ней, по существу, применяется параллельная компенсация. Схема невосприимчива к аддитивным помехам, если преобразователи  $T$  и  $T'$  одинаково чувствительны к этим помехам. Для того, чтобы она была невосприимчива также к мультипликативным помехам коэффициенты чувствительности по отношению к помехам, у преобразователей  $T$  и  $T'$  должны быть одной величины, но противоположны по знаку. На рис. 2.1б показан пример, в котором применена балансная схема преобразователя. Оба емкостных датчика перемещения, обозначенные  $C$  и  $C'$ , являются отдельными преобразователями. Входной величиной является смещение  $x$ , а выходной – напряжение  $V_0$ . Пренебрегая краевыми эффектами на краях пластин конденсатора, находим:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d + x} \text{ и } C' = \frac{\epsilon_0 A}{d - x} . \quad (2.4)$$

Очевидно, что зависимость  $C = C(x)$  нелинейная. Входная величина  $x$  входит в выражение для  $C'$  с отрицательным знаком. Можно показать, что выходное напряжение  $V_0$  трансформаторного моста пропорционально разности емкостей конденсаторов  $C$  и  $C'$ :

$$V_0 = V \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{(C' - C)}{(C' + C)} . \quad (2.5)$$

Подстановка значений  $C$  и  $C'$  дает:

$$V_0 = V \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{x}{d} . \quad (2.6)$$

Использование в этом примере двух емкостных преобразователей смещения в балансной схеме позволяет достичь идеальной линейности. Поэтому мы можем записать:

$$V_0 = xS . \quad (2.7)$$

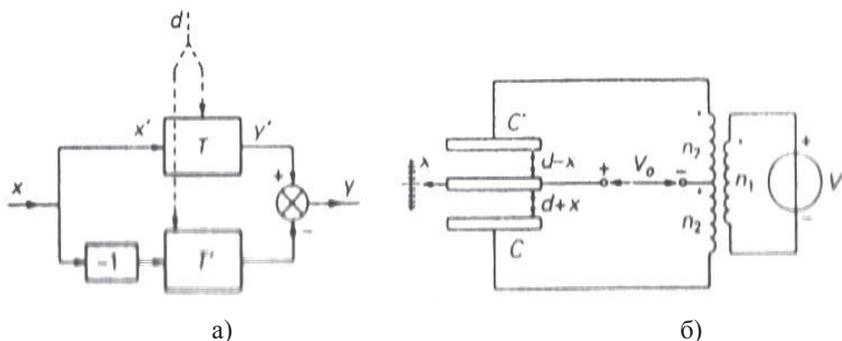


Рис. 2.1. Балансная схема преобразователя:

а)  $T$  и  $T'$  – два одинаковых преобразователя; б) применение балансной схемы в емкостном датчике смещения

Чувствительность  $S$  определяется как  $S = Vn_2 / n_1d$ . Чувствительность моста определяется напряжением источника питания  $V$ .

Другой обычно используемой конфигурацией является схема с обратной связью, состоящая из двух преобразователей  $T_1$  и  $T_2$  (см. рис. 2.2). Назначением системы является преобразование входного сигнала  $x$  в электрический выходной сигнал  $y$ . Для этого можно воспользоваться единственным преобразователем  $T_1$ . Предположим, однако, что  $T_1$  не подходит для непосредственного использования из-за недопустимо большой нелинейности и слишком высокой чувствительности к помехам. Если у нас есть второй преобразователь, способный выполнять обратное преобразование (преобразовывать  $y$  в  $x$ ), и это преобразование линейное и невосприимчиво к помехам, то, объединяя оба преобразователя  $T_1$  и  $T_2$  (с усилителем  $A$  для увеличения петлевого усиления) в схему с обратной связью, как показано на рис. 2.2а, можем реализовать составной преобразователь для преобразования измеряемого сигнала  $x$  в сигнал  $y$  с такими же характеристиками, как у использованного обратного преобразователя. Необходимыми условиями достижения такого результата являются большой коэффициент петлевого усиления и квазистатический динамический режим элементов  $T_1$ ,  $T_2$  и  $A$ . Однако на практике динамическая характеристика, особенно у преобразователей  $T_1$  и  $T_2$ , часто имеет более высокий порядок, поэтому ситуация оказывается не столь идеальной, как описано выше.

Рис. 2.2б иллюстрирует применение обратной связи в акселерометре. Входная величина (ускорение  $x$ ) оказывает усилие на подвижную массу, соединенную со «звуковой катушкой» электродинамического выходного преобразователя. Ускорение приводит массу в движение. Это движение определяется датчиком смещения (здесь – разностный

конденсатор). Выходной сигнал датчика смещения усиливается и подается в виде тока на катушку выходного преобразователя  $T_2$ , противодействуя изменению положения подвижной массы. Поэтому если коэффициент усиления  $A$  велик, то масса будет едва смещаться. Таким образом, передаточная характеристика акселерометра определяется соотношением между током  $I$ , протекающим по звуковой катушке, и тем усилием, которое катушка оказывает на подвижную массу, воспринимающую ускорение. Ток  $I$  можно преобразовать в выходное напряжение  $V_0$  с помощью резистора  $R$ .

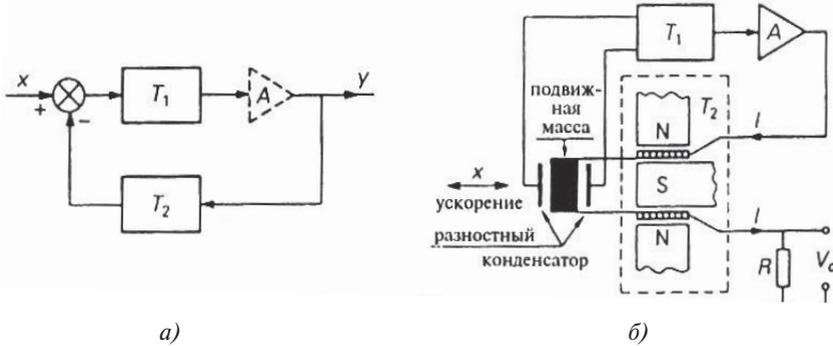


Рис. 2.2. Схема с отрицательной обратной связью:

- а)  $T_1$  выполняет желаемое преобразование  $x$  в  $y$ , а  $T_2$  осуществляет обратное преобразование; б) применение обратной связи в акселерометре

В преобразователе такого типа входная величина автоматически компенсируется внутренней величиной с помощью цепи отрицательной обратной связи, поэтому его часто называют компенсационным датчиком.

Входной диапазон большинства преобразователей мал, динамический диапазон часто не превышает величины 3–10. Для тех случаев, где этого недостаточно, можно объединить вместе несколько преобразователей, имеющих различные входные диапазоны, с целью обеспечить более широкий входной диапазон. При превышении измеряемой величиной входного диапазона одного преобразователя вступает в действие следующий преобразователь. В такой «релейной конструкции» все преобразователи должны иметь одинаковую чувствительность, иначе общая передаточная характеристика становится разрывной. Кроме того, отдельные преобразователи должны очень хорошо выдерживать перегрузки по входу.

Наконец, часто проблемой является надежность преобразователя. Иногда это решается путем применения нескольких преобразователей, вместе измеряющих одну и ту же величину. Поскольку между выходными

сигналами преобразователей остаются различия в некотором заданном допустимом интервале, окончательным результатом измерения является среднее значение отдельных выходных сигналов. Если, однако, один из выходов существенно отличается от остальных, то сигнал соответствующего преобразователя исключается из выходного сигнала. При использовании  $n$  преобразователей, до  $n-2$  из них могут быть повреждены, прежде чем система действительно становится непригодной. Такая «дублирующая конструкция» значительно улучшает надежность системы, увеличивая, конечно, и свою стоимость.

Перед рассмотрением различных принципов преобразования необходимо сделать полезное заключительное замечание. Динамику линейного преобразователя можно легко описать, используя его электрический аналог. Проиллюстрируем это на примере. На рис. 2.3а показан электродинамический преобразователь, который можно считать линейным для малых отклонений мембраны. Предполагая, что давление окружающего воздуха, действующего на мембрану, изменяется по синусоидальному закону (при использовании преобразователя в качестве микрофона), можно ввести комплексные обозначения. Сила  $F$ , действующая на мембрану, приводит ее в движение со скоростью  $V$ . Это движение создает на выводах катушки напряжение  $V$ , которое, в свою очередь, вызывает ток  $I$ , протекающий через сопротивление нагрузки. Мы можем рассматривать преобразователь как неоднородный линейный четырехполюсник; это означает, что соответствующие величины ( $V$ - и  $I$ - величины) на входе и выходе четырехполюсника имеют разную размерность. Связь между входными и выходными величинами задается следующими двумя передаточными уравнениями:

$$V_m = t_{11}V + t_{12}I; \quad (2.8)$$

$$F = t_{21}V + t_{22}I. \quad (2.9)$$

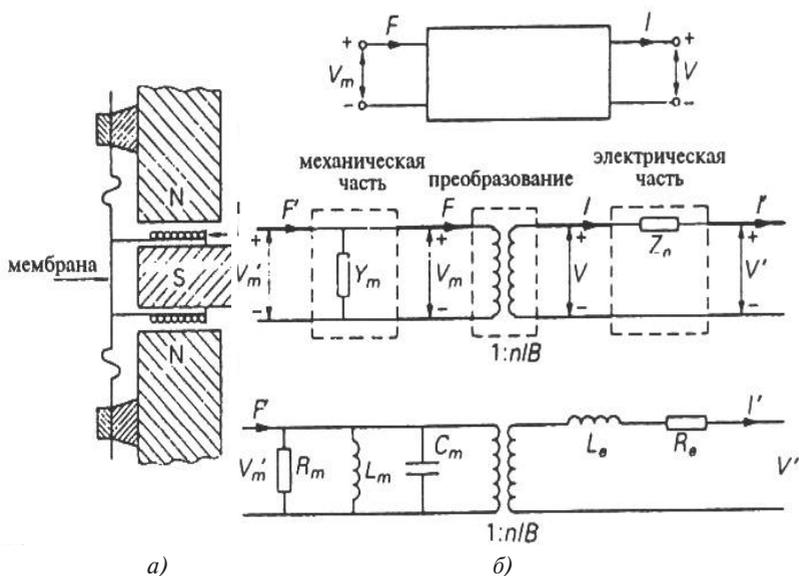


Рис. 2.3. Электродинамический преобразователь:  
 а) схема контроля; б) линейный неоднородный четырехполюсник

Предположим, что преобразователь идеальный, а именно, что у катушки нет электрического сопротивления, емкости и самоиндукции, а мембрана абсолютно гибкая и не имеет массы и трения. Применяя к катушке, находящейся в постоянном магнитном поле с индукцией  $B$ , закон об электромагнитной индукции Фарадея, получаем  $V = n l B V_m$ , где  $n$  – число витков, а  $l$  – длина одного витка. Сила Лоренца, действующая на катушку, равна  $F = n l B I$ , поэтому

$$\begin{bmatrix} V_m \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ n l B & n l B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Поскольку определитель этой матрицы равен единице, преобразователь должен быть обратимым.

Его можно использовать как входной преобразователь (микрофон), а также, наоборот, в качестве выходного преобразователя (громкоговорителя). Если этот датчик используется как входной преобразователь и к его катушке не подключена нагрузка, то выходное напряжение будет пропорционально скорости движения мембраны. Если этот преобразователь,

используемый как выходной, возбуждается некоторым током, а мембрана удерживается неподвижной, так что скоростью можно пренебречь, то сила, действующая на поверхность мембраны, будет пропорциональна току (см. также рис. 3.2б).

Очевидно, что мы можем рассматривать этот идеальный пассивный преобразователь как трансформатор, преобразующий размерность входной величины в соответствующую размерность выходной величины. Коэффициент передачи этого преобразователя размерности равен  $1 : n\ell B$ . Согласно рис. 3.3с и учитывая импеданс катушки  $Z_e$ , получаем:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V' \\ I' \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Даже если к катушке не подключено сопротивление нагрузки, она будет все-таки оказывать определенное воздействие на мембрану, придавая ей некоторую скорость, что вызвано механическим импедансом  $Z_m$  подвижной части преобразователя. С учетом этого можно записать:

$$Y_m = 1/Z_m = V'_m / F'. \text{ Когда } I = 0.$$

Этот пример демонстрирует один из недостатков  $V$ - и  $I$ -величин. Механический импеданс равен обратной величине отношения  $V$  к  $I$ . Это связано с внесистемным выбором импеданса в механике.

Поэтому переход от  $V'_m, F$  к  $V'_m, F'$  задается равенством

$$\begin{bmatrix} V'_m \\ F' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Z_m & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_m \\ F \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Следовательно, передаточные соотношения для преобразователя в целом принимают вид

$$\begin{bmatrix} V'_m \\ F' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Z_m & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{n\ell B} & 0 \\ 0 & n\ell B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V' \\ I' \end{bmatrix},$$

и их можно переписать как

$$\begin{bmatrix} V'_m \\ F' \end{bmatrix} = \frac{1}{n\ell B} \begin{bmatrix} 1 & Z_e \\ Z_m & Z_m Z_e + n^2 \ell^2 B^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V' \\ I' \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

В результате в схеме на рис. 2.3б импеданс  $Z_m$  заменен на сопротивление катушки  $R_e$  и включенную последовательно с ним индуктивность катушки  $L_e$ . Механическая проводимость  $Y_m$  определяется механическим сопротивлением  $R_m$ , массой подвижной части мембраны и катушки  $C_m$  и механической гибкостью закрепленной части мембраны  $L_m$ . Если мы знаем величину каждого параметра, то можем найти передаточную характеристику и определить динамическое поведение. Можно ожидать, что поведение системы зависит от электрического импеданса, которым нагружена звуковая катушка. Аналог, показанный на рис. 2.3б, позволяет нам к тому же рассчитать входной и выходной импедансы этого преобразователя. Эта информация необходима для правильного согласования преобразователя с объектом измерения и с остальной частью измерительной системы.

### 2.3. Системы контроля с применением пьезоэлектрического эффекта

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 году Джексом и Пьером Кюри. Они заметили, что в некоторых кристаллах при механическом воздействии на них появляется электрическая поляризация, причем степень ее пропорциональна величине воздействия. Позже Кюри открыл инверсионный пьезоэлектрический эффект – деформирование материалов, помещенных в электрическое поле. Эти явления еще называют прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом.

Пьезоэлектрический эффект присущ некоторым природным кристаллам, таким как кварц и турмалин, которые в течение многих лет использовались в качестве электромеханических преобразователей. Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. Воздействие (сжимающее или растягивающее), приложенное к такому кристаллу, приводит к поляризации после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющихся в каждой отдельной элементарной частице. Эффект практически линейный, т. е. степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия, но направление поляризации зависит, т. к. усилие сжатия или растяжения генерируют электрические поля, а следовательно, и напряжение, противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение

или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

*Пьезоэлектрические материалы* условно можно разделить на две группы.

1. Пьезоэлектрические монокристаллы.

Природные пьезоэлектрические материалы имеют достаточно высокую стоимость. В связи с этим потребности бурно развивающейся электроники в настоящее время удовлетворяются синтетическими пьезоэлектрическими монокристаллами, которые выращиваются в специальных установках. Пьезоэлектрические свойства таких кристаллов с достаточно высокой повторяемостью можно задавать путем композиции входящих в него компонентов.

Выращенные кристаллы определенным образом режутся на пластины, некоторые (сегнетоэлектрики) поляризуются, и из них путем шлифования и нанесения электродов изготавливаются пьезоэлектрические элементы.

2. Пьезоэлектрическая керамика (пьезокерамика).

По физическим свойствам это поликристаллический сегнетоэлектрик, представляющий собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов).

По химическому составу это сложный оксид, включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырехвалентного титана или циркония. Путем изменения основного соотношения исходных материалов и введения добавок синтезируют разные составы пьезокерамики, обладающие определенными электрофизическими и пьезоэлектрическими характеристиками. Наибольшее распространение получила группа пьезокерамических материалов типа ЦТС (цирконата-титаната свинца). Вместе с тем используется керамика на основе титаната бария (ТБ) и титаната свинца (ТС). В последние годы разрабатываются новые пьезокерамические материалы со свойствами, позволяющими в некоторых случаях использовать их вместо более дорогостоящих пьезоэлектрических кристаллов. В частности, разработана и производится группа материалов на основе ниобата свинца, которая уже нашла практическое применение благодаря возможности ее использования в диапазоне частот до 30 и более МГц. Значительные исследования проводятся по созданию пьезокерамических композитных материалов, а также многослойной керамики. Зарубежные производители в зависимости от пьезоэлектрических свойств делят ее на сегнетожесткую и сегнетомягкую. В отечественной практике существует дополнительное деление на керамику средней сегнетожесткости, а также выделяются высокостабильные, высокотемпературные и тому подобные материалы.

Качество пьезокерамики характеризуется следующими, принятыми за рубежом, основными параметрами:

- $K_{33}^T$  ( $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ ) – относительная диэлектрическая проницаемость;
- $\text{tg } \epsilon$  – тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц в слабых полях;
- $T_c$  ( $T_k$ ) – температура точки Кюри;
- $K_p$   $K_{33}$   $K_{31}$   $K_{15}$  – коэффициенты электромеханической связи;
- $d_{33}$   $-d_{31}$   $d_{15}$  – пьезоэлектрические модули;
- $g_{33}$   $g_{31}$   $g_{15}$  – электрические коэффициенты по напряжению;
- $Y_{11}^E$   $Y_{33}^E$  – модули Юнга;
- $N_L$   $N_T$   $N_R$  – частотные постоянные;
- $S_{11}^E$   $S_{33}^E$  – параметр эластичности;
- $\rho$  – плотность;
- $Q_m$  – механическая добротность.

### 2.3.1. Пьезокерамические элементы

В отличие от пьезоэлектрических кристаллов, пьезокерамические элементы изготавливаются методом полусухого прессования, шликерного литья, горячего литья под давлением, экструзии или изостатического прессования с последующим обжигом на воздухе при температуре 1000–1400 градусов по Цельсию. С целью уменьшения пористости обжиг может проводиться в среде кислорода, или элемент изготавливается методом горячего литья. По специальной технологии на поверхность заготовок наносятся электроды.

После этого керамику делают пьезоэлектрической с любым выбранным направлением поляризации путем помещения ее в сильное электрическое поле при температуре ниже так называемой точки Кюри. Поляризация обычно является окончательным процессом при изготовлении пьезокерамических элементов, хотя за ним следует термостабилизация и контроль параметров.



Рис. 2.4. Изделия из пьезокерамики

Пьезоэлектрическая керамика представляет собой твердый, химически инертный материал, совершенно нечувствительный к влажности и другим атмосферным воздействиям. По механическим качествам она подобна керамическим изоляторам.

В зависимости от предназначения пьезоэлементы могут иметь самую разнообразную конфигурацию – от плоской до объемной (сферы, полусферы и т. п.).

Для последующего понимания целесообразно ввести следующее общепринятое в зарубежной практике условное деление типовых пьезоэлементов в зависимости от их конфигурации (см. приложение): пластина (plate), диск (disc), кольцо (ring), брусок (bar), стержень (rod), цилиндр (cylinder). Существуют также гибкие пьезокерамические элементы: пластинчатые (plate bender) и дисковые (disc bender), которые, в свою очередь, подразделяются на юниморфы (unimorph), т. е. однослойные, и биморфы (bimorph) – двухслойные.

Такое условное деление небезупречно (цилиндр, по сути дела, является трубкой, и в зависимости от высоты его можно назвать кольцом; в то время как кольцо по своей конфигурации напоминает шайбу). Вместе с тем, оно общепринято и позволяет упростить в процессе заказа описание требуемого элемента. В нашей же практике один и тот же элемент потребители называют по-разному, и без чертежа или более подробного описания трудно представить порой, какой элемент хотел бы приобрести заказчик. Например, «кольцо» у нас называют кольцом, шайбой и таблеткой, «диск» – диском, шайбой и таблеткой.

Применение пьезокерамических элементов основано на практической реализации их технико-эксплуатационных показателей.



Рис. 2.5. Пьезокерамические элементы

Пьезоэлектрические элементы идеальны при использовании в качестве электромеханических преобразователей. Они достаточно широко используются для изготовления пьезокерамических компонентов, узлов и устройств. Некоторые пьезокерамические элементы уже изначально могут выполнять функции компонента или узла (например, пластинчатые биморфы) и не нуждаются в дополнительной доработке. Все изделия, изготовленные на базе пьезокерамики, подразделяют на следующие основные группы: генераторы, датчики (сенсоры), актюаторы (пьезоприводы), преобразователи и комбинированные системы.

#### *Пьезокерамические генераторы*

Они преобразуют механическое воздействие в электрический потенциал, используя прямой пьезоэффект. Примерами могут служить искровые воспламенители нажимного и ударного типов, применяемые в разного рода зажигалках и поджигающих системах, а также твердотельные батареи на основе многослойной пьезокерамики, применяемые в современных электронных схемах.

#### *Пьезокерамические датчики*

Пьезокерамические датчики преобразуют механическую силу или движение в пропорциональный электрический сигнал, т. е. также основаны на прямом пьезоэффекте. В условиях активного внедрения компьютерной техники датчики являются незаменимыми устройствами, позволяющими согласовывать механические системы с электронными системами контроля и управления. Выделяются два основных типа пьезокерамических датчиков: осевые (механическая сила действует вдоль оси поляризации, мода d33) и гибкие (сила действует перпендикулярно оси поляризации, мода d31). В осевых датчиках в качестве пьезоэлементов используют диски, кольца, цилиндры и пластины. В качестве примеров можно привести датчики ускорения (акселерометры), датчики давления, датчики детонации, датчики разрушения и т. п. Гибкие датчики строятся на основе последовательных (слои керамики имеют противоположную направленность поляризации) и параллельных (направленность поляризации слоев совпадает) пьезокерамических биморфов. Наиболее распространены датчики силы и ускорения.

#### *Пьезокерамические актюаторы (пьезоприводы)*

Актюаторы строятся на принципе обратного пьезоэффекта и поэтому предназначены для преобразования электрических величин (напряжения или заряда) в механическое перемещение (сдвиг) рабочего тела.

Актюаторы подразделяются на три основные группы: осевые (мода d33), поперечные (мода d31) и гибкие (мода d31). Осевые и поперечные актюаторы имеют еще общее название — многослойные пакетные, т. к. набираются из нескольких пьезоэлементов (дисков, стержней, пластин или брусков) в пакет. Они могут развивать значительное усилие

(блокирующую силу) до 10 кН при управляющем напряжении 1 кВ, но при очень малых отклонениях рабочей части (от единиц нанометров до сотен микрон). Такие актюаторы также называют мощными.

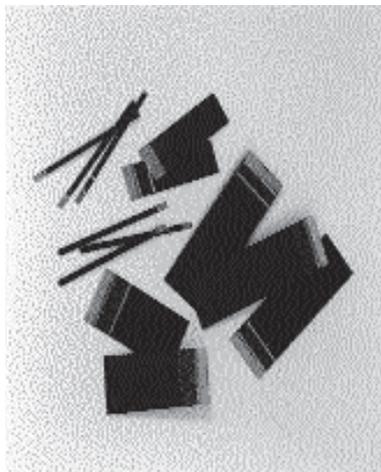


Рис. 2.6. Гибкие актюаторы

Гибкие актюаторы (биморфы) развивают незначительную блокирующую силу при малых (сотни микрон) отклонениях рабочей части. Однако американской компании APC International Inc. удалось создать и выйти на рынок с новым типом пластинчатого биморфа – «ленточным актюатором» (зарегистрированная торговая марка). Ленточный актюатор может обеспечивать блокирующую силу 0,95 Н и величину отклонения 1,2 мм или отклонение до 3 мм и блокирующую силу 0,6 Н.

Гибкие актюаторы относятся к группе маломощных. К этой же группе будут относиться и перспективные осевые актюаторы, представляющие собой моноблок, изготовленный по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы могут производиться предприятиями, не связанными с производством пьезокерамики. Гибкие же и осевые актюаторы из многослойной керамики сами по себе являются пьезокерамическими элементами. Их могут производить только предприятия, владеющие технологиями и оборудованием для производства пьезокерамических элементов.

#### *Пьезокерамические преобразователи*

Предназначены для преобразования электрической энергии в механическую и основываются, как и актюаторы, на принципе обратного пьезоэффекта.

Преобразователи в зависимости от диапазона частот подразделяются:

- на звуковые (ниже 20 кГц) – зуммеры, телефонные микрофоны, высокочастотные громкоговорители, сирены и т. п.;

- ультразвуковые – высокоинтенсивные излучатели для сварки и резки, мойки и очистки материалов, датчики уровня жидкостей, дисперсионные распылители, генераторы тумана, ингаляторы, увлажнители воздуха. Значительной группой выделяются так называемые ультразвуковые измерители расстояния в воздушной среде (Air Transducers), являющиеся пьезокерамическими компонентами. Они используются в качестве измерителей расстояния для автотракторной техники, сенсоров наличия и движения в охранных системах, в уровнемерах, для дистанционного контроля и управления, в устройствах отпугивания птиц, зверей и сельскохозяйственных вредителей и т. д. Производятся устройства трех типов: передающие, приемные и приемо-передающие;

- высокочастотные ультразвуковые – оборудование для испытания материалов и неразрушающего контроля, диагностики в медицине и промышленности, линии задержки и т. д.

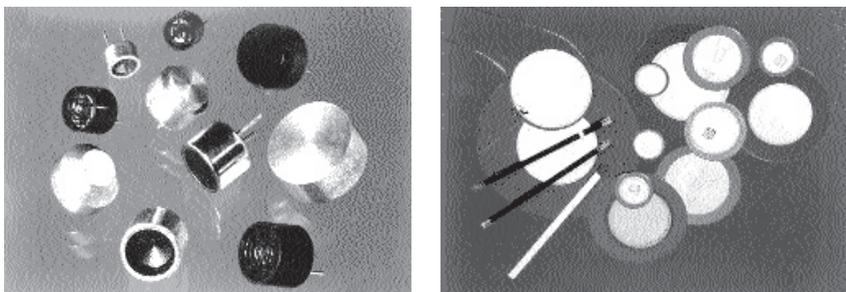


Рис. 2.7. Конструктивные исполнения пьезокерамических преобразователей

#### *Комбинированные пьезокерамические системы*

Такие системы преобразуют электрические величины в электрические, при последовательном использовании обратного и прямого пьезоэффектов. В качестве примеров таких систем можно привести эхолоты, измерители потоков, пьезотрансформаторы, «искатель ключа».

### **2.3.2. Системы контроля с использованием пьезокерамики**

Несмотря на то что пьезоэффект был открыт еще в XIX веке, а со второй половины XX активно развивались теория и технология создания пьезокерамических материалов, считается, что пьезокерамика – один из перспективных материалов XXI века. Причиной

такого взгляда является то, что замечательные свойства, присущие пьезокерамике, до сих пор не в полной мере востребованы наукой, техникой и технологиями.

Активное использование пьезокерамики в различных областях началось в 60–70 годах XX века. Достаточно хорошо были изучены и использованы свойства пьезокерамических датчиков и пьезокерамических преобразователей. В настоящее время пьезокерамика широко используется для ультразвуковой диагностики в медицине, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефтегазовом комплексе; силовая пьезокерамика – в ультразвуковой сварке, чистке поверхностей, нанесении покрытий, сверлении и т. д.

В то же время пьезокерамика еще недостаточно используется для создания генераторов, актюаторов и в комбинированных системах. Однако современные требования по энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к компьютерным системам управления и контроля все чаще заставляют производителей техники и оборудования обращаться к производителям пьезокерамики с целью совместного поиска тех или иных технологических решений с помощью пьезокерамики. В результате появляются новые типы пьезокерамики, создаются новые и совершенствуются известные пьезокерамические элементы и компоненты. Особое внимание в настоящее время уделяется пьезокерамическим трансформаторам и актюаторам.

*Пьезотрансформаторы.* Хотя настоящее потребление пьезотрансформаторов не так велико, потенциал их применения в будущем огромен.

Одним из перспективных направлений является их использование в бытовых и производственных газонаполненных осветительных приборах в качестве резонансных DC-AC конверторов. Сейчас для этих целей применяются самые разные компоненты. В основу перспективных осветительных приборов уже заложены принципы, позволяющие экономить до 80% электроэнергии по сравнению с ныне используемыми приборами. Поэтому единственный параметр, которому должны отвечать перспективные конверторы, являются их минимальные геометрические размеры. Изучение рынка подтверждает, что разработчиков осветительной техники интересуют не столько сравнительные характеристики по напряжению или по потребляемой мощности конверторов, сколько размеры, позволяющие устанавливать их в цоколе лампы. Последние исследования показали целесообразность использования многослойных пьезокерамических трансформаторов в новой осветительной технике. Были разработаны прототипы таких конверторов, удовлетворяющие практически всем требованиям, кроме цены. Поэтому производители пьезокерамики

активно работают над технологией, которая позволила бы добиться снижения их себестоимости.

Другим перспективным направлением использования пьезотрансформаторов является их применение в силовых устройствах. На рынке появились современные устройства, которые используют не традиционные однослойные (Rosen Type) пьезотрансформаторы, а многослойные трансформаторы. Примерами этого могут служить дисплеи обратного свечения на жидких кристаллах (The liquid crystal display back light) и системы управления холодным катодом флуоресцентного освещения (Driving cold cathode fluorescent lightning). В качестве достоинств многослойных пьезотрансформаторов по сравнению с традиционными можно отметить их малый размер (особенно толщина) и меньшее потребление энергии. Однако для современных многослойных трансформаторов, которые появились на рынке, определяющими факторами по-прежнему являются цена и размеры, над снижением которых активно работают производители.

Существует большая вероятность использования пьезотрансформаторов в перспективных телевизионных и компьютерных дисплеях. Уже отработаны прототипы таких дисплеев, которые получили название ПЭД – полевые эмиссионные дисплеи (FED– Field Emission Display). Это плоские панельные дисплеи, имеющие более высокую разрешающую способность и четкость изображения по сравнению с современными. Однако уже сейчас разрабатывается новое поколение экранов с немерцающим изображением (Flicker Free Image Screen), для питания которых также предусматривается использование многослойных пьезокерамических трансформаторов. Рынок телевизионной и компьютерной техники изумляет своими новинками и заставляет производителей пьезокерамических элементов интенсифицировать исследования и разработки в данной области.

*Актюаторы.* Как было сказано выше, актюаторы условно подразделяются на мощные (пакетные) актюаторы и маломощные, к которым относятся гибкие (биморфы и ленточные) и осевые актюаторы, изготовленные по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы (Stack Actuators) уже сейчас применяются в космической, лазерной технике и оптических инструментах для настройки антенн и зеркал с манометрической точностью. Считается, что они найдут более широкое использование там, где важно развить движущее усилие при минимальном угле перемещения.

Одним из перспективных направлений является их применение в точной настройке станков. Благодаря своей жесткой структуре пьезоприводы являются идеальным инструментом для быстрой и точной их настройки. Прилагая фиксированное напряжение к шаблону в фазе

с вращением шпинделя, можно обеспечить высокую точность обработки детали рабочим телом станка.

В станкостроении планируется их использование и для подавления (компенсации) вибрации. Нежелательную вибрацию станков можно компенсировать с помощью многослойных актюаторов, работающих в противофазе с вибрационными колебаниями. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению качества конечного изделия, а также позволит избежать чрезмерного износа инструмента и существенно снизит уровень шума станка. Компенсаторы вибрации могут найти применение не только в станкостроении, но и в других сферах.

Еще одним перспективным направлением использования пакетных актюаторов является управление гидравлическими клапанами. Примером этого могут служить последние разработки пьезокерамических высокоскоростных клапанов как для топливной аппаратуры дизельных двигателей легковых и грузовых автомобилей, так и для газораспределительных систем дизелей и двигателей внутреннего сгорания.

Гибкие актюаторы используются в пьезоэлектрических датчиках изгибающего момента, читающих по методу Брайля электронных системах для слепых, в качестве электронных переключателей. Создание ленточных актюаторов существенно расширило их использование. Изначально ленточный актюатор был разработан по запросу текстильной промышленности для компьютерных систем подачи нитей в жаккардовых машинах. Благодаря высокой чувствительности, относительно большой блокирующей силе и величине отклонения новые пьезоэлементы позволяют использовать их в качестве сенсорных выключателей и контакторов, пьезоп приводов, бесшумных успокоителей в электронном оборудовании, микрокомпрессоров, закрывающих и открывающих клапанов различного назначения, в том числе для программируемой дозированной подачи лекарств, вакуумных клапанов и т. п.

Весьма перспективным считается использование в микроэлектронике осевых актюаторов, разработанных на основе последних достижений в технологии многослойной композитной пьезокерамики. Размеры актюаторов составляют от единиц миллиметров до десятых долей миллиметра.

Ярким примером комплексного использования пьезокерамических элементов, узлов и деталей на их основе могут послужить совместные разработки американской компании APC International, Ltd. с производителями комплектующих для автомобильной промышленности.

Современные, технически сложные автомобили постоянно требуют внедрения дополнительной электроники для повышения надежности, безопасности и комфорта.

В настоящее время американские производители автомобильной техники активно используют устройства и узлы на базе пьезоэлектрической керамики. Примерами таких устройств могут служить:

- актюаторы-клапаны впрыска топлива;
- актюаторы-клапаны для газораспределительной системы двигателя;
- датчики поворота – для определения угла положения дроссельной заслонки;
- датчики детонации;
- датчики уровня заправочных жидкостей;
- датчики давления – для измерения давления в топливном баке с целью определения утечки топлива;
- пьезоп приводы зеркал;
- пьезоп приводы регулировки сидений;
- передние ультразвуковые дистанционные датчики (датчики предотвращения столкновений);
- боковые дистанционные датчики;
- задние (парковочные) ультразвуковые дистанционные датчики;
- датчики системы сигнализации и зуммеры оповещения;
- скоростные сенсоры в передней панели для подушек безопасности;
- боковые ударные сенсоры подушек безопасности;
- аварийные датчики-сенсоры подушек безопасности;
- актюаторы системы антиблокировки тормозов;
- пьезоп приводы системы подвески;
- датчики угловой скорости и линейные акселерометры малых перегрузок, ориентированные по трем осям автомобиля, предназначенные для автоматизированного управления маршрутом;
- пьезоп приводы регулировки фар;
- датчики и актюаторы положения фар – для обеспечения динамического регулирования луча света передних фар в зависимости от профиля дороги и изменения величины полезной нагрузки автомобиля;
- пьезоакустические системы адаптивного регулирования скорости автомобиля.

Инновационная разработка актюаторов (пьезоп приводов) и датчиков обеспечивает решение многих проблем автомобилестроения и улучшает эксплуатационные качества автомобиля, отвечающие жестким эксплуатационным требованиям.

Эффективность действия систем сигнализации, оповещающих зуммеров, биморфных и униморфных актюаторов (пьезоп приводов), пьезоп приводов зеркал и систем регулировки положения сидений,

подъемников стекол, управления клапанами двигателя и ударных датчиков подушек безопасности улучшились благодаря разработке и использованию в производстве новых пьезокерамических материалов со сверхмалыми частицами.

Разработана также высокотемпературная и высокостабильная пьезоэлектрическая керамика, предназначенная для применения в топливных системах двигателей современных автомобилей. Весьма важным является то, что данная керамика обладает значительной стойкостью к высоким температурам и противоударна. Единообразная частотная реакция делает датчики из данной керамики пригодной для любого типа автомобильного двигателя.

Таким образом, пьезокерамика благодаря своим уникальным свойствам находит все большее применение в различных областях техники и технологии. Иностранные производители пьезокерамики, элементов и компонентов на ее базе, пытаясь более полно удовлетворить современные требования рынка, проводят исследования и конструкторские работы с целью улучшения параметров керамики, разрабатывают ее новые типы, на что выделяются значительные финансовые средства. С целью удешевления продукции разрабатываются новые технологии, более энергосберегающие и позволяющие автоматизировать процессы производства. Считается, что только крупные компании-производители пьезокерамики, оснащенные передовыми технологиями и современным оборудованием, смогут в полной мере удовлетворить требования мирового рынка.

К таким, например, относят актюаторы трубчатого типа (рис. 2.8). Они представляют собой трубчатые пьезоэлементы армированные мембраной, работающие с усилием 5 кгс. Их используют при разработке устройств:

- в фото- и рентгенолитографии для точного совмещения шаблонов;
- медицинской аппаратуре (например, для точной подачи инструмента при микрохирургических и глазных операциях);
- оптической и электронной микроскопии для микроперемещений предметного столика;
- лазерной технике.

Технические характеристики трубчатых актюаторов, выпускаемых промышленным способом, приведены в табл. 2.1.

Пьезоэлектрические актюаторы, как приводы точных микроперемещений, находят все большее применение в различных областях техники. Обеспечивая перемещение от единиц до 200-300 мкм с точностью 0,01 – 0,005 нм, они способны развивать усилия до 50 кН.

Как чаще всего бывает, первое применение актюаторы нашли в военной технике, в приборах управления лазерным лучом — как приводы деформируемых лазерных резонаторов в лазерных адаптивных системах.



Рис. 2.8. Актюаторы трубчатые

Таблица 2.1

*Технические характеристики трубчатых актюаторов*

Параметры	Марка пьезопривода					
	ППУ-9	ППУ-10	ППУ-11	ППУ-12	ППУ-13	ППУ-14
Перемещение, мкм	±3	±4	±5	±7	±9	±12
Статическая емкость, мкф, не более	20	25	40	50	60	80
Рабочее электронна- пряжение, В	±500	±500	±500	±500	±500	±500
Предельно допустимое напряжение, В	±600	±600	±600	±600	±600	±600
Сопrotивление изоля- ции, МОм не менее	50	50	50	50	50	50
Габаритные размеры, мм	Φ10×55	Φ10×55	Φ10×87	Φ10×87	Φ10×119	Φ10×119
Масса г, не более	33	30	40	36	50	45

Однако с учетом компактности, удобства управления перемещением и быстрогодействия они начали находить свое применение в топливно-распределительных системах бензиновых и дизельных двигателей, в качестве компенсаторов вибрации оборудования, в устройствах точного позиционирования объектов (микролитография, туннельные расщеливающие микроскопы и т. д.).

Принцип действия актюаторов построен на использовании так называемого обратного пьезоэффекта, т. е. на деформации пьезоэлемента под действием электрического поля.

В табл. 2.2 приведены основные типоразмеры и эксплуатационные параметры актюаторов, выпускаемых серийно зарубежными фирмами (Morgan Electro Ceramics, Ceram Tec, Piezomechanik, Ceram Nort America, Xinetics, APC, Piezo Kinetics, Piezo Systems, TRS Ceramics, Ferroperm Group) и российским производителем – ОАО «ЭЛПА».

Для актюаторов обычно указывается величина свободного перемещения (ход) и развиваемая сила (усилие). Свободное перемещение означает перемещение, которое может быть достигнуто при максимальной величине напряжения при полностью свободном ходе актюатора. Развиваемая сила означает усилие, которым обладает актюатор при максимальной величине напряжения при отсутствии смещения. Величина емкости определяет быстродействие актюатора.

В табл. 2.2 приведены эксплуатационные параметры в зависимости от геометрических размеров пьезокерамического изделия при минимальном и максимальном значении геометрических параметров. По устройству и технологии изготовления различают пакетные и моноблочные конструкции пьезоактюаторов, которые, в свою очередь, в зависимости от режима включения подразделяются на высоковольтные (максимальное рабочее напряжение до 1000 В) и низковольтные (максимальное рабочее напряжение до 150–200 В).

Развиваемая сила прямо пропорциональна площади сечения актюатора, а величина свободного перемещения линейно зависит от длины актюатора и используемого пьезокерамического материала. Зависимость резонансной частоты и емкости от геометрических размеров определяется соотношениями, приведенными в табл. 2.3.

Техническая характеристика пьезокерамических актюаторов

Тип актюатора	Стандартные геометрические размеры (мм)				Эксплуатационные параметры			
	Диаметр внешний D	Длина внутрен- ний d	Ширина L	Высота d	Макси- мальный ход (X), мкм	Емкость (С), мкФ	Частота резонанс- ная (F), кГц	Развива- емая сила (F), кН
<b>Высоковольтные пакетные актюаторы</b>								
Бескорпусные	5÷35	—	10÷75	—	10÷110	0,02÷3,3	10÷50	1÷50
В корпусе с внутренним напряжением	10÷35	—	25÷200	—	10÷250	0,02÷6,5	5÷40	4÷50
<b>Высоковольтные кольцевые актюаторы</b>								
Бескорпусные	10÷35	5÷25	10÷100	—	10÷200	0,065÷1,8	10÷50	3÷20
В корпусе с внутренним напряжением	10÷35	5÷25	25÷125	—	10÷150	0,065÷1,8	10÷40	2÷20
Высоковольтные прямоуголь- ные бескорпусные	—	—	5÷20	2÷14	3÷14	0,07÷11	25÷240	2÷11
<b>Низковольтные актюаторы (полюс цилиндры)</b>								
Бескорпусные	15÷35	10÷15	10÷70	—	15÷180	0,07÷110	10÷45	2,8÷8
В корпусе с внутренним напряжением	15÷25	8÷15	15÷90	—	15÷110	0,07÷110	10÷30	2,8÷3
Низковольтные актюаторы в корпусе	4÷20	—	20÷200	-	10÷200	0,17÷110	5÷40	0,5÷14
Пьезоартриджи — низко- вольтные актюаторы в корпусе с резьбой для фронтального соединения М 8×14	4÷10	—	25÷150	—	25÷200	0,34÷5,6	—	0,15÷3
Низковольтные электрострик- ционные актюаторы (пакет)	5÷7	—	20÷70	—	6÷40	1,2÷22	—	0,5÷1
Полый цилиндр	15	—	3÷35	—	2÷12	4÷22	—	0,5÷5

Таблица 2.3

*Зависимость резонансной частоты и емкости актюатора от размеров*

Тип актюатора	Геометрические размеры (мм)					Расчетные значения	
	D	d	L	a	в	Резонансная частота, кГц	Емкость, мкФ
Пакетный	D	–	L	–	–	N/L	$\frac{\varepsilon_{33}^t \cdot \pi \cdot D^3}{4 \cdot L}$
Кольцевой	D	d	L	–	–	2N/(D-d)	$\frac{2\varepsilon_{33}^t \cdot \pi \cdot L}{\ln(D/d)}$
Прямоугольный	–	–	L	a	в	N/L	$\frac{\varepsilon_{33}^t \cdot a \cdot b}{L}$

**Примечание:**  
 $\varepsilon_{33}^T$  – диэлектрическая проницаемость пьезоматериала;  
N – частотная постоянная пьезоматериала

Работа пьезоактюаторов возможна в двух режимах: однополярном и биполярном.

При биполярном режиме величина напряжения противоположной полярности обычно составляет 20% от величины максимального положительного напряжения. При биполярном режиме работы возможно увеличение хода и усилия на 30% (в табл. 2.3 эти значения указаны для биполярного режима).

Пьезоактюаторы изготавливаются путем сборки пьезокерамических дисков и колец с металлизированными поверхностями в пакет, в котором для внешних соединений используются металлические межсекционные электроды.

Жесткая конструкция формируется либо с помощью высококачественных клеевых материалов, либо путем пайки твердым припоем. Отдельные пьезоэлементы соединены между собой параллельно электрически, что позволяет создать устройство, обладающее максимальной деформацией. Толщина диска и кольца 0,25–0,5 мм, количество слоев 7–40 шт. Материал электродов – серебро и серебряно-палладиевый сплав – наносится методом трафаретной печати на керамическую поверхность (толщина слоя 6–12 мкм).

Для повышения механической прочности, стойкости к климатическим воздействиям и температурным перегрузкам пьезокерамические изделия помещаются в корпус из меди или ее сплавов, обеспечивающий лучший теплоотвод. При помещении пьезокерамического актюатора в корпус с целью повышения жесткости конструкции и, соответственно, повышения эксплуатационных параметров и надежности с помощью специальных устройств (пружин или гибких элементов) осуществляется предварительное механическое нагружение

в осевом направлении (предварительное усилие) – усилие сжатия от 50 до 1500 Н. Предварительное нагружение позволяет работать при подаче положительного и отрицательного напряжения, исключает наклон концевых поверхностей актюатора и обеспечивает их параллельность при установке в изделиях.

Конструкция высоковольтных бескорпусных прямоугольных актюаторов представляет собой прямоугольный брус. Актюаторы изготавливаются из моноблока пьезокерамического материала по технологии изготовления пьезоизделий. На боковую поверхность наносятся серебряные электроды (толщина слоя 6–12 мкм), к которым припаиваются провода. Максимальные габариты определяются возможностями существующего техпроцесса изготовления пьезокерамических изделий.

Конструкция низковольтных кольцевых актюаторов представляет моноблок из пьезокерамического материала в виде полого цилиндра, на боковые поверхности которого нанесены серебряные электроды.

Картриджный вариант пакетного актюатора имеет конструктивную особенность, позволяющую выполнять простое крепление актюатора к механической системе с помощью резьбового соединения для фронтального монтажа.

Картриджные актюаторы предназначены для работы в оптико-механических устройствах. С помощью резьбы осуществляется грубая юстировка зеркала, а точная настройка осуществляется пьезовоздействием. Чувствительность – точность перемещения стандартных конструкций актюаторов от 0,01 до 0,1 нм (см. рис. 2.9).

Эксплуатация пьезоактюаторов в промышленной аппаратуре в течение пяти лет показала их высокую надежность: частота отказа – менее 1%.

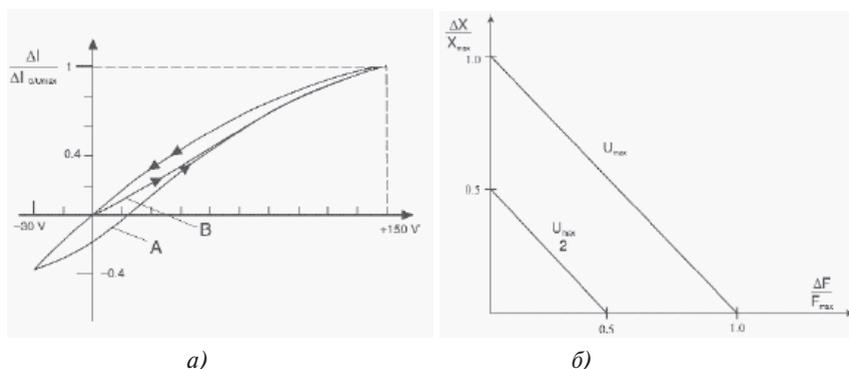


Рис. 2.9. Зависимости основных параметров пьезоактюаторов от напряжения: а) зависимость перемещения (хода); б) развиваемой силы

Зависимость хода и развиваемой силы от напряжения имеет ярко выраженный гистерезис — различие величины при возрастании и падении напряжения. Данное явление определяется свойствами пьезоматериала. Типовые пьезоматериалы имеют гистерезис  $15 \times 20\%$ .

Как видно на рис. 2.9б, величина развиваемого усилия уменьшается с увеличением значения свободного перемещения практически линейно.

В устройствах прецизионного позиционирования необходимо исключить явление гистерезиса в пьезоактюаторах. Это возможно либо путем замены пьезоматериала, либо путем активной стабилизации пьезоактюатора с применением систем управления с обратной связью.

В настоящее время для стабилизации параметров актюаторов используются электрострикционные материалы. Электрострикционный материал (ниобат магнезия свинца — титанат свинца типа PMN-PT) позволяет получить такие же перемещения и усилия, как и при применении пьезокерамического материала при малой петле гистерезиса  $\sim 1\%$ .

Электрострикционные актюаторы обладают внутренней стабильностью и способны точно возвращаться в нулевую точку. Получение аналогичных характеристик в пьезоактюаторах возможно только при применении активной обратной связи с установкой датчиков позиционирования для определения действительного положения.

Основным недостатком электрострикционных актюаторов является зависимость их эксплуатационных параметров от температуры окружающей среды. Оптимальный температурный диапазон  $15\text{--}35^\circ\text{C}$ , максимальное значение параметров при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

Высокие значения пьезомодуля ( $d_{33} > 2000$  нКл/Н) и диэлектрической проницаемости электрострикционного материала ( $\epsilon^T_{33} = 15000 - 20000$ , тогда как для пьезокерамики  $\epsilon^T_{33} = 1500 - 3000$ ) более чем на порядок повышают емкость электрострикционных актюаторов, увеличивая потребление тока, и при этом почти на порядок снижают быстродействие.

По этой причине они в основном используются в квазистатическом режиме работы и нашли свое применение в оптической и электронной промышленности, в устройствах квазистатических перемещений при стабильных условиях с оптимальным поддержанием температуры окружающей среды  $+25^\circ\text{C}$  ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ).

В настоящее время осуществляется широкое внедрение актюаторов в различные области науки и техники, сформулированы основные требования к актюаторам в перспективных приборных разработках для электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленности.

Основные области применения:

— прецизионная техника (современные пневматические и гидравлические клапаны с быстродействием до 10 мкс);

- интеллектуальное управление работой двигателя (предварительный впрыск топлива в двигателях автомобилей и последующее управление аналоговой схемой основного впрыска);
- системы оптической оптоволоконной линии связи (стыковка и подстройка оптических волокон, волоконных лазеров);
- прецизионный контроль и точное позиционирование технологического оборудования в электронном производстве;
- автоюстировка и подстройка лазерных зеркал, интерферометров, приводы для адаптивной оптики;
- управление и компенсация вибрации станков, транспортных средств (активное демпфирование вибрации рамы самолетов).

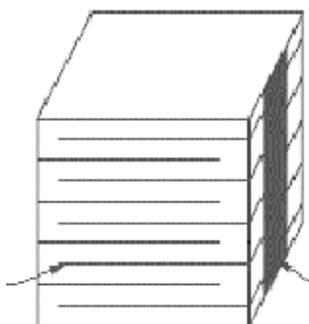


Рис. 2.10. Конструкция многослойного актюатора

Широкое внедрение актюаторов сдерживает их относительно высокая стоимость и габариты, что связано со сложностью их компоновки в изделиях.

В последние годы созданы недорогие многослойные актюаторы — альтернатива пакетным актюаторам.

Многослойные актюаторы (рис. 2.10) состоят из чередующихся тонких слоев пьезокерамики и электродов. Толщина керамического слоя обычно 20–100 мкм. В многослойном актюаторе каждый слой соединен с последующим слоем электрически параллельно. Перемещение, создаваемое структурой, является суммой перемещений всех слоев.

Преимущество конструкции заключается в том, что для заданного уровня деформации требуется напряжение в  $N$  раз ниже ( $N$  — количество слоев, обычно от 10 до 40), чем в монолитном исполнении с теми же размерами. Многослойные актюаторы изготавливают по стандартной технологии многослойных конденсаторов. На начальном этапе формируется пакет из тонкослойных пластин или шайб.

При большом давлении пакет уплотняется и спекается при высокой температуре. Образуется многослойный керамический блок с параметрами, близкими к теоретическому пределу монолитной керамики. В отличие от пакетных актюаторов, многослойные актюаторы имеют более высокую жесткость и деформацию и, соответственно, более высокую резонансную частоту и быстродействие. Они способны развивать значительные усилия пропорционально площади сечения (сечение  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  может создать усилие до 1000 Н).

В настоящее время сформулированы основные области применения многослойных актюаторов:

- системы впрыска топлива – управление клапанами с быстродействием  $\sim 1\text{--}10 \text{ мс}$  при максимальном ходе  $3\text{--}5 \text{ мкм}$  и усилием до 5 кН;

- системы гашения вибрации, усилие до 100 кН;

- системы торможения и системы подвески автомобиля;

- оптико-механические устройства с системой активной стабилизации;

- системы гашения вибрации корпуса и крыла самолета с целью снижения уровня шума до  $40\text{--}10 \text{ дБ}$  и т. д.

Внедрение актюаторов позволит повысить надежность, безопасность и комфорт современных автомобилей, существенно сократить расход топлива за счет оптимизации режим работы двигателя.

В России основным разработчиком и производителем пьезоактюаторов является ОАО «ЭЛПА». В настоящее время с целью удовлетворения современных требований к пьезоактюаторам в ОАО «ЭЛПА» проводятся исследования и разработки новых типов пьезоактюаторов на базе современных технологий.

### **2.3.3. Критерии оценки микроактюаторов**

Для оценки качества микроактюаторов используются следующие показатели: Линейность, точность, погрешность, разрешение, воспроизводимость, гистерезис, пороговое значение, холостой ход, шум, дрейф, силовая характеристика, устойчивость, скорость, переходная характеристика, ранжирование, выход по мощности.

Численное значение данных показателей определяется физическими свойствами материала и процессов, характерных для него. В основе теории пьезоэлектрических актюаторов лежит прямой пьезоэлектрический эффект – появление электрических зарядов разного знака на противоположных гранях некоторых кристаллов при их механических деформациях (сжатии, растяжении и т. п.) и обратный пьезоэлектрический эффект – состоит в деформации этих же кристаллов под действием внешнего электрического поля. Основная формула для прямого эффекта:

$$D_t = d_{tk} \sigma_k + \varepsilon(d)_{tk} E_t. \quad (2.14)$$

Для обратного эффекта применяют выражение вида

$$\varepsilon_k = d_{tk} E_t + S_{tk}^E \sigma_k, \quad (2.15)$$

где  $D_t$  – вектор электрического смещения;

$E_t$  – напряженность электрического поля;

$\varepsilon_k$  – относительная деформация;

$\sigma_k$  – механическое напряжение.

Основными параметрами являются:  $d_{tk}$  – пьезоэлектрические коэффициенты;  $S_{tk}$  – коэффициенты упругой деформации; коэффициенты диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{tk}$ .

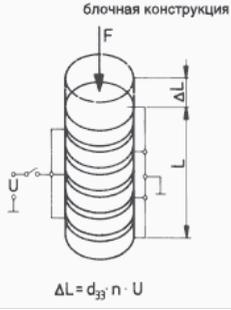
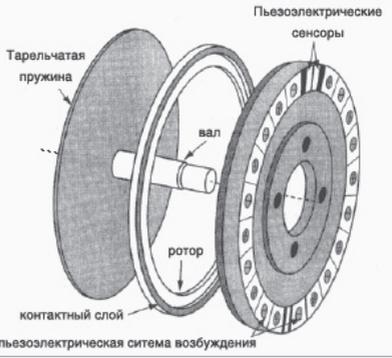
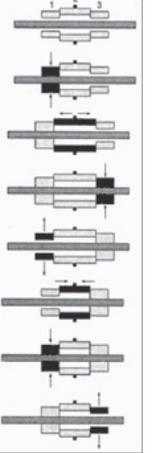
Впервые микроактюаторы начали применять, используя естественные монокристаллы (такие, как кварц), в 1920 году. В 1950-м появляется пьезоэлектрическая керамика, например PZT. Позже появляются пьезоэлектрические полимеры (PVDF). Также было открыто, что для получения пьезоэлектрического эффекта пьезоэлектрическую керамику надо подвергать процессу поляризации, а для улучшения пьезоэлектрических свойств структура кристалла должна быть асимметричной. Применение данной технологии изготовления микроактюаторов накладывает дополнительные требования к конструктивным параметрам микроактюаторов.

Наибольшую популярность имеют несколько различных исполнений конструкции пьезоэлектрических микроактюаторов (см. табл. 2.4).

Конструктивно слой пьезоэлектрика осажден на балку. При приложении напряжения балка изгибается (рис. 2.11).

Такой же принцип можно применить и с тонкой кремниевой мембраной. Если приложить напряжение, мембрана деформируется. Единственное ограничение – это то, что пленки должны быть достаточно толстыми для предотвращения диэлектрического пробоя или короткого замыкания; это может произойти, если приложить высокое напряжение. Комбинируя подобное устройство с микроклапанами, можно перекачивать жидкость в струйной микросистеме.

Типовые исполнения пьезоэлектрических микроактюаторов

Блочные актюаторы	Двигатели вращения	Шаговые двигатели
<p>блочная конструкция</p>  <p><math>\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot U</math></p>	 <p>Тарельчатая пружина вал ротор контактный слой пьезоэлектрическая система возбуждения Пьезоэлектрические сенсоры</p>	
Биморфные актюаторы	Цилиндрические, гибридные и другие актюаторы	
		

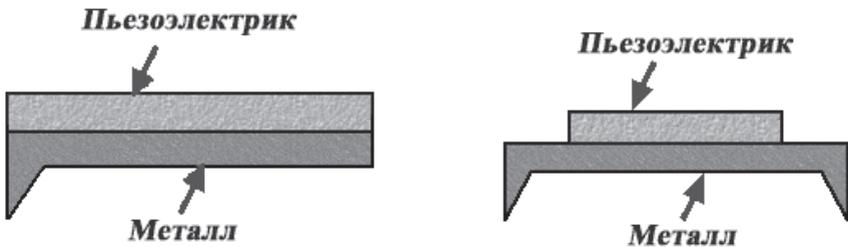


Рис. 2.11. Конструктивное расположение пьезоэлектрика на корпусе

Для пьезоэлектрического материала характерно появление поляризационного заряда при его механической деформации и наоборот, если пьезоэлектрический материал внести в электрическое поле, то можно наблюдать изменение его длины. Электрическая поляризация ( $P = D - \epsilon_0 E$ ), которая связана с поверхностным зарядом, в первом приближении

увеличивается линейно относительно механического напряжения  $\sigma$ . Материальный закон изменения поляризации выражен так:

$$D = P + \epsilon_0 E = d\sigma. \quad (2.16)$$

Электрическое смещение  $D$  и напряженность поля  $E$  – векторы, механическое напряжение  $\sigma$  и деформация  $\epsilon$  – это тензоры второго ранга. Следовательно, пьезоэлектрический коэффициент  $d$  – тензор третьего ранга. Так как тензор напряжения симметричен, тензор пьезоэлектрического коэффициента в общем случае имеет  $3 \times 6 = 18$  независимых компонент. В компонентном представлении мы получаем следующие отношения:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Индексы 1, 2, 3 относятся к кристаллическим параметрам и их можно совместить с координатными направлениями  $x, y, z$  при соответствующей ориентации. Например, положительное значение означает, что растягивающее напряжение в направлении  $z$  ведет к положительному заряду на поверхности, лежащей в направлении  $z$ . Обратный или косвенный пьезоэлектрический эффект дает соотношение между напряженностью электрического поля  $E$  и механической деформацией  $\epsilon$ :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}. \quad (2.18)$$

Коэффициенты  $d_{ij}$  тождественны прямому пьезоэлектрическому эффекту. Электрострикция определяется как эффект второго порядка, она зависит от квадрата напряженности электрического поля и описывается тензором четвертого ранга:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{34} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{11}\gamma_{12}\gamma_{13}\gamma_{14}\gamma_{15}\gamma_{16} \\ \gamma_{21}\gamma_{22}\gamma_{23}\gamma_{24}\gamma_{25}\gamma_{26} \\ \gamma_{31}\gamma_{32}\gamma_{33}\gamma_{34}\gamma_{35}\gamma_{36} \\ \gamma_{41}\gamma_{42}\gamma_{43}\gamma_{44}\gamma_{45}\gamma_{46} \\ \gamma_{51}\gamma_{52}\gamma_{53}\gamma_{54}\gamma_{55}\gamma_{56} \\ \gamma_{61}\gamma_{62}\gamma_{63}\gamma_{64}\gamma_{65}\gamma_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ E_3^2 \\ E_2E_3 \\ E_3E_1 \\ E_1E_2 \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

Для пьезоэлектрического эффекта характерно, что изменение направления электрического поля вызывает переход растягивающего напряжения в сжимающее напряжение. Эффект электрострикции связан с квадратом напряженности электрического поля и, значит, не зависит от полярности. В зависимости от кристаллической структуры некоторые пьезоэлектрические коэффициенты станут нулевыми или их можно приравнять друг к другу. Фактический вид тензора для пьезоэлектрического материала определяется тем кристаллографическим классом, к которому материал принадлежит. Кристаллический кварц относится к тригональному классу:  $d_{11} = -d_{12}$ ;  $d_{14} = -d_{25}$ ;  $d_{26} = -2d_{11}$ , а остальные коэффициенты исчезают. Оксид цинка и нитрид алюминия принадлежат к гексагональному классу, где только коэффициенты  $d_{31} = d_{32}$ ;  $d_{24} = -d_{15}$  и  $d_{33}$  отличны от нуля. Кристаллы, обладающие центральной

симметрией (как кремний), или изотропные материалы не проявляют пьезоэлектрический эффект, однако электрострикция имеет место во всех таких материалах, включая изотропные.

Многие пьезоэлектрические материалы – одновременно и сегнетоэлектрики или пироэлектрики, т. е. они имеют высокую диэлектрическую проницаемость, обладают гистерезисной характеристикой, сравнимой с характеристикой ферромагнитных материалов, или образуют поляризационный заряд при изменении температуры. Все сегнетоэлектрики – это пьезоэлектрики и пироэлектрики, но не все пьезоэлектрические материалы – сегнетоэлектрики (например,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ). Точно так же пироэлектрик (например, турмалин) необязательно сегнетоэлектрик.

Особенно высокий пьезоэлектрический коэффициент проявляет сегнетоэлектрическая керамика с кристаллической структурой  $\text{ABO}_3$  (рис. 2.12). А и В – это двухвалентные и трехвалентные элементы, например,  $\text{BaTiO}_2$ ,  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{PbZrO}_3$ . Для этих материалов эффектом электрострикции можно пренебрегать при напряженности поля, равной:

$$E < 10^3 \text{ V/m.}$$

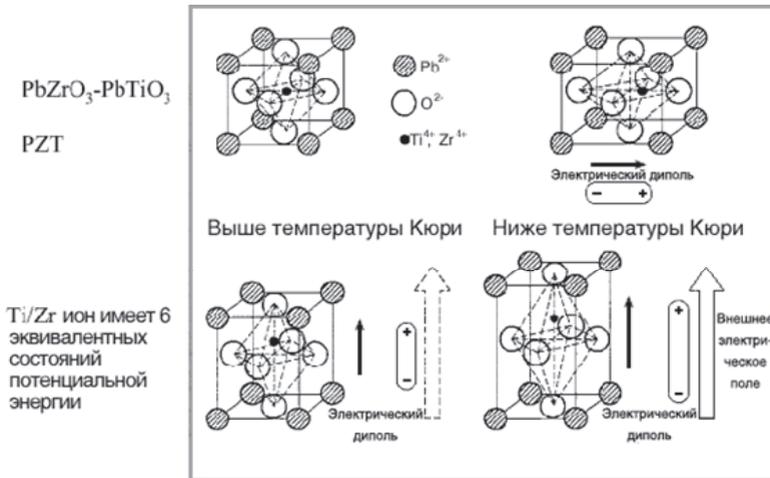


Рис. 2.12. Элементарные диэлектрические решетки

Одной из особенностей любого сегнетоэлектрического материала является то, что он изменяет свои свойства в точке Кюри  $T_c$ . При температуре  $T > T_c$  кристалл не проявляет себя как сегнетоэлектрик, однако до тех пор, пока  $T < T_c$ , он сегнетоэлектрик. Большинство кристаллов могут находиться в различных кристаллических фазах, которые устойчивы при различных температурах и диапазонах давлений. Переход между фазами

сопровождается изменением термодинамических характеристик (упругости, оптических и тепловых свойств, объема, энтропии, и т. д.). Во время перехода атомы перемещаются таким образом, что кристалл сменяет один кристаллический класс на другой. Вообще переход происходит при различных температурах, при нагревании и охлаждении (температурный гистерезис). Фазовый переход первого порядка отличается сильными и резкими изменениями в кристаллической структуре. В течение перехода второго порядка изменения менее сильны и переход непрерывен. Фазовые переходы второго порядка не обладают температурным гистерезисом. Фазовые переходы часто сопровождаются наличием новых физических явлений (сегнетоэлектричество, ферромагнетизм, сверхпроводимость). Для  $\text{BaTiO}_2$  точка Кюри равняется  $120^\circ\text{C}$ . Выше этой температуры  $\text{BaTiO}_2$  принадлежит кубическому кристаллическому классу и теряет таким образом свои сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства, ниже точки Кюри кристалл тетрагональный, от 0 и до  $-70^\circ\text{C}$  дальнейшие фазовые переходы происходят от орторомбического к тригональному кристаллическому классу. Смена кристаллической группы симметрии, связанной с фазовым переходом, становится причиной появления новых коэффициентов в тензоре материала. Материалы, с пригодным для использования коэффициентом продольной деформации, охватывают минералы, монокристаллические вещества и полимеры. Обычно пьезоэлектрический эффект наиболее ярко выражен в монокристаллических веществах. Среди материалов, годных к использованию в микросистемах, пьезоэлектрический коэффициент обычно лежит в диапазоне  $1 - 100 \times 10^{-12} \text{ м/В}$  (см. табл. 2.5).

Таблица 2.5

*Характеристики пьезоэффекта для ряда пьезоматериалов*

Материал	Химический знак	Пьезоэлектрический коэффициент, $1-100 \times 10^{-12} \text{ м/В}$	$\epsilon_r$	$T_c$ °C	$k_p$
Кварц	$\text{Si O}_2$	$d_{11}=2,3; d_{14}=-0,67$	4,5	570	0,1
Оксид цинка	$\text{Zn O}$	$d_{33}=12,3; d_{31}=-5,1, d_{15}=-8,3$	8,2	-	0,23
Нитрид алюминия	$\text{AL N}$	$d_{33}=5; d_{31}=-2, d_{15}=4$	11,4	-	0,17
PZT-5A	$\text{Pb}(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{O}_3$	$d_{33}=374; d_{31}=-171, d_{15}=584$	1700	365	0,6
PZT-4	$\text{Pb}(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{O}_3$	$d_{33}=289; d_{31}=-123, d_{15}=496$	1300	328	0,6
Поливинилиден-фторид	PVDF	$d_{33}=-27; d_{31}=20, d_{15}=0,9$	12	80	0,2

При максимальной напряженности поля ( $E = 10^7 \text{ V/m}$ ) относительная продольная деформация лежит в диапазоне:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta \ell}{\ell} = 10^{-3} - 10^{-5} \quad (2.20)$$

В результате достижимый диапазон управления мал, но при помощи напряжения можно очень точно управлять перемещением. В отличие от большинства других принципов активации, нельзя достигнуть более низкого предела, получаемого на атомном уровне. Эта особенность используется в растровом туннельном микроскопе или в микроскопе атомной силы, для получения разрешения ниже, чем атомный диаметр  $10^{-10} - 10^{-12} \text{ m}$ .

Электромеханический коэффициент связи  $k_p$  показывает ту долю механической энергии, которая преобразуется в электрическую энергию. Это относится как к прямому, так и к обратному пьезоэлектрическому эффекту.

$$k_p^2 = \frac{\text{Преобразованная энергия}}{\text{Накопленная энергия}}$$

Для эффективного преобразования энергии, естественно, должен быть достигнут высокий коэффициент связи. Однако коэффициент связи нельзя приравнять к эффективности. Так как, в принципе, возможно восстановление накопленной энергии, а значит, эффективность может быть намного больше коэффициента связи.



Рис. 2.13. Линейность пьезоматериалов

Существует ряд физических свойств, характеризующих процессы преобразования энергии в кристаллах пьезоматериалов.

*Линейность.* Определяет линейность выходного сигнала как функцию входного. Максимальная разница между опорной линейной линией и выходом актюатора, выражена как процент полного выхода. Опорные линии: линия, обеспечивающая лучшее соответствие, и линия, построенная по терминальным точкам.

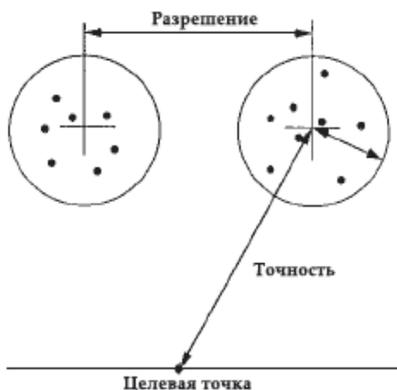


Рис. 2.14. Характеристики активации пьезоматериала

### *Точность, погрешность, разрешение*

*Точность:* насколько точно и воспроизводимо выполнена искомая активация. *Погрешность:* определяет разность между реальным перемещением и целевым (2.21):

$$\varepsilon_a (\%) = \frac{(Y_a - Y_t)}{Y_t}; \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{ВПД} (\%) = \frac{(Y_a - Y_t)}{Y_{ВПД}}, \quad (2.22)$$

где ВПД – выход полного диапазона.

Разрешение имеет три определения: 1) наименьший обеспечиваемый шаг; 2) наименьшее приращение входа, приводящее к обнаружению активации; 3) наименьший определяемый шаг.

Воспроизводимость характеризует отклонение выходного сигнала по циклам работы (2.23):

$$R = Y_i(X) - Y_k(X), \quad (2.23)$$

где  $i$  и  $k$  определяются по  $i$ -му и  $k$ -му циклу работы.

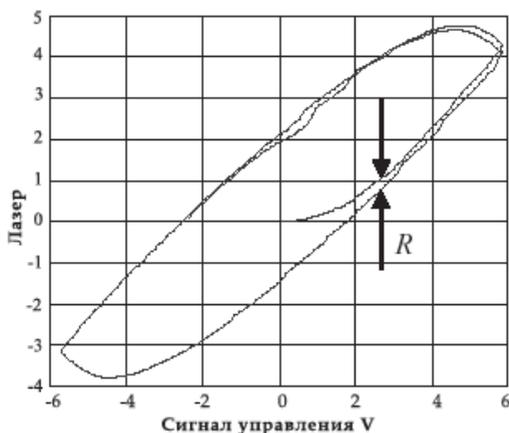


Рис. 2.15. Гистерезис изменения воспроизводимости пьезоматериала

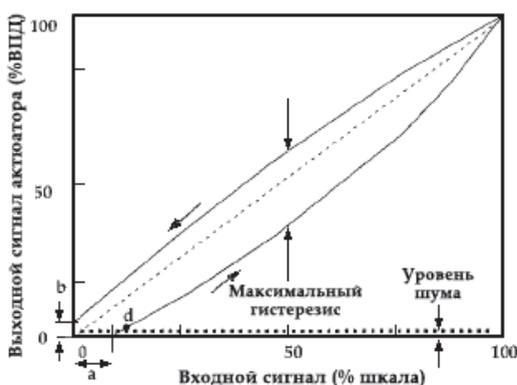


Рис. 2.16. Холостой ход

Гистерезис, пороговое значение, холостой ход, шум пьезоэлемента характеризуют его способность возвращать исходные размеры после изменения направления выходного сигнала.

*Гистерезис* – это разница между выходным сигналом актюатора  $Y$ , когда  $Y$  получают в двух противоположных направлениях.

Пороговое значение: начиная с нулевого входного сигнала, наименьшее начальное приращение входа, которое приводит к обнаружению выходного сигнала актюатора (значение «а» на рис. 2.17). «Мертвый ход: холостой ход» после смены направления («b»).

Шум: флуктуации (случайные изменения) в выходном сигнале с нулевым входом.

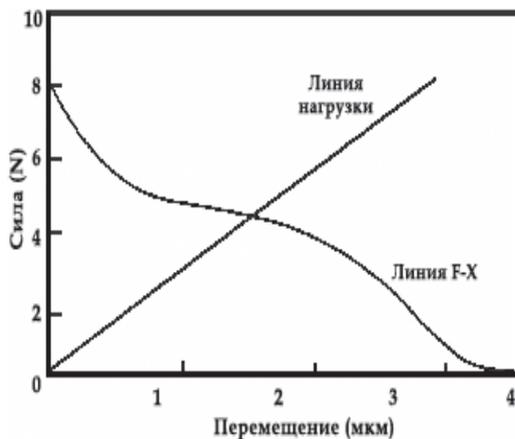


Рис. 2.17. силовая зависимость перемещения пьезоэлемента

Дрейф – это изменение выходного сигнала актюатора (с постоянным входом) в зависимости от изменения времени, температуры и т. д. Силовая характеристика и устойчивость пьезоматериала.

Нагрузка изменяет свойства актюатора: кривая сила-перемещение (линия F-X) дает статическую характеристику.

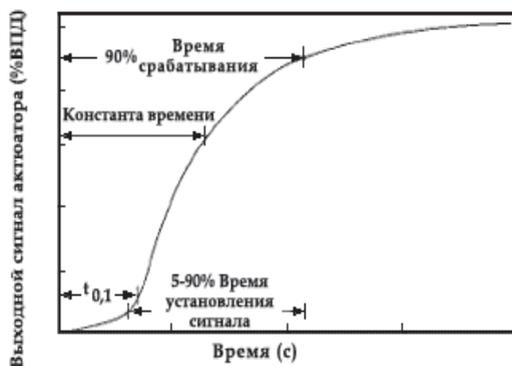


Рис. 2.18. Скорость пьезоэлемента

*Амплитуда и чувствительность.* Амплитуда – это полный рабочий диапазон выходного сигнала актюатора. Чувствительность – отношение изменения выходного сигнала актюатора  $\Delta Y$  к изменению приращения входного сигнала  $\Delta X$ :

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \quad (2.24)$$

Скорость и переходная характеристика. Скорость это интенсивность, с которой изменяется выходной сигнал актюатора:

$$v = \frac{dY}{dt}. \quad (2.25)$$

Переходная характеристика – резкое изменение выходного сигнала актюатора в ответ на ступенчатый входной сигнал.

Ранжирование – это оценка сопоставления разных методов активации:

$$DS = -\left(\frac{d\eta}{dV}\right), \quad (2.26)$$

где  $\eta$  – выход по энергии;

$V$  – объем.

Деформации пьезоэлектрика, возникающие вследствие пьезоэффекта, весьма незначительны по абсолютной величине. Например, кварцевая пластина толщиной 1 мм под действием напряжения 100 В изменяет свою толщину всего на  $2,3 \times 10^{-7}$  мм. Незначительность величин деформаций пьезоэлектриков объясняется их очень высокой жесткостью.

#### 2.4. Системы контроля с применением магнестрикционного эффекта

Магнестрикционный эффект (сокращенно магнитоупругий эффект) наблюдается в изотропных электриках, преимущественно в решетках металлов, обладающих определенной, достаточно высокой симметрией. Магнестрикционным эффектом могут обладать металлы, чьи решетки не имеют центра симметрии, а имеют так называемые полярные направления (домены).

Внешние механические силы, воздействуя в определенных направлениях на магнестрикционный материал, вызывают в нем не только механические напряжения и деформации (как во всяком твердом теле), но и электрическую поляризацию и, следовательно, появление на его поверхностях связанных электрических зарядов разных знаков. При изменении направления механических сил на противоположное становятся противоположными направление поляризации и знаки зарядов. Это явление называют *прямым магнитоупругим эффектом*.

Магнестрикционный эффект обратим. При воздействии на магнитоматериал электрического поля соответствующего направления в нем возникают механические напряжения и деформации. При изменении

направления электрического поля на противоположное соответственно изменяются на противоположное направления напряжений и деформаций. Это явление получило название *обратного магнитоупругого эффекта*.

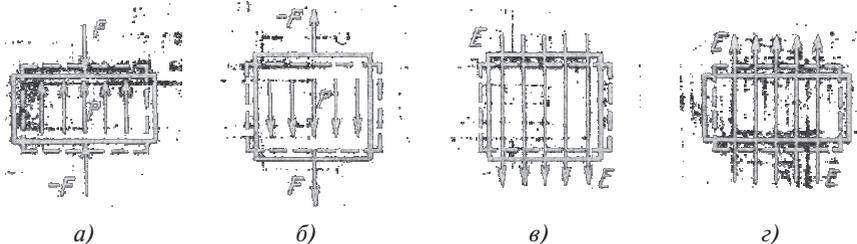


Рис. 2.19. Схематичные изображения прямого (а, б) и обратного (в, з) магнитоупругих эффектов. Стрелками  $P$  и  $E$  изображены внешние воздействия – механическая сила и напряженность электромагнитного поля

Штриховыми линиями на рис. 2.19 показаны контуры электрика до внешнего воздействия, сплошными линиями – контуры деформации электрика (для наглядности во много раз увеличены);  $P$  – вектор поляризации.

В некоторых литературных источниках для обратного магнитоэффекта неуместно используют термин *электрострикция*, относящийся к сходному, но другому физическому явлению, характерному для всех диэлектриков, деформации их под действием электрического поля. Электрострикция – четный эффект, означающий, что деформация не зависит от направления электрического поля, а ее величина пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Порядок деформаций при электрострикции намного меньше, чем при магнитоэффекте (примерно на два порядка). Электрострикция всегда возникает и при магнитоэффекте, но вследствие малости в расчет не принимается. Электрострикция – эффект необратимый.

Прямой и обратный магнитоэффекты линейны и описываются линейными зависимостями, связывающими электрическую поляризацию  $P$  с механическим напряжением  $t$ :

$$P = dt. \quad (2.27)$$

Данную зависимость называют *уравнением прямого магнитоэффекта*. Коэффициент пропорциональности  $d$  называется *магнитоэлектрическим модулем (модулем магнитоэлектричества)*, и он служит мерой магнитоэффекта. Обратный магнитоэффект описывается зависимостью:  $r = dE$ , где  $r$  – деформация;  $E$  – напряженность электромагнитного поля. Магнитомодуль  $d$  для прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение.

Приведенные выражения даны в элементарной форме только для уяснения качественной стороны магнитоэлектрических явлений. В действительности магнитоэлектрические явления в кристаллах более сложны, что обусловлено анизотропией их упругих и электрических свойств. Магнитоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и от их характера и направления сил относительно кристаллофизических осей кристалла. Магнитоэффект может возникать в результате действия как нормальных, так и касательных напряжений. Существуют направления, для которых магнитоэффект равен нулю. Магнитоэффект описывается несколькими магнитомодулями, число которых зависит от симметрии кристалла. Направления поляризации может совпадать с направлением механического напряжения или составлять с ним некоторый угол. При совпадении направлений поляризации и механического напряжения магнитоэффект называют *продольным*, а при их взаимно перпендикулярном расположении – *поперечным*. За направление касательных напряжений принимают нормаль к плоскости, в которой действуют напряжения.



Рис. 2.20. Схематические изображения, поясняющие продольный (а) и поперечный (б) магнитоэффекты

Деформации магнитоэлектрика, возникающие вследствие магнитоэффекта, весьма незначительны по абсолютной величине. Незначительность величин деформаций магнитоэлектриков объясняется их высокой жесткостью.

#### 2.4.1. Устройство магнитопроводов, работающих с применением эффекта магнитострикции

В частотной области от 50 Гц до 1 МГц магнитопроводы для трансформаторов и дросселей традиционно изготавливают из электротехнической стали, железоникелевых сплавов (пермаллой), ферритов, прессованного порошкообразного пермаллоя и альсифера (магнитодиэлектрики). Одним из производителей магнитопроводов данного типа является научно-производственное отделение ГАММАМЕТ (Россия).

Магнитопроводы (рис. 2.21) изготавливают из аморфной ленты толщиной 20...25 мкм, полученной из сплавов на основе железа или кобальта. Принцип получения аморфной ленты состоит в разливке металлического расплава заданного химического состава на участок поверхности вращающегося бронзового диска, перемещающегося с линейной скоростью около 25 м/с.

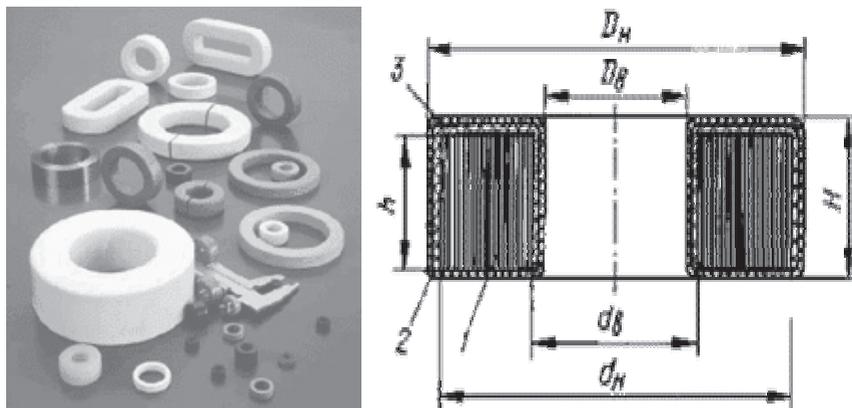


Рис. 2.21. Конструктивные исполнения и параметры промышленных магнитопроводов ГАММАМЕТ

В результате резкого охлаждения со скоростью до  $10^6$  см/с металлический расплав не успевает кристаллизоваться, и полученная лента имеет аморфную структуру, аналогичную структуре стекла.

После термической обработки структура ленты может либо остаться аморфной, либо стать частично кристаллизованной, либо нанокристаллической.

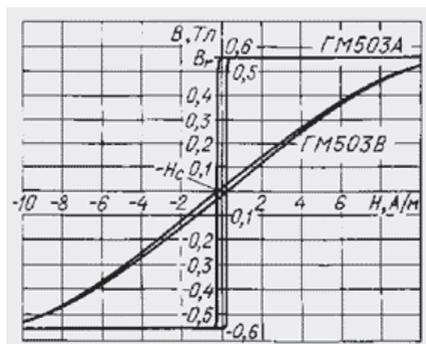


Рис. 2.22. Магнитные свойства магнитоупругих сплавов

В материале с нанокристаллической структурой кристаллиты расположены по всему объему ленты и имеют размер около 10 нм. Поэтому такие материалы и называют нанокристаллическими.

Частичную кристаллизацию получают прерыванием процесса на начальной стадии термической обработки. Кристаллизованный материал занимает меньший объем, чем этот же материал с аморфной структурой, из-за плотной упаковки атомов. В результате поверхностные слои толщиной не более 1 мкм, в которых вырастают кристаллиты на начальной стадии, сжимают центральный слой ленты с аморфной структурой. Такая слоеная структура ленты (кристаллическая – аморфная – кристаллическая) обеспечивает линейность кривой намагничивания материала.

Маркировка сплавов ГАММАМЕТ состоит из сокращенного наименования товарного знака ГМ и трех цифр, которые определяют химический состав сплава: первая цифра – основной элемент (4 – железо, 5 – кобальт), вторая и третья цифры – код химического состава сплава. Например, ГМ501 – магнитомягкий сплав на основе кобальта.

Магнитопроводы получают намоткой аморфной ленты на оправки разных форм и размеров и последующей термической обработкой. Все магнитные материалы под действием механических напряжений изменяют магнитные свойства, и, наоборот, в магнитном поле объект из магнитного материала претерпевает деформацию (явление магнитоstriction). Поэтому для сохранения высоких магнитных свойств магнитопровода после отжига его помещают в защитный пластиковый контейнер и заливают вязким компаундом (рис. 2.21). Компаунд 3 предохраняет магнитопровод 1 от ударов и смещения внутри контейнера 2. В качестве компаунда используют вазелин КВ-3 или другой материал, не ухудшающий магнитных свойств магнитопровода.

Маркировка магнитопроводов в защитном контейнере состоит из обозначения магнитного сплава, из которого изготовлен магнитопровод, и буквы А или В. Буквы характеризуют условия термической обработки: А – отжиг в продольном магнитном поле (вдоль магнитного пути магнитопровода), В – отжиг в поперечном магнитном поле (перпендикулярно торцевой поверхности магнитопровода и вдоль поверхности ленты). Если дополнительной буквы в маркировке магнитопровода нет, то это обозначает, что он отожжен без магнитного поля.

На примере сплава ГМ503 (табл. 2.6) видно, насколько значительно различаются магнитные характеристики после отжига в продольном магнитном поле (ГМ503А) и поперечном магнитном поле (ГМ503В). Вообще такая сильная зависимость магнитных свойств от условий термической обработки является характерной особенностью магнитомягких аморфных материалов и подчеркивает большие возможности, заложенные в них.

Таблица 2.6

## Магнитные свойства промышленных магнитопроводов

Магнитопровод	Магнитная индукция насыщения <sup>(1)</sup> Тл	Начальная относит. магн. проницаемость	Максимальная относит. магн. проницаемость	Кoeff. прямоугольности статической петли гистерезиса <sup>(2)</sup>	Статическая коэрцитивная сила, А/м	Удельные магн. потери (0,2/20) <sup>(3)</sup> Вт/кг	Удельные магн. потери (0,05/100) <sup>(4)</sup> Вт/кг	Температура Кюри, °С	Плотность (удельный вес), кг/м <sup>3</sup>	Магнитострикция насыщения
ГМ 501	0,46	150000	600000	0,6	0,15	3,6	3,6	160	7700	<0,2·10 <sup>-6</sup>
ГМ 503А	0,58	5000	1500000	0,9	0,2	8,5	10	260	7700	0,1·10 <sup>-6</sup>
ГМ 503В	0,58	40000	50000	0,04	0,25	2,6	2,8	260	7700	0,1·10 <sup>-6</sup>
ГМ 414	1,15	60000	300000	0,6	1	4,5	4,3	600	7400	1,5·10 <sup>-6</sup>
ГМ 412А	1,12	10000	600000	0,9	1,2	10	11	610	7400	1,5·10 <sup>-6</sup>
ГМ 412В	1,12	30000	45000	0,05	1,2	3	3,5	610	7400	1,5·10 <sup>-6</sup>
ГМ 440А	1,5	1000	200000	0,9	4	30	45	420	7300	25·10 <sup>-6</sup>

Все характеристики в таблице указаны для температуры 25°С. Коэффициент прямоугольности статической петли гистерезиса равен

$$K_{\text{п}} = \frac{B_r}{B_s}, \quad (2.28)$$

где  $B_r$  — остаточная магнитная индукция;  
 $B_s$  — магнитная индукция насыщения.

Контроль параметров магнитоприводов производится при  $B_m = 0,2 T_d$  и  $f = 20$  кГц ( $B_m$  – максимальная магнитная индукция;  $f$  – частота), а также при  $B_m = 0,05 T_d$  и  $f = 100$  кГц.

Материал магнитопроводов ГМ501, ГМ503А и ГМ503В, ГМ440А и ГМ440В после термической обработки имеет аморфную структуру, а материал магнитопроводов ГМ414, ГМ412А и ГМ412В – нанокристаллическую структуру. При расчете электромагнитных компонентов, в которых использованы магнитопроводы в защитных контейнерах, необходимо учитывать коэффициент заполнения магнитопровода магнитным материалом, равный 0,7 для ленты толщиной 20...25 мкм.

Магнитопроводы в защитных контейнерах имеют кольцевую форму, а их размеры соответствуют ряду типоразмеров ОЛ по ГОСТ 24011-80. Так, ОЛ20/32-10 – ленточный кольцевой магнитопровод с наружным диаметром 32, внутренним 20 и высотой 10 мм. Указанные цифры соответствуют размерам магнитопровода, а не контейнера, в который он помещен. Типоразмеры наиболее распространенных магнитопроводов ГАММАМЕТ в защитных контейнерах представлены в табл. 2.7. Магнитопроводы в контейнерах могут иметь также прямоугольную форму. Обязательное применение защитных контейнеров ограничивает выбор типоразмеров этого класса изделий. Техничко-конструктивные параметры магнитопроводов приведены в табл. 2.7. Действующее сечение магнитопровода равно геометрическому, умноженному на коэффициент заполнения.

Таблица 2.7

*Размеры магнитопроводов*

Магнито-провод	Размеры магнито-провода, мм			Размеры контейнера, мм			Средняя длина магнитного пути, см <sup>3</sup>	Действующее <sup>(1)</sup> сечение, см <sup>2</sup>	Объем, см
	$d_n$	$d_b$	h	$D_n$	$D_b$	H			
ОЛ14/20-10	20	14	10	23	10,7	12,5	5,3	0,21	1,11
ОЛ15/25-10	25	15		29	12,5	13,5	6,3	0,35	2,21
ОЛ20/32-10	32	20		34	17,5		8,2	0,42	3,44
ОЛ28/45-10	45	28		50	23,3	15,3	11,5	0,6	6,9
ОЛ40/64-20	64	40	20	69	36	26	16,3	1,68	27,4
ОЛ40/64-30			30	70		36,5		2,52	41,1
ОЛ135/170-20	170	135	20	178	117	26,5	47,9	2,45	117
ОЛ140/200-35	200	140	35	208	135	39,5	53,4	7,35	392

Магнитопроводы класса ДС (см. табл. 2.7) при намотке ленты пропитывают клеем, поэтому они имеют жесткую конструкцию и без защитного контейнера. У такого магнитопровода слабее воздействие механических факторов на магнитные свойства. Дополнительную жесткость магнитопроводу придает наружное покрытие толщиной от 0,4 до 1,2 мм из полимерных изоляционных материалов, выдерживающее напряжение не менее 5 кВ.

Принята следующая система обозначений магнитопроводов класса ДС. После сокращенного наименования товарного знака – ГМ следуют две цифры: первая обозначает группу по основной магнитной характеристике и соответствующую ей область применения (табл. 2.8); вторая – указывает на химический состав сплава, а последующие буквы Д – на наличие внешнего изоляционного покрытия на магнитопроводе и С – на межвитковую изоляцию, образованную специальным клеем.

Магнитопроводы класса ДС изготовлены из композиционного материала. Их физические и магнитные свойства также представлены в табл. 2.8. Обозначение магнитопроводов аналогично ферритовым и магнитодиэлектрическим. Например, К32×20×10 – наружный диаметр 32, внутренний – 20 и высота 10 мм (без учета толщины изоляционного покрытия).

Выбор типоразмеров магнитопроводов класса ДС очень широк – начиная от 5 мм для внутреннего диаметра до 400 мм для наружного. Форма магнитопровода может быть кольцевой или прямоугольной. Типоразмеры разрезных магнитопроводов видов ПЛ и ШЛ ГМ24ДС соответствуют ГОСТ 22050-76.

Магнитопроводы ГМ11ДС изготовлены на основе сплава ГМ501, магнитопроводы ГМ14ДС, ГМ24ДС, ГМ54ДС – на основе сплава ГМ414, а ГМ40ДС – на основе сплава ГМ440 с частично кристаллизованной структурой после термической обработки.

Технические условия на магнитопроводы ГАММАМЕТ® гарантируют температурную и временную стабильность изделий при воздействии на них нагревания до 125°С и охлаждения до –60°С, относительной влажности воздуха до 100% при температуре 35°С, атмосферного давления от 0,00013 Па до 297 кПа.

При эксплуатации в течение 5000 ч при температуре 125°С магнитные параметры магнитопровода изменяются не более чем на 10...20% для разных марок. Полный срок службы – не менее 30 лет. Магнитопроводы ГАММАМЕТ безотказны в работе при соблюдении требований соответствующих технических условий. Гарантийный срок хранения – до 15 лет. Гарантийный срок эксплуатации – 6 лет со дня введения в эксплуатацию в пределах гарантийного срока хранения.

Область применения промышленных магнитопроводов приведены в табл. 2.8. Выбор того или иного исполнения магнитопровода осуществляют с учетом параметров их производительности (см. табл. 2.9).

*Область применения магнитопроводов*

Группа	Область применения	Основные требования к магнитным свойствам	Магнитопроводы ГАММАМЕТ®
1	Измерительные трансформаторы и дроссели	Высокая начальная магнитная проницаемость	ГМ501; ГМ414; ГМ11ДС; ГМ14ДС
2	Трансформаторы сетевые, согласующие, широкополосные	Низкие удельные магнитные потери; высокая магнитная индукция	ГМ414; ГМ14ДС; ГМ24ДС
3	Насыщающиеся дроссели; задающие трансформаторы; магнитные усилители	Высокий коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса; низкая динамическая коэрцитивная сила	ГМ503А; ГМ412А; ГМ440А
4	Трансформаторы импульсные и сигнальные	Низкий коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса; высокая магнитная индукция	ГМ503В; ГМ412В; ГМ440В; ГМ40ДС
5	Накопительные трансформаторы и дроссели; токоограничивающие, сглаживающие и помехо-подавляющие дроссели	Высокая запасаемая магнитная энергия	ГМ54ДС; ГМ40ДС

Таблица 2.9

*Параметры производительности магнитопроводов*

Магнитопровод	Магнитная индукция насыщения, Тл	Начальная относит. магн. проницаемость	Максимальная относит. магн. проницаемость	Коэфф. прямоугольности стати ческой петли гистерезиса	Статическая коэрцитивная сила, А/м	Удельные магн. потери (0,2/20), Вт/см <sup>3</sup>	Удельные магн. потери (0,05/100), Вт/см <sup>3</sup>	Темпера- тура Кюри, ° С	Плотность (удельный вес), кг/м <sup>3</sup>	Магнитострикция насыщения	
ГМ11ДС	0,32	70000	150000	0,5	0,4	35	35	160	5400	<0,2·10 <sup>-6</sup>	
ГМ14ДС	0,8	20000	50000	0,35	2,5	70	60	600	5200	1,5·10 <sup>-6</sup>	
ГМ40ДС-2000	1	2000	8000	0,06	0,05	10	550	80	420	5100	25·10 <sup>-6</sup>
ГМ40ДС-1500		1500	2200			12	620	90			
ГМ40ДС-1000		1000	1300			16	730	100			
ГМ40ДС-700		700	850	20		840	130				
ГМ40ДС-500		500	600	30		1040	190				
ГМ40ДС-350		350	500	0,1		40	1660	290			
ГМ54ДС-1000		0,8	1000	1030		<0,01	3	100			
ГМ54ДС-700	700		715	120	90						
ГМ54ДС-500	500		510	130	100						
ГМ54ДС-350	350		357	150	110						
ГМ54ДС-250	250		255	180	130						
ГМ54ДС-140	140		143	210	160						
ГМ54ДС-90	90		91	270	200						
ГМ54ДС-60	60		60	4	350			260			
ГМ54ДС-30	30		30		520		380				

## Марки производимых магнитопроводов

Магнитопроводы из традиционных магнитных материалов	Магнитопроводы ГАММАМЕТ®
Пермаллой 79НМ, 80НХС, 81НМА	ГМ501, ГМ414, ГМ11ДС, ГМ14ДС
Ферриты 700НМ, 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 2500НМС, 3000НМ, 6000НМ	ГМ414, ГМ14ДС, ГМ40ДС
Прецизионный сплав 50НП, феррит 108П	ГМ503А, ГМ412А, ГМ440А
Прецизионный сплав 47НК	ГМ503В, ГМ412В, ГМ440В, ГМ40ДС-1000, ГМ40ДС-1500, ГМ54ДС-1000
Магнитоэлектрики МП250, МП140, МП90, МП60, ТЧ-60, ТЧК-55, ВЧ-32	ГМ54ДС, ГМ24ДС
Анизотропная электротехническая сталь толщиной 0,08 и 0,30 мм	ГМ414, ГМ14ДС, ГМ40ДС <sup>1</sup>

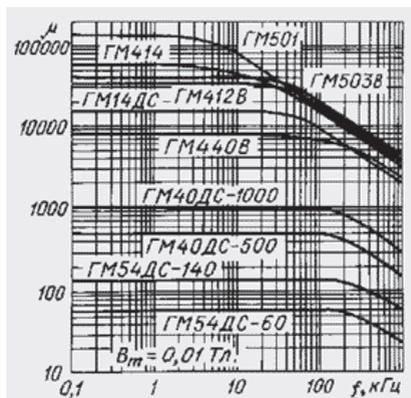


Рис. 2.23. Зависимость магнитных свойств магнитоупругих сплавов от резонансной частоты

Например, при частоте 400 Гц и более. При частоте 50 Гц замена рациональна для трансформаторов тока и напряжения. Подобная замена без изменения конструкции позволяет улучшить электромагнитные

параметры трансформаторов и дросселей. Если же произвести замену на стадии разработки, то при правильном выборе магнитопровода можно дополнительно добиться уменьшения габаритов, рабочей температуры и улучшения выходных параметров электромагнитных компонентов. Исходя из магнитных свойств материала ГАММАМЕТ, можно сделать вывод, что магнитопроводы из него покрывают всю частотную область применения от 50 Гц до 20 кГц, а в некоторых случаях до 1 МГц (см. рис. 2.23).

#### 2.4.2. Магнитные актюаторы систем контроля

Прежде всего следует сказать, что довольно часто микроустройства изготавливают при помощи гальванотехники, используя никель (это особенно характерно для LIGA-технологии). А так как никель – это ферромагнитный материал, то это стало первопричиной появления магнитных актюаторов. Вообще, слово «магнитный» употреблять не совсем корректно, поскольку в этот класс микроактюаторов входят и электромагнитные, магнитоstrictionные актюаторы. Основным компонентом большинства магнитных актюаторов является тонкопленочная структура пластины, которая поддерживает электролитический пермаллоевый участок, генерирующий механическую силу и вращающий момент при условии помещения его в магнитное поле. Эти актюаторы различаются по виду механической поддержки, которая расположена либо на консольных балках, либо балках кручения (см. рис. 2.24).

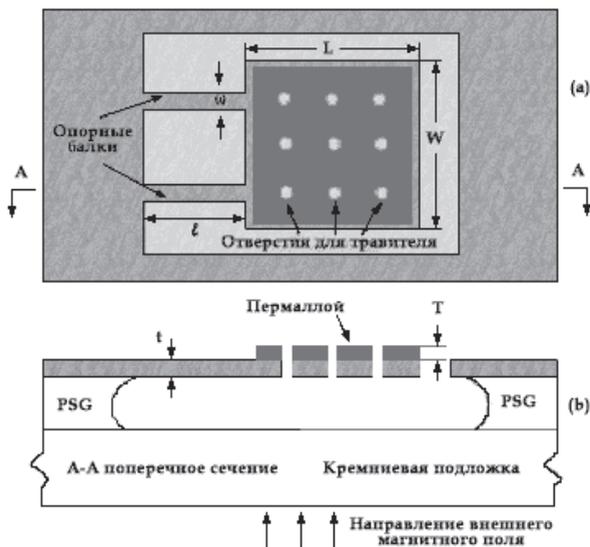


Рис. 2.24. Устройство магнитного актюатора

Структурные пластины и поддерживающие балки сделаны из поликристаллических тонких пленок. Механизм активации проиллюстрирован, используя актюатор первого типа. Три величины  $L$ ,  $W$ ,  $T$  – это длина, ширина и толщина магнитного участка, соответственно. Консольная балка имеет длину  $l$ , ширину  $w$ , толщину  $t$ . Когда внешнее магнитное поле равно нулю структурная пластина параллельна плоскости подложки (рис. 2.24).

Когда внешнее магнитное поле  $H_{\text{внеш}}$  приложено нормально к плоскости структурной пластины, внутри пермаллового участка возникает вектор намагниченности  $M$ , и он впоследствии взаимодействует с  $H_{\text{внеш}}$ . Взаимодействие создает вращающий момент ( $M_{\text{вращ}}$ ) и небольшую силу, воздействующую на свободный конец консольной балки при этом, заставляя ее изгибаться.

Анализ квазистатических характеристик таких актюаторов представлен в следующих двух абзацах. Прежде всего будет проанализирован магнитный момент и сила, которые появляются благодаря магнитному взаимодействию. После этого будет получено полное смещение.

При приложении внешнего подмагничивания, пермалловый материал рассматривается как материал, имеющий постоянный плоскопараллельный вектор намагниченности с величиной равной намагниченности насыщения  $M_{\text{нас}}$ .

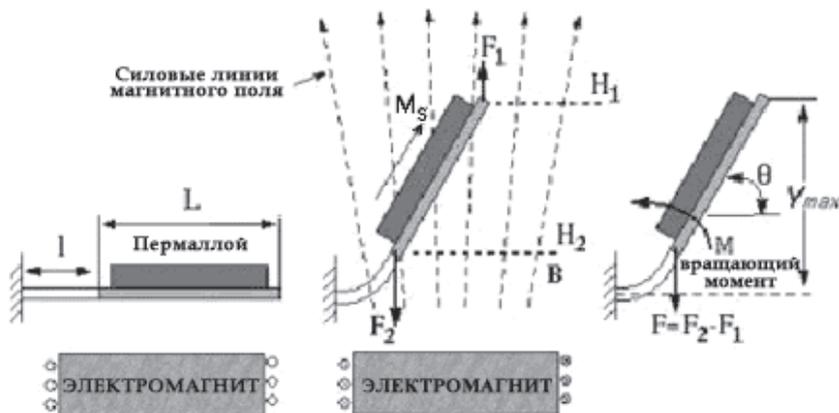


Рис. 2.25. Расчетная схема магнитного актюатора

При помещении во внешнее магнитное поле генерируется две компоненты силы. Величина обеих – как  $F_1$  (которая действует на верхнюю грань), так и  $F_2$  (которая действует на нижнюю грань) – рассчитывается следующим образом:

$$F_1 = M_{\text{нас}} \times W \times T \times H_1; \quad (2.29)$$

$$F_2 = M_{\text{нас}} \times W \times T \times H_2, \quad (2.30)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – напряженность магнитного поля на верхней и нижней грани пластины (в текущей конфигурации  $H_1 < H_2$ ).

Величина  $H_1$  и  $H_2$  линейно зависит от соответствующего расстояния до поверхности электромагнитного источника. Структура пластины вместе с пермалловым участком имеет толщину  $T+t$ . Ее момент инерции  $I$  пропорционален  $(T+t)^3$ , и он намного больше по сравнению с моментом инерции консольной балки, которая имеет толщину  $t$ . Пластина структуры вместе с пермалловым участком, таким образом, рассматривается как твердое тело. Основываясь на этом предположении, систему сил упрощают, перемещая  $F_1$  до совмещения с  $F_2$ . Результатом является вращающий момент, действующий против часовой стрелки, и сосредоточенная сила, воздействующая на нижнюю грань структурной пластины. Этот результат можно представить как:

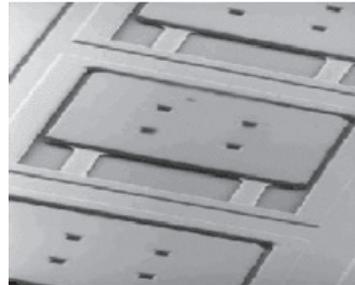
$$M_{\text{маг}} = F \times L \times \cos \theta, \quad (2.31)$$

где  $F = F_2 - F_1$ .

Вращающий момент всегда стремится уменьшить полную энергию в системе актюатора выравниванием вектора намагниченности с силовыми линиями внешнего магнитного поля. Фотография магнитного микроактюатора, полученная на сканирующем электронном микроскопе, представлена на рис. 2.26.



*a)*



*б)*

Рис. 2.26. Общий вид и применение магнитных актюаторов:

*a)* – вид сверху, *б)* – в перспективе

Примером магнитного микроактюатора другой конструкции может служить линейный мотор, показанный на рис. 2.27. Магнит, расположенный в канале, движется возвратно-поступательно при переключении тока

в обмотках, то с одной, то с другой стороны канала. Еще одним типом магнитного микроактюатора может быть микроактюатор запоминания формы.

Из рис. 2.27 видна общая проблема, связанная с магнитными актюаторами: обмотки двумерны (трехмерные обмотки очень тяжело изготовить на микроуровне). Вдобавок ограничен выбор магнитного материала. Выбираются только те материалы, которые легко обрабатывать на микроуровне, т. е. получается, что не всегда материал магнита выбирается оптимально. Во многом из-за этого магнитные актюаторы потребляют большое количество энергии и рассеивают много тепла.

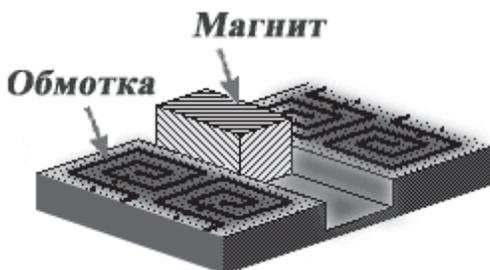


Рис. 2.27. Конструктивное расположение рабочих элементов магнитного актюатора

Следует также отметить, что для изготовления микроскопических компонентов (размером до нескольких миллиметров) электростатические устройства обычно выгоднее магнитных, однако при больших размерах магнитные устройства превосходят электростатические.

## 2.5. Системы контроля, работающие на основе эффекта электрострикции

Электрострикция — деформация твердых, жидких и газообразных диэлектриков в электрическом поле, обусловленная их поляризацией и пропорциональная квадрату напряженности электрического поля. Квадратичная зависимость деформации от напряженности поля  $E$  означает, в частности, что знак электрострикции (т. е. расширяется или сжимается вещество в электрическом поле) не зависит от направления поля. В переменном поле в результате электрострикции механические колебания происходят с частотой вдвое большей, чем частота поля. В твердых телах электрострикция выражается квадратичной формулой

$$u_{lm}(E) = \sum_i \sum_j q_{ijlm} E_i E_j, \quad (2.32)$$

где  $u_{lm}$  — компонента тензора деформации;

$E_i$  и  $E_j$  — составляющие напряженности электрического поля;

$q_{ijlm}$  — коэффициенты электрострикции;

все индексы  $i, j, l, m$  принимают значения 1, 2, 3 или соответственно —  $x, y, z$ .

В газах и жидкостях электростриксию описывают формулой

$$\frac{\Delta V}{V} = A E^2, \quad (2.33)$$

где  $\frac{\Delta V}{V}$  — относительная объемная деформация;

$A$  — постоянная электрострикции.

Электрострикция обусловлена поляризацией диэлектриков в электрическом поле, т. е. смещение под действием поля атомов, несущих на себе электрические заряды (ионы, электрические диполи), или изменением ориентации диполей. Электрострикцией обладают все твердые диэлектрики независимо от их структуры и симметрии, в отличие от пьезоэффекта, который наблюдается только у сред, не имеющих центра симметрии. С другой стороны, создание механических напряжений в веществах, обладающих электрострикцией, но не являющихся пьезоэлектриками, не сопровождается возникновением электрической поляризации и соответственно электрического поля: в средах, обладающих центром симметрии, однородная деформация, возникающая под действием механических напряжений, вызывает однородное изменение расстояний между зарядами атомов и, следовательно, не приводит к появлению электрического момента, т. е. поляризации. Поэтому, в принципе, электростриксию можно использовать для возбуждения звука (с удвоенной по отношению к электрическому полю частотой), но не для преобразования звуковых колебаний в электрические.

Количественно электрострикционная деформация твердых тел меньше, чем пьезоэлектрическая. Величина  $q$  обусловленной электрострикцией деформации в кристаллах не превышает по порядку величины  $3 \times 10^{-10}$ .

Электрострикция наблюдается в жидкостях, газах, обладающих дипольными моментами. Среди жидкостей наибольшей электрострикцией также обладают дипольные, хотя, в принципе, зависимость плотности от электрического поля имеет место в любой диэлектрической жидкости. Согласно термодинамической теории проводимости в изотропном веществе

$$A = \frac{\beta}{g\pi} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right), \quad (2.34)$$

где  $\beta$  — сжимаемость;  
 $\rho$  — плотность;  
 $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость.

Наличие свободных зарядов (электронов и ионов) не исключает электрострикцию, которая наблюдается не только у чистых диэлектриков, но и у ионизированных газов, электролитов и полупроводников, однако вследствие экранирования свободными зарядами поле, действующее на связанные с атомами заряды, оказывается уменьшенным. В сильно проводящих средах, например, в металлах, электрическое поле равно нулю, и следовательно, электрострикция отсутствует.

Особую роль играет электрострикция у *сегнетоэлектриков*, где аномально большой пьезоэффект обусловлен так называемой линейризованной электрострикцией, которая имеет место благодаря наличию в сегнетоэлектриках постоянной, не зависящей от внешнего поля, спонтанной поляризации  $P_s$  и, следовательно, большого спонтанного внутреннего поля  $E_s$ , пропорционального  $P_s$ . При воздействии переменного внешнего поля с амплитудой ( $EE_s$ ) основную роль в выражении для эффекта электрострикции приобретает компонент с частотой переменного поля и амплитудой ( $E_s E$ ), т. е. напряженность поля  $E_s$  входит в качестве одного из множителей в выражение (2.34), тем самым линейризуя и усиливая деформацию, возникающую в результате приложения внешнего поля. Характеристики промышленных электрострикторов: время инициации ( $\log t_0$  от  $-9$  до  $-6$ ); время существования ( $\log t_c$  от  $-9$  до  $15$ ); время деградации ( $\log t_d$  от  $-9$  до  $-6$ ); время оптимального проявления ( $\log t_k$  от  $-2$  до  $7$ ).

### 2.5.1. Применение эффекта электрострикции

Данный эффект широко применяется в электрострикционных преобразователях. Достоинства электрострикционных преобразователей состоят в высокой чувствительности, равномерной частотной характеристике и низком уровне собственного шума, а также в малой температурной зависимости свойств (чувствительности, резонансной частоты, электрического импеданса и т. д.). Их недостатки — сравнительная сложность конструкции и необходимость применения согласующих каскадов в непосредственной близости от капсула микрофона: малая емкость конденсатора (несколько десятков пикофарад) и большое сопротивление нагрузки исключают возможность присоединения электрострикционного преобразователя к усилительному устройству

кабелем даже малой длины, т. к. в этом случае чувствительность резко падает в результате того, что емкость микрофона шунтируется емкостью кабеля. В качестве согласующих устройств используются либо катудные повторители на миниатюрных электронных лампах, либо каскады, выполненные на полевых транзисторах.

Эффект электрострикции применяется в электрострикционных преобразователях, примером этого служит *устройство контроля электропроводности среды* (рис. 2.28).

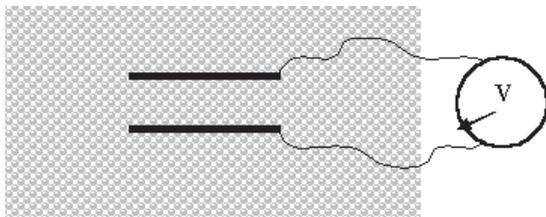


Рис. 2.28. Схема работы устройства контроля электропроводности

К устройству подключен стрелочный вольтметр. При подаче напряжения жидкость втягивается в зазор конденсатора. В качестве жидкой среды лучше брать чистое касторовое масло, в котором для визуализации взвешены окрашенные пластмассовые частицы. Зазор в конденсаторе — порядка сантиметра, размер пластин — порядка 10 сантиметров. Подаваемое напряжение — 5–10 кВ. Наблюдаем течение электропроводящей среды на краях пластин при подаче и снятии напряжения.

Для увеличения чувствительности электрострикционных преобразователей на неподвижном электроде делают канавки или выемки и повышают поляризующее напряжение  $U_0$ , однако величина  $U_0$  ограничена опасностью электрического пробоя между обкладками конденсатора и возможностью залипания мембраны в результате ее прогиба из-за действия электрических сил. Обычно  $U_0$  не превышает 250 В. Электрострикционные преобразователи могут работать и без поляризующего напряжения. Это достигается применением в устройствах материалов, несущих на себе постоянный электрический заряд (электреты). Электретная полимерная пленка помещается в зазоре между электродами. Свойства полимерных электретов позволяют обеспечить стабильную работу микрофонов в течение десятков лет при заряде, соответствующем напряжению 150 В.

В диапазоне звуковых частот чувствительность электрострикционных преобразователей колеблется в пределах 5–50 мВ/Па. При динамическом диапазоне 10–150 дБ. У более высокочастотных электрострикционных преобразователей (известны миниатюрные электрострикционные

преобразователи с линейной характеристикой вплоть до 100–140 кГц) чувствительность снижена до 0,5–3 мВ/Па, зато они могут работать в полях со звуковыми давлениями до 174–184 дБ.

Разновидностью электрострикционных преобразователей являются акустические зонды, предназначенные для измерений в малых объемах и труднодоступных местах. Для этого служат трубчатые звукопроводы. Такие зонды могут выполняться как обычные конденсаторные микрофоны, но снабжены трубчатыми насадками разной длины и диаметра, либо иметь бесконечную длинную линию, обеспечивающую режим бегущей волны в приемной трубке с целью устранения в ней нежелательных резонансов.

Электрострикционные преобразователи, предназначенные для измерения колебаний поверхностей твердых тел, устроены аналогично электрострикционным преобразователям для воздушной среды, только подвижным электродом служит сама колеблющаяся поверхность тела, амплитуду колебаний которой необходимо измерить. В таких электрострикционных преобразователях чаще применяется способ измерения амплитуды колебаний, основанный на частотной модуляции. Детектируя полученный высокочастотный сигнал, можно определить частоту и амплитуду колебаний вибрирующей поверхности.

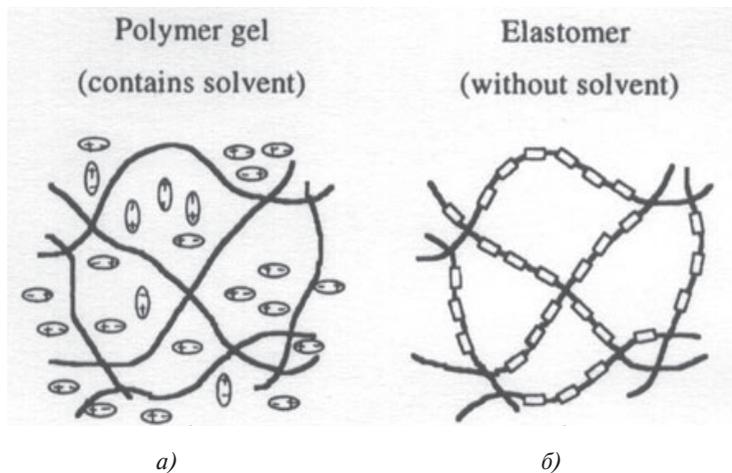


Рис. 2.29. Схематическое представление структуры полимерного геля и полиуретанового эластомера

Как обнаружили японские ученые (совместная работа сотрудников Nara National College of Technology; Nitta Corp.; Matsue National College of Technology), пленки полиуретанового эластомера (PUE) проявляют эффект электрострикции аналогично полимерным гелевым материалам,

на основе которых уже предложено много различных движущих устройств. В полимерных гелевых материалах используется изменение объема геля, и эффект значителен, однако отклик замедленный – из-за участия ионного растворителя.

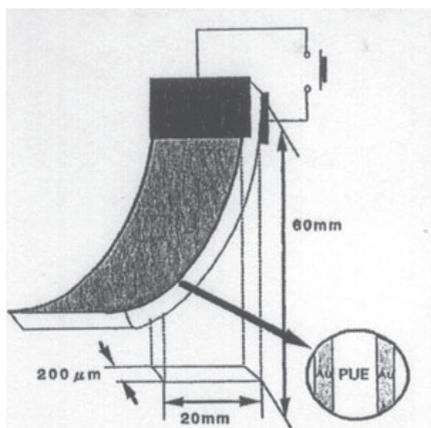


Рис. 2.30. PUE-актюатор моноформного типа

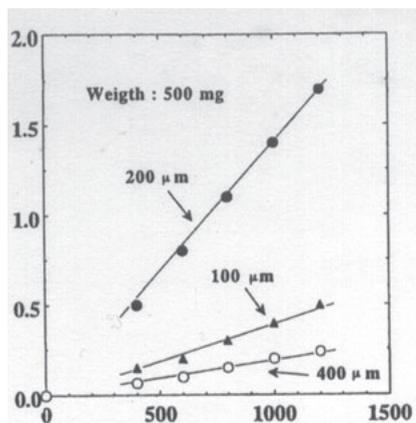


Рис. 2.31. Магнитные характеристики PUE-актюатора

Авторы синтезировали пленки эластомера, аналогичные гелевому материалу без растворителя. Как видно из рис. 2.31, молекулярная структура эластомера состоит из гибких и жестких сегментов, и полимерная цепь сама может заменить ионные растворители. Авторы предлагают актюаторы, состоящие из пленок *PUE* и *Al* или *Au* электродов, нанесенных на обе стороны пленки (например, методом термического испарения или ионной имплантации). Для того чтобы понизить рабочее напряжение (обычно более 1 кВ), в пленку был добавлен фуллерен, являющийся производным фуллерена с гидроксильными группами (предположительно  $C_{60}$  содержит 10–12 групп). Было обнаружено, что *PUE*-пленки проявляют эффект электрострикции и растягиваются под действием, приложенного электрического поля. Механизм растягивания можно связать с конформационными изменениями, обусловленными ориентацией множества полярных групп гибких сегментов молекулярных цепей вдоль электрического поля. Из-за наличия с двух сторон тонких пленочных электродов пленка *PUE* изгибается (рис. 2.32).

Смещение пластины работающего актюатора при приложенном высоком напряжении также очень велико.

Меняя толщину одного из электродов, можно управлять направлением изгиба (актюаторы всегда изгибаются в направлении более

толстого электрода). Однако если электроды имеют одинаковую толщину — около 200 нм, все актюаторы изгибаются в сторону катода. Поскольку *PUE*-актюаторы толщиной 100-400 мкм работают при приложенном напряжении более 1 кВ, их очень сложно использовать в качестве искусственной мышцы. Тут и помогли производные фуллеренов. Оказалось, что при добавлении 0,25% фуллеренола смещение при электрическом поле 15 кВ/см увеличивалось в три раза (как и в случае обычной пленки, наблюдалась квадратичная зависимость деформации от приложенного электрического поля, т. е. эффект электрострикции). Интересно, что при добавлении фуллеренов смещение, наоборот, стало очень небольшим по сравнению с обычной *PUE*-пленкой. Очевидно, гидроксильные группы добавленных в жесткие сегменты звездчатых фуллеренолов способствует образованию поперечных связей в трех измерениях, и кажущаяся длина молекулярной цепи в *PUE*-пленке возрастает.

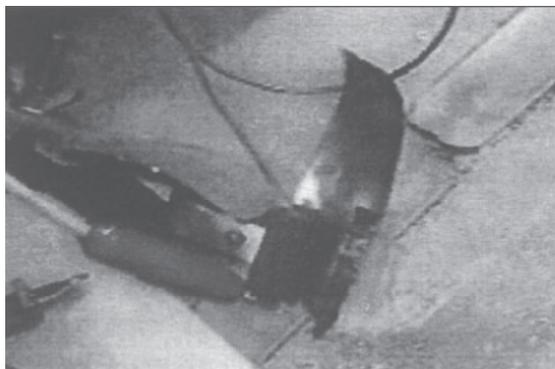


Рис. 2.32. Фотография работающего *PUE*-актюатора

Это приводит к эффективному растягиванию при более низком напряжении. Ученые синтезировали три типа фуллеренолов с разным количеством гидроксильных групп и убедились, что актюатор с добавкой большего числа этих групп при той же концентрации фуллеренола изгибается более сильно. Чтобы прояснить связь между растягиванием пленок и механизмом изгиба актюатора, исследователи импульсным электроакустическим методом измерили пространственное распределение заряда в *PUE*-пленках с добавками фуллеренола и пленок полиэтилентерефталата (*PET*). Оказалось, что пространственные заряды двух пленок резко отличаются. Если в пленках *PET* разноименные пространственные заряды имеются соответственно около катода и анода, то в *PUE*-пленках с добавками фуллеренола при приложении напряжения и отрицательный, и положительный пространственные заряды имеются около катода.

Происхождение зарядов обусловлено ориентированными полярными группами гибких сегментов. Это подтверждает предположение о том, что растягивание *PUE*-пленок основано на конформации молекулярных цепей. Последние около катода испытывают взаимное притяжение, обусловленное отрицательным и положительным зарядами, и *PUE*-пленкам с добавками фуллеренола всегда изгибаются в сторону катода. Для определения индуцированной силы к *PUE*-пленкам толщиной 100, 200 и 400 мкм были приложены нагрузки от 100 мг до 1 г. На рис. 2.31 показана зависимость между изгибающим смещением для *PUE*-фуллереноловых актюаторов и индуцированной силой для трех разных толщин пленок при нагрузке 500 мг. Актюатор толщиной 200 мкм является самым сильным (опыты показали, что он может поднять груз до 700 мг). В настоящее время авторы изучают добавление в *PUE*-актюаторы углеродных нанотрубок с гидроксильными группами. Как и в случае с фуллеренолом, изгибание растет при увеличении количества гидроксильных групп. Для актюатора с углеродными нанотрубками эффект при низком электрическом поле даже больше, чем для актюатора с добавками фуллеренола такой же концентрации. Согласно опытным данным, линейные нанотрубки являются более эффективными для поперечных сшивок полимерных цепей, чем сферические фуллеренолы.

### 2.5.2. Электростатические актюаторы систем контроля

Работу простейшего электростатического актюатора можно представить в виде двух пластин конденсатора площадью  $S$ , разведенных на расстояние  $d$ . В процессе работы электрического поля в пластинах накапливается напряжение и они притягиваются (отталкиваются) с силой  $F$  (рис. 2.33).

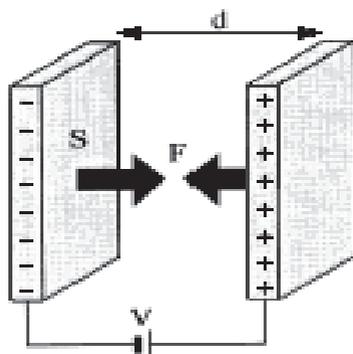


Рис. 2.33. Схема электростатического актюатора

Для актюатора накопленная энергия  $U$  может быть рассчитана по формуле

$$U = \frac{CV^2}{2}, \quad (2.35)$$

где  $C$  – емкость;

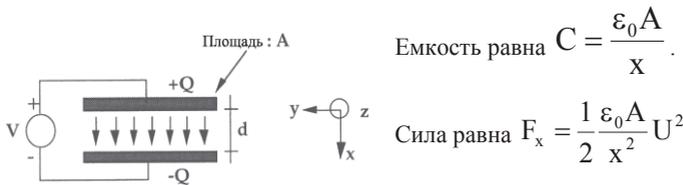
$V$  – напряжение между обкладками конденсатора.

Когда пластины актюатора перемещаются навстречу друг другу, работа, совершаемая силой взаимодействия между ними, может быть рассчитана, как изменение  $U$  в зависимости от изменения расстояния ( $x$ ). Сила рассчитывается по формуле

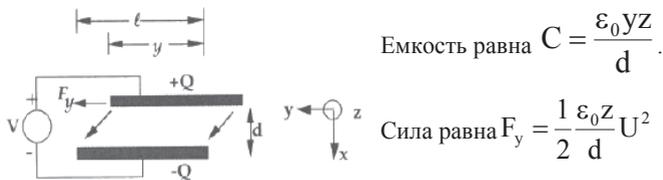
$$F_x = V^2 \partial C / \partial x / 2. \quad (2.36)$$

Существует несколько вариантов реализации электростатических актюаторов на основе плоскопараллельных электростатических актюаторов. Их можно разделить на виды:

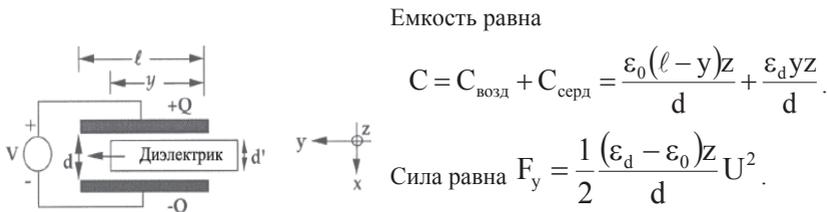
*Актюаторы с перпендикулярным движением пластин*



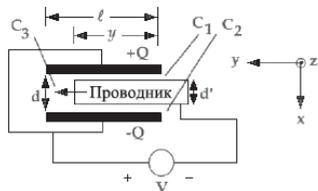
*Актюаторы с боковым движением пластин*



*Актюаторы с сердечником из диэлектрика*



Актуаторы с сердечником из проводника



Емкость равна

$$C = C_{\text{возд}} + C_{\text{серд}} = \frac{\epsilon_0(\ell - y)z}{d} + \frac{\epsilon_d yz}{d}.$$

$$\text{Сила равна: } F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 z d'}{d(d - d')} U^2.$$

Следует отметить, что в случае применения плоскопараллельных актуаторов можно сгенерировать только силы взаимодействия. Для генерации больших сил, которые будут совершать полезную работу такого устройства, необходимо, чтобы при изменении расстояния сильно изменялись емкости. Это и есть руководство к действию для получения электростатических гребневых микродвигателей (рис. 2.34а, б).

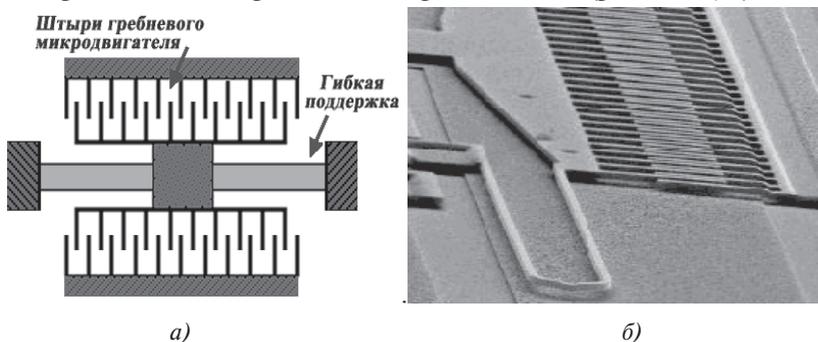


Рис. 2.34. Схема устройства (а) и вариант исполнения (б) микродвигателя на основе плоскопараллельного актуатора

**Гребневые микродвигатели — вариант применения электростатических актуаторов.** Они особенно распространены среди устройств, полученных поверхностной микрообработкой. Они состоят из большого количества встречностержневых штырей (рис. 2.34). Прилагая напряжение, у нас появляется сила взаимодействия между штырями, и они начинают двигаться. Увеличение емкости пропорционально количеству штырей, таким образом, для генерации больших сил, требуется большое количество штырей. Для примера можно привести расчет параметров гребневого микродвигателя, представленного на рис. 2.34, и изготовленного по технологии *MUMPs* (многопользовательская МЭМС-технология).

К известным параметрам конструкции микродвигателя относят: модуль Юнга  $E_{\text{poly}} = 140$  ГПа, плотность  $\rho_{\text{poly}} = 2,3$  г/см<sup>3</sup>, число штырей микродвигателя  $N_z = 20$ .

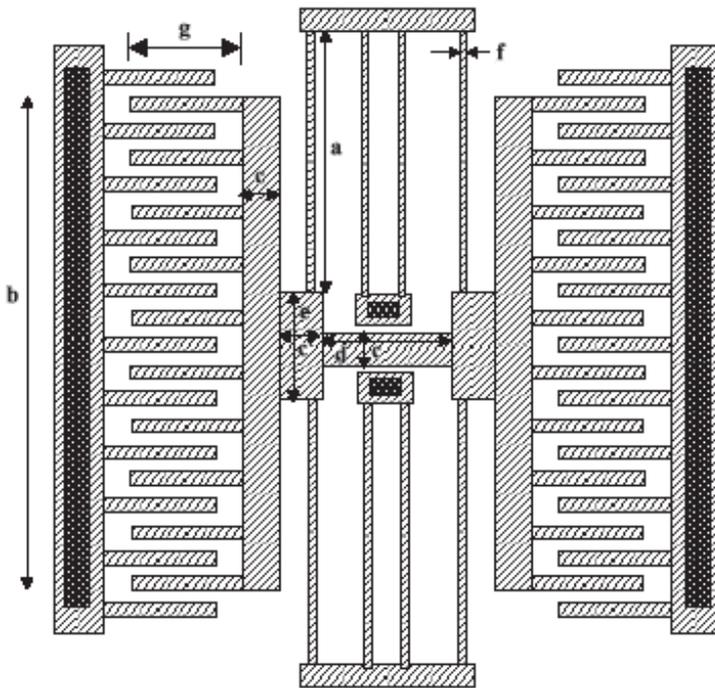


Рис. 2.35. Схема устройства гребневого микродвигателя

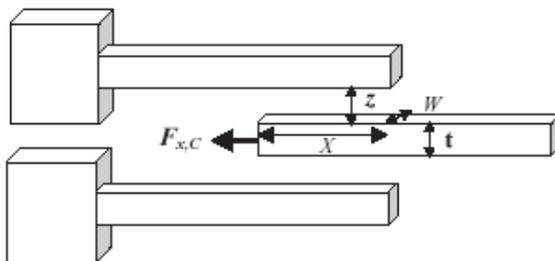


Рис. 2.36. Схема действия электростатических сил в обмотках гребневого микродвигателя

Расчет параметров электростатического актюатора включает этапы:

1. Расчет массы образца:

$$M = \rho W(2bc + 2ce + cd + 20tg) = 48,49 \text{ нг.} \quad (2.37)$$

2. Расчет жесткости пружины:

$$K = 8 \frac{EWf^3}{4a^3} = 4,56 \text{ Н/м.} \quad (2.38)$$

3. Расчет частотной характеристики:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} = 306498 \text{ рад/с;} \quad (2.39)$$

$$f_n = 48,78 \text{ кГц.}$$

4. Расчет затухания:

$$b = \frac{\omega_n M}{Q} = \frac{1,486e^{-5}}{100} = 1,486e^{-7} \text{ Нс/м.} \quad (2.40)$$

5. Расчет максимального усилия:

$$F_{x,C} = \frac{1}{2} N \epsilon_0 V^2 \frac{W}{z} = 1,55 \text{ мН,} \quad (2.41)$$

принимаям  $V = 100 \text{ В.}$

6. Расчет максимального смещения:

$$F_{x,C} = \frac{1}{2} N \epsilon_0 V^2 \frac{W}{z} = F_k = K \Delta x \geq \Delta x = \frac{1}{2} N \epsilon_0 V^2 \frac{W}{kz} = 0,34 \text{ мкм.} \quad (2.42)$$

7. Расчет прочности нагруженной балки на продольный изгиб:

$$P_{\text{изгиб}} = 2 \times 4P_{\text{крит}} = 8 \frac{\pi^2 EI}{a^2} = \frac{2\pi^2 EWf^3}{3a^2} = 1,79 \text{ мН.} \quad (2.43)$$

8. Расчет мощности входа:

$$W_{\text{вх}} = \int IV dt = \int \frac{dQ}{dt} V dt \int_0^{\tau} V^2 dC = CV^2 \Big|_0^{\tau} = 1,05 \times 10^{-12} \text{ Дж/такт.} \quad (2.44)$$

9. Расчет мощности выхода:

$$W_{\text{вых}} = \int_0^{\Delta x} (F_{x,C} - F_k) dx = \int_0^{\Delta x} \left( \frac{1}{2} N \epsilon_0 V^2 \frac{W}{z} - Kx \right) dx = \frac{1}{2} \left( N \epsilon_0 V^2 \frac{W}{z} \Delta x - K \Delta x^2 \right) = \quad (2.45)$$

$$0,53 \times 10^{-12} \text{ Нм/такт.}$$

10. Расчет коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{W_{\text{ВЫХ}}}{W_{\text{ВХ}}} = \frac{0,53}{1,05} = 50,47\%. \quad (2.46)$$

Одной из проблем применения данного типа устройств является случай, когда поперечное расстояние между штырями не одинаково с обеих сторон, (например, если устройство поломано). Возможно движение штырей под прямым углом к правильному направлению и соединение их друг с другом до выключения напряжения, т. к. при этом они остаются соединенными и после снятия напряжения.

Еще один вид устройств, разработанных на основе электростатических актюаторов, — *двигатели качения*, названные так по действию раскачивания, положенному в основу их принципа работы. На рис. 2.37 показана конструкция двигателя качения, полученного при помощи технологии поверхностной микрообработки. Ротор — это круглый диск. Во время работы снизу расположенные электроды последовательно, друг за другом, включают и выключают. Диск последовательно притягивается к каждому электроду; край диска контактирует с диэлектриком, расположенным над электродами. Таким образом он медленно вращается по кругу; делая один оборот вокруг своей оси совокупностью нескольких изменений напряжения на статоре.

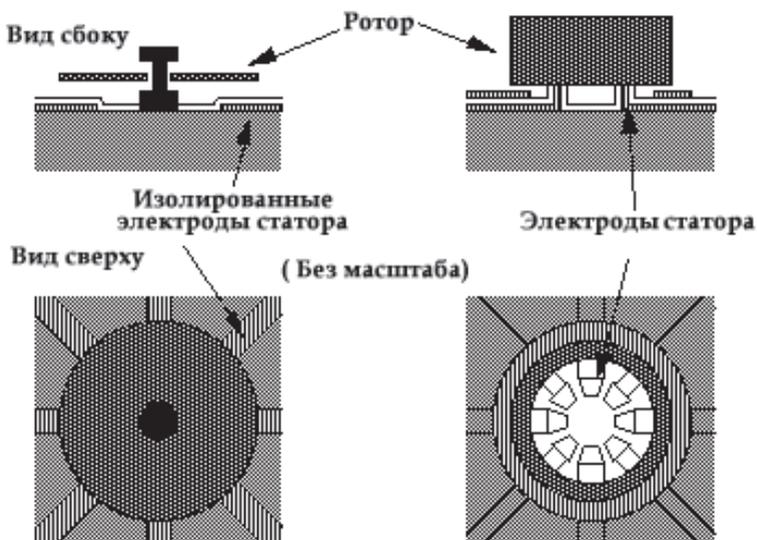


Рис. 2.37. Устройство плоского двигателя качения

В конструкции двигателя качения, показанного на рис. 2.37, ротор, находящийся внутри статора, формирует ось двигателя. Электрическое поле раскачивает ротор внутри статора, и трение вращает ротор.

Недостатком данной конструкции является вероятность износа изоляции на электродах статора. Происходит сцепление (или слипание) с ротором; если ротор и подшипник не круглые, что обычно бывает из-за того, что большинство пакетов автоматизированного проектирования рисуют не круг, а многоугольник с большим количеством сторон, то в этом случае ротор может застопориться даже во время своего первого оборота.

Также к проблемам моторов, полученных поверхностной микрообработкой, относят их очень маленькие вертикальные размеры, поэтому так трудно достичь большого изменения емкости при движении ротора.

Для преодоления этих проблем можно использовать LIGA-технологии. Мотор, изготовленный по этой технологии, показан на рис. 2.38.

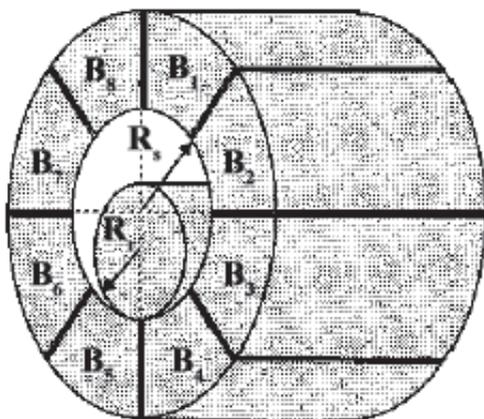


Рис. 2.38. Конструкция цилиндрического двигателя качения

Здесь цилиндрический ротор вращается вокруг статора. Данное устройство можно охарактеризовать следующим образом. Его преимущества: приоритетность пропорционального уменьшения размеров, легкость миниатюризации.

Недостатки: для большинства электростатических актюаторов частицы пыли и поверхностные дефекты могут быть причиной поломки вследствие малых воздушных зазоров; высокое напряжение — для двигателей вращения малый вращающий момент и короткий срок жизнедеятельности из-за трения.

### 3. ДАТЧИКИ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

#### 3.1. Принцип работы измерительных систем автоматического контроля

Основной составной частью автоматической измерительной системы является измерительный преобразователь (датчик). *Датчик* является устройством, включающим воспринимающий, задающий, сравнивающий и преобразующий элементы системы. По типу воспринимающих элементов датчики делятся на контактные и бесконтактные.

По типу задающих элементов датчики делятся на предельные и амплитудные, а по числу команд – на одно-, двух- и многокомандные.

Предельные датчики служат для фиксации выхода отклонений размера из поля допуска; амплитудные датчики ограничивают колебание отклонений геометрической формы и взаимного расположения поверхностей. Количество команд зависит от назначения автоматической системы. Однокомандные (однопредельные) датчики сортируют детали по одному пределу или дают одну команду на управление станком. Они применяются редко. Двухкомандные (двухпредельные) датчики сортируют детали на годные, брак «+» и брак «-» или дают две команды на управление станком. Многокомандные датчики применяются для сортировки деталей на группы внутри поля допуска и управления сложными автоматическими циклами станков.

По типу преобразующих элементов датчики можно разделить на датчики с прямым и промежуточным преобразованием.

Датчики с прямым преобразованием включают только один преобразователь измеряемой величины. Например, электрические датчики могут быть построены на преобразовании линейных перемещений измерительного наконечника в переменное активное сопротивление электрической цепи  $R_x$ , в переменное индуктивное сопротивление  $L_x$  и в переменную емкость  $C_x$ .

Датчики с промежуточным преобразованием имеют промежуточный преобразователь для преобразования линейных перемещений в промежуточную величину, которая затем обрабатывается по соответствующему алгоритму в преобразователе. К ним принадлежат, например, пневмоэлектроконтактные датчики, в которых изменение размера преобразуется в изменение давления в пневматической измерительной цепи, а затем – в изменение активного сопротивления электрической цепи.

### 3.2. Датчики смещения

Датчики смещения могут измерять как линейный сдвиг (при поступательном движении), так и угол поворота (при вращении). Кроме того, их можно классифицировать в соответствии с используемым *принципом преобразования*. Например, можно провести различие между резистивными, емкостными, индуктивными и оптическими датчиками поступательного движения или вращения. Эти механические датчики называются также тензодатчиками или сенсорами.

Распространенным типом датчика смещения является потенциометрический датчик. В случае измерения сдвига при поступательном движении он представляет собой, в действительности, не более чем движковый потенциометр. Для измерения угла поворота при вращении можно применить поворотный потенциометр. Проволочные потенциометры обычно имеют большую точность, меньший температурный коэффициент и т. д. Однако конечная разрешающая способность проволочных датчиков смещения ограничивает их возможности. Недостатком всех датчиков потенциометрического типа является механический износ и химическая коррозия, способные изменить передаточную характеристику датчика в течение его срока службы.

В качестве примера датчика линейного смещения приведем описание параметров проволочного движкового потенциометра, с 1000 витками провода из нихрома (NiCr): длина – 25 см, полное сопротивление – 300 Ом, нелинейность –  $10^{-3}$ , максимальное разрешение –  $10^3$ , температурный коэффициент –  $2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , сила трения – 0,5 Н.

Потенциометрический датчик смещения становится нелинейным, когда он нагружен. Относительная ошибка, появляющаяся при подключении нагрузки, равна нулю при  $x = 0$  или  $x = 1$  и максимальна при  $x = 0,5$  ( $x$  – относительное положение подвижного контакта (движка) на длине резистора, так что  $0 \leq x \leq 1$ ). Когда  $x = 0,5$ , относительная ошибка равна  $-R/4R_p$ , где  $R$  – полное сопротивление потенциометра, а  $R_p$  – сопротивление нагрузки.

В другом типе резистивного датчика смещения используется тот факт, что электрическое сопротивление проводника зависит от размеров проводника. Сопротивление  $R$  является функцией площади поперечного сечения  $A$  проводника, его длины  $\ell$  и удельного сопротивления  $\rho$ :

$$R = R(A, \ell, \rho). \quad (3.1)$$

Если проводник механически растягивается или сжимается, то его параметры  $A$ ,  $\ell$  и  $\rho$  изменяются и, как следствие, меняется  $R$ . Это дает

возможность измерять очень малые перемещения. На рис. 3.1а показан отрезок проволоки (тензодатчик), который удлиняется на величину  $\Delta l$  при прикладывании растягивающих усилий. Используя разложение в ряд, можно вычислить чувствительность этого проволочного датчика деформации:

$$R + \Delta R = R(A, \ell, p) + \left( \Delta A \frac{\partial}{\partial A} + \Delta \ell \frac{\partial}{\partial \ell} + \Delta p \frac{\partial}{\partial p} \right) R(A, \ell, p) + \frac{1}{2!} \left( \Delta A \frac{\partial}{\partial A} + \Delta \ell \frac{\partial}{\partial \ell} + \Delta p \frac{\partial}{\partial p} \right)^2 R(A, \ell, p) + \dots \quad (3.2)$$

Если каждая из величин  $\Delta A/A$ ,  $\Delta \ell/\ell$  и  $\Delta p/p$  меньше 1, а кривизна в точке  $R(A, \ell, p)$  мала, то можно пренебречь членами более высоких порядков. Вычитая  $R = R(A, \ell, p)$  из обеих частей равенства, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \ell} d\ell + \frac{\partial R}{\partial p} dp. \quad (3.3)$$

При  $p = p(\ell)$ ,  $A = A(d)$  и  $d = d(\ell)$  это уравнение принимает вид

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\ell}{\ell} \left\{ \frac{1}{R} \left( \frac{\partial R}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \ell} + \frac{\partial R}{\partial \ell} + \frac{\partial R}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial \ell} \right) \right\}. \quad (3.4)$$

Множитель в скобках является точным выражением чувствительности  $R_\ell^R$  проволоки к изменению длины. Можно найти величину этой чувствительности, используя следующие соотношения:

$R = p \frac{\ell}{A}$  (электрическое сопротивление), где  $\frac{\partial p}{\partial \ell} = c \frac{p}{\ell}$  ( $c$  зависит от материала).

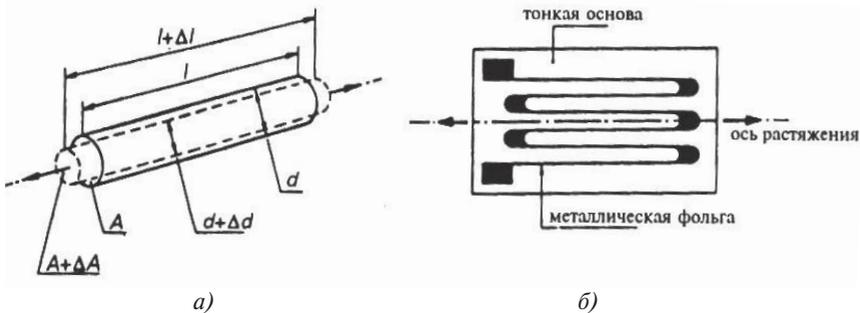


Рис. 3.1. Модель датчика со свободно растягиваемой проволокой (а); тензодатчик с металлической фольгой (б)

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \text{ (площадь поперечного сечения);}$$

$$\frac{\partial d}{\partial \ell} = -\mu \frac{d}{\ell} \text{ (}\mu \text{ — постоянная Пуассона).}$$

Получаем:

$$S_{\ell}^R = 2\mu + 1 + c \quad (3.5)$$

Если при растяжении объем остается неизменным, то в соответствии с предпоследним выражением  $\mu = 0,5$ . Для многих материалов  $\mu \approx 0,3$ . Удельное сопротивление большинства металлов не зависит от растяжения; константа  $c$  очень мала. Следовательно, для большинства металлов эта чувствительность приблизительно равна 2, например, у нихрома 2,1–2,3, у константана 2,0–2,1, у хромеля 2,5; правда, у марганца 0,5, а у никеля –12.

Для большинства металлов можно предположить, что объем проводника и удельное сопротивление не изменяются при наличии растягивающих или сжимающих усилий (отсутствует пьезорезистивный эффект). Поэтому для металлических тензодатчиков получаем:

$$\frac{dR}{R} = k \frac{d\ell}{\ell} \approx 2 \frac{d\ell}{\ell}, \quad (3.6)$$

где  $k = S_{\ell}^R$  — коэффициент чувствительности тензодатчика. Полупроводниковые материалы обычно имеют значение величины  $k$  много больше 2. Это связано с тем фактом, что больше не выполняется условие  $\partial p / \partial \ell \approx 0$ . В этих материалах доминирует пьезорезистивный эффект.

Для полупроводника с примесями  $p = 1/nq\mu$ , где  $n$  – концентрация примеси,  $q$  – заряд, а  $\mu$  – подвижность носителей заряда. Так как  $\mu = q\tau/m$ , находим, что  $p = m/nq^2\tau$ , где  $m$  – эффективная масса, а  $\tau$  – среднее время жизни носителей заряда. Эффективная масса определяется из взаимодействия между носителями заряда и кристаллической решеткой. Когда материал подвергается механическому воздействию, взаимодействие, а поэтому и эффективная масса, изменяются. Кремниевый тензодатчик при благоприятной ориентации кристалла может иметь настолько сильный пьезорезистивный эффект, что коэффициент чувствительности может превосходить 200.

Хотя полупроводниковые тензодатчики обладают очень высокой чувствительностью, они, кроме того, характеризуются сильной нелинейностью и значительным температурным коэффициентом. Возьмем, к примеру, тензодатчик из металлической фольги: материал – константан; коэффициент чувствительности  $k = 2,00 \pm 1\%$ ; сопротивление  $120 \text{ Ом} \pm 1\%$ ; диапазон измерения  $10^{-6} \leq \Delta\ell/\ell \leq 10^{-2}$ ; нелинейность  $10^{-3}$  при  $\Delta\ell/\ell < 10^{-3}$ ; температурный коэффициент  $2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; коэффициент теплового расширения  $1,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; термоэлектрический потенциал контакта константана с медью  $43 \text{ мкВ/К}$ . Сравним этот тензодатчик с полупроводниковым, имеющим следующие параметры:  $k \approx 50 - 200$ ; нелинейность  $10^{-2}$  для диапазона измерения  $\Delta\ell/\ell < 10^{-3}$ ; температурный коэффициент  $k$  приблизительно равен  $10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Как показано на рис. 3.1б, в тензодатчике полоски металлической фольги, выполненные в виде меандра, сделаны значительно шире в местах поворота, для того чтобы уменьшить чувствительность этого датчика к деформации, направленной перпендикулярно к рабочей оси. Если кроме величины деформации мы хотим также измерить направление деформации, то применяется комбинация тензодатчиков, образующих определенную геометрическую структуру, например, три тензодатчика, ориентированные под углом  $120^\circ$  один по отношению к другому. Эта конструкция известна под названием «розеточный тензодатчик».

Для измерения линейной деформации в механической конструкции тензодатчик приклеивают к этой конструкции в направлении ожидаемого воздействия. Характеристики отвердевшего клея и основы датчика вызывают эффекты ползучести. Если деформация долговременна, то металлическая фольга или проволока будут медленно возвращаться к первоначальному ненапряженному состоянию (релаксация напряжений). При более высоких температурах этот эффект выражен особенно сильно. Кроме того, клей и основа датчика могут привести к появлению гистерезиса. После снятия воздействия металлическая

фольга или проволока не сразу возвращаются к своему первоначальному состоянию, и будет казаться, будто все еще имеется небольшое остаточное воздействие. Для того чтобы ослабить эффекты ползучести и гистерезиса, клей и основа датчика должны быть тонкими, твердыми и иметь большие модули Юнга.

Металлический проводник тензодатчика, его основа и материал конструкции, к которой прикреплен датчик, — все должны иметь один и тот же коэффициент теплового расширения. Если соответствующие коэффициенты не равны, то вследствие изменения температуры будет наблюдаться кажущаяся деформация. Кроме того, дополнительно появится кажущаяся деформация, вызванная отличным от нуля температурным коэффициентом сопротивления используемого материала проводника. Поэтому часто применяют второй тензодатчик, компенсирующий эти эффекты. Второй датчик расположен так, чтобы подвергаться тем же самым (тепловым) возмущениям, но не испытывать никаких усилий (так называемый пассивный или фиктивный тензодатчик, см. рис. 3.2а). Датчики включены в мост Уитстона в местах расположения резисторов  $R_1$  и  $R_4$  на рис. 3.2д. Таким образом, влияние большинства мешающих воздействий может быть значительно уменьшено.

Рис. 3.2б иллюстрирует метод измерения изгиба консольной балки. Рис. 3.2в показывает способ измерения скручивания вала с помощью четырех тензодатчиков, прикрепленных к валу под углом  $45^\circ$  к оси скручивания. Наконец, рис. 3.2г изображает схему моста Уитстона для компенсации мешающих воздействий. Если тензодатчики  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  соединены так, как показано, то измерение линейной деформации (а) будет нечувствительно к температуре, измерение изгиба (б) — к растяжению и температуре, а измерение скручивания (в) — даже к растяжению, изгибу, температуре и температурному градиенту вдоль вала. В случаях (а) и (б) резисторы моста  $R_2$  и  $R_3$  являются постоянными резисторами, сопротивление которых выбирается из соображений максимальной чувствительности моста.

В технике все большую роль в контроле над техническими процессами занимают цифровые вычислительные машины, работающие с импульсами, а подавляющее большинство исполнительных механизмов по-прежнему являются аналоговыми устройствами с амплитудным управлением. Так, предлагаемая силовая ячейка (см. рис. 3.3) должна сыграть роль аналога поперечнополосатой мышцы. Ячейка представляет собой два блока металлических пластин, одна сторона которых покрыта диэлектриком с высокой относительной диэлектрической проницаемостью (типа титаната бария). Пластины одного блока размещены в зазорах между пластинами другого так, что они образуют плоский многопластинчатый конденсатор.

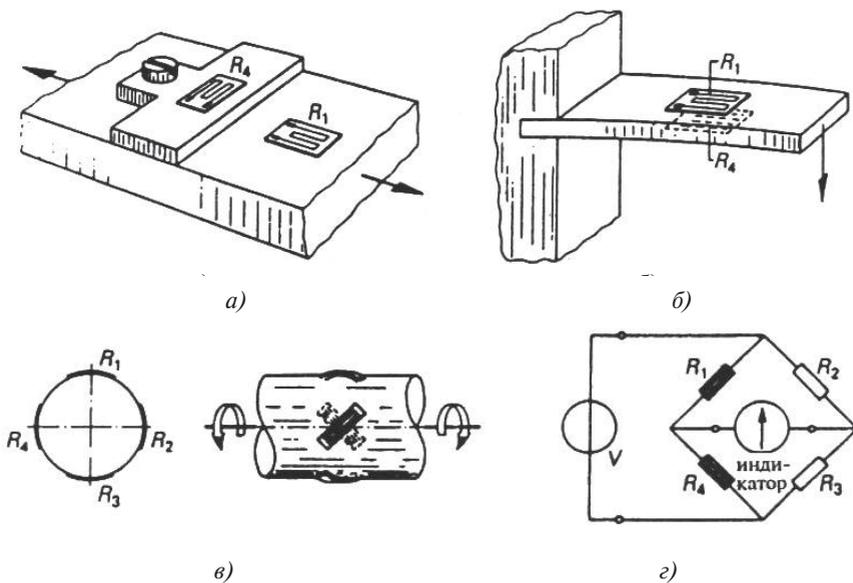


Рис. 3.2. Измерение линейной деформации, изгиба и скручивания с компенсирующими тензодатчиками в мосте Уитстона:  
*а)* компенсация при измерении линейной деформации;  
*б)* компенсация при измерении изгиба; *в)* измерение крутящего момента;  
*г)* измерительный мост

Сборка заключена в упругий изоляционный чехол, который обеспечивает удержание блоков в состоянии, показанном на рис. 3.3.

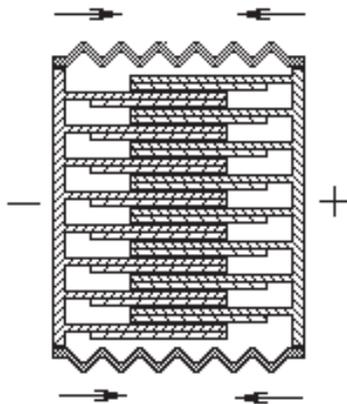


Рис. 3.3. Устройство силовой ячейки

При подаче на блоки электрического напряжения пластины одного блока стремятся втянуться в зазоры между пластинами другого (разумеемся, и наоборот). Легко подсчитать, что при 50 пластинах в блоке шириной 1 см, толщиной 0,1 мм, толщине диэлектрического покрытия из титаната бария 0,1 мм и разности потенциалов 100 В ячейка может развить усилие 0,25 Н. Таким образом, при подаче импульсов амплитудой 100 В получаем импульсы силы 0,25 Н с каждого квадратного сантиметра поперечного сечения ячейки (длина ячейки будет определять возможное перемещение, но не силу). Среднее во времени усилие линейно зависит от частоты следования импульсов и их длительности и квадратично — от амплитуды. В качестве интегратора выступает колебательная система — блоки (масса  $M$ ) и оболочка ячейки (упругий элемент с упругостью  $K$ ). Вполне очевидно, что для качественного интегрирования собственная частота колебательной системы должна быть много меньше минимальной частоты следования импульсов. Добавив к ячейке формирующий каскад, который на любой управляющий импульс выше порога будет отвечать своим импульсом фиксированной амплитуды и длительности, получим полный аналог поперечнополосатой мышцы, способный хорошо «понимать» ЭВМ.

### 3.3. Тепловые исполнительные микроустройства

Тепловые исполнительные микроустройства (тепловые актюаторы) используют как линейное или объемное расширение жидкости или газа, так и деформацию формы вследствие биметаллического эффекта, которые имеют место благодаря изменению температуры. Рассмотрим биметаллический актюатор (рис. 3.4) в виде балки из одного материала (кремний) и слой из другого материала (алюминий).

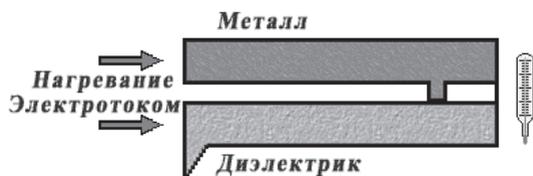


Рис. 3.4. Устройство биметаллического актюатора

Коэффициент теплового расширения у них разный. При нагревании один материал расширяется быстрее, чем другой, и балка изгибается. Нагревание можно производить, пропуская через это устройство электрический ток.

Приведем расчет параметров актюатора на примере биметаллического актюатора, материал рабочего элемента «кремний/алюминий».

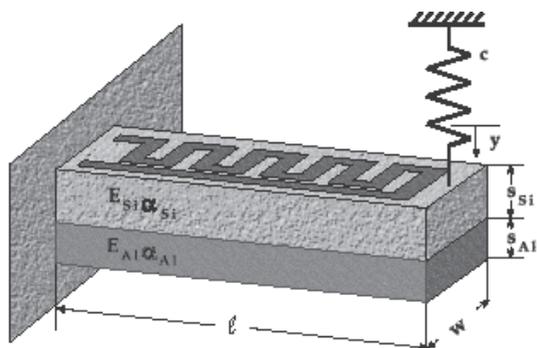


Рис. 3.5. Расчетная схема биметаллического актюатора

Пусть заданы следующие геометрические размеры:  $S_{Si} = 4 \mu\text{м}$ ,  $S_{Al} = 1,8 \mu\text{м}$ ,  $\ell = 200 \mu\text{м}$ ,  $w = 40 \mu\text{м}$ . Традиционно при расчетах задают электромагнитные характеристики материалов:

$$\alpha_{Si} = 3,3 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)};$$

$$c_{pSi} = 0,71 \times 10^3 \text{ (Вт с/(кг К))};$$

$$\rho_{Si} = 2,33 \times 10^3 \text{ (кг/м}^3\text{)};$$

$$E_{Si} = 150 \times 10^9 \text{ (Н/м}^2\text{)};$$

$$\kappa_{Si} = 150 \text{ (Вт/м К)};$$

$$\alpha_{Al} = 23 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)};$$

$$c_{pAl} = 0,9 \times 10^3 \text{ (Вт с/(кг К))};$$

$$\rho_{Al} = 2,7 \times 10^3 \text{ (кг/м}^3\text{)};$$

$$E_{Al} = 70 \times 10^9 \text{ (Н/м}^2\text{)};$$

$$\kappa_{Al} = 230 \text{ (Вт/м К)}.$$

1. Выбираем теплоемкость пластины:

$$C_v = C_{vSi} + C_{vAl} = 8,8 \times 10^{-8} \frac{\text{Вт с}}{\text{К}}. \quad (3.7)$$

2. Выберем скорость переключения равной  $\tau = 10 \text{ мс}$ , тогда тепловое сопротивление получается равным

$$R_\theta = \frac{\tau}{C_v} = 1,13 \times 10^5 \frac{\text{К}}{\text{Вт}}. \quad (3.8)$$

3. Предположение о постоянной температуре консоли может быть проверено при помощи длины рассеивания тепла:

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{\lambda}{c_p \rho}} \tau. \quad (3.9)$$

Для кремния длина рассеивания тепла равна 1,8 мм, для алюминия – 1,95 мм. По сравнению со всеми геометрическими размерами, длина рассеивания тепла очень велика, следовательно, гипотеза о постоянной температуре консоли оправдана.

4. Разница температур (выбрали)  $\Delta T(t = \tau) = 50$  К. Тогда электрическая мощность нагрева равна

$$\Delta T(t = \tau) = P_{\text{эл}} \times R_{\text{в}} \times (1 - e^{-1}), P_{\text{эл}} = 0,7 \text{ мВт.} \quad (3.10)$$

5. Максимально возможное увеличение температуры для такой мощности нагрева равно

$$\Delta T_{\text{макс}} = R_{\text{в}} \times P_{\text{эл}} = 79,1 \text{ К.} \quad (3.11)$$

6. Тепловое расширение балки (без силы сжатия пружины) с  $K1 = 60,8$  и  $\frac{\alpha}{s} = 3,48 \frac{1}{\text{мК}}$  получается равным

$$y_{\text{тепл}} = \frac{1\alpha}{2s} \times \Delta T \times l^2 = 3,48 \mu\text{м.} \quad (3.12)$$

7. Для достижения максимальной эффективности жесткость пружины с выбрана так, чтобы сила противодействия уменьшала прогиб вдвое:

$$y_{\text{мех}} = \frac{y_{\text{тепл}}}{2} = \frac{F}{3E \cdot I} l^3 = \frac{c \cdot y}{3E \cdot I} l^3 = 1,74 \mu\text{м.} \quad (3.13)$$

Для такого прогиба жесткость пружины в результате получается  $c = 25,6$  Н/м и жесткость к изгибу  $EI = 68,4 \times 10^{-12}$  Нм<sup>2</sup>. Напряжение в материале меньше, чем  $50 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup>, и, таким образом, оно не приводит к разрушению.

8. Механическая работа, совершающая действие на нагрузку (пружину), получается из выражения

$$W_{\text{мех}} = \frac{c}{2} y^2 = 38,8 \times 10^{-12} \text{ Вт с.} \quad (3.14)$$

9. Подаваемая для выполнения этой механической работы электрическая энергия:

$$W_{\text{эл}} = P_{\text{эл}} \times t = 0,7 \text{ мВт} \times 10 \text{ мс} = 7 \times 10^{-6} \text{ Вт с.} \quad (3.15)$$

10. Коэффициент полезного действия равен

$$\eta = \frac{W_{\text{мех}}}{W_{\text{эл}}} = 5,5 \times 10^{-6}. \quad (3.16)$$

Расчет, приведенный в примере, показывает, что тепловые актюаторы могут создавать относительно большие силы, но нет конструкции, которая бы позволяла это сделать с позиции эффективного использования энергии. Результат становится более хорошим при увеличении разницы между коэффициентами теплового расширения  $\alpha$  и при большем изменении температуры  $\Delta T$ , однако достигаемое КПД все равно остается относительно маленьким. Газы и жидкости имеют намного больший коэффициент теплового расширения, чем твердые тела, и это можно использовать в термопневматических микроактюаторах.

На рис. 3.6 показан резонатор, внутри которого находится жидкость, с тонкой мембраной в роли нижней стенки. Через нагревательный элемент (резистор) пропускается ток. Жидкость нагревается и начинает расширяться, деформируя мембрану.

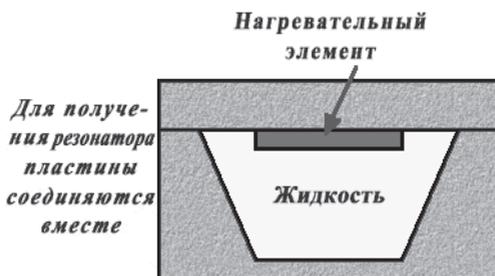


Рис. 3.6. Устройство резонатора

К преимуществам тепловых микроактюаторов можно отнести:

- 1) простоту конструкции; рабочими элементами являются резистор нагрева и для использования биметаллического эффекта — пленочная структура;
- 2) подходящий размер, лежащий в микродиапазоне: согласно формуле Фурье быстроедействие при уменьшении размеров возрастает квадратично;
- 3) применение в качестве активных элементов почти любых материалов, которые, кроме различных коэффициентов расширения, должны обладать достаточной прочностью. Обычно в качестве нагревателя используются резисторы извилистой формы, которые можно легко изготовить с использованием тонко- или толстопленочной технологии.

Из недостатков следует отметить следующие факторы:

- 1) в настоящее время нагревательный элемент потребляет очень много энергии для того, чтобы тепловой актюатор смог развить относительно большую силу, т. е. невысокий КПД;
- 2) нагревательный элемент необходимо охлаждать, чтобы вернуть актюатор в исходное положение, а значит — тепло должно быть рассеяно в окружающую среду. Это, естественно, занимает некоторое количество времени и ограничивает быстродействие.

### 3.4. Емкостные датчики смещения

Емкость  $C$  является функцией расстояния  $d$  между электродами датчика, площади электродов  $A$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  диэлектрика между электродами:

$$C = C(d, A, \epsilon). \quad (3.17)$$

Очевидно, что имеются три метода реализации емкостного датчика смещения: можно изменять  $d$ ,  $A$  или  $\epsilon$ . Эти три метода проиллюстрированы на рис. 3.7. Если выбрать конденсатор с плоскими параллельными пластинами, разнесенными на расстояние  $x$ , и пренебречь всеми краевыми эффектами, то емкость такого датчика с параллельными пластинами равна

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 A}{x}. \quad (3.18)$$

Однако этот датчик нелинеен и имеет гиперболическую передаточную характеристику, как показано на рис. 3.7а. Этот тип датчика часто применяют для измерения малых приращений смещения без контакта с измеряемым объектом. Характеристика датчика обычно линеаризируется путем применения балансной схемы.

Если у плоского конденсатора изменяется площадь электродов, то получаем:

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 bx}{d}. \quad (3.19)$$

Теперь датчик имеет линейную зависимость от  $x$ . Обычно этот тип датчика реализуется в виде поворотного конденсатора для измерения угловых смещений, а не в виде варианта со сдвигом, приведенного на рис. 3.7б. Конструкция с поворотным конденсатором применяется также в качестве выходного преобразователя для измерения электрических напряжений (емкостной вольтметр).

Для плоского конденсатора изменение положения диэлектрика приводит к следующему результату:

$$C(x) = C_0 \left\{ 1 + \frac{x}{a} (\epsilon_r - 1) \right\}, \quad (3.20)$$

где  $C_0 = C(0) = \epsilon_0 ab / d$ . Этот датчик также линеен. Он бывает реализован, главным образом, в форме двух концентрических цилиндров и используется для измерения уровня жидкости в резервуаре. Непроводящая жидкость играет роль диэлектрика.

Сила, которую измеряемый объект должен приложить к емкостному датчику, чтобы переместить электроды, очень мала. Будем полагать эту силу  $F(x)$  положительной, когда она имеет направление, при котором  $x$  увеличивается. Если пренебречь всеми потерями, то отдаваемая измеряемым объектом механическая энергия  $dE_m$ , при бесконечно малом смещении  $dx$ , плюс электрическая энергия  $dE_e$ , подводимая подключенным к датчику источником питания с напряжением  $V$ , должны быть равны увеличению энергии электрического поля  $dE_f$  между электродами конденсатора.

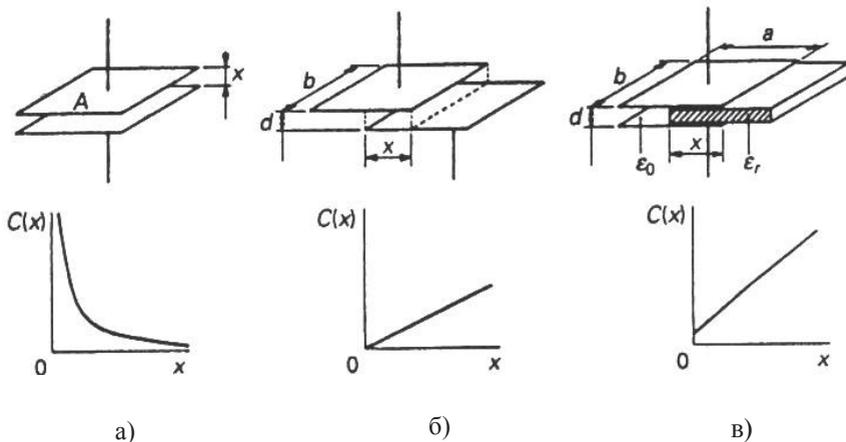


Рис. 3.7. Емкостной датчик смещения с изменяемыми:  
 а) расстоянием между электродами; б) площадью электродов;  
 в) сечением диэлектрика

Баланс энергии может быть записан как

$$dE_m + dE_e = dE_f, \quad (3.21)$$

где  $dE_m = F(x)dx$ ;

$$dE_e = d(QV) = qdV + VdQ.$$

Поскольку напряжение источника питания  $V$ , приложенное к конденсатору, поддерживается постоянным,  $dV=0$ . Так как  $Q = VC(x)$ , то сила Кулона равна

$$F(x) = -\frac{1}{2} V^2 \frac{dC(x)}{dx}. \quad (3.22)$$

Следовательно, для датчика, приведенного на рис. 3.7а, сила положительна, а для датчиков на рис. 3.7б и на рис. 3.7в – отрицательна. Таким образом, если подвижный электрод имел полную свободу перемещения, то он займет положение, при котором емкость максимальна. Если  $C$  – линейная функция от  $x$ , то сила  $F$  не зависит от  $x$ .

Силы Кулона чрезвычайно малы. Линейный емкостной датчик смещения с емкостью 100 пФ, имеющий диапазон измерения 1 см, при напряжении питания 10 В требует усилия всего лишь 0,5 мкН.

При вычислении емкости  $C(x)$  для трех случаев, показанных на рис. 3.7, не учитывались краевые (или концевые) эффекты в конденсаторах. Эти краевые эффекты можно подавить, используя экранирующий электрод, как показано на рис. 3.7. Датчик смещения  $C_t$  снабжен здесь заземленным экранирующим электродом, расположенным так, что электрическое поле внутри конденсатора однородно на указанных участках (на краях). Если бы мы измеряли только емкость между подвижным и неподвижным электродами и при этом не учитывали емкость электродов относительно экрана, то датчик был бы свободен от возмущающих краевых эффектов. В схеме, приведенной на рис. 3.7б, это достигается путем соединения экрана со средней точкой трансформатора, входящего в состав моста. Напряжение, приложенное к индикатору, может быть приравнено нулю путем балансировки моста переменным конденсатором  $C_n$ . В этом случае экран имеет потенциал земли. Поскольку емкость между незаземленным электродом конденсатора  $C_t$  и экраном включена параллельно верхней половине вторичной обмотки трансформатора моста, то она не влияет на условие баланса моста:  $C_t = C_n$ .

### 3.5. Механотронные датчики

В этих датчиках в качестве первичного преобразователя линейных перемещений в электрический сигнал используют так называемые механотроны. Механотрон – это вакуумная электронная лампа, в которой измеряемая линейная величина вызывает перемещение электродов, что ведет к значительным изменениям анодного тока лампы.

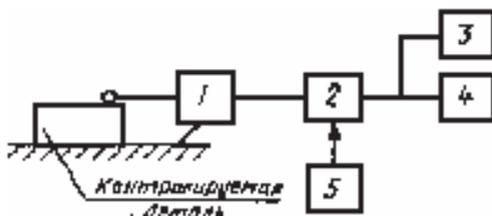


Рис. 3.8. Блок-схема прибора с механотронным преобразователем

Механотроны обладают высокой чувствительностью, позволяют без усилителя получать мощный измерительный сигнал, имеют достаточно линейную характеристику.

В общем виде прибор с механотронным преобразователем состоит из первичного преобразователя 1, измерительной схемы 2, которая преобразует сигнал механотрона в удобный для дальнейших измерений параметр, указательного устройства 4, командного устройства 3 и блока питания 5, который поддерживает напряжение питания на заданном уровне.

### 3.6. Электронные датчики

В электронных датчиках типа механотронов используется зависимость электрических характеристик электронных и ионных ламп от изменения геометрического расположения электродов (катода, анода, сетки) внутри лампы.

Электронный датчик размера представляет собой электровакуумный прибор, в котором управление электронными токами осуществляется механически, путем перемещения электродов. Он преобразует линейное перемещение (изменение размера) непосредственно в изменение анодного тока и одновременно усиливает этот ток. Электронные датчики размеров могут работать без усилителя.

Электронные датчики с механическим управлением электронными и ионными токами впервые были предложены и освоены в СССР. Известны три вида механического управления электронными ионными токами электронно-механических и ионно-механических преобразователей: продольное, зондовое и дифференциальное.

Продольное управление электронным током основано на перемещении анода в направлении электрического поля лампы. Это перемещение сопровождается изменением напряженности электрического поля внутри прибора, прямо пропорциональным величине смещения подвижного электрода. Принципиальная схема электронного датчика размера с продольным управлением электронным током показана на рис. 3.9 а.

В датчиках зондового управления (рис. 3.9 в) тонкий накаленный катод 3 перемещается относительно плоских электродов 1 и 2.

Чувствительность датчика повышается при использовании холодного катода цилиндрической или конической формы.

Для рассортировки деталей на группы могут быть применены электронно-лучевые распределители с одним подвижным электродом, который отклоняет поток электронов, падающих на одну из ламелей.

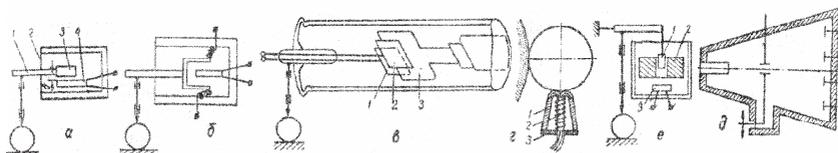


Рис. 3.9. Схемы электронных датчиков:

- а) с продольным управлением; б) двоянный диодный датчик;
- в) датчик с зондовым управлением; г) высокочастотный электромагнитный датчик; д) электроннолучевой распределитель с подвижным электродом;
- е) датчик с дифференциальным управлением

Напряжение с этой ламели подается на соответствующую лампу (см. рис. 3.9 д). Иногда для непосредственного включения исполнительного механизма подвижный электрод лампы перемещается от электромагнита, питаемого датчиком.

Дифференциальное управление электронными токами основано на том, что управляющий анод 1 скользит в щелях холодного катода 2 (рис. 3.9е), который экранирует его действие на накаленный катод 3. При полном вхождении анода ток равен нулю. При перемещении анода 1 относительно холодного катода экранирующее действие последнего постепенно ослабляется и появляется быстро нарастающий анодный ток.

### 3.7. Фотоэлектрические датчики

Фотоэлектрические датчики размера с промежуточным преобразованием осуществляют непосредственное преобразование изменения размера изделия в изменение лучистой энергии светового потока с помощью оптической системы; затем лучистая энергия света преобразовывается фотоэлементами в электрический сигнал.

Оптические системы фотоэлектрических датчиков размера основаны на свойстве изделия отражать световой поток или диафрагмировать его. Оптические схемы с отражением светового потока строятся на отражении светового луча непосредственно контролируемым изделием или специальным отражательным зеркалом.

Оптические датчики позволяют преобразовать в электрические сигналы информацию, доставляемую видимым светом или излучением соседних длин волн – инфракрасным и ультрафиолетовым.

### **3.8. Емкостные датчики**

Принцип действия емкостной измерительной системы основан на том, что с измерением размера контролируемой детали изменяется емкость конденсатора датчика. Измеряя тем или иным путем эту емкость, можно судить о размере изделия.

Емкостный метод контроля может быть как контактным, так и бесконтактным. При бесконтактном методе одной из пластин конденсатора служит само контролируемое изделие; при контактном методе емкостный датчик представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, одна из пластин которого связана с измерительным стержнем. Бесконтактный метод находит ограниченное применение.

### **3.9. Электроиндуктивные датчики**

Принцип действия индуктивных датчиков состоит в преобразовании линейного перемещения сердечника в измерение индуктивности катушки датчика. Индуктивный метод измерения линейных размеров основан на использовании контактных индуктивных датчиков, которые выполняются простыми или дифференциальными.

Простые индуктивные датчики имеют одну катушку с индуктивностью  $L$  (рис. 3.10а). При увеличении размера контролируемой детали 1 измерительный шток 2 датчика, преодолевая усилие пружины 5, оказывает давление на якорь 3, который подвешен на плоской пружине 4 и может поворачиваться. Поворот якоря вызывает изменение воздушного зазора между магнитопроводом 6 катушки и якорем, что приводит к изменению индуктивности катушки.

В дифференциальном индуктивном датчике имеются две катушки с индуктивностями  $L_1$  и  $L < 2$  (рис. 3.10б). Если при перемещении якоря дифференциального датчика зазор  $\delta$  между якорем и катушкой увеличивается, то зазор между якорем и второй катушкой уменьшается.

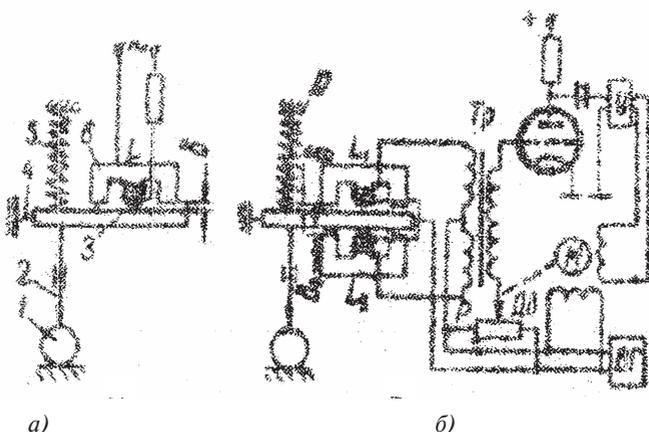


Рис. 3.10. Схемы электроиндуктивных измерений:  
*а)* простая, *б)* дифференциальная

В связи с этим изменяются индуктивности обеих катушек, что приводит к повышению чувствительности измерительной схемы в 2 раза.

### 3.10. Радиационные измерительные системы

Для контроля и измерения линейных размеров изделий применяются радиоактивные изотопы как источники излучения; при этом используются их свойства проникновения излучения сквозь вещество изделия и рассеяние излучения веществом изделия. В последнем случае пучок излучения определенной геометрии направляется на измеряемое изделие. В результате ряда сложных процессов взаимодействия излучения с веществом часть излучения поглощается в веществе, а часть рассеивается. Это взаимодействие, интенсивность излучения, а также проникающая и отражательная способность зависят от природы и плотности вещества изделия и от вида и энергии излучения. С помощью специальной регистрирующей аппаратуры можно измерять интенсивность того потока излучения, который прошел через изделие или рассеялся от него. При этом наблюдается определенная зависимость интенсивности прошедшего или рассеянного потока излучения от размеров изделия. Таким образом, можно измерять ширину и высоту изделия, толщину его стенок, диаметр цилиндрических изделий, толщину материала, толщину покрытий и т. п. В датчиках радиоактивного контроля технических процессов используются альфа-излучение, бета-излучение и гамма-излучение.

Альфа-излучение (*а*) — поток положительно заряженных ядер гелия. Альфа-излучение обладает небольшой проникающей способностью, но, проходя через газовую среду, вызывает самую интенсивную

ионизацию газа, что приводит к повышению проводимости газовой среды и используется для изучения параметров газовых сред.

Бета-излучение ( $\beta$ ) – поток электронов (позитронов). Бета-излучение обладает сравнительно большой проникающей способностью и используется, например, для контроля толщины и плотности листовых материалов.

Гамма-излучение ( $\gamma$ ) – электромагнитное излучение волновой (квантовой) природы. Оно обладает большой проникающей способностью и сравнительно малой ионизирующей способностью.

В качестве детекторов излучения обычно применяются счетчики Гейгера-Мюллера или ионизационные камеры.

### 3.11. Пневматические датчики

Основными достоинствами пневматического метода измерения линейных размеров, обусловившими его широкое применение в промышленности, являются высокая точность измерения, возможность выполнять измерения бесконтактным способом, возможность одновременного контроля нескольких размеров и совмещения операций контроля с вычислительными операциями (например, контроль суммы или разности размеров). К тому же пневматические измерения легко автоматизировать.

Если воздух под постоянным давлением  $H$  проходит через отверстие  $f_1$  в камеру (рис. 3.11а), а из нее через отверстие  $f_2$  наружу, то давление между двумя отверстиями в камере зависит от соотношения размеров площадей поперечных сечений этих двух отверстий. Калиброванное отверстие  $f_1$  называют входным соплом, второе калиброванное отверстие  $f_2$  – измерительным (или выходным) соплом, а зазор  $s$  – измерительным зазором.

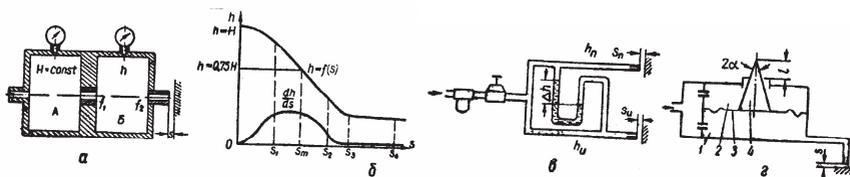


Рис. 3.11. Схемы пневматических измерений

Если против выходного сопла расположить поверхность контролируемой детали, то давление  $h$  в камере будет возрастать при приближении этой поверхности к отверстию, а при удалении – уменьшаться, т. е. величина давления  $h$  является функцией линейного размера  $s$ .

### 3.12. Датчики, регистрирующие изменение температуры

На рис. 3.12 показана схема датчика, реагирующего на величину температуры (терморегулятор). Датчик состоит из корпуса 1, в котором закреплена трубка 9 из материала, имеющего большой коэффициент линейного расширения (например, медь или алюминий). В отверстие трубки вставлен стержень 10, выполненный из материала, имеющий небольшой коэффициент линейного расширения (например, инвар). При повышении температуры длина трубки будет увеличиваться по сравнению с длиной стержня. Это вызовет опускание стержня по отношению к корпусу 1. На верхний конец стержня 10 опирается рычаг 3. Левый конец рычага покоится на ножевой опоре 2. По мере опускания стержня 10 рычаг 3 под действием пружины 4 будет поворачиваться. В момент достижения определенной температуры, на которую отрегулирован датчик, винт 5 нажмет на ленточную пружину 7 и разомкнет контакты 6 и 8.

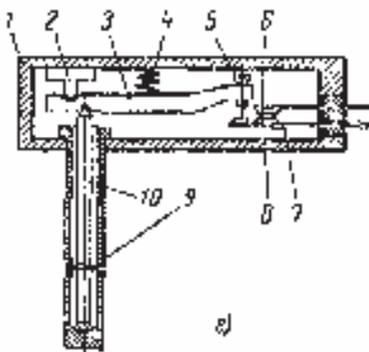


Рис. 3.12. Устройство датчика измерения температуры

Такого типа датчик используется для поддержания определенной температуры в пресс-формах (150–250–500) и может быть использован для других случаев, когда требуется осуществить связь между температурным режимом процесса с общей системой управления. Например, невключение пресс-автомата при падении температуры в пресс-форме ниже допустимой.

Датчики, реагирующие на изменение температуры, могут быть выполнены и на другом принципе. Например, с термопарой для высоких температур или с термометром сопротивления для измерения температур с более высокой точностью.

### 3.13. Манометрические датчики

Принципиальная схема манометрического датчика показана на рис. 3.13. В камеру 1 поступает воздух со стабилизированным давлением  $H$ . Проходя через два сопла 2 и 3, воздух выходит в зазор  $Z$  между торцом сопла и деталью. В полости 4 устанавливается давление  $h = f(Z)$ . Полости 1 и 4 соединены водяным манометром 5. Перепад давлений равен

$$L = H - h = f(Z) \quad (3.23)$$

Он отсчитывается по шкале 6 и служит для косвенного измерения размера детали.

Статической характеристикой датчика называется зависимость между выходной и входной величинами. Для манометрического датчика входной величиной является размер детали (точнее, зазор  $Z$ ), выходной – перепад давлений  $L$  (рис. 3.13).

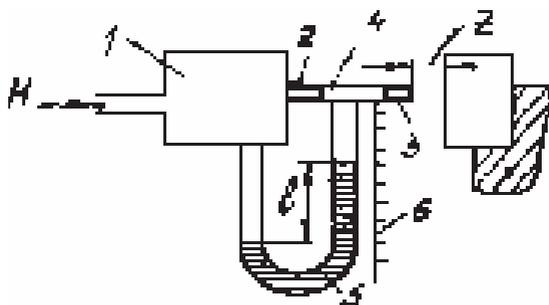


Рис. 3.13. Схема манометрического датчика

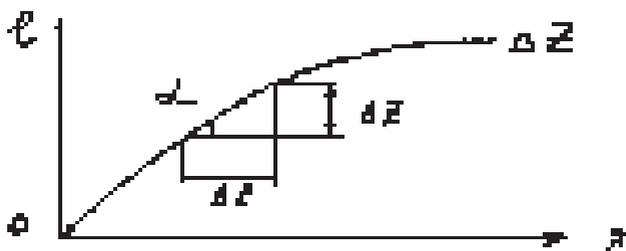


Рис. 3.14. Статическая характеристика манометрического датчика

Статической характеристикой датчика является зависимость  $L = f(Z)$ . С увеличением  $Z$  экранирующее действие детали уменьшается, расход воздуха  $G$  через сопло растет, давление в камере падает, поэтому величина  $L$  увеличивается.

При  $Z > d/4$  деталь не является препятствием для истечения воздуха, расход становится постоянным и не зависит от  $Z$ . Из рис. 3.13 видно, что характеристика нелинейна. При измерениях используют либо часть характеристики, имеющую приблизительно линейный участок, либо нелинейную шкалу 6 (рис. 3.13).

По графику (рис. 3.14) можно определить коэффициент усиления  $K = f_{га} = L/Z$ , характеризующий чувствительность датчика. Он показывает, насколько изменяется выходная величина  $L$  при изменении входной величины  $Z$  на единицу длины.

### 3.14. Датчики скорости

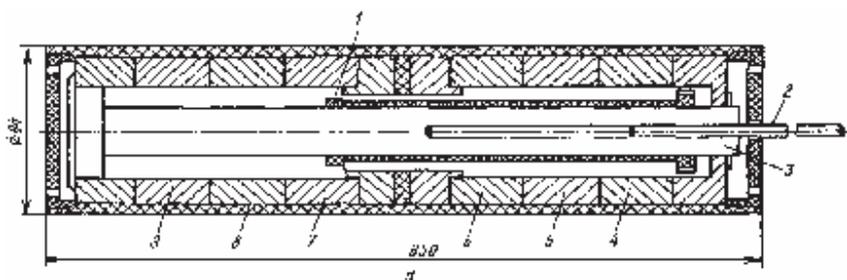


Рис. 3.15. Датчик скорости

Непрерывные измерители скорости обеспечивают непрерывное преобразование скорости контролируемого объекта в выходной электрический сигнал. Наиболее характерный пример таких устройств – индукционные датчики скорости.

В датчике скорости ДС-1, разработанном в ЭНИМСе, катушка 1 (см. рис. 3.15), жестко связана через шток 2 с исследуемым объектом, перемещается вдоль цилиндрической направляющей 3. С помощью двух систем постоянных магнитов (4, 5, 6, и 7, 8, 9) создается магнитное поле. Замыкание силовых линий поля осуществляется через направляющую 3, благодаря чему направление магнитного поля перпендикулярно направлению движения. При перемещении катушки в ее обмотке возникает ЭДС  $E$ , пропорциональная мгновенной скорости контролируемого объекта  $V$ :  $E = k \times V$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Датчик скорости ДС-1 обеспечивает измерение равномерности прямолинейного движения в диапазоне скоростей от 15 мм/мин до 20 м/мин при максимальной длине хода 200 мм. Нижний предел диапазона скоростей определяется уровнем помех с промышленной частотой (50 Гц), которые наводятся в катушке датчика.

### 3.15. Датчики деформаций. Резисторные датчики

Резисторные датчики (рис. 3.16) преобразуют в изменение сопротивления их собственную деформацию, практически равную деформации образца в области закрепления датчика. Деформации, измеряемые с погрешностью до 0,1%, лежат в области примерно от  $\pm 10^{-5}$  до  $\pm 2 \times 10^{-1}$ . Нижний предел измерений определяется шумами датчика и связанной с ним электрической схемы; верхний предел зависит от упругости датчика и фиксирующего его клея.

Обычно датчик состоит из сетки, образованной нитевидными проводниками с удельным сопротивлением  $\rho$ , площадью поперечного сечения нити  $s$  и длиной  $n \cdot l$ , где  $l$  — длина одного нитевидного элемента,  $n$  — их количество; для металлических датчиков  $n$  обычно составляет от 10 до 20 и равно 1 для полупроводниковых. Проводник закрепляется на изолирующей подложке — бумаге или пластике, которая наклеивается на исследуемый образец. Поэтому датчик испытывает такую же деформацию  $\Delta l/l$ , как и образец, в направлении, параллельном нитям.

Первичная обмотка датчика питается от источника переменного тока.

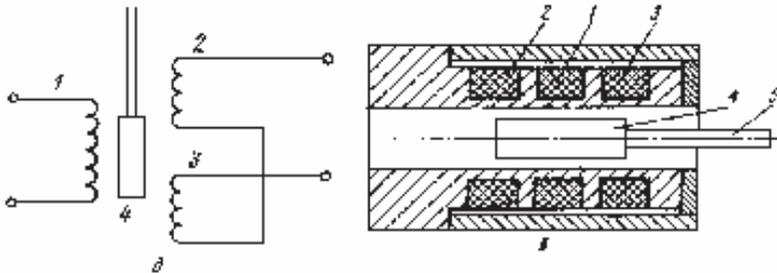


Рис. 3.16. Дифференциально-трансформаторные датчики

Электродвижущие силы, наводимые во вторичных обмотках, зависят от положения ферромагнитного сердечника, связанного через шток с контролируемым узлом станка. Параметры дифференциально-трансформаторных датчиков:

Частота напряжения питания	1–10 КГц
Предел измерения	2–10 мм
Погрешность	$\pm 0,2\%$
Разрешающая способность	0,1 мкм
Масса сердечника со штоком	1 г

При симметричном расположении сердечника относительно вторичных обмоток наводимые на них ЭДС равны, и выходной сигнал датчика, представляющий собой разность указанных ЭДС, равен нулю.

При смещении сердечника в сторону одна из ЭДС возрастает, другая — уменьшается и выходной сигнал оказывается пропорциональным перемещению сердечника. Направление перемещения определяется по фазе выходного сигнала. Обычно этот сигнал присоединяют ко входу фазочувствительного детектора и получают напряжение постоянного тока, величина и знак которого соответствуют величине и направлению смещения контролируемого объекта.

## 4. ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

При многономенклатурном производстве переменных по технологической сложности изделий, для изготовления которых требуется значительное количество инструментов, гибкая производственная система (ГПС), как правило, включает автоматизированную систему контроля, автоматизированную систему инструментального обеспечения (АСИО), снабжающую инструментальные магазины станков необходимым инструментом из накопителя (склада) при смене изготавливаемой детали и производящую замену изношенного или поломанного инструмента.

Большая номенклатура изготавливаемых деталей и высокая отдача оборудования, включенного в ГПС, как правило, требуют оснащения автоматизированным складом (АС) заготовок и деталей, а также инструмента и оснастки (как технологической, так и контрольной), необходимых для бесперебойного функционирования ГПС.

Дальнейшим развитием ГПС для повышения надежности функционирования и осуществления своевременного обеспечения всеми элементами технологического процесса является включение в ее состав систем обеспечения функционирования (СОФ), ГПС, ГПЯ и системы автоматизированного контроля (САК), автоматизированной системы удаления отходов (АСУО), а также включение ГПС в автоматизированную систему управления производством (АСУП).

Производственные новые возможности ГПС достигаются при интегрировании в систему их управления автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП), включающей соответствующие системы автоматизированного проектирования (САПР) – конструирования, технологии и т. п. В этом случае достигается высший – третий уровень автоматизации производства. Рост уровня автоматизации достигается значительным усложнением конструкции и системы обеспечения функционирования ГПС и ГПЯ, а значит, увеличением их стоимости. Поэтому задаваемый уровень автоматизации должен быть экономически обоснован.

На рис. 4.1 показаны основные структурные элементы, а на рис. 4.2. – технические возможности типовой ГПС высокого уровня автоматизации.

Основные структурные элементы ГПЯ следующие: несколько гибких производственных моделей (ГПМ), обеспечивающих требуемую технологическую обработку заготовок, совместно с единой управляющей ЭВМ.

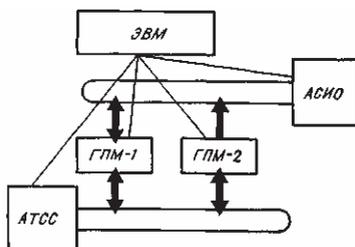


Рис. 4.1. Основные элементы гибкой производственной ячейки (ГПЯ)

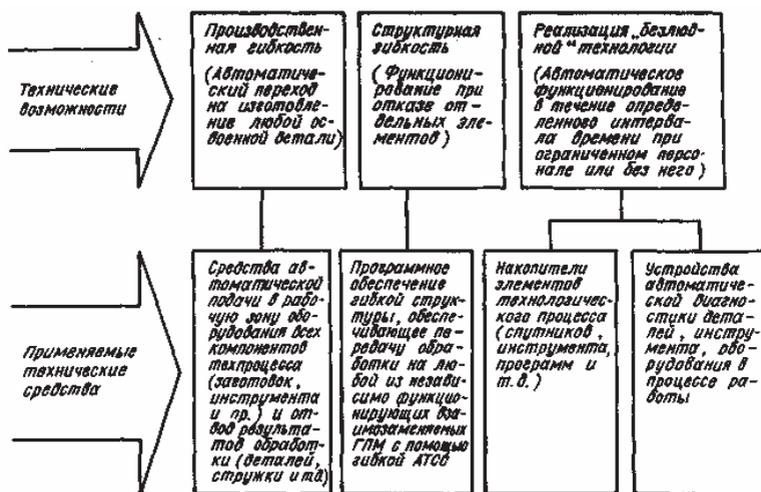


Рис. 4.2. Основные технические возможности типовой гибкой производственной ячейки (ГПЯ)

Основными техническими возможностями ГПЯ являются:

- производственная гибкость, заключающаяся в автоматическом (автоматизированном) переходе на изготовление любой освоенной детали в любой последовательности. В ГПЯ 2-го уровня автоматизации этот переход занимает минуты – время, необходимое для удаления грейфером из камеры станочного модуля детали и загрузки на стол ГПМ тем же грейфером спутника с новой заготовкой;
- структурная гибкость – способность каждого из станочных модулей функционировать при отказе другого, возможность проведения обработки на любом из однотипных ГПМ;
- реализация безлюдной технологии обработки, заключающаяся в автоматическом функционировании ГПЯ в течение определенного

интервала времени без участия обслуживающего персонала или при ограниченном его числе. Степень и продолжительность этой реализации определяется вместимостью элементов технологического процесса, качеством и степенью автоматизации функционирования устройств ГПЯ для диагностирования заготовок, инструмента, оборудования и других элементов ГПЯ в процессе работы.

Число и номенклатура систем в конкретной ГПС, зависят от организационной структуры производства, созданного на основе ГПС, и определяются техническими и экономическими требованиями, предъявляемыми к ней.

Приведенные стадии развития ГПС (см. рис. 4.2) свидетельствуют о высокой насыщенности ее достаточно сложной механикой и электроникой. Поэтому появление ГПС только в начале 80-х годов объясняется тем, что именно в это время сформировалась техническая база для ее создания, включающая три основные части: многоцелевые станки, оснащенные устройствами автоматической смены заготовок и инструмента; роботизированные технические транспортные средства и микроэлектронные системы управления, обладающие разветвленной гибкой структурой.

Современная техническая база ГПС и реализуемые на ее основе отмеченные выше технические возможности гибких структур производства определяют приведенные ниже особенности ГПС.

Благодаря производственной гибкости достигается:

- автоматический (автоматизированный) переход на выпуск новой продукции в кратчайшее время и с наименьшими затратами;
- повышение производительности труда рабочих-станочников благодаря росту коэффициента загрузки станков;
- обеспечение стабильности качества выпускаемых изделий в результате автоматизации всех элементов технологического процесса изготовления и проведения его без участия человека;
- снижение без потери производительности станков размера партии изготавливаемых деталей до полумесечной или месячной программы с трех-, шестимесечной программы производства, характерной при использовании автономных станков с ЧПУ;
- возможность производить детали в таком количестве и тогда, когда они нужны при сборке, т. е. иметь минимальные запасы и заделы, максимальные оборотные средства;
- изменение конструкции изделия в процессе его выпуска.

В результате структурной гибкости достигается:

- обеспечение ритмичности производства благодаря работе основного количества технологического оборудования, несмотря на отказы отдельных его объектов;

– обеспечение требуемой пропорциональности производства вследствие автоматического (автоматизированного) подключения к изготовлению требуемого вида изделия различного количества единиц однотипного технологического оборудования.

В результате реализации безлюдной (малолюдной) технологии достигается:

– переход на работу в две-три смены, круглосуточно, а в перспективе и круглогодично без выходных и праздничных дней с высвобождением людей от работы в ночное время;

– улучшение условий труда, повышение культуры труда, поскольку оператор не связан с циклом работы станка;

– улучшение техники безопасности и сокращение травматизма;

– максимальный выпуск продукции с единицы технологического оборудования благодаря росту коэффициента его загрузки в результате сокращения потерь времени на переналадку при переходе на выпуск нового изделия и коэффициента сменности.

Области рационального применения ГПС – это мелкосерийное повторяющееся, средне- и крупносерийное производство. Применение ГПС в единичном и мелкосерийном неповторяющемся производстве возможно в особых случаях.

Главное преимущество ГПС – способность производить продукцию в кратчайшие сроки при минимальных затратах. ГПС позволяют реализовать методы автоматизации массового производства (непрерывность, ритмичность и пропорциональность) в условиях серийного производства. В серийном производстве в настоящее время изготавливают 75...80% общего выпуска продукции машиностроения. В ГПС при автоматизированной переналадке станка на изготовление другой детали коэффициент загрузки станков, характеризующий машинное время, в течение которого на станке непосредственно изготавливается деталь, составляет 0,85...0,90 (коэффициент загрузки не достигает 1,0, т. к. 10...15% времени по действующим нормативам эксплуатации отводится на ремонтные и профилактические работы), в то время как на автономно работающих станках с ЧПУ он составляет 0,4...0,6.

Несмотря на меры, принятые для использования станка с ЧПУ в две-три смены, практически средний коэффициент сменности их работы составляет 1,3...1,6, в то время как в ГПС он поднимается до 2,5...2,8 при реализации безлюдной (малолюдной) технологии обработки, поскольку производственный и обслуживающий персонал работает главным образом в первую, удобную для работы человека смену, а во вторую и третью смены станочные модули обслуживаются ограниченным числом персонала или работают без его участия.

Сравнение значений коэффициентов загрузки и сменности станков с ЧПУ при их автономном использовании и их значений при автоматизированной переналадке и реализации безлюдной (малолюдной) технологии обработки показывает возможность в последнем случае повышения отдачи станочных модулей относительно автономно эксплуатируемых станков с ЧПУ в 2...4 раза. В этом основной смысл создания ГПС, получивших признание в 80-х годах. В современных условиях прогрессивным может быть только такое производство, которое способно учитывать изменения спроса заказчиков и может быстро переходить на выпуск новой продукции. В результате удается избежать выпуска не находящей спроса продукции и бесполезного расходования ресурсов.

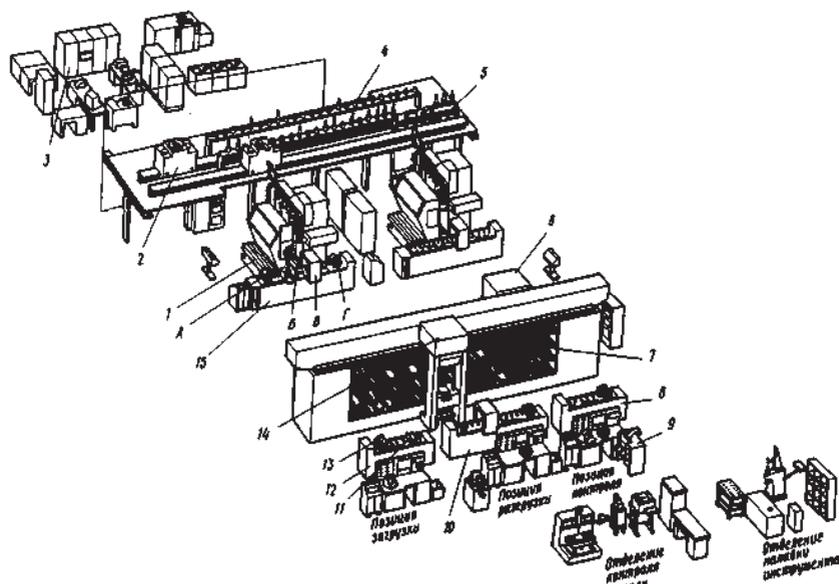


Рис. 4.3. Гибкая ячейка с автоматической переналадкой основных и вспомогательных технологических систем

Отмеченные технические возможности ГПС с автоматической переналадкой при переходе на изготовление нового из освоенных уже изделий (2-й уровень развития автоматизации) иллюстрирует первая разработанная в нашей стране Национальным институтом авиационной технологии (НИАТ) ГПС АЛП-3-1, внедренная на Московском машиностроительном заводе в 1980 году. В состав АЛП-3-1 входили два ГПМ СМ400Ф4.5 (рис. 4.5, 4.6.), созданные путем преобразования станков с ЧПУ в ГПМ.

Конструктивные изменения, внесенные в многоцелевые станки с ЧПУ при преобразовании их в ГПМ, показаны на рис. 4.4, 4.5. Шестикоординатный станок СМ400Ф4.5 средних габаритов имеет три линейных координаты перемещения – две круговые и одну плансуппортовую (координата  $U$ ), которые управляются по числовой программе (см. рис. 4.5).

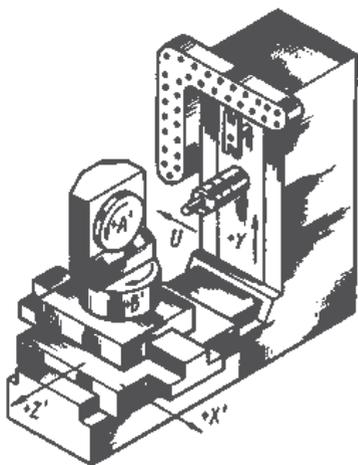


Рис. 4.4. Компоновка многоцелевого станка с шестью координатами, управляемыми по числовой программе

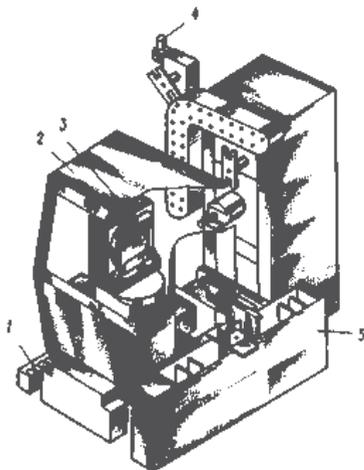


Рис. 4.5. Гибкий производственный модуль, созданный на базе многоцелевого станка с шестью координатами, управляемыми по числовой программе

Он предназначен для точной обработки внутренних фасонных поверхностей, расположенных под произвольными углами, стол станка оснащен устройством 3 (рис. 4.5) приемки спутника, а рабочая зона станка закрыта камерой 2, предохраняющей от разбрасывания стружки, разбрызгивания СОЖ и направляющей стружку и СОЖ в отводящий конвейер 1. Станок оборудован устройством 5 автоматической подачи заготовки на стол станка на спутнике и отвода со стола спутника с деталью. Предусмотрено устройство 4 автоматической подачи инструмента в магазин станка из внешнего накопителя инструментов.

Система обеспечения функционирования ГАУ АЛП-3-1 приведена на рис. 4.6. С центральной ЭВМ (СМ-2М) непосредственно связано большое число объектов управления, в том числе: 12 устройств ЧПУ станками, штабелерами и автооператорами; 12 цикловых систем управления агрегатами загрузки спутников; две цикловые системы управления инструментальными подвижными кассетами; 31 датчик считывания

кода инструмента и 12 датчиков считывания кода спутников; 18 видео-терминалов; один цветной графический дисплей для показа диспетчеру мнемосхемы (в динамике) ГАУ; ряд устройств вывода на печать.

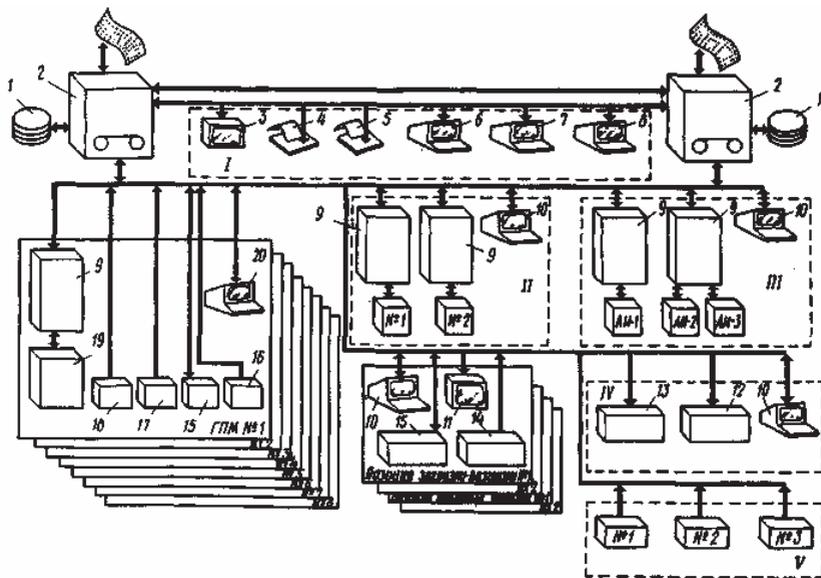


Рис. 4.6. Система обеспечения функционирования ГАУ мод. АЛП-3-2:  
 I – центральный пульт управления; II – АТСС, штабелеры; III – АСИО, автооператоры; IV – позиция загрузки инструмента; V – датчики кода в накопителе инструмента; 1 – внешняя память (10 Мбайт);  
 2 – УВКС СМ-2М К 125 А; 3 – мнемосхема; 4 – протокол работы;  
 5 – справочная информация; 6 – выполнение сменного задания;  
 7 – определение состояния устройств; 8 – ввод директив, вывод справочной информации; 9 – H55-2Л УЧПУ; 10 – директивы и сообщения; 11 – чертеж установки или контроля заготовки, детали; 12 – инструментальная подвижная кассета № 1; 13 – то же, № 2; 14 – датчик кода спутника на входе агрегата загрузки спутников; 15 – агрегат загрузки спутников; 16 – датчик кода спутника на входе АЗС; 17 – датчик кода инструмента в падающем гнезде; 18 – датчик кода инструмента в цепи магазина; 19 – многоцелевой станок; 20 – директивы и сообщения при запуске.

Для резервирования надежности эксплуатации ГАУ, возможности проведения технического обслуживания УВК при круглосуточной работе технологического оборудования параллельно включены две ЭВМ СМ-2М. Основные технические возможности ГАУ АЛП-3-2 как гибкой производственной системы соответствуют типовым ГПЯ АЛП-3-1 и обеспечивают производственную гибкость ГАУ,

структурную гибкость и возможность реализации безлюдной (малолюдной) технологии обработки.

Управление от ЭВМ работой всего оборудования ГАУ и наличие в ЭВМ полной модели участка, работающей в динамике, контролирующей в каждый момент времени фактическое состояние оборудования и оснастки (инструмента, спутников), позволяют реализовать структурную гибкость участка, поскольку изготовление детали может быть без потерь времени передано на любой из однотипных ГПМ участка. Кроме того, возможно оперативное вмешательство персонала участка в процесс обработки: запуск в изготовление приоритетной детали, изменение размера партии деталей, введение коррекции на размеры обрабатываемых поверхностей, автоматическое прерывание процесса обработки с выводом детали на позицию контроля для проверки. Агрегаты загрузки станков АЗСт (см. рис. 4.7) оборудованы на выходе моечными камерами.

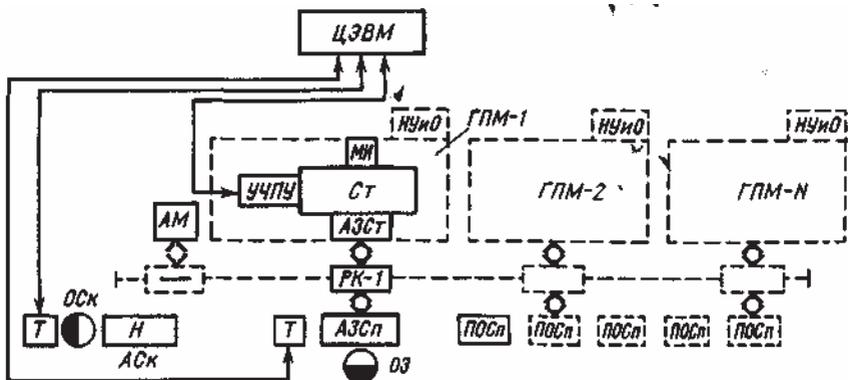


Рис. 4.7. Типовая схема ГАУ упрощенной конструкции 2-го уровня автоматизации

Описанное выше прямое управление от ЦЭВМ позволяет иметь неограниченного объема программу обработки, а индивидуальная подача инструментов снимает ограничения на число используемого инструмента, поскольку используются емкости как инструментальных магазинов ГПМ, так и накопителя инструментов на АСИО. Замена изношенного и сломанного инструмента осуществляется оператором загрузки инструмента ОЗИ с помощью автооператора РА-2 и агрегата загрузки инструмента АЗИ из автоматизированного склада инструментов АСКИ. Подача к ГПМ смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на обрабатываемую заготовку и ее регулирование осуществляются автоматически по командам от ЭВМ с помощью запорно-регулирующей

арматуры от единой насосной установки с отстойником НУиО, расположенным в подвальном помещении. Транспортирование стружки от ГПМ в НУиО выполняется системой гидравлического смыва по желобу (показан штриховой линией), расположенному под полом, или подобными другими средствами.

Схема на рис. 4.7 и изложенное ее краткое описание указывают на функционирование следующих потоков основных составляющих технологического процесса обработки в ГАУ 2-го уровня автоматизации:

- заготовок и деталей в системе АТСС по маршруту АСкЗ↔АЗСт;
- режущего инструмента в системе АСИО по маршруту АСкИ↔МИ;
- заготовок и деталей в системе САК по маршруту АЗСт↔К;
- СОЖ и стружки в системе АСУО по маршруту НУиР↔ГПМ;
- команд управления технологическим оборудованием (АСУТО)

и технологическим процессом (АСУТП) по маршруту ЦЭВМ↔УЧПУ, Т (видеотерминалы), УУ (устройства управления).

ГАУ с подобной структурой управления, реализующей прямое управление от ЦЭВМ работой всего оборудования участка, дают возможность повысить производительность труда операторов благодаря следующим факторам: росту коэффициента загрузки станков в результате автоматизации переналадки оборудования (загрузки заготовками, инструментом, программами обработки и разгрузки деталей, ненужного инструмента); повышению отдачи оборудования в результате роста коэффициента сменности при реализации безлюдной (малолюдной) технологии обработки (за счет вместимости накопителей АТСС и АСИО, загружаемых в первую смену по суточной программе и автоматически питающих станки во вторую и третью смены).

Устройства ЧПУ, ГПМ, АТСС и АСИО при системе прямого управления от ЦЭВМ могут быть упрощенными, поскольку они выполняют обычные функции управления приводами, интерполяции перемещений по данным команд ЦЭВМ, задействование некоторых вспомогательных циклов и т. п. Однако на ЦЭВМ лежит высокая ответственность за результаты работы ГАУ, поскольку отказ ЭВМ ведет к простоему всего участка. Это создало известный психологический барьер в распространении прямого управления от ЦЭВМ.

В целях упрощения структуры ЦЭВМ, уменьшения стоимости ГАУ при сохранении второго уровня автоматизации при допустимой степени изменения экономических показателей часто бывает возможно упростить ГАУ и изменить функционирование потоков основных составляющих технологического процесса (рис. 4.8). Главным образом, это целесообразно в серийном производстве деталей ограниченной номенклатуры и повышенной сложности при достаточно продолжительном времени обработки (свыше 15...30 мин). В этом случае ЦЭВМ

хранит и выдает программы устройствам управления оборудованием и транспортом ГАУ периодически. Накопитель Н автоматизированного склада АСк хранит как заготовки, изготовленные детали, так и необходимый для обработки инструмент. Хранение спутников производится на отдельных позициях ожидания ПОСП вдоль пути движения робокара РК-1, который осуществляет двустороннюю подачу спутников: расположенных с одной стороны по отношению к гибким производственным модулям ГПМ-1, ГПМ-2 и так далее, агрегату мойки деталей АМ и расположенных по другую сторону по отношению к позициям ожидания спутников – ПОСП и агрегатом загрузки спутников. Единая автоматизированная система удаления отходов (АСУО) заменена автономными насосными установками и отстойниками стружки НУиО у каждого из ГПМ. Уборка стружки, автоматически собираемой в тару у каждого ГПМ, обычно совершается оператором один раз в смену.

К устройствам ЧПУ, входящим в ГПМ и АТСС, предъявляются повышенные требования: у них должен быть значительный объем оперативной памяти; они должны диагностировать неисправности, иметь возможность обрабатывать и корректировать программы в диалоге «программист – станок» и др.

На рис. 4.8 показано системное окружение ГПС, соответствующее третьему уровню автоматизации. В этой системе на базе единого банка данных (БД) и под действием автоматизированной системы управления производством АСУП в непрерывном протоке функционирует комплекс превращений технического задания (ТЗ) в готовое изделие. Вся система реализуется материально-техническим обеспечением (МТО). Здесь информация о техническом задании, обрабатываясь системой автоматизированного проектирования (САПР), превращается в комплекс документации, осуществленной в виде подпрограмм обработки, сборки, транспортирования отдельных деталей и узлов изготовленной продукции. Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) обеспечивает подготовку технологического оборудования, оснастки, выбор режимов обработки, т. е. создание технологического процесса для ГПС.

Автоматизированная подсистема управления технологическим процессом (АСУТП), действующая в ГПС, выполняет непосредственно обработку, измерение, транспортирование изделий, контроль функционирования, технологического оборудования, смену инструмента, удаление стружки, упаковку и складирование продукции. Автоматизированная система АСИ обеспечивает требуемый объем испытаний изделий, например, на вибрацию, механические толчки, удары, воздействие внешней среды.

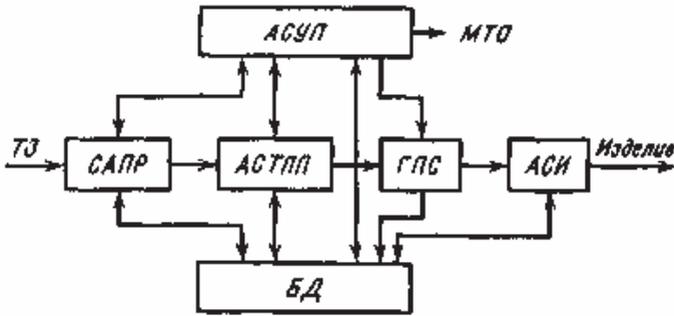


Рис. 4.8. Системное окружение гибкой производственной схемы

На рис. 4.9 показаны назначение, цели и функции АСУТП. В общем виде АСУТП предназначены для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления и представляют собой человеко-машинные системы, обеспечивающие автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом с принятым критерием.

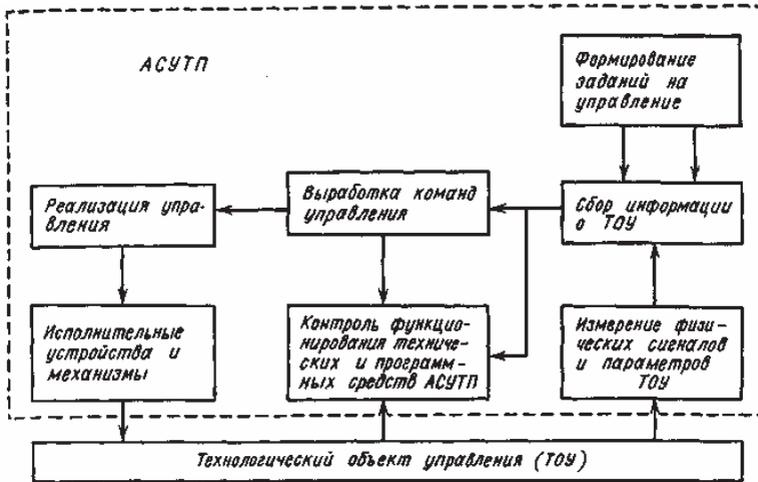


Рис. 4.9. Назначение, цели и функции автоматизированной системы управления технологическим процессом

## 5. АРМАТУРА, КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И РЕГУЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

С целью обеспечения контроля заданных параметров производственных процессов установки систем автоматического контроля могут быть снабжены следующими контрольно-измерительными приборами:

1) манометрами, устанавливаемыми после каждой ступени сжатия и на линии нагнетания после компрессора, а также на воздухоборниках или газосборниках; при давлении на последней ступени сжатия  $300 \text{ кгс/см}^2$  и выше должны устанавливаться два манометра;

2) термометрами или другими датчиками для указания температуры сжатого воздуха или газа, устанавливаемыми на каждой ступени компрессора, после промежуточных и конечного холодильников, а также на сливе воды. Замер температуры должен производиться стационарными ртутными (в металлическом кожухе) или электрическими термометрами и самопишущими приборами. Применение переносных ртутных термометров для постоянного (регулярного) замера температур запрещается;

3) приборами для измерения давления и температуры масла, поступающего для смазки механизма движения.

Все установленные контрольно-измерительные приборы должны проходить государственные испытания в соответствии с требованиями СанПИН.

На воздухоборниках или газосборниках должны применяться манометры диаметров не менее 150 мм, класса точности не ниже 2,5. Высота установки манометра на воздухоборнике от 2 до 3 м.

Манометры должны быть с такой шкалой, чтобы при рабочем давлении стрелка их находилась в средней трети шкалы. На циферблате манометра должна быть нанесена красная черта по делению, соответствующему высшему допускаемому рабочему давлению.

Взамен красной черты, наносимой на циферблате манометра, разрешается прикреплять пайкой или другим способом к корпусу манометра металлическую пластинку, окрашенную в красный цвет и плотно прилегающую к стеклу манометра над соответствующим делением шкалы. Нанесение красной черты на стекло манометра не допускается.

Манометры должны быть снабжены трехходовым краном. При давлении выше  $25 \text{ кгс/см}^2$  вместо трехходового крана разрешается установка отдельного штуцера с запорным устройством для подсоединения второго манометра.

Не реже одного раза в шесть месяцев должна производиться дополнительная проверка рабочих манометров контрольным манометром с записью результатов этих проверок в журнал.

Манометры не допускаются к применению в случаях, когда:

- 1) отсутствует пломба или клеймо;
- 2) просрочен срок проверки манометра;
- 3) стрелка манометра при его выключении не возвращается к нулевому показанию шкалы на величину, превышающую половину допустимой погрешности для данного манометра;
- 4) разбито стекло или имеются другие повреждения манометра, которые могут отразиться на правильности его показаний.

Каждая точка замера должна иметь отдельный термометр. Места замеров должны определяться проектом.

Каждый компрессор должен быть оборудован системой аварийной защиты, обеспечивающей звуковую и световую сигнализацию при прекращении подачи охлаждающей воды, повышении температуры сжимаемого воздуха или газа выше допустимой и автоматическую остановку компрессора при понижении давления масла для смазки механизма движения ниже допустимой.

Предохранительные клапаны должны устанавливаться после каждой ступени сжатия компрессора на участке охлажденного воздуха или газа. Допускается присоединение к одному воздухохранику нескольких компрессоров с установкой на нагнетательных линиях обратных клапанов и запорной арматуры, в этом случае перед запорной арматурой на нагнетательных линиях должны быть установлены предохранительные клапаны. Если на каждый компрессор предусмотрен один воздухохраник и на нагнетательном трубопроводе отсутствует запорная арматура, предохранительный клапан после компрессора может устанавливаться только на воздухо- или газосборнике.

Размеры и пропускная способность предохранительных клапанов должна быть выбрана так, чтобы не могло образоваться давление, превышающее рабочее более чем на  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  при рабочем давлении до  $3 \text{ кгс/см}^2$  включительно, на 15% при рабочем давлении от 3 до  $60 \text{ кгс/см}^2$  и на 10% при рабочем давлении свыше  $60 \text{ кгс/см}^2$ .

Установка предохранительных клапанов должна отвечать требованиям «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

Регулировка предохранительных клапанов должна производиться на специальных стендах лицами, допущенными к самостоятельному обслуживанию компрессорных установок, с записью о проведенной регулировке в ремонтной книге компрессорной установки.

Натяжные гайки пружинных предохранительных клапанов должны быть запломбированы, а грузы рычажных предохранительных клапанов закреплены, закрыты металлическими кожухами и запломбированы.

На нагнетательном трубопроводе к воздухо- или газосборнику должен быть установлен обратный клапан.

Для проведения периодических осмотров и ремонтов воздухооборудованных устройств необходимо предусматривать возможность отключения от сети каждого из них.

Масло и вода, удаляемые при продувке влагомаслоотделителей и воздухооборудованных устройств, должны отводиться в специально оборудованные устройства (сборники), исключающие загрязнение производственных помещений, стен здания и окружающей территории маслом.

При расположении арматуры, требующей систематического обслуживания, на высоте более 1,8 м должны быть предусмотрены устройства для удобства обслуживания.

## **6. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ АВАРИЙ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ. ОБЯЗАННОСТИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА**

*Ликвидация утечек рабочей среды (газа).* Наличие газа в воздухе определяют по запаху или при помощи приборов – газоиндикаторов. Применение приборов наиболее желательно, если вблизи котельной имеются подземные газопроводы. В случаях утечек из таких газопроводов газ проходит через влажный грунт и может потерять свой специфический запах, вследствие чего обнаружение его возможно только при наличии прибора.

Места выхода газа из внутренних газопроводов, газового оборудования и арматуры отыскивают по запаху, который наиболее ощутим в зоне утечки. Для этой цели можно также пользоваться газоиндикаторами, отбирая пробы воздуха вблизи возможных мест утечки. Наиболее распространенным и удобным является применение пенообразующих растворов или, как говорят, обмыливание. Пенообразующие растворы наносят кисточкой на проверяемые соединения, швы, стыки, а места выхода газа обнаруживают по пузырькам пены, образуемым выходящим газом. Для приготовления мыльного раствора на 1 л воды требуется 50 г туалетного или 65%-ного хозяйственного мыла. Приготавливают пенообразующий раствор также из экстракта лакричного корня (10 г на 1 л воды). При низких температурах воздуха в этот раствор добавляют поваренную соль.

Наличие утечек газа на подземных газопроводах проверяют систематическим контролем загазованности воздуха колодцев, каналов, подвалов и других сооружений, расположенных вблизи трассы газопровода. При наличии запаха газа в указанных сооружениях немедленно приступают к определению места предстоящей раскопки грунта бурением контрольных скважин вдоль газопровода.

Применение огня для отыскания утечек газа в помещении не допускается. Известны случаи, когда при пользовании огнем образовывались невидимые проверяющему очаги горения в местах, стесненных или обращенных к стене, что приводило к еще большему увеличению неплотности соединения и к пожару. Запрещается проверять огнем загазованность колодцев канализации, тепловых сетей и других подземных сооружений.

На подземных газопроводах применение огня допускается только для проверки наличия газа в контрольных трубках и специально пробуренных скважинах на расстоянии более 3 м от зданий и подземных сооружений.

В случаях, когда ликвидировать утечку указанными способами не удастся, следует отключить газопровод, по которому поступает газ

к месту утечки. При сильной утечке, грозящей образованием газовой смеси, необходимо отключить подачу газа в котельную, закрыть краны перед горелками и открыть краны на продувочных трубопроводах. Для вентилирования помещения открывают окна и двери или включают искусственную вытяжную вентиляцию, если она имеется.

*Аварийно-восстановительные работы.* Выполняются в случаях нарушения целостности газопровода, сооружений на нем или системы контроля, создающих аварийную ситуацию. Аварийные работы должны выполняться силами и средствами персонала котельной немедленно и без наряда до устранения прямой угрозы жизни людей и материальным ценностям. Первоначальными мерами по устранению аварий являются: отключение от действующей сети поврежденного участка проводящей системы устройства контроля; естественная вентиляция (проветривание) загазованного помещения; запрещение курить, зажигать спички, включать и выключать электроосвещение и проводку. После ликвидации последствий аварий восстановительные работы ведутся по разовому наряду, а при необходимости – по специальному плану проведения этих работ.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие систем автоматического контроля.
2. Способы измерения и методы автоматического контроля
3. Классификация систем автоматического контроля.
4. Адаптивные устройства контроля.
5. Цикловое программное управление систем контроля.
6. Устройства контроля на основе циклового программного управления.
7. Числовое программное управление (ЧПУ) систем контроля.
8. Контурные устройства с ЧПУ систем контроля.
9. Классификация контурных устройств с ЧПУ систем контроля.
10. Схема работы устройств активного контроля без автоподналадки.
11. Схема работы устройств активного контроля с автоподналадкой.
12. Схема работы устройств пассивного контроля.
13. Системы активного контроля над производственным процессом.
14. Лазерные системы активного контроля.
15. Автоматические системы с бесконтактным способом контроля.
16. Датчики систем автоматизированного контроля.
17. Принцип работы тактильного датчика.
18. Однопозиционные тактильные датчики.
19. Многопозиционные тактильные датчики.
20. Координатно-измерительные машины.
21. Микропроцессорные контрольно-измерительные системы.
22. Схема программируемого контрольно-измерительного прибора.
23. Схема функционирования мультиметра.
24. Схема работы устройств пассивного контроля.
25. Принципы функционирования системы автоматического контроля.
26. Как осуществляется обратная связь в системах автоматического контроля?
27. Сравните дифференциальную измерительную схему с мостовой.
28. Чем отличается автоматизация систем контроля от механизации?
29. Принцип работы контактного датчика.
30. Расскажите сущность пьезоэлектрического эффекта.
31. Приведите основные типы пьезоэлементов по назначению.
32. Применение пьезоэлементов в системах контроля.
33. Алгоритм расчета пьезоактюатора.
34. Основы методики тензометрических измерений.
35. Конструкции тензодатчиков и их применение.
36. Схемы подключения тензодатчиков в системах контроля.
37. Алгоритм расчета напряжений и деформаций при измерениях.
38. Приведите сущность явления магнитострикции.
39. Характеристики магнитострикции в материалах.

40. Применение явления магнитострикции в системах контроля.
41. Измерение температур с помощью термопар.
42. Перечислите типы индикаторных устройств систем контроля.
43. Принцип работы контактора и магнитного пускателя систем контроля.
44. Назначение аналого-цифрового преобразователя.
45. Назначение цифро-аналогового преобразователя.
46. Какими преимуществами обладает электрический сигнал по сравнению с другими сигналами в системах контроля?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### *Основная литература*

1. Волков, Н.И. Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Миловзоров. — М. : Высшая школа, 1986. — 335 с.
2. Захаров, И.А. Электроника в технике / И.А. Захаров. — М. : Радио и связь, 1995. — 440 с.
3. Келим, Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления / Ю.М. Келим. — М. : ИНФРА-М, 2004. — 384 с.
4. Келим, Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики / Ю.М. Келим. — М. : Высшая школа, 1991. — 304 с.
5. Клюев, А.С. Автоматическое регулирование / А.С. Клюев. — М. : Высшая школа, 1986. — 344 с.
6. Михайлов, О.П. Электрические аппараты и средства автоматизации / О.П. Михайлов, В.Е. Стоколов. — М. : Машиностроение, 1982. — 183 с.
7. Преображенский, А.А. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники / А.А. Преображенский, Б.В. Шармай. — М. : Высшая школа, 1982. — 264 с.
8. Ямпольский, В.С. Основы автоматики и электронно-вычислительной техники / В.С. Ямпольский. — М. : Просвещение, 1991. — 223 с.
9. Фотоэлектрические автоматы для контроля размеров : учебник для техникумов / Я.М. Цейтлин [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1968. — 192 с.
10. Городецкий, Ю.Г. Конструкции и эксплуатация средств измерения размеров в машиностроении / Ю.Г. Городецкий. — М. : Машгиз, 1951. — 370 с.
11. Марков, Н.Н. Электроконтактные датчики для линейных измерений / Н.Н. Марков, В.М. Машинистов, Н.И. Этингоф. — М. : Машиностроение, 1969. — 244 с.
12. Безопасность жизнедеятельности : учебник для вузов / С.В. Белов [и др.]. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Высшая школа, 1999. — 448 с.
13. Таскин, А. А. Датчики давления мембранного типа для исследования аэродинамических потоков / А.А. Таскин [и др.] // Наука — производству. — 2001. — № 12. — С. 26–30.
14. Русин, Ю.С. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры / Ю.С. Русин, И.Я. Гликман, А.Н. Горский. — М. : Радио и связь, 1991. — 224 с.
15. Стародубцев, Ю. ГАММАМЕТ — новый материал магнитопровода / Ю. Стародубцев, В. Кейлин // Радио. — 1994. — № 6. — С. 34–35.
16. ГОСТ 24011-80. Магнитопроводы ленточные кольцевые. Конструкция и размеры. — Введ. 01.01.1981. — М. : Изд-во стандартов, 1981. — 7 с.
17. ГОСТ 14208-77. Магнитопроводы кольцевые из марганец-цинковых ферритов. Типы и основные размеры. — Введ. 01.07.1977. — М. : Изд-во стандартов, 1977. — 14 с.

18. ГОСТ 22050-76. Магнитопроводы ленточные. Типы и основные размеры. – Введ. 01.07.1977. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 14 с.

*Дополнительная литература*

1. Апарин, Г.А. Допуски и технические измерения / Г.А. Апарин, И.Е. Городецкий. – М. : Машгиз, 1956. – 738 с.
2. Волосов, С.С. Автоматическое обеспечение точности размеров при шлифовании / С.С. Волосов. – М. : Машгиз, 1958. – 368 с.
3. Волосов, С.С. Основы точности активного контроля размеров / С.С. Волосов. – М. : Машиностроение, 1969. – 356 с.
4. Городецкий, Ю.Г. Конструкции и эксплуатация средств измерения размеров в машиностроении / Ю.Г. Городецкий. – М. : Машгиз, 1951. – 370 с.
5. Городецкий, Ю.Г. Автоматизация пневматических измерений / Ю.Г. Городецкий. – М. : Машгиз, 1955. – 168 с.
6. Конические соединения : справ. пособие / А.Н. Журавлев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1968. – 141 с.
7. Измерительные приборы в машиностроении : учеб. пособие / А.Г. Иванов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1964. – 523 с.
8. Кемпинский, М.М. Проектирование механизмов измерительных приборов / М.М. Кемпинский. – М. : Машгиз, 1959. – 143 с.
9. Оптические приборы для измерения литейных и угловых величин в машиностроении : справочная книга / Ю.В. Коломийцов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1964. – 256 с.
10. Коротков, В.П. Основы метрологии и точности механизмов приборов / В.П. Коротков, Б.А. Тайц. – М. : Машгиз, 1961. – 400 с.
11. Крупп, Н.Я. Оптико-механические измерительные приборы / Н.Я. Крупп. – М. : Машгиз, 1962. – 276 с.
12. Маликов, С.Ф. Введение в метрологию / С.Ф. Маликов, Н.И. Тюрин. – М. : Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, 1966. – 304 с.
13. Марков, Н.Н. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях / Н.Н. Марков, Г.Б. Кайнер, П.А. Сацердотов. – М. : Машиностроение, 1967. – 392 с.
14. Гаврилов, А.Н. Приборостроение и средства автоматики : справочник : в 5 т. / А.Н. Гаврилов. – М. : Машгиз, 1963. – Т. 1. – 515 с.
15. Эрвайс, А.В. Юстировка и ремонт оптико-механических измерительных приборов / А.В. Эрвайс. – М. : Машгиз, 1958. – 459 с.
16. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники / Ф.Е. Евдокимов. – М. : Высшая школа, 1999. – 496 с.
18. Якушев, А.И. Основы взаимозаменяемости и технические измерения / А.И. Якушев. – М. : Машгиз, 1968. – 375 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. УРОВНИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ	5
1.1. Назначение автоматических систем на производстве	5
1.2. Уровни автоматизации производственных систем	6
1.3. Автоматические и автоматизированные процессы и оборудование	7
1.4. Степень автоматизации производственных систем	10
1.5. Контроль с применением систем программного управления	12
2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ. УСТРОЙСТВО	15
2.1. Классификация приборов в электрических измерениях	15
2.2. Устройство преобразователей сигнала регистрирующей аппаратуры	17
2.3. Системы контроля с применением пьезоэлектрического эффекта	24
2.4. Системы контроля с применением магнитострикционного эффекта	54
2.5. Системы контроля, работающие на основе эффекта электрострикции	68
3. ДАТЧИКИ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	82
3.1. Принцип работы измерительных систем автоматического контроля	82
3.2. Датчики смещения	83
3.3. Тепловые исполнительные микроустройства	89
3.4. Емкостные датчики смещения	93
3.5. Механотронные датчики	96
3.6. Электронные датчики	96
3.7. Фотоэлектрические датчики	97
3.8. Емкостные датчики	98
3.9. Электроиндуктивные датчики	98
3.10. Радиационные измерительные системы	99
3.11. Пневматические датчики	100
3.12. Датчики, регистрирующие изменение температуры	101
3.13. Манометрические датчики	102
3.14. Датчики скорости	103
3.15. Датчики деформаций. Резисторные датчики	104

4. ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ	106
5. АРМАТУРА, КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И РЕГУЛИРУЮЩАЯ АППАРАТУРА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ	117
6. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ АВАРИЙ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ. ОБЯЗАННОСТИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА	120
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	122
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	124

Учебное издание

*Денис Геннадьевич ЛЕВАШКИН*

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Редактор *В.С. Павлова*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Компьютерная вёрстка *И.И. Шишкиной*  
Дизайн обложки *И.И. Шишкиной*

Подписано в печать 24.07.2008. Формат 60x84/16.  
Печать оперативная. Усл. п. л. 8. Уч.-изд. л. 7,44.  
Тираж 100 экз. Заказ № 1-55-08.

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14