

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ  
КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ  
И ПРОГРАММНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.А. Лавров

# **Технические средства автоматизации и управления**

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2015

## Содержание.

Введение.....	3
1. Типовые структуры и средства систем автоматизации и управления .....	4
1.1. Уровни автоматизации.....	4
1.2. Автоматизированные системы управления предприятия в целом.....	6
1.3. Технические средства автоматизации и управления (ТСА).....	8
1.4. Локальные системы автоматического управления (САУ).....	9
1.5. Программно-технические комплексы (ПТК).....	10
2. Технические средства получения информации о состоянии объекта управления.....	15
2.1. Общие сведения о датчиках.....	15
2.2. Датчики электромагнитных переменных.....	17
2.2.1. Датчики тока.....	17
2.2.2. Датчики напряжения.....	22
2.2.3. Датчики магнитного поля.....	23
2.3. Датчики механических переменных.....	27
2.3.1. Оптоэлектронные датчики угловой скорости и углового положения.....	27
2.3.2. Потенциометрические датчики углового и линейного положения.....	29
2.3.3. Магниторезистивные датчики угловой скорости, углового положения и линейного перемещения.....	31
2.3.4. Тахогенераторные датчики измерения частоты вращения.....	34
2.3.5. Емкостные датчики линейного и углового положения.....	35
2.3.6. Индуктивные датчики положения.....	38
2.3.7. Тензометрические датчики.....	40
2.3.8. Пьезоэлектрические датчики силы.....	44
2.4. Датчики технологических переменных.....	45
2.4.1. Датчики температуры.....	45
2.4.2. Датчики давления.....	53
Список литературы .....	59

## **Введение**

Согласно программе, курс «Технические средства автоматизации и управления» (САиУ) состоит из следующих разделов:

1. Типовые структуры и средства САиУ .
2. Технические средства получения информации о состоянии объекта, (датчики).
3. Технические средства использования командной информации и воздействия на объект управления (исполнительные устройства).
4. Аппаратно-программные средства распределённых САиУ.
5. Технические средства обработки, хранения информации, принципы цифрового управления в САиУ.
6. Микроконтроллерные системы управления электромеханическими объектами.

В самом курсе «Технические средства автоматизации и управления» разделы 4, 5 и 6 имеют ознакомительный характер. В разделе 4 рассматриваются общие вопросы, связанные с применением аппаратно-программных средств распределённых САиУ: решаемые задачи, состав этих средств, основные характеристики и структурные схемы, подробно эти средства изучаются в курсе «Промышленные сети», читаемом на кафедре КСиПТ. Аналогично, в разделах 5 и 6 рассматриваются общие вопросы применения программируемых логических контроллеров (ПЛК), промышленных ПК и микроконтроллеров, подробно эти вычислительные средства изучаются в курсах «Промышленные контроллеры» и «Микроконтроллерные системы управления». Технические средства использования командной информации и воздействия на объект управления (исполнительные устройства) в необходимой мере изучаются в курсе «Электромеханика».

В данном пособии помещены материалы для освоения студентами двух разделов: «Типовые структуры и средства систем автоматизации и управления» и «Технические средства получения информации о состоянии объекта управления».

# **1. Типовые структуры и средства систем автоматизации и управления**

## **1.1. Уровни автоматизации**

Уровень и способы автоматизации зависят от состава рабочих мест, оснащенности их техническими средствами и серийности выпускаемой продукции. Условно все рабочие места можно разделить на три группы.

К первой группе относятся рабочие места, на которых выполняются работы вручную, а рабочие, занятые при машинах и механизмах, выполняют только функции по обслуживанию машин и механизмов. В этой группе объединяются рабочие, которые не ведут технологические процессы, а занятые постоянно только загрузкой и выгрузкой предметами труда машин и механизмов. Сюда относятся профессии подсобных рабочих, такелажников, другие профессии рабочих, выполняющих работу вручную более 50% времени, а также рабочие, выполняющие работу при помощи простейших инструментов, наладчики, слесари и ремонтники.

Ко второй группе относятся рабочие места, на которых рабочие выполняют работу механизированным способом при помощи машин и механизмов, аппаратов и механизированных инструментов, приводимых в действие паром, электрическими, пневматическими, гидравлическими и т.п. приводами, а также, осуществляющие наблюдение за действием машин и механизмов.

К этой группе также относят рабочие места, связанные с настройкой оборудования, изделий или приборов, при помощи электронных и радиоизмерительных приборов, установок, стендов.

На рабочих местах, относимых ко второй группе, заняты рабочие таких профессий как аппаратчики всех профилей, водители, машинисты, станочники и операторы всех специальностей, занятые загрузкой оборудования вручную, гальваники, испытатели, измерители, кладовщики на комплексно-механизированных складах, лаборанты, занятые работой на оборудовании, контролеры на испытательных операциях, электромонтеры по обслуживанию оборудования и другие.

К третьей группе относятся рабочие места, на которых технологические операции выполняются в автоматическом режиме. Автоматизация процессов производства имеет целью исключить последовательно различные функции, выполняемые рабочими из первой и второй групп. Различают пять уровней автоматизации.

Первый уровень автоматизации характеризуется тем, что автоматизируется цикл обработки изделия. В автоматическом режиме осуществляется управление последовательностью и характером движений рабочего инструмента для получения заданной формы, размеров и качественных характеристик обрабатываемой детали. Наиболее полное воплощение автоматизация этого уровня получила в станках с числовым программным управлением (ЧПУ). При их использовании значительно возрастает производительность труда по сравнению со станками, имеющими

ручное управление, существенно повышается качество продукции.

На этом уровне рабочий может осуществлять следующие действия: установку и снятие предметов труда или заполнение предметами труда и необходимыми материалами загрузочных устройств; пуск и установку оборудования; активное наблюдение за работой оборудования; контроль обработки; смену инструмента, наладку и подналадку оборудования; удаление отходов в пределах рабочего места.

Второй уровень автоматизации предполагает автоматизацию постановки и снятия деталей со станка, то есть загрузку оборудования. Это позволяет рабочему обслуживать несколько технологических единиц оборудования, таким образом перейти к многостаночному обслуживанию. В качестве загрузочных устройств широко используются промышленные роботы (ПР).

Второй уровень автоматизации, как правило, обеспечивается созданием роботизированных технологических комплексов (РТК). В них робот может обслуживать как один, так и группу станков или оборудования.

Третий уровень автоматизации. На этом уровне автоматизируется ранее выполняемый рабочим контроль за состоянием инструмента и своевременная его замена, контроль качества обрабатываемых изделий (размеров, чистоты поверхности, а где возможно, качества изделия после термических, диффузионных, химических и других процессов), контроль за состоянием станков и оборудования, удалением стружки и других отходов производства, а также, контроль и подналадка технологических процессов.

Автоматизация перечисленных операций освобождает рабочего от постоянной связи с обслуживаемой установкой и открывает возможность расширения зоны обслуживания оборудования одним человеком.

При таком уровне рабочие выполняют работу на автоматических линиях, автоматах, автоматизированных агрегатах, установках и аппаратах. К этой категории относятся также рабочие, занятые работой по управлению, контролю, периодической регулировке автоматических линий, автоматов, агрегатов, комплексов.

Третий уровень автоматизации реализуется путем создания адаптивных роботизированных технологических комплексов (РТК), гибких производственных модулей, имеющих в своем составе, например, обрабатывающий центр, ПР, устройства контроля, диагностики и подналадки, другие вспомогательные механизмы, управляемых от одного контроллера или других управляющих устройств

Четвертый уровень автоматизации. В этом случае осуществляется автоматическая переналадка оборудования. При ручной переналадке оборудования, она занимает значительную часть рабочего времени. Чем чаще по условиям производства требуется переналадка, тем больше оказываются потери времени и уменьшается зона обслуживания одним рабочим.

Оборудование с автоматической переналадкой экономически выгодно при обработке любых партий деталей и целесообразно при выпуске сборочных комплектов деталей, необходимых для обеспечения ритмичной работы сборочных цехов. Оно позволяет существенно сократить объемы

незавершенного производства, сократить до минимума производственный цикл изготовления изделий.

Пятый уровень автоматизации это гибкие производственные системы (ГПС). ГПС это управляемая средствами вычислительной техники совокупность технологического оборудования, состоящего из разных сочетаний гибких производственных модулей (ГПМ) и (или) гибких производственных ячеек (ГПЯ). Обеспечение функционирования ГПС, ГПМ и ГПЯ осуществляет автоматизированная система управления технологическим процессом гибкой производственной системой (АСУТП ГПС), которая взаимодействует с автоматизированной системой управления предприятия (АСУП). В общем случае она обеспечивает комплексную автоматизацию всех звеньев производственного процесса, включая процессы обработки и управления, подготовку производства, разработку конструкторской и технологической документации, а также планирование производства.

Гибкими производственными системами могут быть как автоматизированные предприятия и заводы-автоматы, так и их структурные составляющие: автоматизированные цехи, автоматизированные и роботизированные участки, автоматизированные линии и роботизированные комплексы. ГПС обеспечивают автоматическое производство деталей различными партиями, с уровнем себестоимости продукции и производительности близкой к предельно достигаемой в современном массовом производстве.

## **1.2. Автоматизированные системы управления предприятия в целом**

Отличительными особенностями современных структур построения автоматизированных систем управления промышленными предприятиями являются: использование вычислительных средств и внедрение сетевых технологий на все уровни управления.

Зарубежные и российские специалисты по комплексной автоматизации производства выделяют пять уровней управления современным предприятием [1]. Эти уровни приведены на рис. 1.1.

На уровне ERP – Enterprise Resource Planning (планирования ресурсов предприятия) осуществляются расчет и анализ финансово-экономических показателей, решаются стратегические административные и логистические задачи.

На уровне MES – Manufacturing Execution Systems (системы исполнения производством) – решаются задачи управления качеством продукции, планирования и контроля последовательности операций технологического процесса, управления производственными и людскими ресурсами в рамках технологического процесса, технического обслуживания производственного оборудования.

Эти два уровня, которые еще соответственно называют четвертый и третий уровни управления, относятся к задачам АСУП (автоматизированным

системам управления предприятием) и технические средства, с помощью которых эти задачи реализуются – это офисные персональные компьютеры (ПК) и рабочие станции на их основе в службах главных специалистов предприятия.

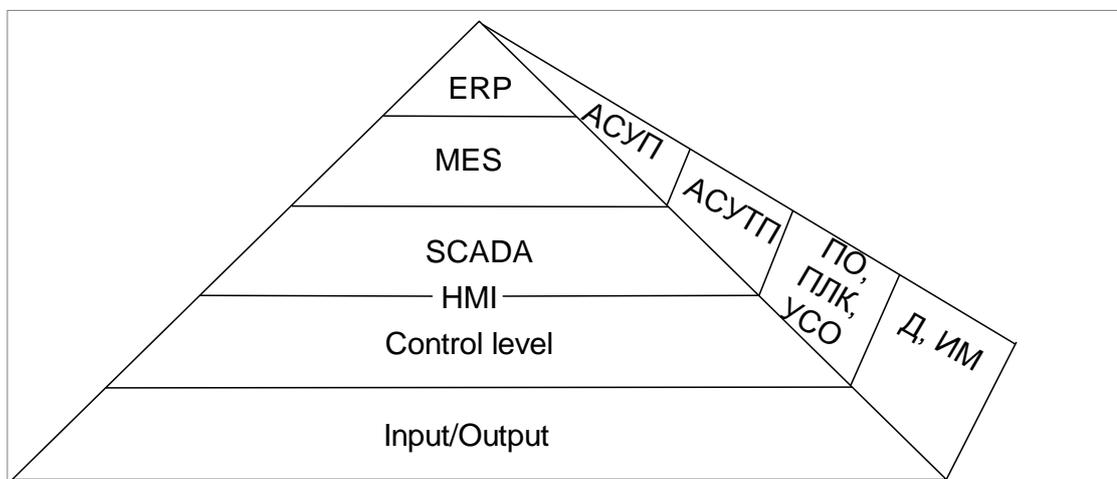


Рис.1.1. Пирамида управления современным производством

На следующих трех уровнях решаются задачи, которые относятся к классу АСУ ТП (автоматизированных систем управления технологическими процессами).

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (второй уровень - система сбора данных и супервизорного (диспетчерского) управления) – это уровень тактического оперативного управления, на котором решаются задачи оптимизации, диагностики, адаптации и т.п. Предназначен для отображения (визуализации) данных о производственном процессе и оперативного комплексного управления различными агрегатами при участии диспетчерского персонала .

HMI–Human-Machine Interface (человеко-машинная связь)- осуществляет визуализацию (отображение информации) хода технологического процесса.

Control-level (первый уровень) -уровень непосредственного (локального) управления, который реализуется на таких технических средствах как: ПО – панели (пульты) операторов, ПЛК – программируемые логические контроллеры, УСО – устройства связи с объектом. Служит для непосредственного автоматического управления локальными технологическими установками и процессами и т. д.

Input/Output – Входы/Выходы (нулевой уровень) объекта управления представляет собой уровень включающий датчики и исполнительные механизмы (Д/ИМ) конкретных технологических установок и рабочих машин (электродвигатели насосов, вентиляторов, задвижек, заслонок и клапанов, станков и т. д).

Обмен информацией между первым и вторым уровнями АСУ осуществляется на основе локальных промышленных сетей (Profibus, Bitbus

и т. п.). Компьютеры второго уровня и выше объединяются в однородную локальную сеть предприятия (типа Industrial Ethernet). Прямая связь объекта управления и системы управления осуществляется через уровень ввода-вывода.

Целью данного курса является изучение технических средств, относящихся к АСУТП. Основные понятия.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – система, предназначенная для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления и представляющая собой человеко-машинную систему, обеспечивающую автоматический сбор и обработку информации, необходимую для управления этим технологическим объектом в соответствии с принятыми критериями (техническими, технологическими, экономическими).

Система автоматического управления (САУ) – совокупность технических устройств и программно-технических средств, взаимодействующих между собой с целью реализации некоторого закона (алгоритма) управления без участия человека.

Технологический объект управления (ТОУ) - совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим инструкциям и регламентам технологического процесса. В зависимости от уровня АСУ ТП в качестве ТОУ можно рассматривать: технологические агрегаты и установки, группы станков, отдельные производства (цехи, участки), реализующие самостоятельный ТП; производственный процесс всего промышленного предприятия, если управление им заключается в рациональном выборе и согласовании режимов работы агрегатов, участков и производств.

### **1.3. Технические средства автоматизации и управления (ТСА)**

ТСА по функциональному назначению делят на пять групп:

1. Входные устройства, осуществляющие сбор и преобразование информации (без изменения ее содержания) о состоянии процесса (измерительные преобразователи и датчики положения, скорости давления, усилия и т.д.);

2. Средства для передачи информации по каналам связи (промышленные и локальные сети);

3. Устройства для хранения, обработки и формирования команд управления (программируемые логические контроллеры (ПЛК), промышленные ПК, микроконтроллерные устройства и др.);

4. Выходные устройства управления исполнительными механизмами технологических установок и рабочих машин;

5. Устройства отображения информации для воздействия на процесс и связи с оператором АСУ ТП.

## 1.4. Локальная САУ

Система управления может быть и одноуровневой, то есть включать только нулевой и первый уровни управления для одного объекта. Часто такая система может функционировать практически без участия человека и называется локальной САУ. Рассмотрим простую локальную, одноканальную САУ предназначенную для управления каким либо механизмом, устройством, станком, машиной, аппаратом, агрегатом и т.п. (рис.1.2).

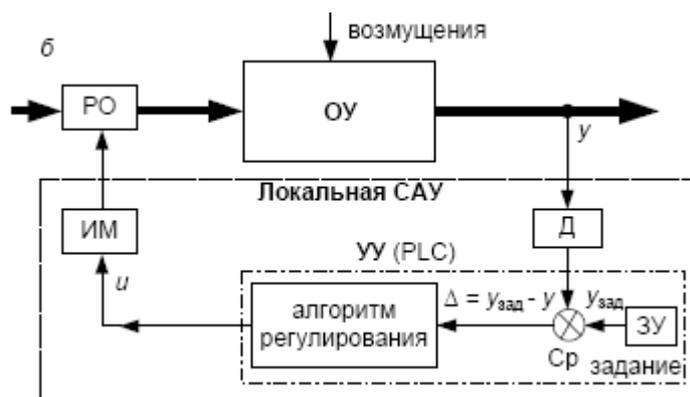


Рис.1.2. Локальная, одноканальная САУ

САУ состоит из ряда базовых элементов.

Д – датчик (измерительный преобразователь) – устройство, преобразующее физическую величину (например, температуру  $T$ , давление  $P$ , расход  $F$ , концентрацию  $Q$ , массу  $W$ , скорость  $S$  и т.д.) в электрический сигнал, удобный для передачи.

УУ – управляющее устройство (на практике часто реализуются в виде промышленного контроллера PLC (Programmer Logic Controller). Обычно в нем предусмотрены функции задания, сравнения и выработки алгоритма регулирования.

ЗУ (задающее устройство) – служит для установления заданного значения  $U_{зад}$  управляемой переменной  $u$ . Установка производится либо вручную, либо автоматически.

Ср (сравнивающее устройство) – сравнивает (обычно это операция вычитания, т.е. отрицательная обратная связь) текущее  $u$  и заданное значение  $U_{зад}$  технологической переменной. В результате на его выходе формируется сигнал рассогласования  $\Delta$ ;

Алгоритм регулирования вырабатывается при помощи УУ. В некоторых случаях отрабатывается режим стабилизации, неизменность состояния ОУ (стабилизация его технологических переменных), во втором, наоборот, отработки управляющих воздействий, изменяющих состояние ОУ в соответствии с заданной последовательностью действий (программное управление).

ИМ – исполнительный механизм. Обычно, это силовое устройство с достаточно большой мощностью (двигатели электрические, гидравлические, пневматические, электромагнитные, поршневые устройства, муфты), в данной структурной схеме считается, что ИМ по необходимости содержит и преобразователь электроэнергии управляемый от УУ. РО-регулирующий орган (заслонка, задвижка, элерон крыла самолета и т.д.).

### 1.5. Программно-технические комплексы (ПТК)

Основной тенденцией в развитии АСУТП является их совместимость, способность функционировать в единой системе, стандартизация интерфейсов, функциональная полнота, позволяющая строить АСУТП только из данного набора.

На рубеже 70-х и 80-х годов XX века ведущие мировые производители средств автоматизации начали выпускать наборы программно технических комплексов (ПТК) для построения АСУТП.

ПТК - это совокупность микропроцессорных средств автоматизации (программируемые логические контроллеры, локальные регуляторы, устройства связи с объектом), дисплейных панелей операторов и серверов, промышленных сетей, связывающих между собой перечисленные компоненты, а также промышленного программного обеспечения всех этих составных частей, предназначенная для создания распределенных АСУ ТП в различных отраслях промышленности. Примером современного ПТК является ПТК SIMATIC, основные характеристики приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

ПЛК (PLC): SIMATIC S5/S7/C7; Logo ПЛК на базе ПК: SIMATIC WinAC; УСО: Станции децентрализованной периферии (DP) ET-200; Человеко-машинный интерфейс (HMI): Панели операторов OP/TP/MP; Промышленные сети (NET): ASi, Profibus, Ethernet; Д/ИМ (I/O): КИП (SITRANS, SIREC, SIPART), BERO, MOBI, SIMODRIV, SIRIUS, MICROMASTER и пр.; ППО (Soft): Step5, Step7, S7Graph, S7PLCSim, Logo-Soft-	Реализация любых систем автоматизации, начиная от локальных (<10 вх./вых.) до сложных комплексных распределенных АСУ ТП в различных отраслях промышленности. Концепция –Totally Integrated Automation” - комплексной интегрированной автоматизации. Сотни внедрений по России	–Siemens” (Германия) Департамент «Автоматизации и приводов» (A&D) <a href="http://www.siemens.ru/ad/as">www.siemens.ru/ad/as</a>
--	---	---

Comfort, PDM, PID-Control, PCS-7, SCADA-системы: ProTool, WinCC.		
---	--	--

Одна из самых простых и популярных структур ПТК представлена на рис. 1.3 [2]. Все функциональные возможности системы четко разделены на два уровня. Первый уровень составляют контроллеры, второй – пульт оператора, который может быть представлен рабочей станцией или промышленным компьютером.

Уровень контроллеров в такой системе выполняет сбор сигналов от датчиков, установленных на объекте управления; предварительную обработку сигналов (фильтрацию и масштабирование); реализацию алгоритмов управления и формирование управляющих сигналов на исполнительные механизмы объекта управления; передача и прием информации из промышленной сети.



Рис.1.3. –Простая” структура ПТК

Пульт оператора формирует сетевые запросы к контроллерам нижнего уровня, получает от них оперативную информацию о ходе технологического процесса, отображает на экране монитора ход технологического процесса в удобном для оператора виде, осуществляет долговременное хранение динамической информации (ведение архива) о ходе процесса, производит коррекцию необходимых параметров алгоритмов управления и уставок регуляторов в контроллерах нижнего уровня.

Увеличение информационной мощности (количества входных/выходных переменных) объекта управления, расширение круга задач, решаемых на верхнем уровне управления, повышение надежностных

показателей приводят к появлению более сложных структур программно-технических комплексов (рис. 1.4).

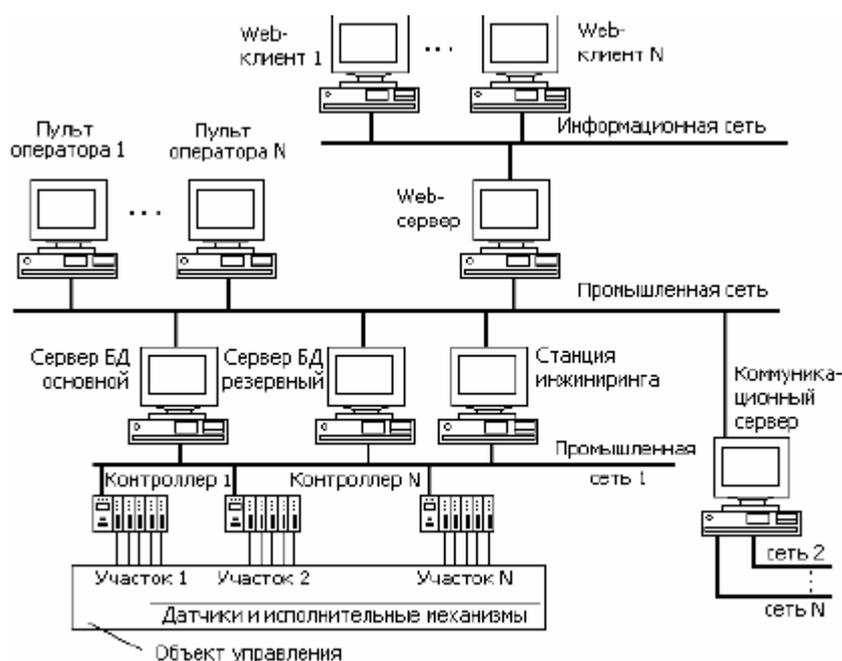


Рис. 1.4. структура ПТК

Большинство серверов и рабочих станций функционируют под управлением ОС Windows T/2000/XP. Это связано с тем, что операционные системы (ОС) семейства Windows фирмы Microsoft практически полностью завоевали рынок не только офисных компьютеров, но и активно осваивают уровень промышленной автоматизации. Некоторые технологии Microsoft уже сейчас стали промышленным стандартом.

Использование архитектуры «Клиент-сервер» позволяет повысить эффективность и скорость работы всей системы, повысить надежность и живучесть системы за счет резервирования серверов, рабочих станций, территориальным распределением решаемых задач.

Серверы, как правило, выполняются на базе промышленных компьютеров и являются резервируемыми. Наименование серверов в различных ПТК различается: сервер базы данных реального времени, сервер оперативной и архивной базы данных, сервер ввода-вывода и др. Основные функции: сбор, обработка оперативных данных от устройств связи с объектом и контроллеров;

передача команд управления контроллерам с верхнего уровня управления; хранение и отображение информации о заданных переменных; предоставление требуемой информации клиентским рабочим станциям; архивация трендов, печатных документов и протоколов событий.

Современные ПТК, как правило, включают станции инжиниринга, выполненные на базе персональных компьютеров в офисном исполнении. С их помощью осуществляется инженерное обслуживание контроллеров: программирование, наладка, настройка. В некоторых ПТК станции

инжиниринга позволяют производить также инженерное обслуживание рабочих станций.

Еще одна сторона современных ПТК связана с активным проникновением Internet-технологий на уровень промышленной автоматизации. Сегодня все ведущие производители инструментального программного обеспечения для систем управления технологическими процессами, как зарубежные, так и отечественные, встраивают поддержку данных технологий в свои продукты. Наиболее широким применением Internet-технологий в АСУ ТП является публикация на Web-серверах информации о ходе ТП и всевозможных сводных отчетов. Web-серверы имеют возможность взаимодействовать с сервером БД, который хранит необходимую информацию о процессе. Это позволяет клиенту через браузер (Internet-обозреватель) делать необходимые запросы к базе данных. Такой подход к тому же минимизирует затраты, так как не требует на стороне клиента установки какого бы то ни было дополнительного программного обеспечения, кроме обычных программ-браузеров (Internet Explorer, Netscape Navigator и др.).

В современных экономических условиях вследствие финансовых трудностей большинство предприятий не может провести комплексную автоматизацию всего производства или его модернизацию. Приходится выбирать наиболее слабое место в производстве и модернизировать именно его, при этом обеспечивая совместимость с существующими работающими подсистемами АСУ. На этом этапе приходится решать следующие задачи:

- согласование физических интерфейсов и протоколов различных промышленных сетей (Profibus, CANbus, Modbus, LonWork и др.) и локальных сетей с их базовыми протоколами (TCP/IP, IPX/SPX, NetBios и т.д);
- поддержка работы модемов и радиомодемов для обеспечения взаимодействия с удаленными контроллерами и подсистемами;
- синхронизация взаимодействия различных подсистем, обеспечение единого времени и адресации параметров системы (при необходимости формирования базы данных системы);
- обеспечение взаимодействия со SCADA-системами, СУБД и человеко-машинными интерфейсами верхнего уровня.

Эти задачи решаются с использованием различного рода коммутаторов, концентраторов и интеграторов. Их аппаратное и программное оснащение в зависимости от выполняемых функций может варьироваться в широком диапазоне от недорогого контроллера, выполняющего роль шлюза для нескольких промышленных сетей, до крупного сервера с широким набором функций, объединяющего большое количество неоднородных подсистем.

Коммуникационный сервер (сервер-шлюз, коммутатор). Основные функции серверов этого типа - поддержка различных промышленных и локальных сетей и обеспечение передачи данных из одной сети в другую (рис.1.5).

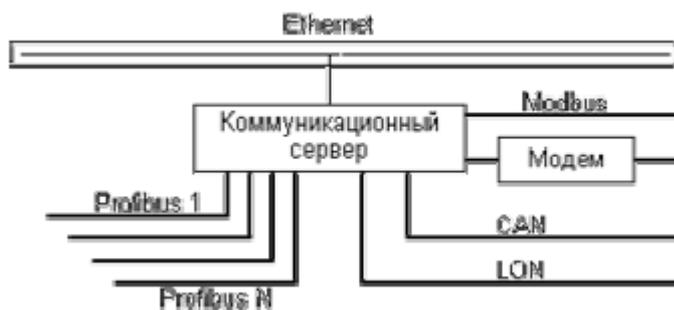


Рис.1.5. Коммуникационный сервер

Концентратор (сервер данных) включает в себя функции коммуникационного сервера, выполняя при этом такие дополнительные функции, как сбор и первичная обработка данных от группы контроллеров нижнего уровня, а также обеспечивает информационный канал к системам верхнего уровня (архивирование и визуализация данных) (рис. 1.6).

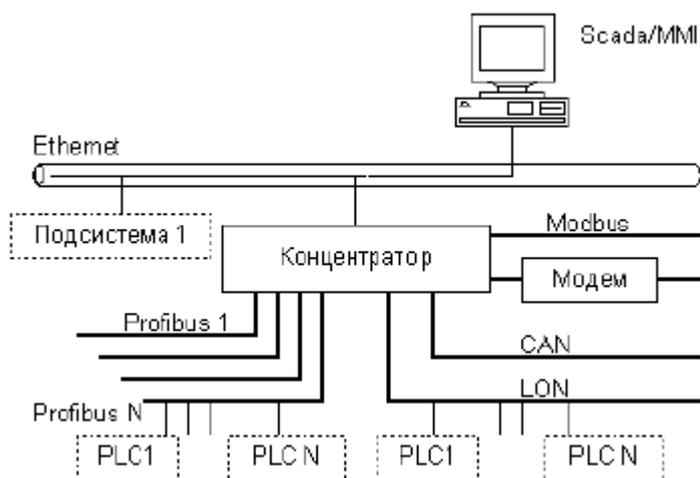


Рис.1.6. Концентратор

Интеграционный сервер обеспечивает интеграцию различных подсистем в единую АСУ ТП. Это полнофункциональные серверы, наиболее мощные среди всех типов серверов по аппаратному и программному оснащению. Они включают в себя функции коммуникационного сервера и концентратора. Кроме этого, выполняют широкий набор специальных функций по обработке данных, реализуют комплексные алгоритмы управления, обеспечивают синхронизацию работы подсистем и поддержку единого времени в системе и пр. (рис. 1.7).

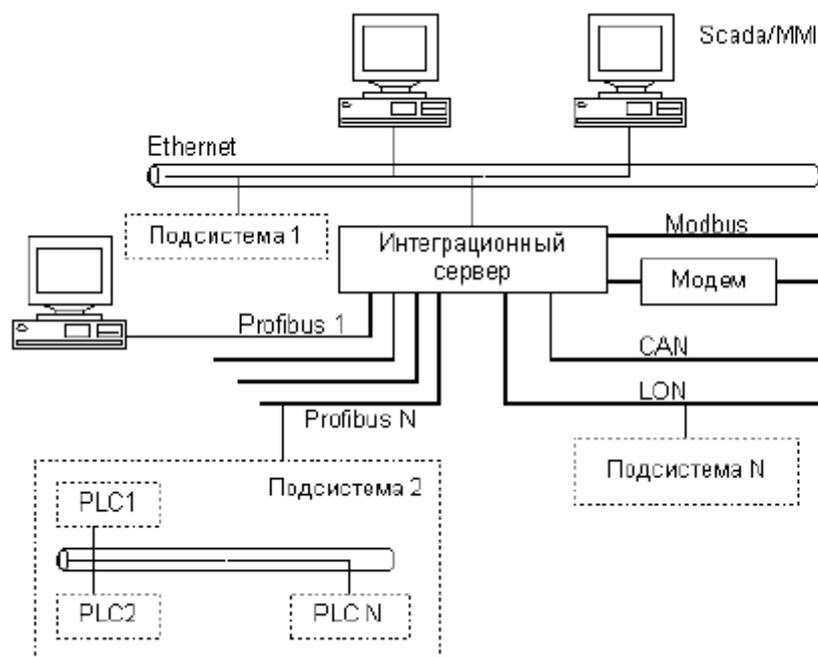


Рис. 1.7. Интеграционный сервер

## 2. Технические средства получения информации о состоянии объекта управления

### 2.1. Общие сведения о датчиках

Датчик - это устройство, воспринимающее измеряемый параметр и вырабатывающее соответствующий электрический сигнал в целях передачи его для дальнейшего использования или регистрации. Измерения технически осуществляются при помощи измерительных преобразователей, использующих те или иные физические принципы. Часто в технической литературе понятия датчиков (pick up) и измерительных преобразователей (sensor) между собой не разделяют, и измерительные преобразователи называют просто датчиками. Хотя с функциональной точки зрения понятия измерительного преобразователя и датчика совпадают, но в конструкторской практике под датчиком следует понимать первичный измерительный преобразователь, заключенный в корпус и снабженный устройствами для его установки и фиксации на объекте, а также кабелем для передачи сигнала и соответствующими разъемами. При изучении удобнее пользоваться термином «датчик».

При построении датчиков используются различные физические принципы, которые в значительной степени определяют области рационального применения того или иного датчика. В зависимости от принципа действия, используемого при преобразовании входного сигнала в электрический выходной сигнал, датчики подразделяют на: контактные, потенциометрические, тензометрические, электромагнитные,

пьезоэлектрические, емкостные, термоэлектрические, магнитоэлектрические, фотоэлектрические, ультразвуковые и др. Необходимо отметить, что этот ряд непрерывно расширяется - все новые и новые физические явления используются для преобразования входных сигналов с развитием науки, техники, технологии, появлением новых материалов.

По характеру формирования выходного сигнала датчики делят на параметрические и генераторные.

Параметрический датчик изменяет какой-либо из своих параметров под воздействием самой измеряемой величины и требует подключения к какому-либо внешнему источнику энергии, например потенциметрические, тензометрические, емкостные и др..

Генераторный датчик сам генерирует выходной сигнал и не требует подключения к внешнему источнику энергии. В качестве примеров датчиков такого рода можно назвать различные пьезоэлектрические датчики давления или тахогенераторные датчики скорости вращения.

Основные характеристики и параметры датчиков:

Функция преобразования измерительного преобразователя-это зависимость выходной величины данного измерительного преобразователя от входной, задаваемая либо аналитическим выражением, либо графиком, либо таблицей. Функция преобразования измерительного преобразователя иногда называют статической характеристикой датчика, так как это зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин.

Чувствительность преобразователя - это именованная величина, показывающая, насколько изменится выходная величина при изменении входной величины на одну единицу. Для термопары единицей чувствительности будет мВ/К (милливольты на 1 градус Кельвина), для регулируемого электродвигателя - (с<sup>-1</sup>)/В (обороты в секунду на 1 вольт) и т.д.

Разрешающая способность преобразования - это наименьшее изменение входного сигнала, которое может быть измерено преобразователем.

Точность (погрешность) измерения показывает, насколько показанное датчиком значение параметра близко к его истинному значению. Обычно точность задается в процентах от полной шкалы измерительного прибора и в результате представляет собой некоторую абсолютную величину.

Допустимый диапазон измерений, представляет собой разность между допустимыми максимальным и минимальным установившимися значениями измеряемой величины.

Динамической характеристикой датчика описывает поведение выходной величины во время переходного процесса при мгновенном (ступенчатом) изменении измеряемой входной величины.

Для динамических характеристик датчиков характерны три случая.

Первый случай имеет место, когда выходная величина датчика просто повторяет (в определенном масштабе) входную величину.

Второй случай соответствует аperiодическому характеру переходного процесса, когда выходная величина постепенно приближается к новому установившемуся значению монотонным образом (монотонно убывая или же монотонно возрастая).

Третий случай соответствует колебательному характеру переходного процесса, когда выходная величина постепенно приближается к новому установившемуся значению, совершая за время переходного процесса одно или несколько колебаний, превышая на время новое значение выходной величины, а затем возвращаясь к нему.

Показателями качества переходного процесса являются:

- время завершения переходного процесса;
- величина превышения в течение переходного процесса выходного параметра над его новым установившимся значением;

Динамическая характеристика однозначно связана с полосой пропускания датчика, которая представляет собой разность между максимальной и минимальной частотами изменения входной величины, для работы с которыми предназначен данный датчик.

Датчики имеют на выходе электрические унифицированные сигналы. Некоторые из них: непрерывные токовые (0...5 мА, 0...20 мА), непрерывные напряжения постоянного тока (0...10 мВ, 0...50 мВ, 0...1 В, 0...10 В, 0...12 В, 0...24 В); непрерывные частотные (1500...2500 Гц, 4000...8000 Гц); непрерывные напряжения переменного тока 50 Гц (0...1 В, 0...2 В) и др. Все выше перечисленные электрические сигналы определены стандартами.

В последнее время все большее распространение получают датчики с цифровым параллельным или последовательным выходным интерфейсом (UART, SPI, I<sup>2</sup>K и др.).

При изучении датчиков для систем автоматизации и управления удобно разделить датчики на три следующие группы [3]:

1. Датчики электромагнитных переменных, к которым относятся датчики тока, напряжения, мощности и магнитного потока.
2. Датчики механических переменных: датчики угловых и линейных перемещений и скоростей, датчики силы, момента деформации и др.
3. Датчики технологических переменных: температуры, давления, уровня и расхода.

## **2.2 Датчики электромагнитных переменных**

### **2.2.1. Датчики тока**

Специализированные датчики тока применяются для мониторинга и диагностики электрических цепей, схем защиты, обнаружения отказов электрооборудования и аварийных состояний различных типов нагрузки.

В промышленности наиболее широко применяются три способа измерения токов: резистивный, на основе эффекта Холла и при помощи трансформатора тока, последний может быть использован только в цепях

переменного тока. В таблице 2.1 представлены основные характеристики перечисленных методов измерения [5].

Таблица 2.1

Метод	Ток	Диапазон измерения, А	Гальваническая развязка	Вносимые потери	Внешний источник питания	Частотный диапазон, кГц	Погрешность измерения тока, %	Относительная стоимость
Резистор	Постоянный	<20	Нет	Есть	Нет	~100	<1	Очень низкая
	Переменный	Нет				>500		Низкая
Ячейка Холла	Постоянный и переменный	<1000	Есть	Нет	Есть	~200	<10	Средняя/высокая
Трансформатор тока	Переменный	<1000	Есть	Есть	Нет	Сеть переменного тока	<5	Высокая

Резистивные датчики – самые дешёвые, линейные и точные. Однако им присущи потери, вносимые в цепь измерения, отсутствие гальванической развязки, ограничение полосы пропускания, обусловленное паразитной индуктивностью большинства мощных резисторов. Низкоиндуктивные измерительные резисторы существенно дороже, но могут быть использованы для измерения токов в диапазоне частот до нескольких мегагерц. Для усиления напряжения, выделяющегося на токочувствительном резисторе необходим усилитель.

Первые промышленные датчики на основе эффекта, открытого в 1897г. американским физиком Эдвином Холлом (Edwin H. Hall, 1855–1938), были разработаны в конце 1960-х. Однако широкое использование интегральных и гибридных датчиков тока на основе эффекта Холла долгое время сдерживалось их высокой стоимостью. К началу 1990-х были разработаны новые технологии, позволившие значительно снизить себестоимость производства самих ячеек Холла и интегральных схем на их основе. Это обусловило бурный рост предложения промышленных датчиков тока и других магниточувствительных полупроводниковых приборов.

Эффект Холла заключается в появлении напряжения на концах полоски проводника или полупроводника, помещённого перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (см. рис.2.1). Для меди напряжение Холла составляет  $\pm 24$  мкВ/кГс, для полупроводника – свыше  $\pm 10$  мВ/кГс (с учётом направлений магнитного поля и тока), что вполне достаточно для построения промышленных датчиков тока, главными преимуществами которых является отсутствие вносимых потерь и «естественная» гальваническая развязка. В датчиках Холла выходное напряжение пропорционально приложенному магнитному полю. По сравнению с резистивными датчиками тока, приборы на основе ячейки Холла имеют более узкий частотный диапазон, паразитное напряжение смещения (в некоторых конструкциях), низкую точность, высокую стоимость и требуют для работы внешний источник питания.

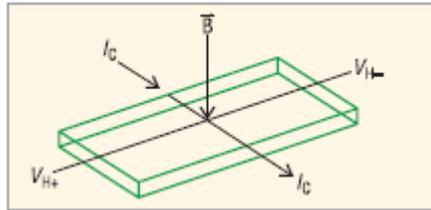


Рис. 2.1. Возникновение ЭДС Холла

На рис. 2.2 и 2.3 схематически представлены две основные разновидности датчиков тока на основе эффекта Холла – разомкнутого и замкнутого типов соответственно, где  $I_{\text{primary}}$  ток в первичной цепи,  $I_{\text{secondary}}$  – ток во вторичной цепи,  $V_{\text{out}}$  – выходное напряжение усилителя, пропорциональное току в первичной цепи. Датчики замкнутого типа (с компенсирующей обмоткой) обеспечивают высокую точность, в несколько раз более широкую полосу пропускания и, как правило, не имеют выходного смещения при нулевом токе. Их чувствительность прямо пропорциональная числу витков компенсирующей обмотки. Однако по стоимости они приближаются к трансформаторам тока.

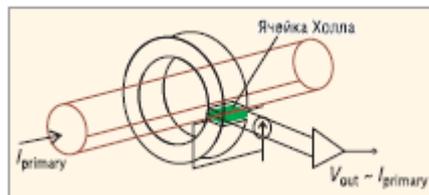


Рис.2.2. Холловский датчик тока разомкнутого типа

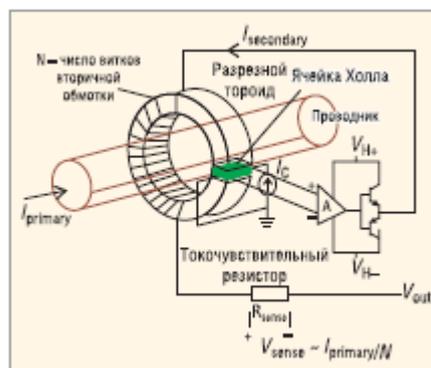


Рис.2.3. Холловский датчик тока замкнутого типа

Датчики на базе трансформаторов тока (ТТ) обычно работают на сетевой частоте (50, 60 или 400 Гц) и, естественно, не могут использоваться в цепях постоянного тока. Их стоимость превышает стоимость приборов на основе эффекта Холла. К преимуществам трансформаторных датчиков тока следует отнести отсутствие вносимых потерь и напряжения смещения при нулевом токе, также гальваническую развязку с высоким пробивным

напряжением. Кроме того, они не нуждаются в дополнительном источнике питания. Недостатком ТТ является насыщение сердечника при наличии в первичном токе постоянной составляющей. Для решения этой проблемы при изготовлении сердечника используют материалы с высокой магнитной проницаемостью, что, однако, увеличивает фазовый сдвиг в цепи измерения, уменьшает динамический диапазон и термостабильность.

Высококачественные низкоомные токоизмерительные резисторы выпускают компании Vishay (Vishay Intertechnology), IRC (TT Electronics), Panasonic (Electronic Components Division of Panasonic Industrial Company) и KOA (KOA Speer Electronics). Наиболее популярными являются безвыводные резисторы для поверхностного монтажа с номиналами от 0,01 до 1 Ом, паспортной мощностью до 5 Вт и допуском  $\pm 0,5\%$  и  $\pm 1\%$ . Номинал, рассеиваемая мощность и ТКС, как правило, выбираются таким образом, чтобы в реальных условиях эксплуатации уход сопротивления резистивного датчика из-за саморазогрева не превышал 0,1% при максимальном падении напряжения порядка 100 мВ. Для обеспечения высокой разрешающей способности измерения, с учетом шумовых параметров большинства специализированных ИС для измерителей тока предпочтительным является номинал 0,02 Ом, вносящий минимальное возмущение в измеряемую цепь с током 5 А. В цепях с большими токами используют резисторы 0,00025...0,01 Ом.

Распространенная схема усилителя напряжения датчика тока приведена на рис. 2.4.

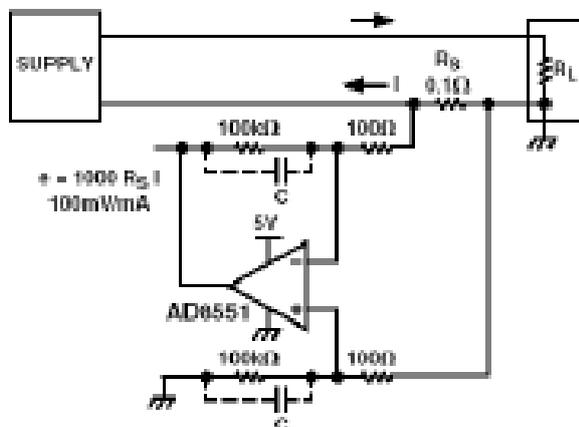


Рис.2.4. Усилитель напряжения датчика тока

Для этого применяются как стандартные операционные измерительные усилители, например, AD6551, INA118, MAX4372 и аналогичные, так и специализированные ИС, например, типа INA169 фирмы Texas Instruments/Burr\_Brown, Потребляемый ток ИС составляет всего 60 мкА, полоса пропускания – до 440 кГц, типовое значение КОСС = 115 дБ на постоянном токе. Для обеспечения гальванической развязки резистивного датчика тока и схемы управления компания Agilent Technologies выпускает микросхемы HCPL-7510/7520, схема включения которых приведена на

рис.2.5. Полоса пропускания равна 100 кГц, погрешность линейности 0,06%, ИС выполнены в корпусах DIP 8.

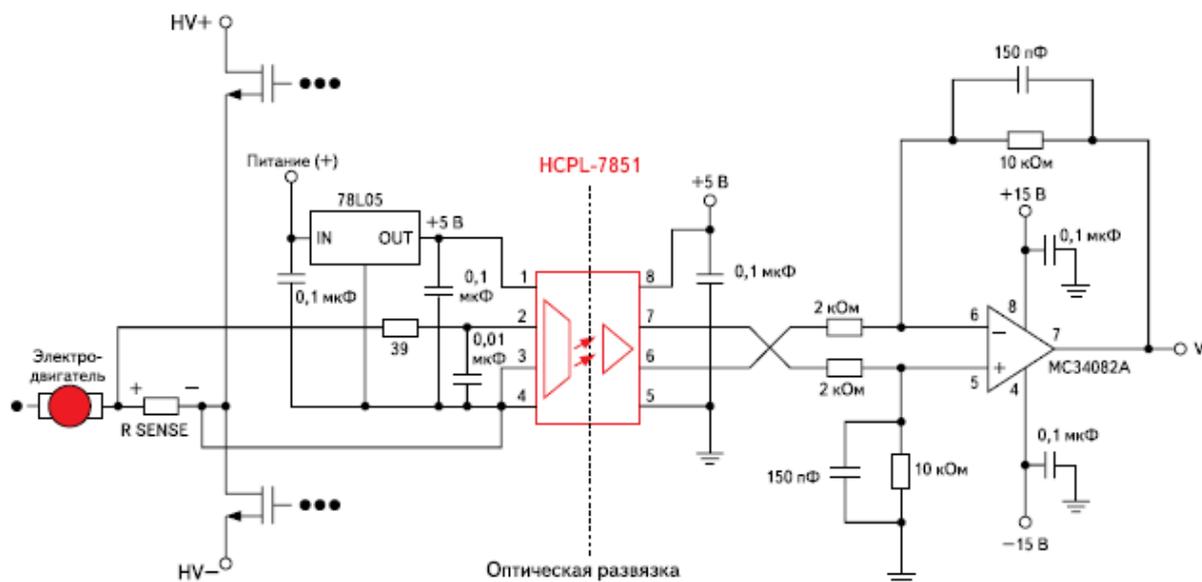


Рис. 2.5. Схема включения изолирующего усилителя HCPL-7510/7520

Рассмотрим только некоторые примеры выпускаемых датчиков Холла и трансформаторов тока.

Датчики холла выпускают следующие компании.

Компания Honeywell предлагает широкую номенклатуру функционально законченных холловских датчиков тока разомкнутого и замкнутого типов. Компания Allegro MicroSystems выпускает разнообразные датчики Холла с логическим и линейным выходами, а также прецизионные линейные датчики Холла разомкнутого типа. Фирма Sentron производит недорогой линейный холловский датчик типа CSA-1V, размещённый в корпусе SOIC-8 предназначенный для измерения постоянного и переменного (до 100 кГц) тока. ИС выполнена по стандартной КМОП технологии. Компания Asahi Kasei Electronics предлагает широкий выбор холловских датчиков. Линейные датчики тока выпускаются в шести сериях и рассчитаны на ток от 200 мА до 800 А.

Трансформаторы тока выпускают следующие компании.

Компания Inductive Technologies, выпускает малогабаритные трансформаторы тока сетевой частоты (50...400 Гц) серии TR, предназначенные для установки на печатную плату. Диаметр отверстия для проводника первичного тока (макс. 100 А) составляет 14,22 мм. Габариты трансформатора 35 x 35 x 14,3 мм.

Американская компания CR Magnetics специализируется на изготовлении различных магнитопроводов, трансформаторов и функционально

законченных датчиков на их основе. Новая серия датчиков тока повышенной точности CR4100 реализована на базе трансформаторов тока, позволяет измерять значение переменного тока (до 150 А) с повышенным содержанием гармоник и удовлетворяет всем международным стандартам. Диапазон измерения двух и трёхканальных приборов ограничен током 30 А.

### 2.2.2. Датчики напряжения

Часто измеряемое напряжение необходимо понизить, для того чтобы затем подать на измерительный вольтметр, схему дальнейшей обработки сигнала или вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В простейшем варианте для этого может быть использован резистивный делитель напряжения, однако при этом не обеспечивается гальваническая развязка между силовой цепью и последующей схемой обработки сигнала. Поэтому ряд фирм выпускает специализированные датчики, которые преобразуют высоковольтные сигналы в силовых цепях в сигналы низкого напряжения, обеспечивая гальваническую развязку[6]. В основе действия датчиков также как и в датчиках тока используется эффект Холла. Измеряемое напряжение снимается с внешнего резистора подключаемого к выходу датчика рис. 2.6. Сопротивление резистора выбирается исходя из номинального выходного тока датчика. В таблице 2.2 приведены параметры датчиков фирмы LEM.

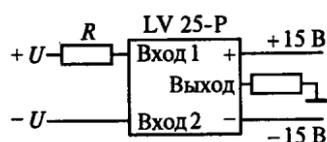


Рис.2.6. Схема подключения датчика напряжения фирмы LEM

Таблица 2.2

Тип датчика	Входной ток, мА	Входное напряжение, В	Точность, %	Выходной сигнал, мА
LV 25-P	10	10...50	0.6	25
LV 100	10	100...2500	0.7	50

### 2.2.3. Датчики магнитного поля

Для измерения напряженности магнитного поля применяются магниторезистивные датчики и датчики, работающие на основе эффекта Холла. Рассмотрим датчики, выпускаемые фирмой Honeywell [7]. Выделяются две большие группы магниторезисторов, которые условно можно разделить на «монолитные» и «пленочные». «Пленочные» магниторезисторы получили распространение в последние годы в результате развития технологии их изготовления.

В основе действия датчиков лежит анизотропный магниторезистивный эффект, который заключается в способности пермаллоевой пленки изменять свое сопротивление в зависимости от взаимной ориентации протекающего через нее тока и направления ее вектора намагниченности (рис. 2.7). Внешнее магнитное поле поворачивает вектор намагниченности пленки  $M$  на угол  $Q$ . Величина  $Q$  зависит от направления и величины этого поля. При этом сопротивление пленки  $R \sim \cos 2Q$ .

Для увеличения чувствительности датчика четыре идентичных пермаллоевых пленки соединяются по мостовой схеме (рис. 2.8). Датчик измеряет внешнее магнитное поле, действующее вдоль его чувствительной оси. Это поле вызывает изменение сопротивления плеч моста, при этом выходное напряжение получает приращение. Типовая передаточная характеристика одноосевого датчика фирмы Honeywell приведена на рис. 2.9.

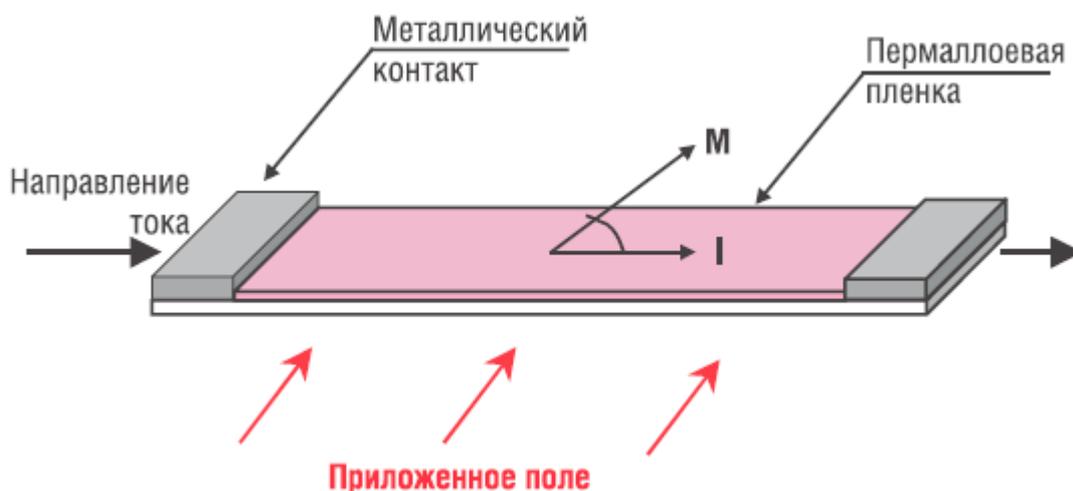


Рис.2.7 . Пермаллоевая магниторезистивная пленка

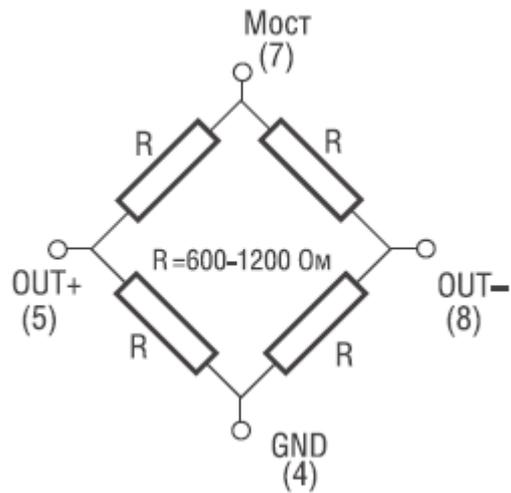


Рис.2.8. Упрощенная схема магниторезистивного датчика

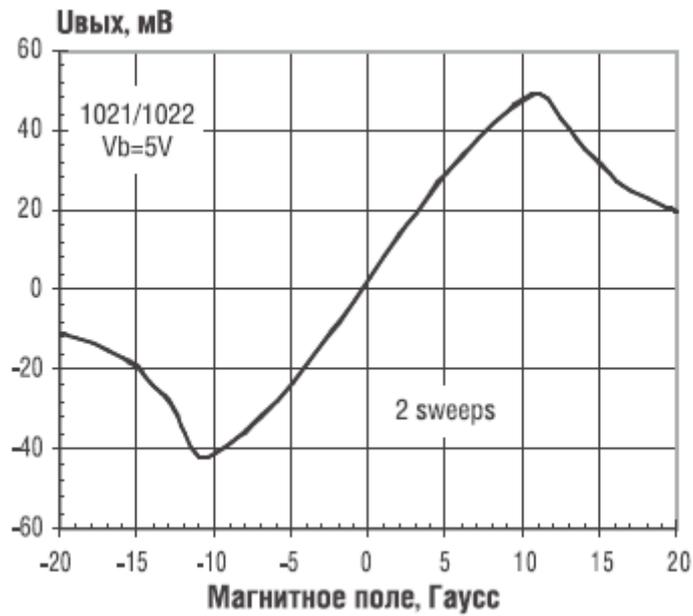


Рис.2.9. Типовая передаточная характеристика магнитоэлектрического датчика Honeywell

Параметры некоторых магниторезистивных датчиков приведены в табл. 2.3. Такие датчики обладают высокой чувствительностью и применяются в основном для измерения напряженности магнитного поля Земли (создания электронных компасов).

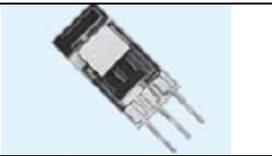
Таблица 2.3

Наименование	Кол-во осей	Чувств. мВ/В/Гс	Сопротивление моста, Ом	Диапазон измерения, Гаусс	Корпус
HMC1001	1	3.2	850...1100	$\pm 2$	
HMC1002	2	3.2	850...1100	$\pm 2$	
HMC1021S	1	1	1000...1100	$\pm 6$	
HMC1052L	2	1	1000	$\pm 6$	
HMC1053	3	1	1000	$\pm 6$	

Компания Honeywell предлагает широкий ассортимент датчиков Холла, предназначенных для работы в устройствах промышленной автоматики и системах сбора данных. Основными областями применения датчиков Холла являются системы контроля положения объекта в промышленном оборудовании, робототехнике и силовых приводах. Контроль состояния фильтров и уровней жидкостей, а также осуществление контроля положения вращающихся устройств, контроль величины тока. Условно все датчики Холла можно разделить на две группы: с линейным и логическим выходом.

Датчики с линейным (табл.2.4) выходом обычно применяются для определения небольших перемещений или построения более сложных датчиков, например в составе датчиков тока с гальванической развязкой. Они состоят из полупроводникового элемента Холла, стабилизатора питания, дифференциального усилителя и выходного каскада. В зависимости от модели, выходной каскад датчика может представлять собой усилитель на биполярном транзисторе, включенном по схеме с открытым коллектором или по двухтактной схеме (комплементарный выход).

Таблица 2.4

Серии	Измеряемый диапазон, Гс	Напряжение питания, В	Выход	Корпус
SS19	$\pm 400$	4...10	Откр. коллектор	
SS59ET	$\pm 1000$	3...6,5	Откр. коллектор	
SS94	$\pm 100 \dots \pm 2500$	6.6...12.6	Компл. вых	
SS494B	$\pm 420$	4,5...10,5	Компл. вых	
SS42	$\pm 185$	4,5...16	2 компл.вых	

Датчики Холла с логическим выходом (табл.2.5) обычно применяются для определения наличия какого-либо ферромагнитного объекта в поле «зрения» датчика. В отличие от линейных датчиков магнитного поля, выход этих приборов, в зависимости от величины приложенного магнитного поля, принимает всего два состояния: высокий или низкий уровень. Выходной сигнал конвертируется из линейного с помощью триггера Шмидта. Благодаря гистерезисной характеристике триггера, повышается помехоустойчивость датчика, устраняются ложные срабатывания.

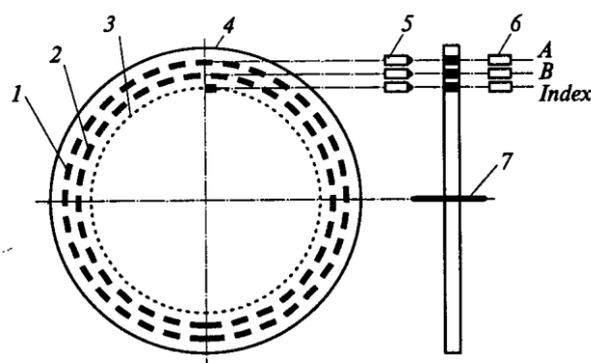
Таблица 2.5

Серии	Диапазон работы, Гц	Напряжение питания, В	Тип датчика	Назначение
255	4...25	3.8...30	Омнипол.	Определение положения внешнего магнита
255	140...390	4.5...24 3.8...30	Унипол., бипол.	Определение положения внешнего магнита
255	215...430; $\pm 35$	4.5...16	Унипол., бипол.	Определение положения внешнего магнита

## 2.3. Датчики механических переменных

### 2.3.1. Оптоэлектронные датчики угловой скорости и углового положения

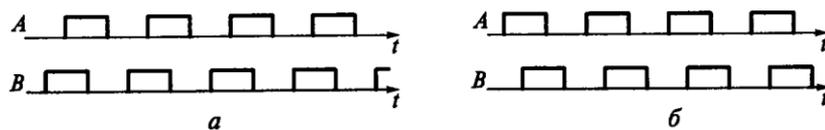
Для измерения угловой скорости и углового положения используют инкрементальные шифраторы перемещений (инкрементальные энкодеры). В корпусе датчика на валу крепится прозрачный пластиковый кодирующий диск, на котором в общем случае нанесены три дорожки непрозрачных меток [6] (рис. 2.10). На первых двух дорожках А и В число меток одинаково, метки по окружности расположены равномерно, но со сдвигом на четверть периода по окружности. На третьей (индексной) дорожке всего только одна метка, фиксирующая точку отсчета. При вращении диска световые потоки от источников света периодически перекрываются непрозрачными метками, что приводит к появлению импульсных сигналов на выходе датчика.



1 — дорожка А; 2 — дорожка В; 3 — индексная дорожка; 4 — кодирующий диск;  
5 — источники света; 6 — фотоприемники; 7 — ось вращения

Рис.2.10. Шифратор приращений

Число меток, расположенных на дорожках А и В, определяет разрешающую способность датчика. Современные технологии позволяют распознавать метки размером в несколько микрон. При диаметре диска в несколько сантиметров разрешающая способность составляет до 10000 меток/оборот. При равномерном вращении шифратор формирует две сдвинутые друг относительно друга на 90 градусов периодические импульсные последовательности, путем измерения частоты следования импульсов сигнала А или В, определяют угловую скорость вращения, по разности фаз сигналов А и В определяют направление вращения (Рис.2.11).



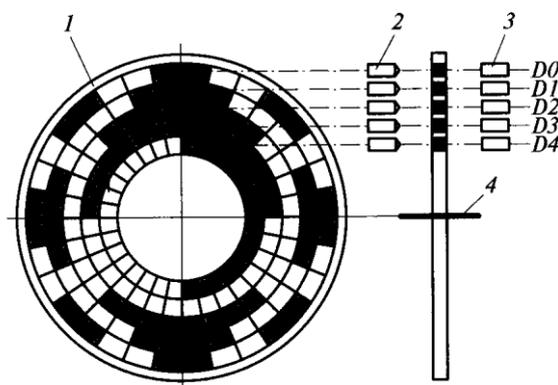
а-при движении по часовой стрелке, б-при движении против часовой стрелки

Рис.2.11. Выходные сигналы шифратора приращений

Сигнал канала I появляется один раз за оборот и используется для определения начала отсчета при определении углового положения вала. Если сбрасывать счетчик в момент появления сигнала I, то его показания будут соответствовать угловому положению вала.

Для измерения линейной скорости движения используются рассмотренные шифраторы, дополненные мерными колесами, осуществляющими преобразование линейного перемещения в угловое. При известном диаметре мерного колеса R линейная скорость v вычисляется по угловой скорости n (об/сек):  $v=2\pi nR$ .

В электрическом приводе используются оптоэлектронные датчики положения, известные как абсолютные шифраторы или абсолютные энкодеры (рис.2.12), которые осуществляют преобразование углового положения вала в двоичный код. Абсолютный шифратор в отличие от шифратора приращений имеет значительно больше дорожек на кодирующем диске. Количество дорожек определяет разрядность преобразования. Прозрачный кодирующий диск разделяется на сектора. Каждый сектор разделяется на отдельные концентрические дорожки. Сектора кодируются и код сектора наносится на дорожки в виде последовательности непрозрачных меток. Источники и приемники света расположены напротив каждой дорожки. В любой момент времени она обеспечивает считывание двоичного кода, соответствующего угловому положению вала. При кодировании используется код Грея, в котором две соседние кодовые комбинации отличаются только одним битом.



1 — кодирующий диск; 2 — источники света; 3 — фотоприемники; 4 — ось вращения

Рис. 2.12. Абсолютный шифратор

Для преобразования кода Грея в нужный выходной код схема абсолютного шифратора содержит соответствующий преобразователь кода. При пяти дорожках, показанных на рис. число кодовых комбинаций равно  $2^5 = 32$ . Если, например, число дорожек составляет 13, это обеспечивает  $2^{13} = 8192$  отсчета на оборот диска. Данные с выхода абсолютного шифратора могут быть считаны в любой момент времени, при этом при включении и последующем выключении датчика данные не теряются. Современные абсолютные шифраторы часто снабжаются стандартными последовательными интерфейсами, обеспечивающими скорость передачи данных до 12 Мбит/с. Производством абсолютных шифраторов занимаются фирмы Omron Electronics, Peperl + Fuchs, Balluff. В таблице 2.6 приведены параметры ряда абсолютных шифраторов фирмы Peperl + Fuchs.

Таблица 2.6.

Модель	AVE10	AVM10	SCS10	PVM10
Разрядность	12	24	13	25
Число оборотов	1	4096	1	4096
Выходной код	Двоичный, код Грея	Двоичный, код Грея	Двоичный, BCD-код, код Грея	Двоичный
Интерфейс	RS422, SSI	RS422, SSI	Параллельный	RS485

### 2.3.2. Потенциометрические датчики углового и линейного положения

Конструкции датчиков углового и линейного положения приведены соответственно на рис. 2.13 и рис. 2.14, а электрическая схема датчиков представляет собой линейно изменяющееся сопротивление с выводом от средней точки. Конструкция резистивного элемента определяет разрешающую способность датчика. Если этот элемент выполнен из проволоки (сплав с высоким удельным сопротивлением), разрешение зависит от числа витков на единицу длины элемента. Резистивный элемент может быть выполнен также из углерода или металлокерамической смеси. В режиме холостого хода (при нагрузке  $R_H \rightarrow \infty$ ) выходное напряжение потенциометрического датчика  $U_x$  пропорционально перемещению щётки  $x$ :  $U_x = (U_0/L)x$ , где  $U_0$  — напряжение питания датчика;  $L$  — длина намотки. Датчики углового положения могут быть как однооборотные, так и многооборотные, датчики линейного положения могут измерять положение в диапазоне от нескольких миллиметров до нескольких метров.

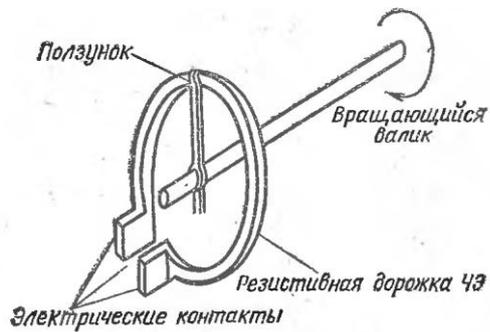


Рис.2.13. Датчик углового положения

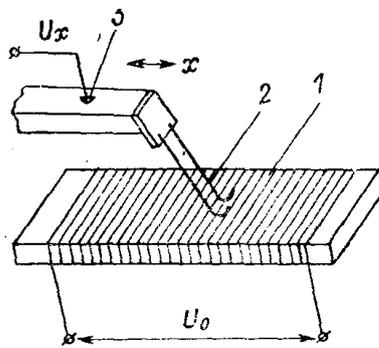


Рис. 2-1. Конструкция потенциометрического датчика

Рис.2.14. Датчик линейного положения

Параметры некоторых потенциометрических датчиков линейного положения фирмы Honeywell приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Тип датчика	Диапазон перемещения, мм	Сопротивление, кОм	Разрешение, мм
MM10-30	10...30	1...10	Менее 0.01
CLP13	12.7...101	1...20	Менее 0.01
CLP21	15...100	1...20	Менее 0.01
SPI/SPR18	25...150	1...20	Менее 0.01
LP/CPL	55...1000	2...500	Менее 0.01
CI18	25...150	1/5	Менее 0.01
CR18	10...50	1/5	Менее 0.01
RC20	50...250	2/8/10	Менее 0.01
MMS33	50...900	5/10	Менее 0.01
MSL38	100...2000	5/10/20	Менее 0.01

Достоинствами потенциометрических датчиков являются: простота конструкции; высокий уровень выходного сигнала (выходное напряжение — до нескольких десятков вольт) возможность работы, как на постоянном, так и на переменном токе. Недостатками являются: недостаточно высокая надежность и ограниченная долговечность из-за наличия скользящего контакта и истирания обмотки; влияние на характеристику сопротивления нагрузки; потери энергии за счет рассеяния мощности активным сопротивлением обмотки.

### **2.3.3. Магниторезистивные датчики угловой скорости, углового положения и линейного перемещения**

Принцип работы магниторезистивных датчиков рассмотрен в разделе 2.2.3. В данном разделе рассмотрим применение таких датчиков для измерения угловой скорости, углового положения и линейного перемещения [5].

Принцип измерения скорости вращения основан на детектировании изменения плотности магнитного потока в момент, когда ферромагнитный материал (шестерня) проходит вдоль чувствительной поверхности датчика (рис 2.15).

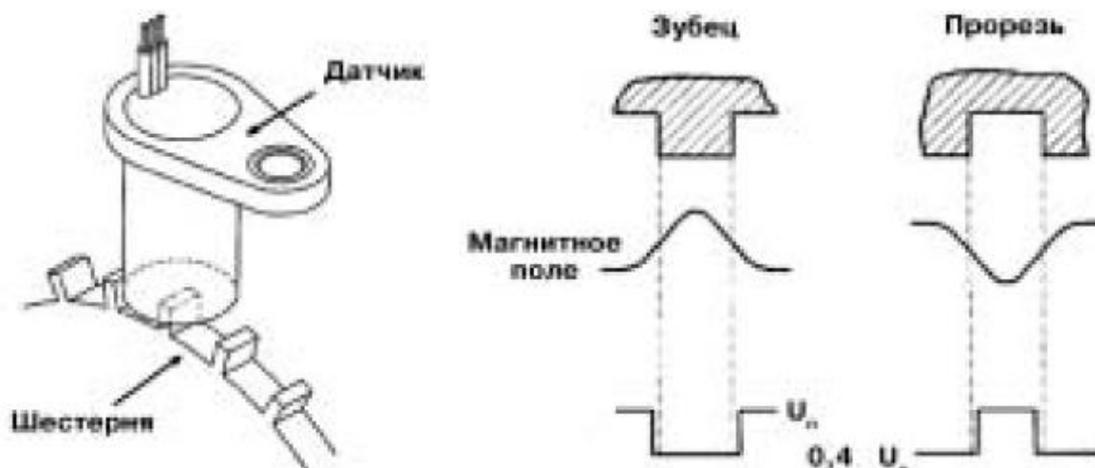


Рис.2.15. Принцип действия датчиков скорости вращения

Устройство включает в одном корпусе элемент Холла, усилитель, триггер Шмидта, стабилизатор питания и постоянный магнит. Примером служит датчик широкого применения (в том числе и для автомобильной техники) 1GT101DC, изображенный на рис. 2.16.



Рис.2.16. Датчик скорости вращения со встроенным магнитом 1GT101DC

Датчик отличается широкий диапазон рабочих температур (-40....150 °С) и напряжений питания (4,5.....24 В), а также широкий диапазон измеряемых частот (10.....3600 об/мин.). Упрощенная схема датчика приведена на рис.2.17.

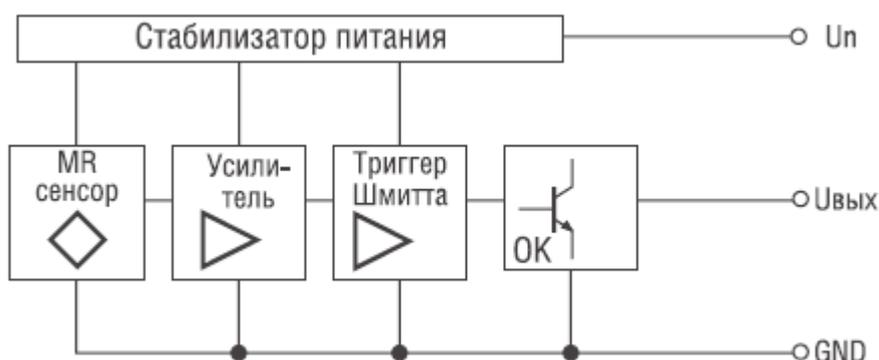


Рис. 2.17. Упрощенная схема датчика 1GT101DC

Для бесконтактного измерения угла поворота в диапазоне  $-45^\circ \dots +45^\circ$  и  $-90^\circ \dots +90^\circ$  и небольшого перемещения предназначены датчики НМС1501 и НМС1502, характеристики которых приведены в таблице 2.8, а принцип действия поясняется рис. 2.18.

Таблица 2.8

Наименование	Кол-во чувствит. осей	Рабочий диапазон, °	Чувствительность мВ/°	Разреш. способн., °	Типовое сопротивление, Ом	Полоса частот МГц	T раб, °С
НМС1501	1	$\pm 45$	2.1	0.07	5000	0...5.0	-55...150
НМС1512	2	$\pm 90$	2.1	0.05	2100	0...5.0	-55...150

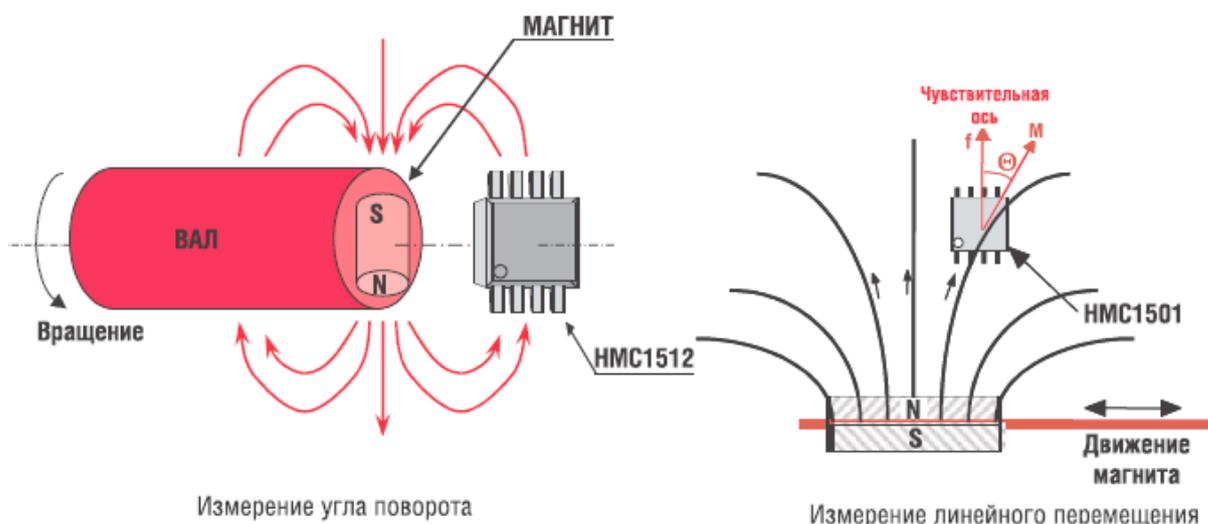


Рис. 2.18. Применение магниторезистивных датчиков для определения угла поворота и линейного перемещения.

Применение таких датчиков очень актуально в автомобильной промышленности (датчики положения дроссельной заслонки, датчики положения педали газа и т. д.).

Для измерения линейного перемещения используют датчики, которые состоят из герметичной измерительной головки, которая движется над координатной лентой, и самой координатной ленты. Такие датчики выпускаются, например, ООО «ИТМ» г. Томск. Конструкция датчика приведена на рис.2.19.

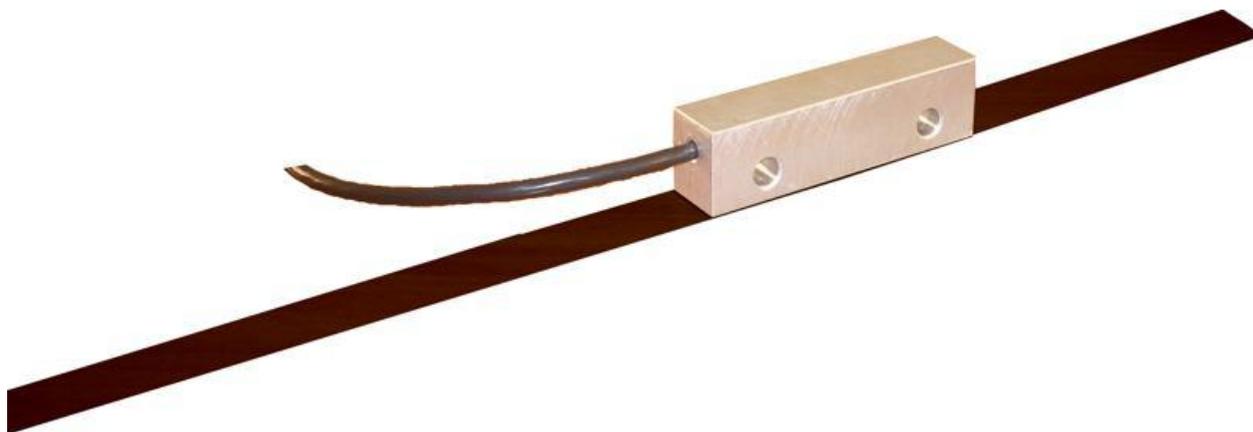


Рис.2.19. Датчик перемещений магнитный

Датчик магнитного поля детектирует градиент магнитного поля над магнитной лентой и преобразует его в аналоговые сигналы. Эти аналоговые сигналы преобразуются в значение положения. Выходной сигнал измерительной головки представлен в цифровом виде. Передача информации осуществляется посылками из трёх байт с периодичностью 5 миллисекунд (200 Гц).

Основные характеристики датчика ДПМ05:

Самоклеющаяся координатная лента.

Разрешение до 1 мкм.

Высокоскоростные измерения, до 0,4 м/с.

Измерительная длина до 1,5 м.

Цифровой выход (информация о положении и намагниченности ленты)

Подобные датчики могут применяться в деревообрабатывающей, металлообрабатывающей, текстильной, печатной, пластмассовой промышленности и на производстве упаковки. Они пригодны также для систем автоматизации сборочных конвейеров, лазерной, плазменной и гидроабразивной резки, производства микросхем и печатных плат и т.п.

#### **2.3.4. Тахогенераторные датчики измерения частоты вращения**

В системах автоматического управления широкое применение имеют тахогенераторы постоянного тока. Тахогенераторы представляют собой генераторы небольшой мощности, служащие для преобразования частоты вращения в электрический сигнал. Как правило, тахогенераторы выполняют с независимым электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением (рис. 2.20).

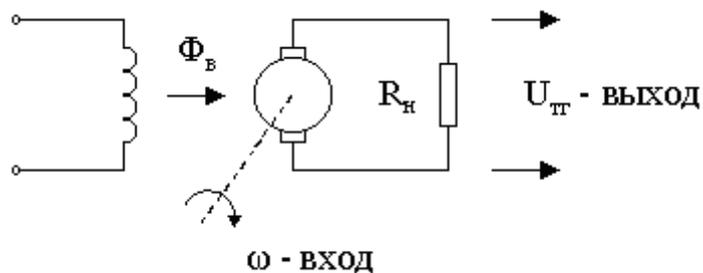


Рис.2.20. Схема подключения тахогенератора

Выходное напряжение тахогенератора определяется как:  $U_{ТГ} = K_{ТГ} \omega$ , где  $K_{ТГ}$  - коэффициент передачи тахогенератора, который определяет крутизну выходной характеристики тахогенератора. Однако, практически выходная характеристика отклоняется от линейной (рис.2.21) из-за реакции якоря, ослабляющей поток возбуждения  $\Phi_{в}$ .

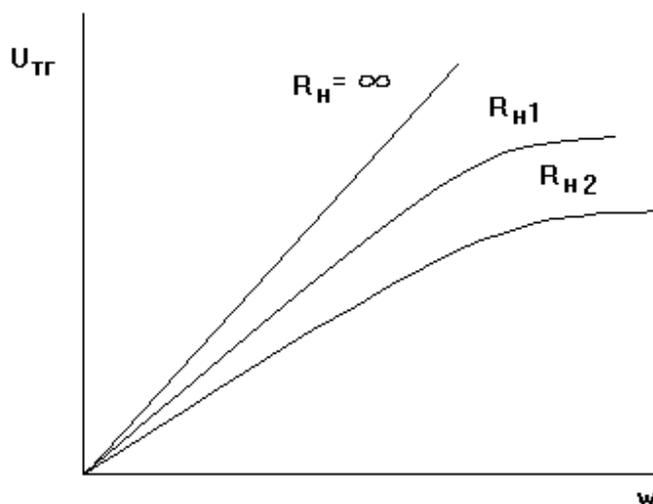


Рис.2.21 . Характеристики тахогенератора

Отклонение от линейности определяет одну из основных погрешностей тахогенератора. Для уменьшения ее следует нагружать тахогенератор на относительно большое сопротивление нагрузки  $R_{н}$  и использовать небольшой диапазон частот вращения.

### 2.3.5. Ёмкостные датчики линейного и углового положения

Ёмкостные преобразователи используют для измерения линейных и угловых перемещений, линейных размеров, уровня жидкостей, влажности и т.д.. Принцип действия ёмкостных измерительных преобразователей основан на изменении ёмкости конденсатора под действием входной преобразуемой величины - перемещения. Ёмкость конденсатора, имеющего две плоские обкладки (пластины) определяется соотношением:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d},$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м),  $S$ - площадь обкладок,  $d$ - расстояние между обкладками.

На емкость конденсатора можно влиять изменением расстоянием между обкладками (рис.2.22 а), площади перекрытия обкладок (рис. 2.22 б ), перемещением диэлектрика либо диэлектрической постоянной вещества, находящегося в зазоре между обкладками (рис.2.22 в ).

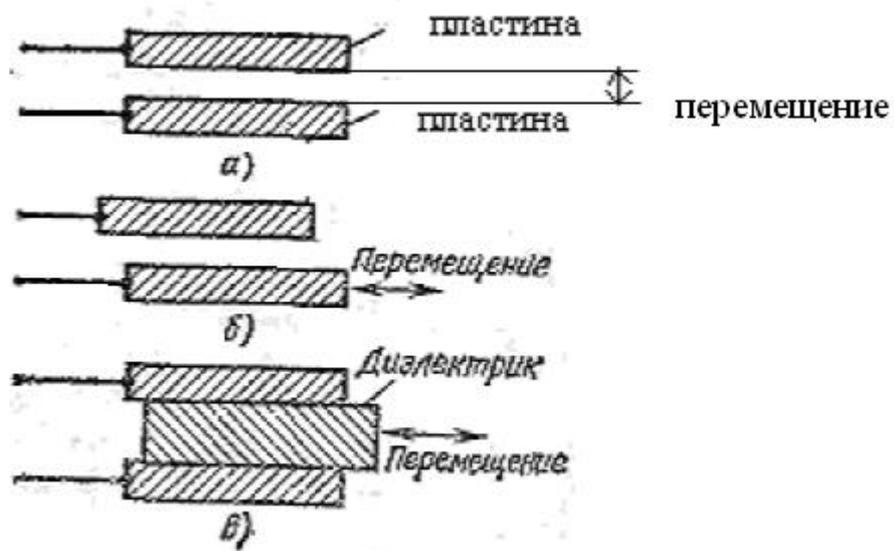


Рис.2.22. Принцип действия емкостных преобразователей

Соответственно зависимости емкости от расстояния между обкладками, площади перекрытия обкладок, перемещения диэлектрика приведены на рис. 2.23.

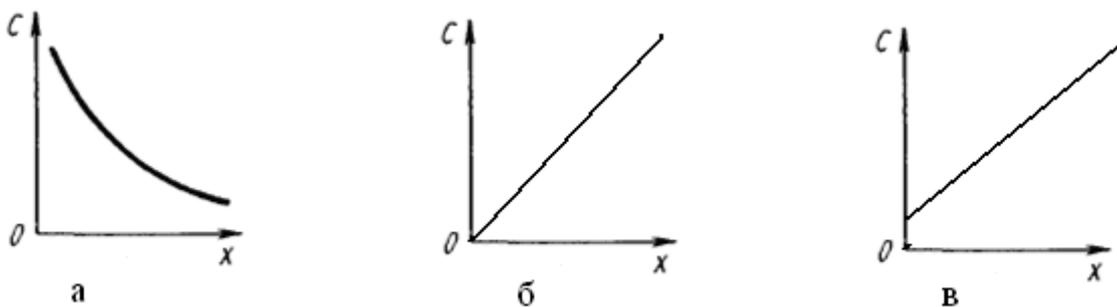


Рис.2.23. Зависимости емкости от расстояния между обкладками, площади перекрытия обкладок, перемещения диэлектрика

Емкостные датчики включают в колебательный контур генератора импульсов, при изменении емкости соответствующим образом изменяется частота генератора, по которой рассчитывается емкость, а затем и перемещение.

Емкостные преобразователи с переменной площадью перекрытия пластин используют для сравнительно больших перемещений (до десятков сантиметров), Такие преобразователи используют и для измерения угловых перемещений. Преобразователи с изменяемым расстоянием между пластинами используют для измерения небольших перемещений (до нескольких миллиметров) из-за нелинейности их характеристики. Преобразователи с изменением диэлектрической проницаемости среды между электродами используют для измерения уровня жидких и сыпучих веществ, для анализа состава и концентрации веществ в химической промышленности, счета изделий, охранной сигнализации и т.д..

На рис. 2.24 показан емкостный датчик уровня. В этом датчике емкость изменяется в зависимости от уровня жидкости, поскольку изменяется диэлектрическая проницаемость среды между неподвижными пластинами.

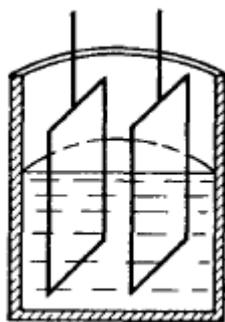


Рис.2.24. Емкостный датчик уровня

Емкостные датчики используют и для измерения влажности. В качестве примера рассмотрим датчики влажности, выпускаемые фирмой Honeywell, серии НН. Датчики содержат гидрофобный полимерный емкостный элемент и встроенную интегральную схему нормализации и усиления сигнала. Датчики имеют металлический корпус с расстоянием между выводами 2.54 мм. Выходной сигнал-напряжение 0.8...3.9 В.

Области применения датчиков влажности: климатический контроль в различных промышленных, складских и административных помещениях, контроль экологических параметров и технологических процессов, метеорологический контроль. Внешний вид датчиков показан на рис. 2.25.



Рис. 2.25. Датчик влажности серии НН

### 2.3.6. Индуктивные датчики положения

Индуктивные датчики применяют для измерения различных механических перемещений, обычно в пределах 0.01- 50 мм. Работа их основана на свойстве катушки индуктивности изменять индуктивное сопротивление при введении в нее ферромагнитного сердечника или при изменении зазора в сердечнике, на котором помещена эта катушка. Для измерения очень малых перемещений (до 2 мм) применяют датчики с изменяющейся величиной зазора (рис.2.26 а) или, как их еще называют с подвижным якорем. При изменении зазора  $\delta$  сердечника индуктивное сопротивление катушки изменяется, после его измерения рассчитывают индуктивность катушки, а затем и само значение  $\delta$ . Датчик на рис. 2.26 б более чувствителен, так как при отклонении якоря от среднего положения происходит противоположное изменение индуктивного сопротивления обеих катушек. Например, если якорь переместится вправо, то зазор  $\delta_2$  уменьшится, а зазор  $\delta_1$  увеличится. Поэтому индуктивное сопротивление правой катушки станет больше, а левой, наоборот, меньше.

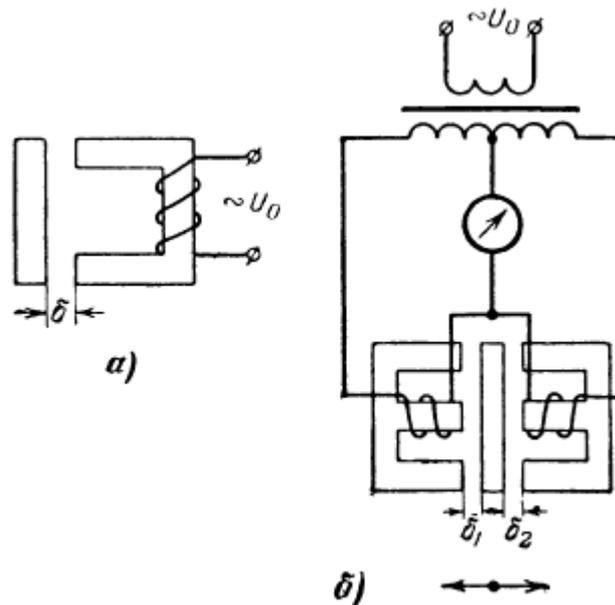


Рис.2.26. Индуктивные датчики с изменяющейся величиной зазора

Сопротивление магнитной цепи датчика складывается из сопротивления участка цепи со сталью  $R_{ст}$  и сопротивления участка цепи с воздушным зазором  $R_{в}$ . Магнитное сопротивление участка цепи со сталью:

$$R_{ст} = \frac{L_{ст} S_{ст}}{\mu_{ст}}$$

где  $L_{СТ}$  - суммарная длина средней магнитной силовой линии в стали сердечника и якоря;  $S_{СТ}$  — площадь поперечного сечения стального сердечника;  $\mu_{СТ}$  — магнитная проницаемость материала сердечника и якоря.

Магнитное сопротивление участка цепи с воздушным зазором:  $R_B = 2\delta / (\mu_0 S_B)$ , где  $\delta$  — длина воздушного зазора между статором и якорем датчика;  $\mu_0$  - проницаемость воздуха;  $S_B$  - площадь поперечного сечения воздушного зазора. Так как  $\mu_{СТ} \gg \mu_0$ , то  $R_{СТ} \ll R_B$  что дает возможность пренебречь магнитным сопротивлением участка цепи со сталью:  $R_{СТ} \approx 0$ . Сопротивление магнитной цепи датчика будет определяться в основном сопротивлением участка цепи с воздушным зазором:

$$R_M \approx R_B = 2\delta / (\mu_0 S_B),$$

Переменный магнитный поток  $\Phi$ , возникающий при подключении источника питания к катушке датчика, равен:

$$\Phi = I\omega / R_M,$$

где  $I$  - ток в цепи катушки датчика;  $\omega$  - число витков катушки датчика.

Индуктивность катушки датчика (если пренебречь потоком рассеяния):

$$L = \omega\Phi / I = [\omega^2 / (2\delta)] \mu_0 S_B.$$

Формула устанавливает функциональную связь между перемещением якоря индуктивного датчика (при перемещении изменяется или  $\delta$ , или  $S_B$ ) и индуктивностью катушки датчика.

Индуктивные датчики с перемещающимся сердечником (рис. 2.27 а) способны измерять перемещения – до 50 мм, а датчики с изменяющейся площадью зазора (рис. 2.27 б) - до 8 мм.

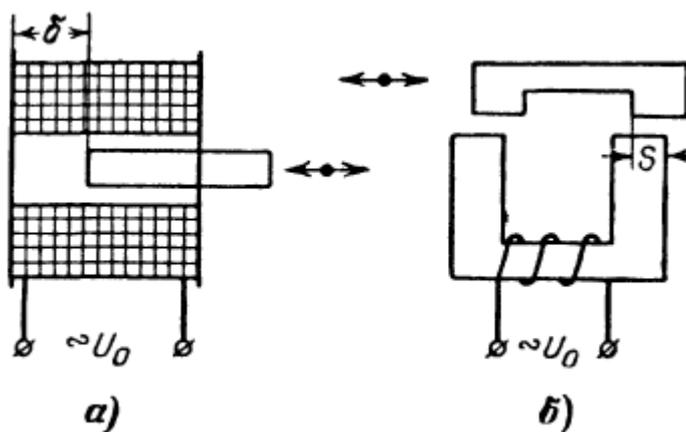


Рис.2.27.Индуктивные датчики с перемещающимся сердечником.

Для питания индуктивных датчиков используется переменное напряжение частотой 50 Гц или более высокой частоты - в несколько тысяч герц.

### 2.3.7. Тензометрические датчики

Применяются для преобразования механических напряжений, усилий и деформаций в электрический сигнал. Наиболее распространены тензодатчики, у которых при внешнем воздействии изменяется активное сопротивление чувствительного элемента. Такие тензодатчики часто называют тензорезисторами. Рассмотрим некоторые из этих датчиков.

Проволочные тензодатчики. Простейшим из них может служить прямолинейный отрезок тонкой проволоки, закрепленной с помощью клея на контролируемой детали. Сопротивление такого проводника при неизменной температуре равно  $\rho L/s$  где  $\rho$  — удельное сопротивление материала;  $L$  — длина проводника,  $s$  - площадь поперечного сечения проводника. При деформации детали одновременно будет деформироваться и наклеенная проволока (тензодатчик). Значит, будут изменяться длина проводника, площадь поперечного сечения и удельное сопротивление. В результате этого изменится и сопротивление проводника на величину  $\Delta R$ .

Размеры детали часто не позволяют закрепить на ней тензодатчик в виде прямолинейного отрезка проволоки достаточно большой длины. В этих случаях используется конструкция тензодатчика в виде спирали (решетки) из нескольких петель проволоки 1 (рис.2.28). Материал проволоки тензодатчика имеет высокую прочность и упругость, поэтому, чтобы решетка сохраняла свою форму, ее наклеивают на подложку 2 (тонкая бумага или лаковая пленка) и сверху наклеивают такую же тонкую бумагу или пленку. К проволоке привариваются (или припаиваются) выводы 3 из тонких полосок медной фольги или провода. Длинная сторона решетки называется базой тензодатчика.

Достоинствами проволочных тензодатчиков являются простота конструкции, безинерционность, линейная статическая характеристика, малая масса и габариты; невысокая стоимость. К их недостаткам следует отнести: невысокую чувствительность (необходимо применение усилителей); сильное влияние окружающей температуры; возможность использовать только в пределах упругих деформаций; необходимость влагозащиты.

Фольговые тензодатчики.

Их принцип действия и основные параметры такие же, как и у проволочных. Различие между ними заключается в конструкции решетки и способе ее изготовления. Фольговые тензодатчики изготавливаются из ленточной фольги толщины 4 мкм. В качестве материала фольги используют константан, нихром, титан-алюминиевый или золотосеребряный сплав. Решетку фольговых тензодатчиков делают методом фотолитографии. Это позволяет получать решетки различной конфигурации (линейную, розеточную, мембранную). По сравнению с проволочными тензодатчики из фольги имеют более высокую чувствительность и точность за счет лучшей передачи деформации от детали к фольге.

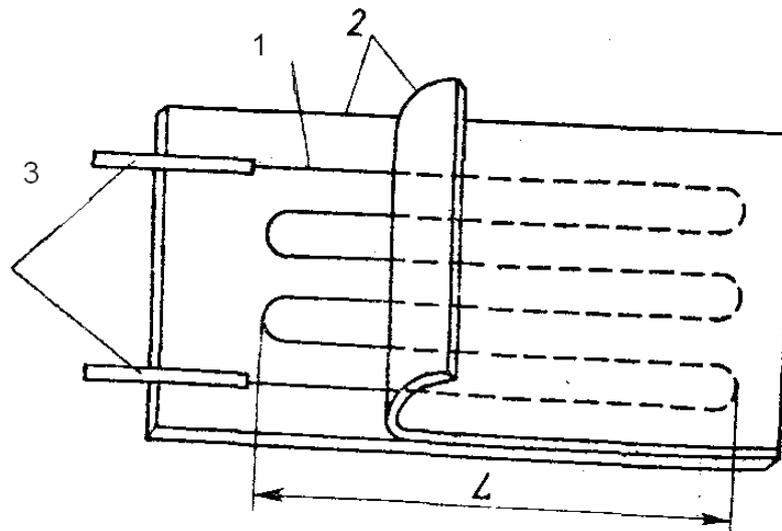


Рис.2.28. Конструкция тензодатчика

Наибольшее практическое применение получили полупроводниковые тензодатчики из полупроводниковых материалов — кремния, германия, арсенида галлия, антимонида индия и др. В отличие от проволочных и фольговых тензодатчиков изменение сопротивления при деформации у полупроводниковых тензодатчиков происходит в основном за счет изменения не геометрических размеров, а удельного сопротивления.

Тензометры обнаруживают деформацию в том месте поверхности, где они размещены, однако, деформации могут быть вызваны различными измеряемыми величинами. Поэтому эти приборы позволяют измерять давление массу, момент и т.д.. Тензометры характеризуются двумя основными параметрами: коэффициентом тензочувствительности и сопротивлением. Коэффициент тензочувствительности это отношение изменения сопротивления в процентах к изменению длины в процентах.

Тензометрический коэффициент преобразователя, выполненного на основе металлической пленки, составляет 2-4, а сопротивление находится в диапазоне 100.....1000 Ом. Полупроводниковые тензометры имеют тензометрический коэффициент порядка 50-200, т.е. гораздо более чувствительны. Выходное напряжение полупроводникового тензометрического моста может составлять примерно 1В.

Полупроводниковый тензометр может монтироваться непосредственно на поверхности тела, деформация которого измеряется, либо может монтироваться на кронштейне, который в свою очередь размещается на измеряемой поверхности.

Тензометрические датчики выпускаются многими фирмами (Siemens, VISHAY и т.д.) и имеют самое различное назначение. В качестве примера рассмотрим тензодатчики серии SIWAREX выпускаемые фирмой Siemens

предназначенные для статического и динамического измерения усилий и веса. Особенностью этих тензодатчиков является использование монолитных тензоэлементов. Они могут использоваться практически во всех сферах промышленной весоизмерительной техники. На их основе могут быть построены:

- контейнерные весы, бункерные или платформенные весы,
- рольганги, ленточные или крановые весы,
- установки для розлива в бутылки/упаковки, дозировки и смешивания,
- устройства для контроля процессов прессования или натяжения,
- динамические весы.

Номенклатура отражена в табл. 2.9. , а представление об их конструкции можно получить из табл. 2.10 .

Таблица 2.9

Обозначение	Номинальная нагрузка															
	кг								т							
SIWAREX WL260 SP-S AA	3	5	10	20		100										
SIWAREX WL260 SP-S AB					50	100	200		500							
SIWAREX WL260 SP-S SA		5	10	20	50	100	200									
SIWAREX WL250 ST-S SA					50	100		250	500	1		2,5	5	10		
SIWAREX WL230 BB-S SA			10	20	50	100	200		500							
SIWAREX WL230 SB-S SA									500	1	2		5			
SIWAREX WL270 CP-S SA													10	20	50	
SIWAREX WL270 CP-S SB																100
SIWAREX WL270 CP-S SC																200

Таблица 2.10

Обозначение	Изображение	Тип конструкции	Материал	Размер платформы, мм	Класс точности
SIWAREX WL260 SP-S AA		Точечный тензодатчик	Алюминий	400 x 400	OIML R60 C3
SIWAREX WL260 SP-S AB		Точечный тензодатчик	Алюминий	600 x 600	OIML R60 C3
SIWAREX WL260 SP-S SA		Точечный тензодатчик	Нержавеющая сталь	400 x 400	OIML R60 C3
SIWAREX WL250 ST-S SA		Тензодатчик S-типа	Нержавеющая сталь	-	OIML R60 C3
SIWAREX WL230 BB-S SA		Эластичный стержень	Нержавеющая сталь	-	OIML R60 C3
SIWAREX WL230 SB-S SA		Стержень, реагирующий на усилие сдвига	Нержавеющая сталь	-	OIML R60 C3
SIWAREX WL270 CP-S SA		Тензодатчик, реагирующий на сжатие	Нержавеющая сталь	-	OIML R60 C3
SIWAREX WL270 CP-S SB		Тензодатчик, реагирующий на сжатие	Нержавеющая сталь	-	OIML R60 C3

SIWAREX WL270 CP-S SC		Тензодатчик, реагирующий на сжатие	Нержавеющая сталь	-	0,1 %
-----------------------------	---	--	----------------------	---	-------

### 2.3.8. Пьезоэлектрические датчики силы

Пьезоэлектрический эффект заключается в образовании в кристаллическом материале электрического заряда или напряжения при приложении к нему механического напряжения (рис.2.29.). Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, например, таких как кварц (химическая формула  $\text{SiO}_2$ ).

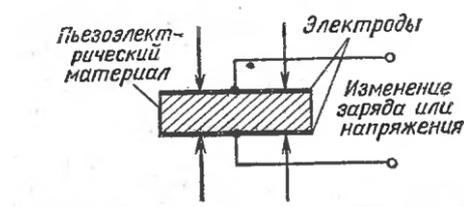


Рис.2.29. Пьезоэлектрический преобразователь

Обычно для увеличения чувствительности пьезодатчика применяют две или несколько пластинок, соединенных параллельно; при этом заряды одноименно заряжающихся плоскостей должны складываться. На рис. 2.30 приведена простейшая схема пьезоэлектрического датчика, состоящего из пластинок 1, и станиолевых прокладок 3, которые служат одним из выводов (-), а второй вывод имеет контакт с корпусом 2. Изоляционная прокладка 4 служит для уменьшения утечки зарядов.

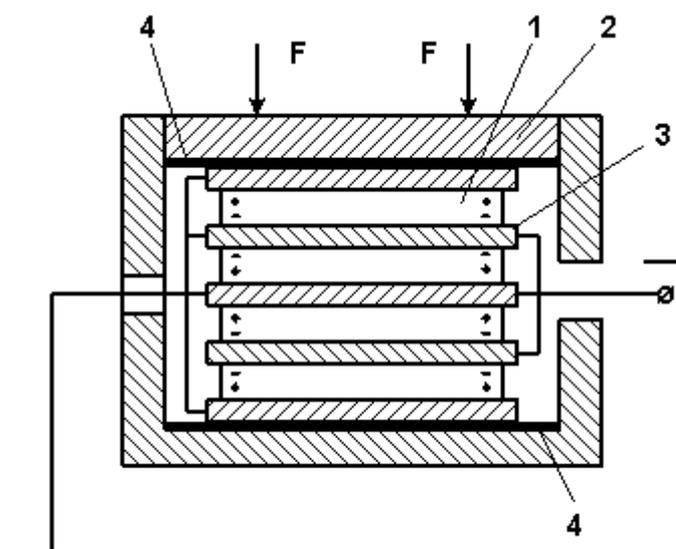


Рис.2.30. Конструкция пьезодатчика

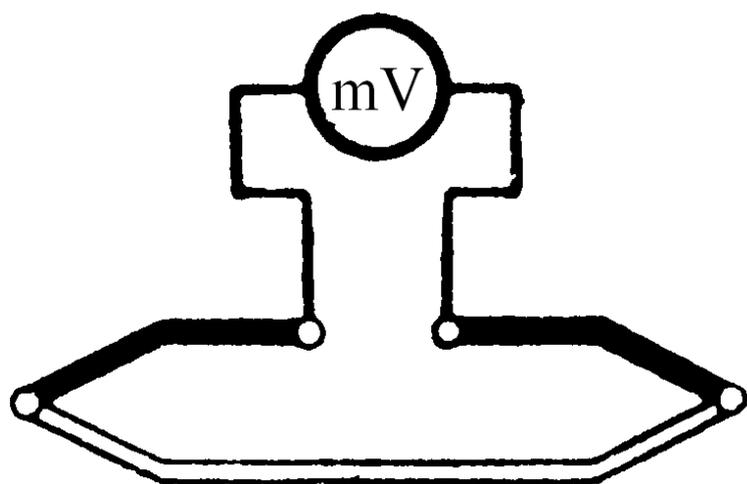
Сегодня, на рынке электронных компонентов присутствует множество пьезоэлектрических датчиков силы от различных производителей. Например, пьезоэлектрические датчики силы фирмы Montronix (Германия) из серии RetroVolt-M-xx-ICA обеспечивают прямое измерение силы сжатия или растяжения. Эти датчики сконструированы как промежуточные шайбы в болтовых соединениях и измеряют нагрузку на головку болта в различных производственных механизмах.

## 2.4. Датчики технологических переменных

### 2.4.1. Датчики температуры

Выбор типа датчика температуры в основном определяется диапазоном изменения измеряемой температуры и условиями эксплуатации. Для измерения температуры используют термопары (диапазон измеряемой температуры  $-250 \div +2500$  °C), термосоротивления ( $-100 \div +300$  °C), полупроводниковые датчики ( $-100 \div +100$  °C) и пирометры ( $+100 \div +5000$  °C).

Термопары представляют собой соединение двух проводников из разного металла, например, меди и медно-никелевого сплава, железа и медно-никелевого сплава или платины и платино - иридиевого сплава. Две такие термопары образуют полный датчик (рис.2.31). Понятие термопара часто и подразумевает датчик изображенный на рис. 2.31.



Опорный спай

Чувствительный спай

Рис. 2.31. Датчик на основе двух термопар

Если опорный спай погрузить, например, в тающий лед ( $0^{\circ}\text{C}$ ), а второй чувствительный спай ввести в контакт с объектом измерения, то между спаями возникнет термо - ЭДС, составляющая в зависимости от вида термопары  $7...75 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$  [5] (рис. 2.32).

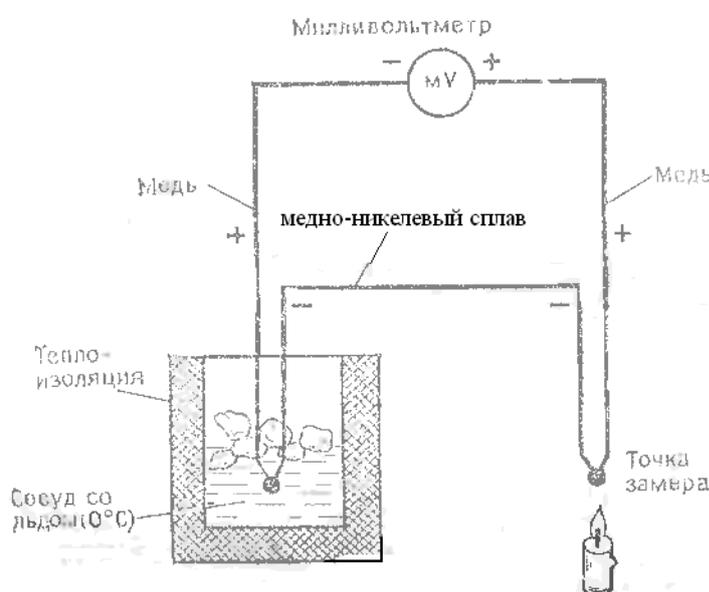


Рис. 2.32. Измерение температуры термопарой с использованием в качестве опорной точки температуры таяния льда

В случае термопары из меди и медно-никелевого сплава удельная термо-ЭДС в диапазоне температур  $0...100^{\circ}\text{C}$  составляет примерно  $40 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ . При разности температур спаев в  $100^{\circ}\text{C}$  термо-ЭДС составит  $4.3 \text{ мВ}$ . Для достаточно точного измерения такого незначительного напряжения

необходимы сложные измерительные усилители. Кроме этого, опорная температура всегда должна поддерживаться постоянной или измеряться.

В последнее время некоторые фирмы выпускают специализированные микросхемы-усилители сигнала термопары, которые позволяют производить измерения без опорной точки при  $0^{\circ}\text{C}$ . Для этого они содержат внутренний компенсатор точки таяния льда, поэтому для измерений достаточно одной «половины» термопары. На рис. 2.33 приведена структурная схема такой микросхемы AD594, выпускаемой фирмой Analog Devices для термопары константан-железо и позволяющей производить измерение температуры в диапазоне  $0 \dots 300^{\circ}\text{C}$ .

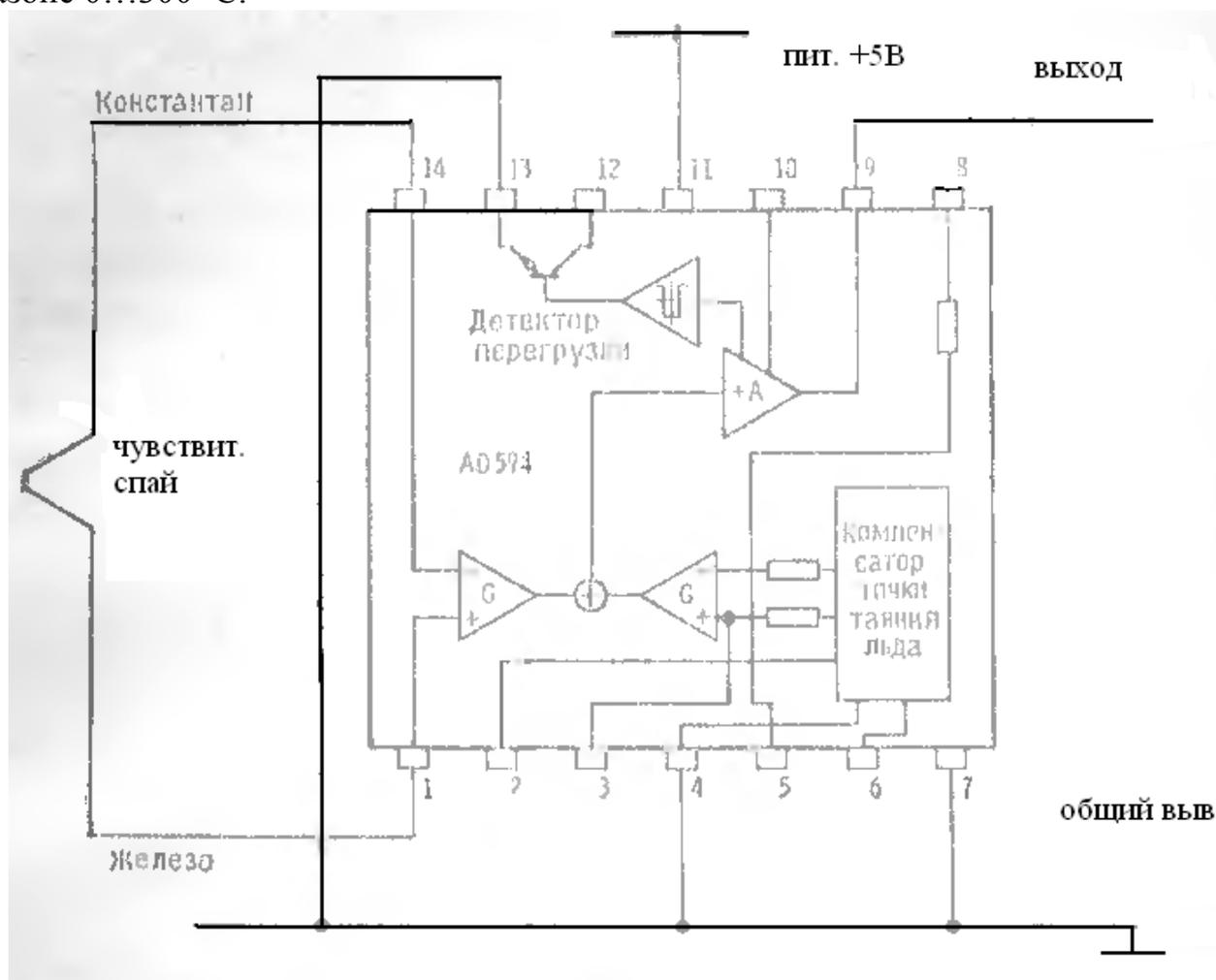


Рис. 2.33. Структурная схема микросхемы AD594

Терморезисторы называют также термометрами сопротивления или термосопротивлениями. Различают металлические и полупроводниковые терморезисторы. Металлические терморезисторы изготовляют из чистых металлов: меди, платины, никеля, железа, реже из молибдена и вольфрама. Для большинства чистых металлов температурный коэффициент электрического сопротивления составляет примерно  $(4 \div 6,5) \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ , т. е. при увеличении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  сопротивление металлического терморезистора увеличивается на  $0,4 \text{—} 0,65 \%$ . Наибольшее распространение получили медные и платиновые терморезисторы. Хотя железные и

никелевые терморезисторы имеют примерно в полтора раза больший температурный коэффициент сопротивления, чем медные и платиновые, однако применяются они реже. Дело в том, что железо и никель сильно окисляются и при этом меняют свои характеристики.

Медные терморезисторы выпускаются серийно и обозначаются ТСМ (термосопротивления медные) с соответствующей градуировкой: гр. 23 имеет сопротивление  $R_0 = 53,00$  Ом при  $0^\circ\text{C}$ ; гр. 24 имеет сопротивление  $R_0 = 100,00$  Ом при  $0^\circ\text{C}$ . Медные терморезисторы выполняются из проволоки диаметром не менее  $0,1$  мм, покрытой для изоляции эмалью.

Платиновые терморезисторы также выпускаются серийно и обозначаются ТСП (термосопротивления платиновые) с соответствующей градуировкой; гр. 20 имеет сопротивление  $R_0 = 10,00$  Ом при  $0^\circ\text{C}$ , гр. 21  $R_0 = 46,00$  Ом; гр. 22  $R_0 = 100,00$  Ом. Платина применяется в виде неизолированной проволоки диаметром  $0,05-0,07$  мм.

После того как определено сопротивление терморезистора, существует два способа, чтобы рассчитать температуру. Первый заключается в использовании стандартной градуировочной таблицы, которая приводится для каждого терморезистора фирмой-изготовителем (табл. 2.11). Обычно приводятся таблицы с гораздо меньшим шагом изменения температуры  $5^\circ\text{C}$  или даже  $1^\circ\text{C}$ .

При втором способе используется интерполирующий полином, коэффициенты для которого также указываются фирмой-изготовителем:

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2],$$

где для платины  $\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 5,8 \cdot 10^{-7} (1/^\circ\text{C})^2$ , для меди  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-1} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ .

Таблица 2.11.

Температура, °C	Сопротивление, Ом				
	Платиновые термометры			Медные термометры	
	Гр. 20	Гр. 21	Гр. 22	Гр. 23	Гр. 24
-200	1.73	7.95	17.28	-	-
-150	3.88	17.85	38.80	-	-
-100	5.97	27.44	59.65	-	-
-50	8.00	36.80	80.00	41.71	78.80
-30	8.80	40.50	88.04	46.23	87.22
-10	9.60	44.17	96.03	50.74	95.74
0	10.00	46.00	100.00	53.00	100.00
20	10.79	46.94	107.91	57.52	108.52
40	11.58	53.26	115.78	62.03	117.04
60	12.36	56.86	123.60	66.55	125.56
80	13.14	60.43	131.37	71.06	134.08
100	13.91	63.99	139.10	72.58	142.60
120	14.68	67.53	146.78	80.09	151.12
140	15.44	71.03	154.41	84.61	159.64
160	16.20	74.52	162.00	89.13	168.16
180	16.95	77.99	169.54	93.64	176.68
300	21.38	98.34	213.79	-	-
400	24.94	114.72	249.38	-	-
500	28.38	130.55	283.30	-	-
600	31.70	145.85	317.06	-	-
650	33.33	153.30	333.25	-	-

Типичные погрешности измерения температуры при использовании металлических термосопротивлений следующие:

- при использовании платины — 0.01...0.03%;
- при использовании меди — 0.2%;
- при использовании никеля и сплава железо-никель — 0.5%.

Термисторами называют полупроводниковые терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (negative

temperature coefficient, NTC) , сопротивление таких терморезисторов уменьшается с ростом температуры.

Позисторами или кремниевыми датчиками температуры, по названию технологии их изготовления, называется другая группа терморезисторов с положительным температурным коэффициентом сопротивления (positive temperature coefficient, PTC), сопротивление таких терморезисторов растет с увеличением температуры.

Полупроводниковые терморезисторы имеют на порядок больший температурный коэффициент сопротивления, чем металлические терморезисторы. Однако, зависимость сопротивления от температуры у терморезисторов существенно нелинейная. Материалом для их изготовления служат смеси оксидов марганца, никеля и кобальта ( MnO, NiO, CoO ); германий и кремний с различными примесями. При массовом производстве термисторы дешевле металлических терморезисторов, но имеют больший разброс характеристик. Характеристики терморезисторов зависят от технологии и используемых материалов. Сопротивление терморезисторов может изменяться по всей шкале в 10 или в 100 раз. Для описания характеристик производители обычно приводят таблицы, в которых указывают отношение сопротивления на данной температуре к сопротивлению при температуре 25°C. Типичные зависимости для термистора — NTC-резистора — приведены в табл. 2.12 [8] .

Таблица 2.12

Температура, °C	R/R <sub>25</sub>	Температура, °C	R/R <sub>25</sub>
-50	39.03	30	0.8276
-40	21.47	40	0.6406
-30	12.28	50	0.5758
-20	7.28	60	0.4086
-10	4.46	70	0.2954
0	2.81	80	0.2172
10	1.82	90	0.1622
20	1.21	100	0.1229
25	1.00	110	0.0945

Эти данные приводятся фирмой Dale, однако являются типичными для любых термисторов (NTC-терморезисторов). Сопротивление в таблице определяется по отношению R/R<sub>25</sub>. На Рис. 2.37 приведен график зависимости сопротивления от температуры, построенный по данным из табл. 2.12. Как ранее упоминалось, данная характеристика имеет нелинейный характер экспоненциального вида, что хорошо видно на графике рис.2.34. Для указанного типа терморезистора данные предоставлены с шагом 10°C, а некоторые фирмы предоставляют данные с шагом 5°C или даже 1°C.

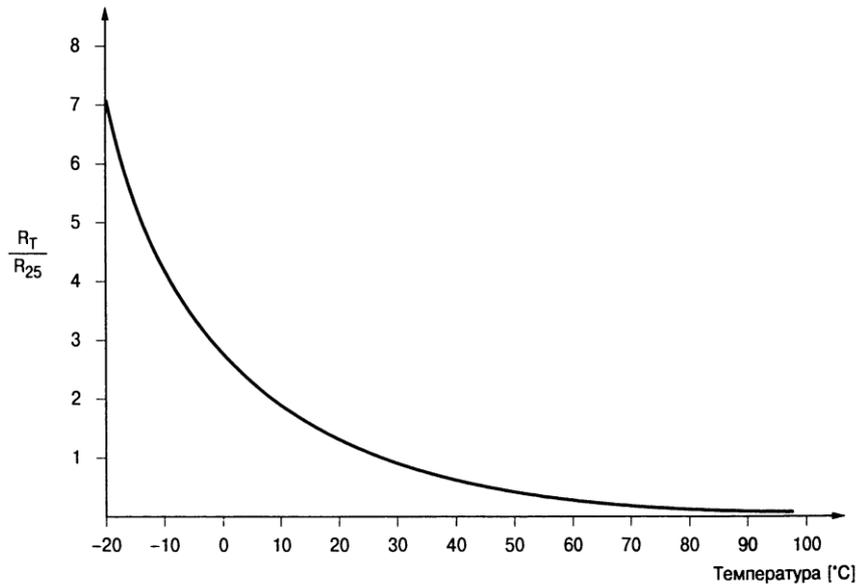


Рис.2.34. График зависимости сопротивления термистора от температуры

Если необходимо узнать сопротивление при температуре между двумя точками таблицы то сопротивление можно определить графически или вычислить по интерполяционной формуле:

$$\frac{R_1}{R_{25}} = \exp\left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}\right)$$

где T- температура в градусах Кельвина, а A, B, C и D-коэффициенты, зависящие от марки терморезистора, значения которых указываются производителем.

Основные схемы включения терморезисторов приведены на рис. 2.35.

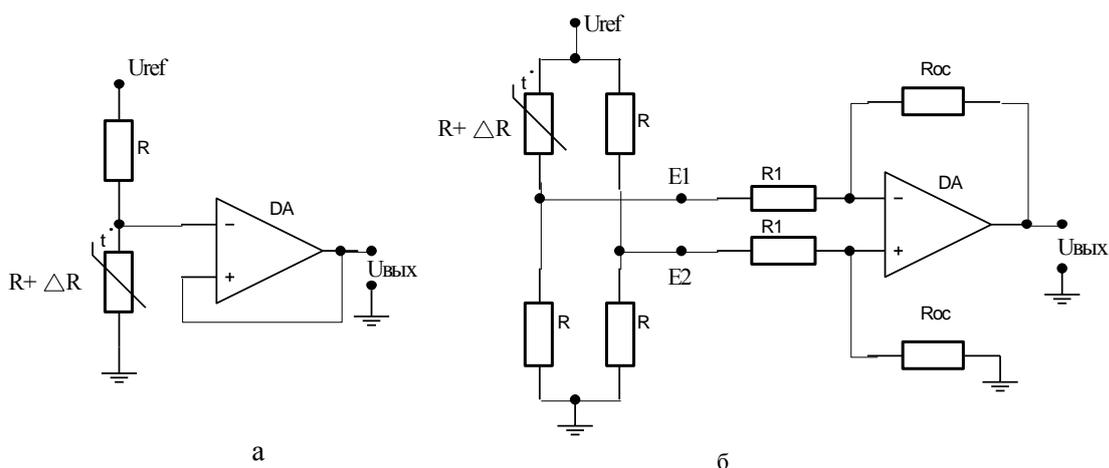


Рис. 2.35. Основные схемы включения терморезисторов

После того как напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  измерено с использованием схемы рис. 2.38 а, сопротивление терморезистора  $R_T=R+\Delta R$  вычисляется по формуле:

$R_T = (U_{\text{вых}} R) / (U_{\text{ref}} - U_{\text{вых}})$ , затем измеряемая температура определяется либо по таблице либо по интерполяционной формуле, приводимым в документации. Напряжение  $U_{\text{вых}}$  может быть подано на вход АЦП, в этом случае вычисление температуры выполняется затем микроконтроллером или ПК. опорное напряжение  $U_{\text{ref}}$  выбирается равным опорному напряжению АЦП, в этом случае при  $t=0^\circ\text{C}$   $U_{\text{вых}} = U_{\text{ref}}/2$ . При использовании схемы рис. 2.38 б по измеренному значению  $U_{\text{вых}}$  вычисляется разность напряжений  $E_{12} = E_1 - E_2$  по формуле:  $E_{12} = U_{\text{вых}} / (R_{\text{oc}} / R_1)$ , затем вычисляется значение  $R_T = (E_{12} \cdot 2R + U_{\text{ref}} \cdot 2R) / (U_{\text{ref}} - 2 \cdot E_{12})$ . Для второй схемы при  $t=0^\circ\text{C}$   $U_{\text{вых}} = 0$ .

В качестве простейшего полупроводникового датчика температуры может использоваться, например, р-п-переход диода или транзистора. Если поддерживать постоянным ток через смещенный в прямом направлении кремниевый р-п -переход, прямое падение напряжения будет меняться на 1.88 мВ с каждым градусом Цельсия.

На подобном принципе работает ИС LM335 (Рис 2.36 ) от фирмы National Semiconductor, которая формирует на выходе напряжение, пропорциональное температуре. Изменение выходного напряжения равно 10 мВ на градус Цельсия. При  $0^\circ\text{C}$  выходное напряжение составляет 2.73 В, а при  $100^\circ\text{C}$  составляет 3.73В. ИС LM335 потребляет ток от 0.4 до 5 мА.

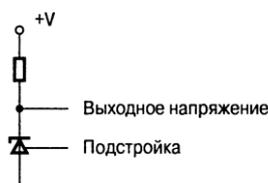


Рис.2.36. ИС LM335.

Датчики LM34/35 фирмы National Semiconductor рассчитаны на напряжение питания в диапазоне 4...20 В и формируют на выходе напряжение, пропорциональное температуре. ИС LM35 формирует 500 мВ при  $50^\circ\text{C}$  и добавляет 10 мВ на каждый градус Цельсия. ИС LM34 калибрована в температурной шкале Фаренгейта, а LM35 - в градусах Цельсия. Выход LM34/LM35 может быть непосредственно подключен к входу АЦП или компаратора.

ИС LM74 фирмы National Semiconductor содержит температурный датчик и 13-битный сигма-дельта АЦП и измеряет температуру в диапазоне  $-55...+150^\circ\text{C}$ . Она имеет на выходе АЦП интерфейс SPI/Microware, которым соединяется с микропроцессором. ИС LM74 поставляется в 8-выводном корпусе для поверхностного монтажа (SMT). Напряжение питания микросхемы в зависимости от модификации -3.3 или 5 В.

ИС LM75 функционально аналогична LM74, но снабжена выходным интерфейсом I2C и измеряет температуру в более узком диапазоне  $-55...+125^\circ\text{C}$ .

Микросхема LM75 фирмы National Semiconductor формирует на выходе 9-битный код и имеет дополнительно в своем составе компаратор,

сравнивающий измеряемую величину с запрограммированным заданным значением - уставкой температуры. Сигнал превышения определенного порога температуры (выше уставки) передается по шине 12С к внешним исполнительным устройствам, например, для терморегулирования.

#### 2.4.2. Датчики давления

Единицы измерения давления: в системе СИ 1 Па (паскаль) – равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной на площади 1 м<sup>2</sup>. На многих отечественных приборах находятся в эксплуатации приборы отградуированные в: кг/см<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup>, мм. рт. ст. :

$$1 \text{ кг/см}^2 = 98066,5 \text{ Па},$$

$$1 \text{ кг/м}^2 = 9,80665 \text{ Па},$$

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,322 \text{ Па},$$

$$1 \text{ бар} = 105 \text{ Па}.$$

Приборы для измерения давления классифицируются (по роду измеряемого давления): барометры – приборы для измерения барометрического давления атмосферного воздуха; манометры – приборы для измерения абсолютного и избыточного давления; вакуумметры – приборы для измерения разрежения (вакуума); мановакуумметры – приборы для измерения избыточного давления и разрежения; напорометры – приборы для измерения малых избыточных давлений.

Приборы для измерения давления работают на известном механическом принципе, связанном с применением узла из упругого материала, который формирует перемещение при воздействии давления. Примеры таких устройств приведены на рис. 2.37. Это диафрагма перемещающаяся и создающая усилие под действием давления (рис.2.37 А), сильфон (рис. 2.37 Б), трубка Бурдона и спиральная трубка Бурдона (рис. 2.37 В и Г).

Измерение перемещения или напряжения, возникающего в материале, позволяет определить давление.

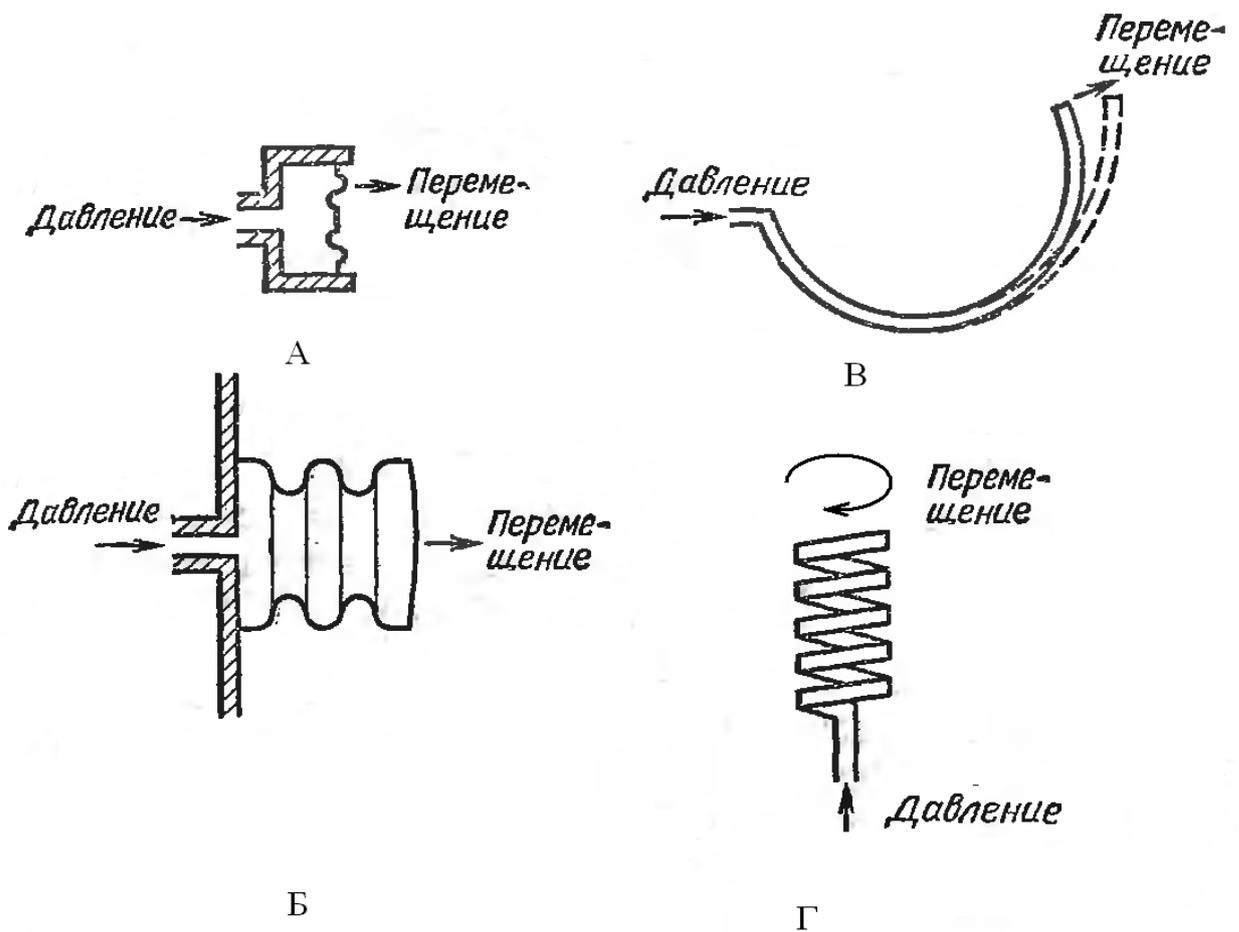


Рис. 2.37. Устройства для измерения давления

Для измерения перемещения или напряжения могут быть использованы тензометрические датчики, емкостные датчики, электромагнитные датчики.

Различают абсолютное, разностное и избыточное давление.

Абсолютным называется давление вещества относительно вакуума (рис. 2.38 а). Разностное или дифференциальное давление определяется относительно некоторого ненулевого опорного давления (рис. 2.38 б). Избыточное давление измеряется относительно атмосферного давления (рис. 2.38 в).

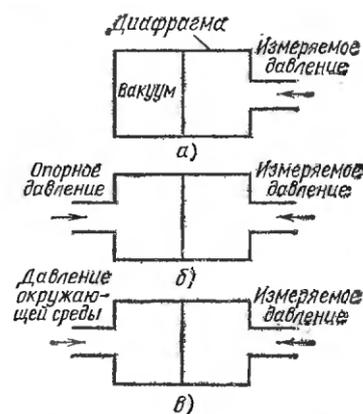


Рис. 2.38. Преобразователи для измерения абсолютного, разностного и избыточного давления

Уровни измерения давлений в зависимости от области применения приведены в табл. 2.13 .

Таблица. 2.13

Уровень давления	Применение
40 мбар	Измерение уровня жидкости в стиральных и посудомоечных машинах
100 мбар	Пылесосы, контроль фильтров, измерение расхода
200 мбар	Измерение кровяного давления
1 бар	Барометр, регулировка зажигания и впрыска в автомобильных двигателях
2 бар	Измерение разрежения на такте всасывания в автомобильных двигателях
10 бар	Измерение давления масла и сжатого воздуха в тормозной системе автомобиля; холодильники
50 бар	Пневматические системы промышленных роботов
500 бар	Гидравлические системы, строительные машины

Наиболее распространенной конструкцией сенсора для датчика давления можно считать мембранную, содержащую четыре тензорезистивных элемента, включенных в единую измерительную схему (рис.2.39).

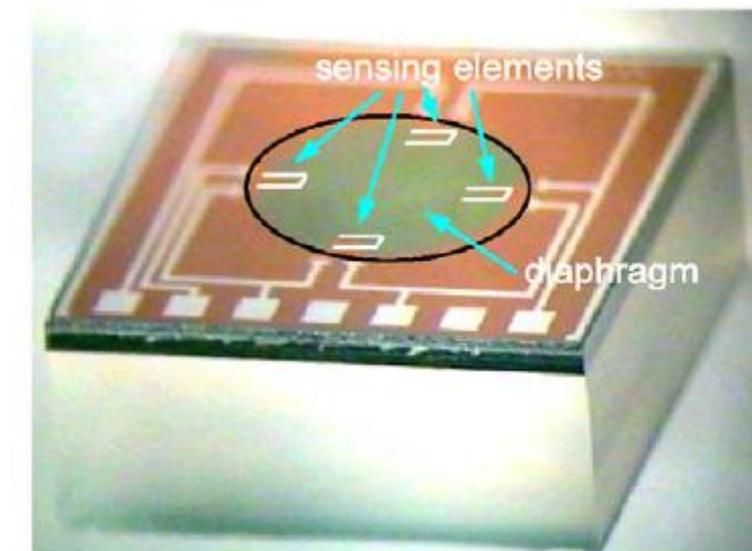


Рис.2.39. Мембранная конструкция сенсора для датчика давления

Четыре однотипных тензорезистора образуют мост, как показано на рис. 2.40. При этом резисторы соединены так, что при изгибе мембраны сопротивление резисторов R1 и R3 возрастает, а у R2 и R4-уменьшается. В результате достигается высокая чувствительность измерительного моста. Выходное напряжение  $U_A$  вычисляется как:  $U_A = U_{CC} (R1R3 - R2R4) / ((R1+R2)(R4+R3))$ .

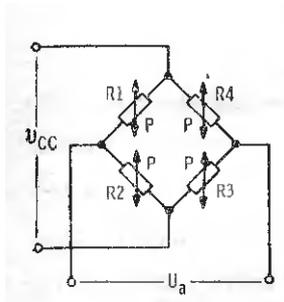


Рис. 2.40. Мостовая измерительная схема

Преимущества использования мостовой схемы заключаются в исключении влияния внешнего источника напряжения на выходной сигнал и устранении значительной по величине постоянной составляющей за счет предварительной балансировки моста, что важно при измерении слабых сигналов. Поскольку максимальное выходное напряжение может составлять не более 1В, для дальнейшей обработки сигнала его еще необходимо усилить. Для измерений с повышенной точностью следует дополнительно компенсировать температурную погрешность датчика. Такую структуру имеют датчики фирмы Honeywell.

В отличие от полупроводниковых датчиков с четырьмя чувствительными резисторами в технологии изготовления датчиков давления фирмы Motorola используется в качестве основы кристалла датчика элемент X-duser – монокристаллический кремниевый кристалл с внедренной тензорезистивной структурой. Это позволяет снизить возможные погрешности передачи деформации от упругого элемента к тензорезистору. Параметры датчиков и типы их корпусов приведены в таблице 2.14, а их внешний вид на рис. 2.41. Датчики производятся в различном конструктивном исполнении на диапазоны давлений от 0 до 1000 кПа.

Область применения: индикаторы уровня, индикаторы утечки, медицинское оборудование, барометры, насосы, альтиметры и т.д.

Motorola выпускает следующие типы датчиков:

- некомпенсированные
- термокомпенсированные и калиброванные
- интегрированные датчики со стандартным вых. сигналом
- медицинские датчики.

Таблица 2.14

Наименование	Тип измеряемого давления	Макс. измеряемое давление, кПа	Макс. допустим. давление, кПа	Выходное напряжение, мВ	Чувствительность, мВ/кПа
MPX 10	Дифф./Относит	10	75	35	3.5
MPX 12	Дифф./Относит	10	75	35	5.5
MPX 53	Дифф./Относит	50	200	35	1.2
<b>Термокомпенсированные и калиброванные датчики</b>					
Наименование	Тип измеряемого давления	Макс. измеряемое давление, кПа	Макс. допустим. давление, кПа	Выходное напряжение, мВ	Чувствительность, мВ/кПа
MPX2 010	Дифф./Относит	10	75	25	2.5
MPX2 050	Дифф./Относит	50	200	40	0.8
MPX2 053	Дифф./Относит./Отн. вакуума	50	200	40	0.8
MPX2 100A	Абсолютн.	100	200	40	0.4
MPX2 100	Дифф./Относит./Отн. вакуума	100	200	40	0.4
MPX2 102A	Абсолютн.	100	200	40	0.4
MPX2 102	Дифф./Относит./Отн. вакуума	100	200	40	0.4
MPX2 200A	Абсолютн.	200	400	40	0.2
MPX2 200	Дифф./Относит./Отн. вакуума	200	400	40	0.2
MPX2 202A	Абсолютн.	200	400	40	0.2
MPX2 202	Дифф./Относит./Абсолютн./Отн. вакуума	200	400	40	0.2
Наименование	Тип измеряемого давления	Диапазон измеряемых давлений, кПа	Макс. допустим. давление, кПа	Выходное напряжение, мВ	Чувствительность, мВ/кПа
MPX4 080D	Дифф.	0 - 80	400	4320	54
MPX4 100	Абсолютн.	20 - 105	400	4590	54
MPX4 101	Абсолютн.	15 - 102	400	4590	54
MPX4 105	Абсолютн.	15 - 105		4590	51
MPX4 115	Абсолютн.	15 - 115	400	4590	45.9
MPXV4 115V	Отн. вакуума	-115 - 0	400	4400	38.26
MPX4 200	Абсолютн.	200	400	4590	25.5
MPX4 250A	Абсолютн.	20 - 250	400	4692	20
MPX4 250	Дифф./Относит	0 - 250	400	4705	18.8
MPXV4 006	Дифф./Относит	0 - 6	10	4600	766
MPXV5 004	Дифф./Относит./Отн. вакуума	0 - 3.92	10	3900	1000
MPX5 010	Дифф./Относит	0 - 10	75	4500	450
MPX5 050	Дифф./Относит	0 - 50	200	4500	90
MPX5 100	Абсолютн.	15 - 115	400	4500	45
	Дифф.	0 - 100			
MPX5 500	Дифф.	0 - 500	2000	4500	9.0
MPX5 700	Дифф./Относит	0 - 700	2800	4500	6.4
	Абсолютн.	15 - 700			
MPX5 999	Дифф.	0 - 1000	4000	4500	4.5

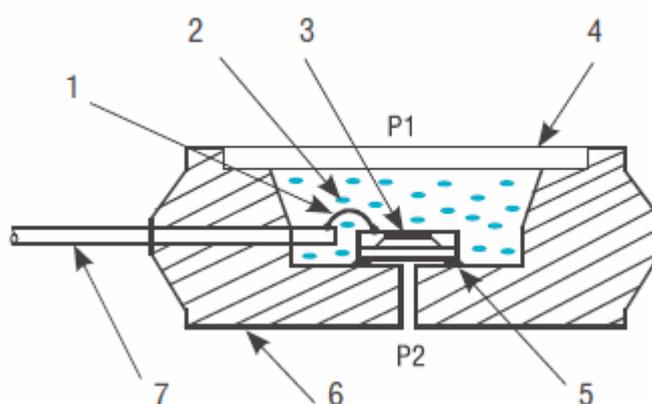


Рис. 2.41. Датчики давления с тензорезистивной структурой

## Пьезоэлектрические датчики давления.

Пьезоэлектрический эффект используют в датчиках давления жидкости. Сегодня, на рынке электронных компонентов присутствует множество пьезоэлектрических датчиков давления от различных производителей.

Рассмотрим, например, пьезоэлектрические датчики давления жидкости фирмы Honeywell серии 19C(U) (рис.2.42).



- где: 1 – микропроволока;  
2 – кремнийорганический гель;  
3 – кремниевый чувствительный элемент;  
4 – разделительная мембрана;  
5 – место соединения чувствительного элемента с корпусом;  
6 – корпус датчика;  
7 – электрический вывод

Рис.2.42. Конструкция датчиков давления жидкости

Серия предназначена для измерения следующих диапазонов давления: от 0 до 3, 5, 10, 15, 30, 50, 100, 200, 300, 500 PSI. Напряжение питания модели К составляет 15 вольт. Диапазон выходного сигнала составляет 40 мВ/В, это значит, что выходной сигнал пропорционально зависит от амплитуды напряжения питания.

## Список литературы

1. Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков Технические средства автоматизации: учебник для студ. высш. учеб. заведений.- М: Академия, 2007-363 с.
2. И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А.Г. Схиртладзе, С.В. Фролов Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: Учеб. пособие.- М.: Машиностроение, 2004. -126 с.
3. Белов М. П. Технические средства автоматизации и управления: учеб. пособие. - СПб.: СЗТУ, 2006-181 с.
4. Гудинов В.Н., Корнейчук А.П. Технические средства автоматизации: Конспект лекций. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006-66 с.
5. Данилов.А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004.№10-с. 26-35.
6. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем.- М.: Мир, 1989-192 с.
7. Водовозов А.М. Элементы систем автоматики: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений – М: Академия, 2006-222 с.
8. Маргелов А. Модульные и компонентные магниторезистивные датчики и компасы фирмы HONEYWELL. Часть 1// Современная электроника. 2006.№10-с.10-14.
9. Болл Стюарт Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. — 360 с.