

621.317
4155

СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

В. Ю. Шишмарев

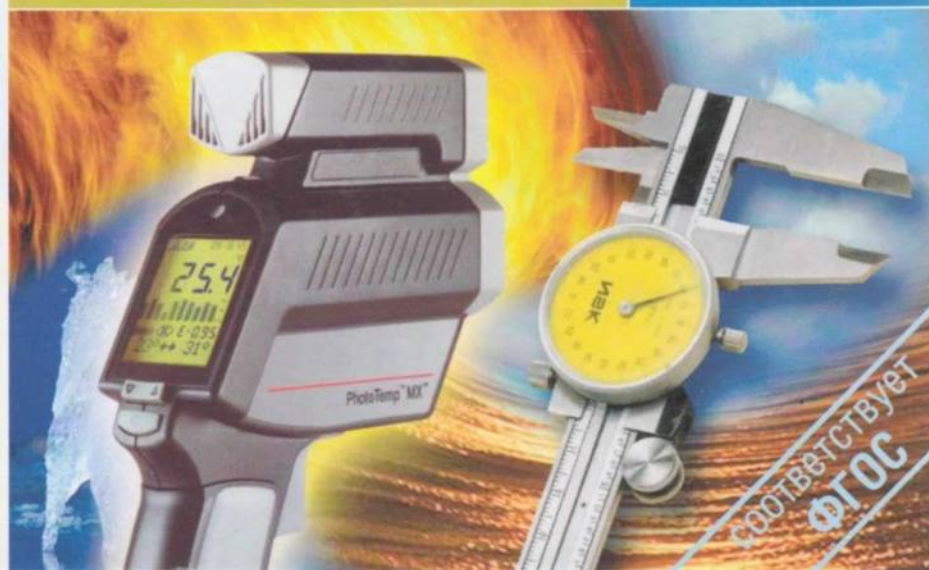
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

5-е издание

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ



УЧЕБНИК



601830
1751
СРЕДНЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

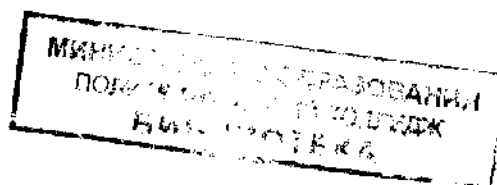
В. Ю. ШИШМАРЕВ

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УЧЕБНИК

Допущено
Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебника для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования

5-е издание, исправленное



94963



Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 681.5(075.32)

ББК 39.17я723

Ш657

Рецензенты:

Председатель предметно-цикловой комиссии специальности 2003
«Радиотехнические системы», преподаватель высшей квалификационной
категории Московского техникума космического приборостроения
Т. А. Хрусталева; главный метролог ОАО МНПК «Авионика» М. К. Лобачевский

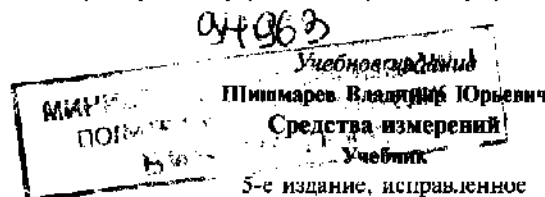
Шишмарев В. Ю.

**Ш657 Средства измерений : учебник для студ. учреждений сред.
проф. образования / В. Ю. Шишмарев. — 5-е изд., испр. — М. :
Издательский центр «Академия», 2012. — 320 с.
ISBN 978-5-7695-8753-5**

Представлены основные типы измерительных средств (приборов) для измерения различных физических величин. Наибольшее внимание уделено электроизмерительным приборам, преобразователям неэлектрических величин в электрические сигналы. Рассмотрены вопросы построения Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации и метрологического обеспечения точности измерений.

Учебник может быть использован при освоении общепрофессиональной дисциплины ОП.09 «Электротехнические измерения» и профессионального модуля ПМ.01 «Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации (МДК.01.01, МДК.01.02, МДК.01.03)» в соответствии с ФГОС СПО для специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)», а также при освоении общепрофессиональной дисциплины ОП.05 «Электроизмерения» в соответствии с ФГОС СПО для специальности 200111 «Радиоэлектронные приборные устройства».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.



УДК 681.5(075.32)

ББК 39.17я723

Редактор *Е. А. Балшко*. Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*.
Компьютерная верстка: *Л. М. Беляева*. Корректоры *И. Н. Волкова, И. В. Могилевец*

Изд. № 105110532. Подписано в печать 12.12.2011. Формат 60×90/16. Гарнитура «Таймс».
Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 20,0. Тираж 1 000 экз. Заказ № 323.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 266.

Адрес для корреспонденции: 129085, Москва, пр-т Мира, 101 В, стр. 1, а/я 48.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 14964 от 21.12.2010.

Отпечатано в ОАО «Тверской полиграфический комбинат».

170024, г. Тверь, пр-т Лепкина, 5. Телефон: (4822) 44-42-15.

Интернет / Home page — www.twetpk.ru. Электронная почта (E-mail) — sales@twetpk.ru.

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра
«Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Шишмарев В. Ю., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ISBN 978-5-7695-8753-5

ВВЕДЕНИЕ

Измерительная техника используется во многих областях деятельности человека.

В последние десятилетия точные методы и технологии, требующие различных измерений, нашли широкое применение также в химии, биологии, медицине, сельском хозяйстве и других отраслях.

В настоящее время трудоемкость контроля и измерений составляет в среднем от 10 до 15 % трудоемкости всего общественного производства. В некоторых отраслях, например в точном машиностроении, радиоаппаратостроении, авиационной и космической технике, эта доля значительно выше.

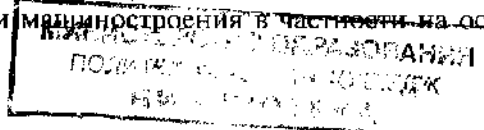
34365
Разработкой и производством измерительной техники занимаются организации и предприятия приборостроения. В нашей стране в настоящее время разработана стратегия развития приборостроения для гражданских отраслей промышленности.

Стратегия развития приборостроения России (далее стратегия) определяет основные приоритеты этой отрасли как наукоемкой части машиностроительного комплекса, призванной осуществить техническое перевооружение и способствовать развитию новых высокотехнологичных производств и науки.

Цели, задачи и приоритеты стратегии. Стратегия предполагает формирование условий приоритетного развития приборостроения в целях обеспечения наиболее эффективного развития сырьевых и машиностроительных отраслей промышленности на основе использования современных достижений науки (информатики, метрологии, электроники) и интеллектуального потенциала страны.

Цели стратегии:

- обеспечение технологической независимости и экономической безопасности страны в условиях рыночной экономики;
- обеспечение поддержания на мировом уровне и совершенствование материальной базы Российской системы единства измерений и опережающего развития направлений в прикладной метрологии, позволяющих активно развивать новые высокоэффективные технологии (атомная техника, нанотехнология, биосинтез, энерго- и ресурсосбережение);
- обеспечение модернизации технологической базы промышленности в целом и машиностроения в частности на основе си-



стемной, комплексной автоматизации оборудования и производств;

- повышение безопасности эксплуатации промышленных, транспортных и коммунальных объектов, в том числе в чрезвычайных ситуациях;

- повышение эффективности и качества медицинской помощи за счет улучшения оснащенности органов здравоохранения современными средствами медицинской техники.

Указанные цели предполагают решение следующих задач:

- ускорение научных и конструкторско-технологических разработок современных средств измерения параметров в широком диапазоне значений, в том числе для измерений в экстремальных условиях, средств автоматизации и систем управления высокой надежности и быстрого действия, программных продуктов широкого назначения, телеизмерительных и телеуправляющих систем;

- технологическое переоснащение приборостроительных предприятий, в первую очередь ведущих, сохранивших в основном производственных потенциал (создание систем автоматизированного проектирования, участков микроэлектронной технологии СБИС, автоматизированных цехов с гибкими производственными системами механообработки, испытательных центров);

- создание интегрированных компаний с высоким уровнем кооперации и специализации, а также развитие и поддержка малых и средних предприятий, специализирующихся на создании и производстве высококачественной приборной продукции и комплектующих изделий;

- расширение внешнеэкономических связей и сотрудничества с ведущими иностранными фирмами, в том числе из ближнего зарубежья, гармонизация стандартов и технических норм с международными;

- организация целевой подготовки инженерных и рабочих кадров с решением социальных вопросов молодых специалистов, в том числе последипломной переподготовки специалистов.

Приоритетными направлениями развития приборостроения, средств автоматизации и систем управления на период до 2010 г. являются: использование новых физико-технологических принципов построения средств измерения физических величин и технологических параметров на основе достижений фундаментальных наук, гетерогенных структур, нанодисперсных материалов, ядерного магнитного резонанса, лазерной оптики, биотехнических сенсоров других высоких технологий, позволяющих обеспечивать высокую точность, надежность и широкий диапазон измерений, в том числе в экстремальных условиях.

Современное состояние приборостроительной промышленности в России. Приборостроение — базовая отрасль, обеспечивающая

промышленность средствами измерения для поддержания единства измерений в стране и в мире.

В России находится в эксплуатации около 1,5 млрд средств измерений, ежегодно потребители приобретают 15...17 млн единиц новых средств измерений, причем около 10 млн единиц поставляются отечественными предприятиями. Государственный реестр средств измерений Госстандарта России включает в себя более 29 000 типов средств измерений. Всемирная торговая организация (ВТО) приняла решение о гармонизации национальных систем измерения с Законом РФ «О техническом регулировании».

В экономике единство измерений обеспечивает производство и потребление продукции, эквивалентность обмена при торговых, таможенных, налоговых операциях, защиту прав потребителей, условия добросовестной конкуренции.

В социальной сфере единство измерений обеспечивает технические регламенты безопасности машин и оборудования, продуктов питания, медицинской техники и лекарственных препаратов, транспортных и других услуг.

Потребность промышленности в измерительных, аналитических, испытательных приборах, средствах автоматизации и вычислительной техники обеспечивается сейчас менее чем на 60 %.

По данным Государственного реестра средств измерений Госстандарта России, зарегистрировано более 3 000 видов средств измерений, ввозимых в РФ по импорту, часть которых (около 30 %) не изготавливается отечественной промышленностью.

К этим средствам измерений относятся:

- приборы и комплексы для измерения геометрических величин;
- приборы и комплексы для измерения физико-химического состава и свойств веществ;
- приборы для теплофизических и температурных измерений;
- приборы для измерения электрических величин;
- приборы для биологических и биомедицинских измерений.

Конкурентоспособность отечественной приборной продукции по различным номенклатурным группам на внутреннем рынке оценивается по соответствию мировым достижениям следующим образом:

- средства измерения теплоэнергетических величин — 70...80 %;
- средства измерения и измерительные системы электрических и магнитных величин — 80...90 %;
- средства измерения и испытательные машины механических величин — 80...85 %;
- геофизические и гидрометеорологические приборы — 60...70 %;
- средства медицинской техники широкого применения в лечебных учреждениях — 70...80 %;

ГЛАВА 1

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1. Назначение и принципы построения

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) создана в целях обеспечения техническими средствами системы контроля, регулирования и управления технологическими процессами различные отрасли промышленности.

В 1950-е гг. в различных организациях и на предприятиях разрабатывалось множество различных приборов для измерения и контроля со сходными техническими характеристиками, однако при этом не учитывалась возможность совместной работы приборов различных производителей, что приводило к увеличению стоимости разработок сложных систем на базе выпускаемых технических средств, тормозило широкое внедрение средств, тормозило широкое внедрение средств автоматизации. Поэтому в 1960 г. было принято решение о создании ГСП, а с 1961 г. начались работы по ее реализации.

В настоящее время ГСП представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность изделий, предназначенных для использования в качестве средств автоматических и автоматизированных систем контроля, измерения, регулирования технологических процессов, а также информационно-измерительных систем. ГСП стала технической базой создания АСУ ТП и АСУ в промышленности. Ее развитие и применение способствовали формализации процесса проектирования АСУ ТП, переходу к машинному проектированию.

В основу создания и совершенствования ГСП положены следующие системотехнические принципы: типизация и минимизация многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления; минимизация номенклатуры технических средств; блочно-модульное построение приборов и устройств; агрегатное построение систем управления на базе унифицированных приборов и устройств; совместимость приборов и устройств.

По функциональному признаку все изделия ГСП подразделены на следующие группы устройств: получения информации о состоянии процесса или объекта; приема, преобразования и передачи информации по каналам связи; преобразования, хранения и обработки информации, формирования команд управления; использования командной информации.

В первую группу устройств в зависимости от способа представления информации входят датчики, нормирующие преобразователи, формирующие унифицированный сигнал связи; приборы, обеспечивающие представление измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, и устройства алфавитно-цифровой информации, вводимой оператором вручную. Средства получения информации являются самой многочисленной группой изделий Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации — более половины номенклатуры всех технических средств.

Вторая группа устройств содержит коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, шифраторы и дешифраторы, согласующие устройства, средства телесигнализации, телеизмерения и телеуправления. Эти устройства используются для преобразования как измерительных, так и управляющих сигналов.

Третью группу составляют анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические устройства и устройства памяти, задатчики, регуляторы, управляющие вычислительные устройства и комплексы.

В четвертую группу входят исполнительные устройства — электрические, пневматические, гидравлические или комбинированные исполнительные механизмы, усилители мощности, вспомогательные устройства представления информации.

Минимизация номенклатуры средств контроля и управления реализуется на основе двух идей: унификации устройств одного функционального назначения на основе параметрического ряда этих изделий и агрегатирования комплекса технических средств для решения крупных функциональных задач.

Процесс минимизации начинается с отбора некоторых основных параметров приборов и устройств, выделения из их числа главного параметра и установления минимального необходимого числа устройств для перекрытия всего диапазона изменения главного параметра. При этом переход от диапазона использования одного устройства к диапазону использования другого подчиняется определенным закономерностям. Преимущественно используется геометрическая прогрессия, основанная на ряде предпочтительных чисел. Вся совокупность изделий одинакового функционального назначения называется *параметрическим рядом*.

В настоящее время разработаны параметрические ряды датчиков давления, расхода, уровня и электроизмерительных приборов.

Тем не менее продолжается их оптимизация по технико-экономическим показателям, например по критерию минимума суммарных затрат на удовлетворение заданных потребностей. Этот критерий основан на противоречии между интересами потребителя и изготовителя: чем меньше в ряду приборов, тем меньше затраты на разработку, освоение, тем большими партиями они выпускаются, что также снижает затраты изготовителя. Увеличение числа приборов в ряду дает экономию потребителю за счет более эффективного использования возможностей приборов или за счет более точного соблюдения режима технологического процесса.

Агрегатные комплексы (АК) представляют собой совокупность технических средств, организованных в виде функционально-параметрических рядов, охватывающих требуемые диапазоны измерения в различных условиях эксплуатации и обеспечивающих выполнение всех функций в пределах заданного класса задач.

Реализация принципа агрегатирования на этапах построения сложных управляющих систем на базе унифицированных блоков и устройств позволяет существенно упростить и ускорить процесс создания АСУ, создает предпосылки для автоматизации их проектирования. К очень важным достоинствам агрегатного построения технических средств можно отнести возможность совершенствования изделий без полного их обновления.

Принцип агрегатирования в ГСП применяется очень широко. Унифицированная базовая конструкция датчиков теплоэнергетических величин с унифицированным пневматическим и электрическим сигналами была создана всего из 600 наименований деталей, при этом получили 136 типов и 863 модификации датчиков.

На более высоких уровнях проектирования изделий ГСП в качестве конструктивной основы используется комплекс унифицированных типов (модульных) конструкций (УТК). Все детали и узлы комплекса подразделяются на четыре категории изделий таким образом, что элементы изделий низшего порядка предназначены для преобразования в элементы изделий высшего порядка.

Заложенные в ГСП общие для всех изделий понятия совместимости можно сформулировать следующим образом.

Информационная совместимость — совокупность стандартизированных характеристик, обеспечивающих согласованность сигналов связи по видам и номенклатуре, их информативным параметрам, уровням, пространственно-временным соотношениям, логическим соотношениям и типу логики. Для всех изделий ГСП приняты унифицированные сигналы связи и единые интерфейсы — совокупность программных и аппаратных средств, обеспечивающих взаимодействие устройств в системе.

Конструктивная совместимость — совокупность свойств, обеспечивающих согласованность конструктивных параметров и меха-

ническое сопряжение технических средств, а также выполнение эргономических норм и эстетических требований при совместном использовании.

Эксплуатационная совместимость — совокупность свойств, обеспечивающих работоспособность и надежность функционирования технических средств при совместном использовании в производственных условиях, а также удобство обслуживания, настройки и ремонта.

Метрологическая совместимость — совокупность выбранных метрологических характеристик и свойств средств измерений, обеспечивающих сопоставимость результатов измерений и возможность расчета погрешности результатов измерений при работе технических средств в составе систем.

1.2. Структура

Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации представляет собой большой, сложный и непрерывно развивающийся комплекс приборов и устройств, серийно выпускаемых промышленностью и предназначенных для автоматизации контроля и управления различными технологическими процессами и оборудованием.

По роду используемой энергии носителя информационных сигналов устройства ГСП подразделяются на электрические, пневматические, гидравлические, а также на устройства, работающие без использования вспомогательной энергии, — приборы и регуляторы прямого действия. Для того чтобы обеспечить совместную работу устройств различных групп, применяются соответствующие преобразователи сигналов. В АСУ наиболее эффективным является комбинированное применение устройств различных групп.

Достоинства электрических приборов общеизвестны. Это в первую очередь высокая чувствительность, точность, быстродействие, удобство передачи, хранения и обработки информации. Пневматические приборы обеспечивают повышенную безопасность при применении в легковоспламеняемых и взрывоопасных средах, высокую надежность в тяжелых условиях работы, в агрессивной атмосфере. Однако они уступают электрическим приборам по быстродействию, возможности передачи сигнала на большое расстояние. Гидравлические приборы позволяют получать точные перемещения исполнительных механизмов.

По функционально-целевому признаку ГСП представляет собой четырехуровневую иерархическую структуру. На нижнем уровне расположены средства получения информации для воздействия на процесс и средства, непосредственно взаимодействующие с объектом управления. Они обеспечивают информацией все вы-

шерасположенные средства. На втором уровне находятся средства локального контроля и регулирования, с помощью которых осуществляются одноконтурные системы контроля и регулирования простых объектов или автономного контроля и регулирования отдельных параметров сложных объектов. Как правило, эти средства выпускают в составе параметрических рядов и унифицированных комплексов, создаваемых на основе одной или нескольких базовых моделей. На третьем уровне расположены устройства централизованного контроля и регулирования, позволяющие реализовать связанное регулирование, косвенные измерения, многоступенчатые защиты и логические операции при пуске и остановке объекта. Они предназначены для построения АСУ ТП, имеющих несколько сотен контролируемых и регулируемых параметров. На верхнем уровне расположены средства автоматизации, предназначенные для работы в составе управляющих вычислительных комплексов со сложными алгоритмами управления, в том числе для решения оптимизационных, диспетчерских и других задач.

В технической документации наиболее широко используется такой классификационный признак, как *тип изделия* — совокупность изделий одинакового функционального назначения и принципа действия, сходных по конструктивному исполнению и имеющих одинаковые главные параметры. В состав типа может входить несколько типоразмеров и модификаций или исполнения изделия. *Типоразмеры* одного типа различаются значениями главного параметра и обычно выделяются в однофункциональных изделиях.

Модификация — совокупность изделий одного типа, имеющих определенные конструкционные особенности или определенное значение неглавного параметра. Под *исполнением* обычно понимают изделия одного типа, имеющие определенные конструктивные особенности, влияющие на их эксплуатационные характеристики, например тропическое или морское исполнение.

Более крупная классификационная группировка, чем тип, это *комплекс*. Они бывают унифицированные и агрегатные. Отличительной особенностью *унифицированного комплекса* является то, что любые сочетания технических средств комплекса между собой не приводят к реализации этими средствами новых функций. В *агрегатных комплексах* сочетанием технических средств можно реализовать новые функции. В настоящее время промышленностью выпускается примерно 30 агрегатных комплексов, предназначенных для получения, хранения, обработки информации, ее передачи, управления и исследования технологических процессов и объектов и т. д. Наиболее широко используются агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники (АСЭТ), вычислительной техники (АСВТ), телемеханики (АСТТ), средств сбора первичной информации (АСПИ) и др.

1.3. Информационные связи

Обмен информацией между техническими средствами ГСП реализуется при помощи сигналов связи и интерфейсов. Непрерывные (аналоговые) сигналы используются на нижних уровнях систем контроля и управления для получения измерительной информации и исполнения управляющих сигналов. На более высоких уровнях систем управления используют цифровые (дискретные) сигналы, обеспечивающие более надежную обработку сигналов. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой применяют аналого-цифровые преобразователи, выполняющие квантование по уровню и дискретизацию по времени аналоговых сигналов.

В АСУ наиболее распространены электрические сигналы связи, достоинствами которых являются высокая скорость передачи сигнала, низкая стоимость и доступность источников энергии, простота прокладки линий связи. Пневматические сигналы применяются в основном в нефтяной, химической и нефтехимической промышленности, где необходимо обеспечить взрывобезопасность и не требуется высокое быстродействие. Гидравлические сигналы в основном применяются в гидравлических следящих системах и устройствах управления гидравлическими исполнительными механизмами.

Информационные сигналы могут быть представлены в естественном или унифицированном виде. *Естественным сигналом* называется сигнал первичного измерительного преобразователя, вид и диапазон изменения которого определяются физическими свойствами преобразователя и диапазоном изменения измеряемой величины. Обычно это выходные сигналы измерительных преобразователей, чаще всего электрические, которые можно передать на небольшое расстояние (до нескольких метров). У *унифицированного сигнала* вид носителя информации и диапазон его изменения не зависят от измеряемой величины и метода измерения. Обычно унифицированный сигнал получают из естественного с помощью встроенных или внешних нормирующих преобразователей.

Из электрических сигналов наиболее распространены унифицированные сигналы постоянного тока и напряжения. Частотные сигналы используют в телемеханической аппаратуре и в комплексе технических средств локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС). Сигнал взаимной индуктивности применяется в датчиках теплоэнергетических параметров, что обеспечивает высокую надежность и устойчивость к воздействию окружающей среды при простой конструкции. Импульсные сигналы используются для контроля состояния двухпозиционных устройств, передачи командных сигналов.

При создании сложных систем, особенно на базе микропроцессорных устройств и вычислительных средств, обмен информацией между техническими средствами верхнего уровня осуществляется с помощью интерфейсов. *Интерфейс*, или сопряжение ввода-вывода, — совокупность программных и аппаратных средств, устанавливающих и реализующих взаимодействие устройств, входящих в систему и предназначенных для сбора, переработки и использования информации.

По определению интерфейс состоит из программной и аппаратной частей. Программная (информационная) часть определяет протокол (порядок) обмена сигналами и информацией (алгоритмы и временные диаграммы). Аппаратная часть (интерфейсные карты, платы) позволяет осуществлять информационный обмен управляющими, адресными, известительными и другими сигналами между функциональными модулями.

В ГСП наиболее распространены интерфейсы «Общая шина» (ОШ) и «Единый интерфейс» (ЕИ).

Интерфейсы определяют скорость сбора информации, загрузку памяти ЭВМ или контроллера, стоимость аппаратуры, поэтому в настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию рациональных интерфейсов.

1.4. Измерительные преобразователи

Необходимую для управления информацию о состоянии объекта и внешних воздействиях получают в виде значений отдельных физических величин с помощью соответствующих технических устройств, которые в автоматике называют *измерительными преобразователями* (ИП).

В отличие от измерительных приборов, где такая информация дана в виде, удобном для непосредственного восприятия оператором — человеком, информация в ИП представляется в виде определенной физической величины, удобной для передачи и дальнейшего преобразования в системе автоматики. Эту величину называют сигналом, и она однозначно связана с контролируемой физической величиной или параметром того или иного технологического процесса.

ГСП охватывает лишь часть контролируемых величин, которые наиболее часто используются в практике автоматизации. В ней все контролируемые величины разбиты на следующие группы:

- теплоэнергетические величины — химический состав и физические свойства;
- теплоэнергетические величины — температура, давление, перепад давлений, уровень и расход;

- электроэнергетические величины — постоянные и переменные ток и напряжение, мощность (активная и реактивная), коэффициент мощности, частота и сопротивление изоляции;

- механические величины — линейные и угловые перемещения, угловая скорость, деформация усилия, вращающие моменты, число изделий, твердость материалов, вибрация, шум и масса;

- величины, характеризующие физические свойства, — влажность, электропроводность, плотность, вязкость, освещенность;

- величины, определяющие химические свойства.

Устройства, в которых однократно (первично) преобразуется измеряемая физическая величина, принято называть первичными ИП.

ИП могут соединяться, образуя следующие структурные схемы:

- однократного прямого преобразования;
- последовательного прямого преобразования;
- дифференциальную;
- с обратной связью (компенсационную).

Простейшие ИП состоят из одного преобразователя. В случае последовательного соединения нескольких первичных преобразователей выходная величина предыдущего преобразователя является входной величиной последующего. Последовательное соединение ИП применяется в том случае, когда однократное преобразование не дает удобного для использования выходного сигнала. При дифференциальной схеме устраняется влияние на результат преобразования искажающих внешних факторов благодаря сопоставлению (сравнению) преобразованной и некоторой эталонной величин, одинаково подверженных действию этих факторов. Схема ИП с обратной связью характеризуется высокой точностью, универсальностью и малой зависимостью коэффициента преобразования от внешних возмущений.

ИП бывают с выходными естественным и унифицированным сигналами.

Естественный сигнал формируется первичными ИП естественным путем и представляет собой угол поворота, перемещение, усилие, напряжение (постоянное и переменное), сопротивление (активное и комплексное), электрическую емкость, частоту и др. ИП с естественным выходным сигналом (термопары, терморезисторы, тензодатчики и др.) широко применяются при автоматизации простых объектов.

Унифицированный сигнал — это сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины, метода и диапазона ее измерения. Среди унифицированных сигналов наибольшее распространение получили электрические сигналы постоянного и переменного токов, напряжения и частоты, а также пневматические сигналы.

К основным видам аналоговых унифицированных сигналов относятся:

- электрические постоянного тока, мА: 0...5; 0...20; -5...0...5;
- электрические постоянного напряжения: 0...10 мВ; 0...20 мВ; -10...0...10 мВ; 0...1 В; -1...0...1 В;
- электрические переменного напряжения, В: 0...2; -1...0...1;
- электрические переменного тока на частоте, кГц: 4...8; 2...4;
- пневматические, кПа: 20...100.

Преобразователи, служащие для изменения масштаба сигнала, называются *масштабными* ИП.

Для получения унифицированных аналоговых сигналов применяются ИП, называемые *нормирующими*.

Специфика контролируемой величины существенно влияет на метод преобразования, используемый в первичном ИП.

Типы преобразователей, применяемых в ГСП, подразделяются на шесть групп: механические, электромеханические, тепловые, электрохимические, оптические и электронно-ионизационные.

Преобразователи, предназначенные для передачи сигнала измерительной информации на расстоянии, называются *передающими* и используются в системах телемеханики.

1.5. Управляющие и корректирующие элементы

Управляющие и корректирующие элементы автоматики выполняют функции формирования сигналов управления исполнительными элементами системы. В целях формирования этих воздействий могут использоваться различные операции: усиления входных сигналов, хранения, передачи и дальнейшего преобразования согласно принятому алгоритму.

Нередко для автоматического управления несложными объектами применяются сравнительно простые управляющие элементы: усилители, реле и логические устройства. Для реализации более сложных алгоритмов управления (пропорционально-интегрального — ПИ, пропорционально-интегрально-дифференциального — ПИД) в цепи обратной связи электронного усилителя служат различные корректирующие элементы, например *RC*-цепочки. Корректирующие элементы могут и не входить в состав управляющих элементов. Дальнейшее совершенствование управления (реализация функций адаптации, логические операции при пуске и остановке объекта, многоступенчатая защита и др.) предполагает использование агрегатированных комплексов автоматики, предусмотренных номенклатурой ГСП, а также управляющих вычислительных машин.

В качестве управляющих элементов можно использовать микроконтроллеры и микропроцессорные системы, выполненные в

виде больших интегральных схем, характеризуемых рядом технических и эксплуатационных преимуществ.

Выходные каскады управляющих элементов представляют собой усилители мощности. Бесконтактные усилители мощности бывают тиристорными или магнитными.

Выходными каскадами управляющих элементов могут быть также гидравлические или пневматические усилители. В конструктивном отношении они имеют много общего и отличаются лишь энергоносителем (рабочим телом), в качестве которого в гидравлических усилителях используется жидкость под высоким давлением, а в пневматических — газ.

Гидро- и пневмоусилители конструктивно выполняются совместно с исполнительными элементами. Основные преимущества таких усилителей: большой коэффициент усиления по мощности, высокое быстродействие, малые габаритные размеры и металлоемкость на 1 кВт выходной мощности. Недостаток их применения заключается в необходимости использования специализированных источников питания (гидравлических насосов, компрессоров). Кроме того, гидросистемы требуют более тщательной герметизации линий связи и нуждаются в специальных емкостях для хранения рабочей среды (воды или специального негорючего масла).

1.6. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Для управления объектами в соответствующих системах автоматики предусматриваются исполнительные устройства, в состав которых входят исполнительные механизмы (ИМ) и регулирующие органы.

По виду потребляемой энергии ИМ подразделяются на электрические, гидравлические и пневматические.

Электрические исполнительные механизмы (ЭИМ) получили наиболее широкое распространение. Их выпускают постоянной и переменной скорости.

В системах управления технологическими процессами чаще всего применяются ЭИМ постоянной скорости. В результате повторнократковременного включения асинхронного электродвигателя ЭИМ реализует закон перемещения регулирующего органа (РО), формируемый управляющим элементом системы.

Электрические исполнительные механизмы подразделяются также по характеру перемещения РО на следующие виды:

- механизмы электрические однооборотные (МЭО);
- механизмы электрические многооборотные (МЭМ);
- механизмы электрические прямоходные (МЭП) с поступательным движением РО.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
И МЕТРОЛОГИИ

Обычно ЭИМ состоит из электродвигателя, редуктора, аппаратуры контроля и управления, а также из приставки, формирующей перемещение выходного вала.

Для улучшения динамических характеристик и фиксации выходного вала ЭИМ применяют тормоз.

Для обратной связи и контроля положения выходного вала служит датчик положения.

При управлении ЭИМ используют контактные и бесконтактные системы. В первом случае трехфазным асинхронным электродвигателем управляют посредством релейно-контактной аппаратуры, а во втором — применяют тиристорное управление специальными двухфазными конденсаторными электродвигателями.

Обозначение ЭИМ расшифровывается следующим образом.

Если ЭИМ оснащен трехфазным асинхронным электродвигателем с контактным управлением, то в наименовании добавляется буква «К» (МЭОК), а если управление бесконтактное — буква «Б» (МЭОБ).

Исполнительные элементы систем в пожаро- и взрывоопасных цехах выполняются на базе пневматических исполнительных механизмов (ПИМ).

К числу недостатков ПИМ относятся следующие: неудобство в наладке, связанное со сложностью оперативных изменений давления воздуха при проверке работоспособности; необходимость применения специальных компрессорных установок питания.

С помощью гидравлических исполнительных механизмов (ГИМ) можно наиболее надежно и просто реализовать преобразование управляющих сигналов-команд в перемещение РО, осуществляемое с большой скоростью и мощностью. ГИМ надежно работают в неблагоприятных условиях (при высокой влажности, повышенных температурах, вибрациях).

1.7. Агрегатирование — основа систематического подхода к созданию современной электроизмерительной аппаратуры

Краткий анализ современного уровня развития электроизмерительной техники (ЭИТ) показывает, что очевидна неуклонная тенденция к усложнению и росту многообразия измерительной аппаратуры. Кроме автономного применения эта аппаратура находит все более широкое применение в различного рода информационных системах, например в АСУ ТП. Это накладывает свой отпечаток на принципы проектирования, изготовления и эксплуатации электроизмерительной аппаратуры, в основе которых может лежать только современный системный подход.

Системный подход в данном случае означает, что решение проблемы создания средств ЭИТ есть решение комплекса работ, направленных:

- на достижение предельного уровня унификации и стандартизации средств ЭИТ, причем в первую очередь элементной и конструктивной баз;
- установление номенклатуры и состава, обеспечивающих выполнение требований, предъявляемых к ЭИТ, определенным числом модификаций средств одного типа (с позиций совокупных затрат на проектирование, изготовление и эксплуатацию);
- углубление предметной и технологической специализаций предприятий-разработчиков и изготовителей.

Реализацию этого комплексного подхода и преследует создание агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники (АСЭТ).

Средства комплекса — это средства ЭИТ, предназначенные для совместного использования по установленным правилам компоновки при создании информационных измерительных систем (ИИС) различного назначения: от элементарных систем, представляющих собой объединение всего лишь нескольких средств ЭИТ, до сложных многофункциональных ИИС широкого назначения или специализированных систем для автоматизации измерения и управления в отдельных областях промышленности и научных исследований.

Кроме того, такие средства комплекса, как измерительная аппаратура, могут использоваться в качестве автономных приборов или в составе простейших соединений, обеспечивающих автоматизацию измерений и регистрацию данных.

Таким образом, создание АСЭТ предусматривает удовлетворение требований промышленности в средствах измерения электрических и магнитных величин в различных отраслях и в первую очередь в машиностроении, металлургии, энергетике и научных исследованиях.

Переход к созданию средств ЭИТ в рамках АСЭТ обеспечивает возможность замены индивидуальной разработки сложных измерительных устройств ИИС в целом их проектной компоновкой с максимальной преемственностью решений и последующим переходом к проектированию с помощью ЭВМ.

Разработка и внедрение в производство средств АСЭТ позволяет:

- сократить затраты на разработку устройств ЭИТ и ИИС;
- повысить удельный вес заимствованных, специализированных и кооперированных деталей, узлов, блоков и средств, т.е. в конечном счете повысить производительность труда, а также увеличить объем производства на действующих мощностях за счет повышения производительности труда;

- ♦ сократить затраты на производство и сократить капиталовложения на развитие мощностей.

В общем случае принцип агрегатирования состоит в следующем.

1. Машины, системы и другие сложные технические устройства представляют собой агрегат, состоящий из нескольких независимых средств, блоков или узлов.

2. Расчленение на эти средства, блоки или узлы производится так, чтобы каждый из них выполнял определенную функцию и имел конструктивно-техническую законченность.

3. Виды сопряжений средств, блоков или узлов выбираются таким образом, чтобы их можно было собирать в агрегатах с заданными технико-эксплуатационными характеристиками.

4. Функциональное многообразие агрегатов достигается различным сочетанием средств, блоков и узлов, а также возможностью наращивания структуры агрегатов в процессе их эксплуатации.

5. Средства одного функционального назначения образуют параметрические ряды.

Специфика агрегатирования в приборостроительной промышленности при создании средств автоматизации и систем измерения, контроля, регулирования и управления связана с большим числом характеристик средств, их разнохарактерностью и сложностью описания. Отсюда возникают следующие особенности:

- ♦ необходимость расширения понятия совместимости средств, развития ее видов, отражающих средства по различным характеристикам;
- ♦ законченность и аттестованность по значительно большему числу параметров, чем, например, в машиностроении;
- ♦ многомерность параметрических рядов;
- ♦ усложнение процедуры компоновки агрегата с заданными технико-эксплуатационными характеристиками.

1.8. Структура и состав агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники

Решение методических вопросов определения структуры АСЭТ, изложенных в подразд. 1.7, позволило разработать структуру АСЭТ исходя из удовлетворения требований функциональной и структурной полноты комплекса. Она включает в себя четыре основные укрупненные группы (рис. 1.1):

- устройства сбора и преобразования информации (первичные и вторичные преобразователи информации, коммутаторы и др.);
- устройства измерения и представления информации;
- устройства управления и блоки связи;
- устройства вспомогательные.

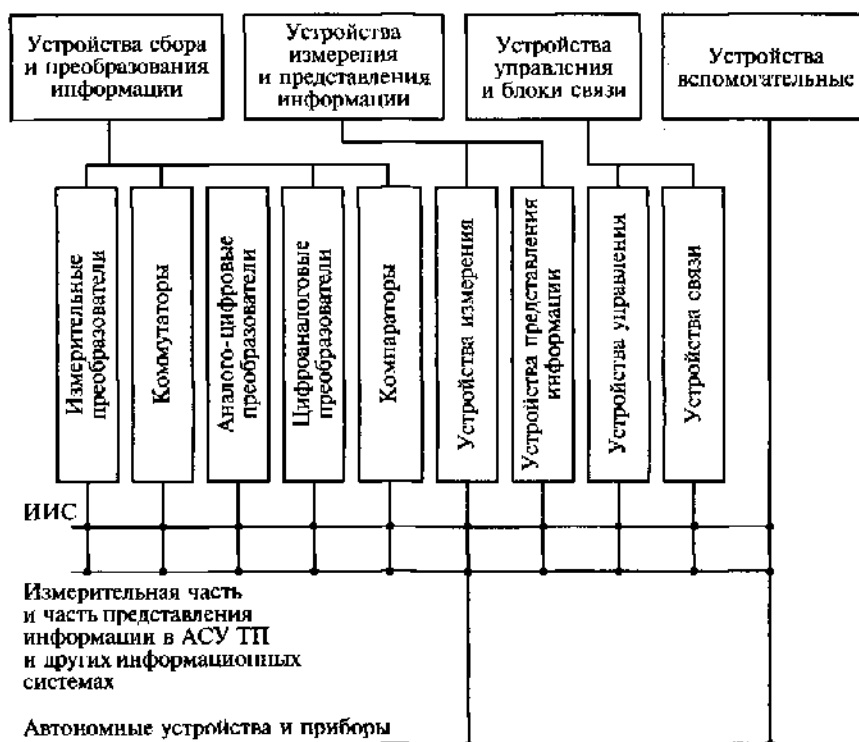


Рис. 1.1. Структура агрегатного комплекса средств электронизмерительной техники

В свою очередь, каждая из указанных групп включает в себя номенклатурные группы средств АСЭТ.

Номенклатурными группами средств АСЭТ являются:

- *измерительные преобразователи*, реализующие определенную функциональную зависимость и предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи и дальнейшего преобразования, но не поддающейся непосредственному восприятию человеком;
- *коммутаторы*, обеспечивающие передачу и подключение по определенной программе или периодических сигналов, представленных в виде аналоговых электрических величин, или цифровых кодов от одних средств к другим;
- *аналого-цифровые преобразователи*, осуществляющие автоматическое преобразование аналоговой величины в цифровой код;
- *цифроаналоговые преобразователи*, осуществляющие автоматическое преобразование сигналов, представленных в виде цифровых кодов, в аналоговые электрические величины;

- *компараторы*, предназначенные для вывода сигналов, характеризующих соотношение между текущим и заранее заданным значениями измеряемой (контролируемой) величины;

- *устройства измерения*, обеспечивающие измерение значений электрических величин и представление результатов измерения в форме, доступной для восприятия человеком или ЭВМ;

- *устройства представления информации*, предназначенные для представления (индикации или регистрации) информации об исследуемой величине в форме, доступной для восприятия человеком;

- *устройства управления*, предназначенные для организации совместной работы всех блоков системы по определенному алгоритму;

- *устройства связи*, осуществляющие согласование между сопрягаемыми агрегатными средствами;

- *устройства вспомогательные* включают в себя источники питания, блоки формирования и задания установок, блоки самоконтроля и т.д.

Каждая из перечисленных номенклатурных групп представляет собой широкую гамму агрегатных средств, которые могут быть классифицированы по критериям применения в системах на подгруппы, причем в большинстве случаев по нескольким уровням.

Измерительные преобразователи. Так как ИП связывают объект автоматизации, испытаний или исследований с измерительной частью любой ИИС или АСУ ТП, то наличие на его входах и выходах унифицированного сигнала является важным для построения систем по агрегатному принципу.

Измерительные преобразователи подразделяются на первичные и вторичные (рис. 1.2). Первичные ИП преобразуют любую входную физическую величину в электрический сигнал. Они подразделяются, в свою очередь, на первичные ИП с неунифицированным выходным сигналом (называемые также датчиками) и первичные ИП с унифицированным выходным сигналом. Неунифицированный сигнал на выходе характерен обычно для ИП неэлектрических величин, так как эти технические средства имеют «естественные» выходные сигналы, определяемые используемыми физическими эффектами, например термопары, тензометры и т.д. При преобразовании любых электрических и магнитных величин нет принципиальных трудностей для получения на выходе унифицированного сигнала. Получение же электрического унифицированного сигнала при измерении неэлектрических величин в агрегатных системах целесообразно при совместном использовании первичных ИП с неунифицированным выходом и унифицированным выходом. Вторичные ИП имеют на входе и выходе электрический унифицированный сигнал.

Иллюстрацией всевозможных связей первичных и вторичных ИП и последовательности преобразования сигналов является

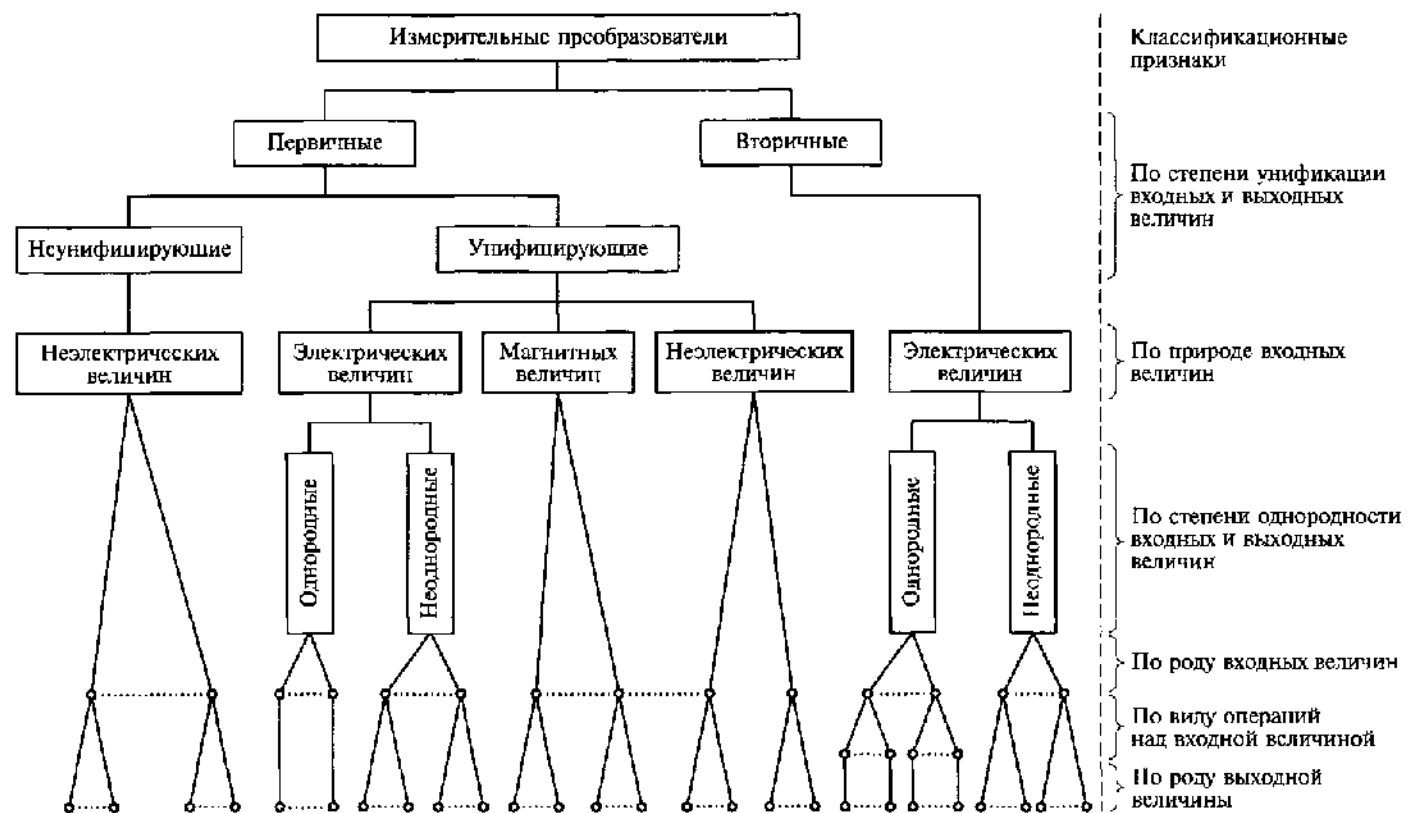


Рис. 1.2. Классификация измерительных преобразователей

рис. 1.3, на котором стрелками указаны направления передачи не-унифицированных и унифицированных сигналов. Поскольку все преобразуемые и измеряемые физические величины принято подразделять по своей природе на электромагнитные (электрические и магнитные) и неэлектромагнитные, то соответствующее подразделение принято и для первичных ИП:

- первичные ИП электрических величин;
- первичные ИП магнитных величин;
- первичные ИП неэлектрических величин.

В связи с тем что унифицированными принято считать несколько величин, целесообразно для ИП электрических величин ввести дополнительный классификационный признак: однородность и разнородность величины на входе и выходе. Поэтому следующая степень подразделения первичных ИП электрических величин и вторичных ИП — однородные и неоднородные.

Основой каждого подразделения в пределах любой подгруппы ИП является род входной преобразуемой величины (неунифицированной для первичных ИП и унифицированной для вторичных ИП). Например, к первичным ИП электрических величин относятся преобразователи, входными сигналами которых могут быть постоянный ток, частота, напряжение переменного тока, мощность и т.д.; к первичным ИП магнитных величин относятся преобразователи с входными сигналами в виде напряжения магнитного поля, магнитной проницаемости, индукции и т.д. К первичным ИП неэлектрических величин относятся преобразователи, входными величинами которых являются температура, давление, уровень, деформация, перемещение и т.д.

Если иметь в виду одно из основных назначений ИП — унификацию выходных сигналов, то становится очевидным целесообразность введения в классификацию еще одного признака. Таким признаком оказывается род выходной унифицированной величины. Следует при этом отметить, что для первичных и вторичных

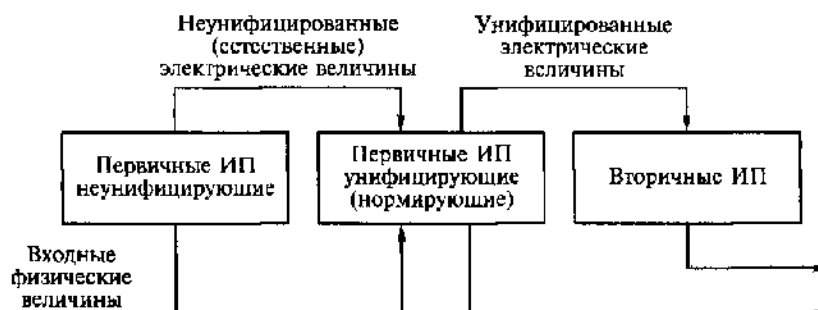


Рис. 1.3. Возможные связи первичных и вторичных преобразователей

однородных ИП род входных и выходных унифицированных величин будет совпадать. Отличие состоит лишь в значениях этих величин. Так, если входная величина первого однородного ИП — это напряжение постоянного тока, то унифицированной величиной на его выходе будет также напряжение постоянного тока, значение которого равно одному из значений ряда, принятых в качестве унифицированных.

Для однородных первичных и вторичных ИП существенным является вид операций. Это может быть деление, умножение, дифференцирование, логарифмирование, интегрирование, возведение в степень, суммирование и т.д. При выполнении этих операций род входной величины сохраняется и на выходе преобразователя.

Для неоднородных первичных и вторичных ИП электрических величин, а также для преобразователей магнитных и неэлектрических величин каждая из входных величин данного рода может быть преобразована в любую из унифицированных величин другого рода. Например, для первичных ИП электрических величин напряжение переменного тока преобразуется в унифицированные сигналы в виде напряжения постоянного тока; для первичных ИП магнитных величин напряженность магнитного поля преобразуется в унифицированные сигналы в виде напряжения постоянного тока; для первичных ИП неэлектрических величин перемещение преобразуется в унифицированные сигналы в виде напряжения постоянного тока; для вторичных ИП электрических величин постоянного тока — в унифицированные сигналы в виде, например, напряжения постоянного тока.

Рассмотренная классификация обладает тем достоинством, что может быть распространена на все ИП безотносительно к тому, насколько они различны по принципам построения, структуре, сложности, конструктивному оформлению, характеру и диапазонам преобразуемых величин. В то же время она сохраняется неизменной и в тех случаях, когда возникает необходимость пополнения перечня ИП на любом ее иерархическом уровне.

Коммутатор. Основное назначение коммутаторов — переключение электрических цепей и передача измерительной и служебной информации в соответствии с командами.

Коммутаторы используются для построения многоканальных ИИС, применяются в сочетании с ИП, аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) и цифровыми измерительными приборами.

Коммутаторы как номенклатурная группа входят в основную группу устройств сбора и преобразования информации и подразделяются на коммутаторы измерительные (КИ) сигналов и коммутаторы без нормируемой погрешности.

Поскольку технические требования, предъявляемые к КИ, не позволяют создать единой унифицированной модели (это эконо-

мически не выгодно), целесообразно провести классификацию КИ в зависимости от вида ИП на коммутаторы измерительные параметрических ИП и коммутаторы измерительные генераторных ИП.

К параметрическим относятся ИП активного сопротивления R , емкости C и индуктивности L . В соответствии с этим данная группа коммутаторов подразделяется на КИ сопротивления активного, КИ сопротивления емкостного и КИ сопротивления индуктивного. Коммутаторы параметрических ИП требуют применения ключей с минимальными и максимальными значениями сопротивления соответственно в замкнутом и разомкнутом состояниях. Большое значение для точности КИ имеет значение вариации этих сопротивлений.

К генераторным ИП относятся ИП токовых сигналов (постоянного тока) и ИП потенциальных сигналов (постоянного и переменного напряжения, частоты и импульсных сигналов).

Все КИ генераторных ИП характеризуются повышенными требованиями к остаточному напряжению ключей и уровню их собственных шумов.

Поскольку унифицированных ИП с выходным сигналом переменного тока практически нет, то в группе КИ токовых ИП предусмотрены только КИ токовых ИП постоянного тока.

Коммутаторы потенциальных ИП подразделяются на КИ преобразователей напряжения постоянного тока и КИ преобразователей напряжения переменного тока.

Коммутаторы напряжения переменного тока должны обеспечивать неискаженную передачу спектра частот коммутируемого сигнала, т.е. требуют минимального значения реактивного сопротивления ключей.

Коммутаторы без нормируемой погрешности применяются для коммутации цифровых и служебных импульсных сигналов. В этом случае основным является требование неискаженной передачи кодовых комбинаций и отдельных импульсов, обеспечивающих их безошибочное восприятие последующим устройством.

Аналого-цифровые преобразователи. Аналого-цифровые преобразователи по своему назначению могут входить в укрупненную группу устройств сбора и преобразования информации и представляют собой, по сути, неоднородные вторичные ИП, поскольку на входе и выходе этих агрегатных средств — унифицированные сигналы, но разного рода: на входе — аналоговые, на выходе — цифровой код. Однако этот тип обычно выделяют в отдельную номенклатурную группу, так как в процессе преобразования аналоговой величины в кодовый эквивалент происходит сравнение с эталоном (характерное свойство устройств измерения).

Так как на вход АЦП могут поступать любые аналоговые унифицированные сигналы, то эти преобразователи целесообразно подразделить на АЦП постоянного тока, АЦП напряжения по-

стоянного тока, АЦП напряжения переменного тока и АЦП частоты (временных интервалов). Выходной сигнал АЦП — двоичный нормальный код.

Цифроаналоговые преобразователи. Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) осуществляют преобразование, обратное по отношению к средствам предыдущей номенклатурной группы. Они также по существу являются неоднородными вторичными ИП. Выделение их в самостоятельную номенклатурную группу объясняется тем, что эти агрегатные средства широко используются для формирования управляющих воздействий на объект.

На вход их поступают унифицированные сигналы в виде двоичного нормального и двоично-десятичного кода с весами 8-4-2-1, на выходе ЦАП — аналоговые электрические величины. Это, прежде всего, унифицированные сигналы: постоянный ток, напряжение постоянного и переменного токов и частота. В последнее время в связи с ростом автоматизации проверочных и контрольных работ в области измерений появились точные ЦАП-калибраторы перечисленных аналоговых величин. Калибраторы кроме упомянутых величин позволяют формировать сигналы с эталонным сдвигом по фазе, импульсные последовательности эталонной частоты, эталонные сопротивления, емкости индуктивности.

Компараторы. Эти устройства относятся к измерительным преобразователям, осуществляющим логические операции, и являются устройствами сравнения. Они выполняют сравнение текущего значения измеряемой (контролируемой) величины со значением этой величины, заданным заранее, и выдают сигналы, соответствующие трем ситуациям: текущее значение, которое меньше, равно или больше заданного. Использование дискриминаторов позволяет контролировать определенные зоны значений измеряемой величины и выдавать управляющие сигналы для регулирования или управления процессами, которые характеризуются этими величинами.

По виду сигнала, представляющего текущее и заданное значения измеряемой (контролируемой) величины, дискриминаторы можно подразделить на аналоговые и цифровые. Сравнение в аналоговом виде в дискриминаторах обычно производится из видов унифицированного сигнала, т. е. по напряжению постоянного тока, напряжению переменного тока, постоянному току и частоте. Возможно построение аналого-цифровых дискриминаторов, в которых текущее значение имеет вид аналогового сигнала, а заданное значение — цифровой вид, т. е. с использованием ЦАП.

Устройства измерения. Для данной группы в качестве классификационных использованы следующие признаки: назначение, вид отображения информации, форма представления информации, вид входного сигнала.

По виду отображения информации устройства измерения подразделяются на аналоговые и цифровые. Аналоговые по длитель-

ности фиксации информации на носителе, в свою очередь, подразделяются на регистрирующие и показывающие.

К регистрирующим отнесены устройства, фиксирующие информацию на каком-либо носителе, обладающем свойствами долговременной памяти. Эта информация может быть воспринята человеком и использована им многократно в течение неограниченно длительного промежутка времени.

К показывающим относятся устройства, отображающие информацию на носителе, не обладающем возможностью ее хранения и допускающем считывание только за сравнительно непродолжительный промежуток времени.

В цифровых измерительных устройствах (ЦИП) рассматриваются только показывающие приборы. Цифровые измерительные приборы предназначены для измерения электрических величин с выдачей информации в цифровой форме.

Они могут использоваться как автономные приборы, а также в составе многоканальных ИИС или измерительной части других систем.

В зависимости от того, для измерения каких величин они предназначены, ЦИП подразделяются на шесть больших подгрупп: вольтметры, амперметры, измерители параметров электрических цепей, приборы частотно-временной группы, комбинированные приборы и фазометры.

В свою очередь, вольтметры и амперметры подразделяются по роду измеряемого тока на приборы постоянного и переменного токов, а среди вольтметров появляется класс для измерения амплитуды импульсов.

Измерители параметров электрических цепей подразделяются на омметры и процентные омметры, измерители емкости, измерители индуктивности и универсальные измерители параметров электрических цепей. Как правило, измерители емкости и индуктивности позволяют измерять тангенс угла потерь и процентное отклонение.

Универсальные измерители параметров электрических цепей позволяют кроме емкости и индуктивности измерять также сопротивление, проводимость, тангенс угла потерь, процентное отклонение, постоянную времени цепи.

Вольтметры и омметры позволяют дополнительно произвести измерение отношений напряжения и сопротивления.

Приборы частотно-временной группы подразделяются на частотомеры, измерители временных интервалов и счетчики импульсов.

Частотомеры кроме измерения частоты f , измерения периода T и промежутка времени между импульсами t иногда позволяют производить измерение процентного отклонения частот Δf , длительности импульсов τ , отношения частот f_1/f_2 и деления частоты f/n .

Счетчики импульсов, как правило, позволяют производить прямой, реверсный счет импульсов и счет импульсов с предустановкой, а также деление частот.

Комбинированные приборы включают в себя широкую гамму приборов, так как соединение в одном приборе возможности измерять два и более вышеприведенных параметра дает уже комбинированный прибор, например вольтметр, вольтамперфарадметр и т.д. Измерение может производиться как на постоянном, так и на переменном токе.

К АСЭТ относятся аналоговые показывающие щитовые и панельные приборы. Эти приборы как более простые и дешевые по сравнению с цифровыми еще находят применение в некоторых типах ИИС для дублирования измерений наиболее важных величин при относительно небольшом их количестве.

В соответствии с ранее рассмотренным аналоговые показывающие приборы могут быть классифицированы по измеряемой величине на амперметры постоянного тока, вольтметры постоянного и переменного токов и частотомеры.

Используя в качестве классификационного признака форму представления измерительной информации, регистрирующие устройства измерения можно подразделить на графические, отображающие измерительную информацию в графической форме, и знакографические, отображающие информацию в графической форме с оцифровкой отдельных точек.

Группу графических регистрирующих устройств измерения составляют светолучевые осциллографы, самописцы и двухкоординатные приборы с нормированной погрешностью.

Имеется тенденция к возникновению группы знакографических регистрирующих устройств измерения, которую образуют те же самые устройства, но отличающиеся возможностью регистрировать значения измеряемой величины в отдельных точках в цифровой форме (с оцифровкой отдельных точек) или в алфавитно-цифровой, фоновой, служебной информации.

При отнесении к АСЭТ аналоговых регистрирующих устройств измерения применяется тот же принцип, что и в показывающих приборах, т.е. в АСЭТ входят щитовые и панельные, а также лабораторные приборы.

Классификация регистрирующих устройств измерения по измеряемой величине аналогична классификации показывающих приборов, но добавляется еще один класс — это двухкоординатные приборы, входным сигналом у которых в большинстве случаев является напряжение постоянного тока.

Устройства представления информации. К этой группе относятся устройства, предназначенные только для отображения результатов измерения и обработки, выполненных другими устройствами. В связи с этим входным сигналом всех этих устройств является

дискретный сигнал и лишь в отдельных случаях к нему может добавляться аналоговый.

Признаки классификации устройств представления информации аналогичны классификационным признакам устройств измерения.

По виду отображения измерительной информации они подразделяются на регистрирующие и показывающие, каждые из которых, в свою очередь — на подгруппы в зависимости от формы представления информации. Так, показывающие устройства разбиваются на графические аналоговые устройства представления знаковой информации и знакографические. Для последних и характерно на входе сочетание аналогового и кодового сигналов.

Графические устройства представления информации отображают информацию в графической форме и разбиваются на два класса: непрерывные, в которых информация представляется непрерывными линиями, и дискретные, в которых информация представляется в виде гистограмм.

Подгруппу устройств измерения знаковой информации образуют индикаторы событий, пиктографические индикаторы ячейки мнемосхем, алфавитно-цифровые индикаторы и мнемосхемы.

Подгруппу показывающих устройств представления информации знакографических составляют устройства, позволяющие отображать информацию как в аналоговой, так и в знаковой форме, т.е. универсальные индикаторы (дисплеи).

Регистрирующие устройства представления информации подразделяются на графические, знаковые и знакографические. Графические регистрирующие устройства представления информации подразделяются на непрерывные и дискретные. Эти подгруппы составляют графопостроители различного типа с цифровым входом.

Знаковые регистрирующие устройства представления информации подразделяются на цифropечатающие и алфавитно-цифровые печатающие устройства. В подгруппу знакографических регистрирующих устройств представления информации входят графопостроители с цифровым входом, имеющие возможность регистрации отдельных точек графика.

Устройства управления. Группа устройств управления и блоков связи весьма специфична, так как средства, входящие в нее, в значительной степени зависят от структур систем, алгоритмов функционирования, степени централизации управления, режимов обмена информацией между средствами, установленных стандартных интерфейсов, а также от уровня интеграции элементной базы, степени применения вычислительных устройств и ряда других факторов.

В настоящее время можно предложить подразделить устройства управления на три подгруппы, а блоки связи — на четыре подгруппы.

В первую подгруппу устройств управления входят таймеры и часы, которые формируют сигналы, используемые в качестве служебных, а также кодовые эквиваленты значения текущего времени.

Второй подгруппой в устройствах управления являются программные устройства (контроллеры), которые управляют работой отдельных агрегатных средств в системах.

К третьей подгруппе относятся наиболее сложные устройства управления, включающие в себя вычислительные средства (мини-ЭВМ и микропроцессоры, которые позволяют не только осуществлять программное управление, но и калибровку, коррекцию температурной погрешности, линеаризацию, диагностику неисправностей, первичную обработку измерительной информации и т.д.). Эту подгруппу устройств управления часто называют активными контроллерами.

Блоки связи решают задачу согласования потоков информационных и служебных сигналов между сопрягаемыми агрегатными средствами в соответствии с принятыми интерфейсами. В блоки связи входят групповые пассивные контроллеры, расширители, устройства согласования входных и выходных сигналов по уровням и мощностям.

Устройства вспомогательные. Классификация устройств этой группы будет производиться в дальнейшем по мере накопления опыта построения ИИС и АСУ ТП.

Контрольные вопросы

1. В каких целях создана в России Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации?
2. Каково назначение устройств телемеханики?
3. Какой сигнал называют унифицированным?
4. Перечислите разделенные по функциональному признаку группы изделий Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации.
5. Назовите пять групп, на которые разбиты контролируемые величины в Государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации.
6. Назовите достоинства и недостатки пневматических и гидравлических средств управления.
7. Какова цель создания агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники?
8. Какова структура и состав АСЭТ?

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ЕДИНИЦЫ

2.1. Виды физических величин и единиц

В науке, технике и обыденной жизни мы имеем дело с разнообразными свойствами окружающих нас тел. Эти свойства отражают процессы взаимодействия тел между собой и их воздействие на органы чувств. Для описания свойств вводятся физические величины, каждая из которых является качественно общей для многих объектов (физических тел, их состояния, процессов, в которых они участвуют), но в количественном отношении различной для разных объектов. Для того чтобы дать меру физической величине, мы устанавливаем единицу. Единица определенной физической величины представляет собой значение данной величины, которое по определению считается равным единице. Операция, с помощью которой мы узнаем числовое значение той или иной величины для определенного объекта, представляет собой *измерение* этой величины. Чтобы измерение физической величины имело однозначный характер, следует обеспечить следующее: отношение двух однородных (одноименных) величин не должно зависеть от того, с помощью какой единицы они измерены. Подавляющее большинство физических величин удовлетворяет этому условию, которое обычно называют *условием абсолютного значения относительного количества*. Это условие может быть соблюдено при наличии, по крайней мере, принципиальной возможности такого количественного сравнения двух однородных величин, в результате которого получается число, выражающее отношение этих величин.

Но иногда требуется измерить свойства, которые не могут быть охарактеризованы величиной, отвечающей данному требованию. В этом случае вводят некоторые условные величины и соответственно шкалы.

Существовало и существует большое число разнообразных единиц величин, что создает серьезные трудности прежде всего в международных торговых отношениях и обмене результатами научных исследований.

Ранее большинство единиц установилось, как правило, совершенно независимо друг от друга. Исключение в ряде случаев со-

ставляли лишь единицы длины, площади и объема. Основные величины выбираются из условия независимости между собой и с учетом возможности установить с их помощью связи с другими физическими величинами. Эти связи устанавливаются с помощью известных закономерностей между основными и производными от них величинами. Таким образом, из нескольких условно выбираемых так называемых *основных единиц* строятся *производные единицы*.

В метрологии существует два вида уравнений, связывающих между собой различные физические величины: уравнения связи между величинами и уравнения связи между числовыми значениями. Первые представляют соотношения между величинами в общем виде независимо от единиц; вторые могут иметь различный вид в зависимости от выбранных единиц, входящих в уравнение величин. При этом в уравнениях связи между числовыми значениями часто имеются коэффициенты пропорциональности. Именно для установления единиц физических величин используются уравнения связи между числовыми значениями. Первый вид уравнений имеет вид

$$X = f(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (2.1)$$

где $X_1, X_2, \dots, X_m$ — величины, связанные с измеряемой величиной X некоторым уравнением связи.

Уравнение (2.1), если $X_1, X_2, \dots, X_m$ представляют собой основные величины, служит для образования производных величин.

Например, сила F определяется уравнением $F = ma = mlT^{-2}$, где m — масса тела, к которому приложена сила; a — ускорение, приобретаемое телом при приложении к нему данной силы; l — длина. Поскольку длина, масса и время во всех системах представляют собой основные величины, то сила является производной величиной.

Второй вид уравнений — уравнения связи между числовыми значениями — используется для установления единиц измерений. Входящие в уравнение (2.1) величины можно представить в соответствии с основным уравнением измерений в виде

$$X = q[X]; \quad X_1 = q_1[X_1]; \quad X_2 = q_2[X_2]; \quad X_m = q_m[X_m],$$

где $q, q_1, q_2, \dots, q_m$ — числовые значения, а $[X], [X_1], [X_2], [X_m]$ — единицы величин.

2.2. Системы единиц физических величин

Совокупность основных и производных единиц, относящихся к некоторой системе величин, построенная в соответствии с принятыми принципами, образует *систему единиц*.

Исторически первой системой единиц физических величин была принятая в 1791 г. Национальным собранием Франции *метрическая система мер*. Она не являлась еще системой единиц в современном понимании, но включала в себя единицы длин, площадей, объемов, вместимостей и веса, в основу которых были положены две единицы: метр и килограмм.

В 1832 г. немецкий математик К. Гаусс предложил методику построения системы единиц как совокупности основных и производных. Он построил систему единиц, в которой за основу были приняты три независимые друг от друга единицы длины, массы и времени. Все остальные единицы можно было определить с помощью этих трех единиц. Такую систему единиц, связанных определенным образом с тремя основными единицами длины, массы и времени, К. Гаусс назвал *абсолютной системой*. За основные единицы он принял миллиметр, миллиграмм и секунду.

В дальнейшем с развитием науки и техники появился ряд систем единиц физических величин, построенных по принципу, предложенному К. Гауссом, базирующихся на метрической системе мер, но отличающихся друг от друга основными единицами.

Рассмотрим главнейшие системы единиц физических величин.

2.2.1. Система СГС

Система единиц физических величин СГС, в которой основными единицами являются сантиметр как единица длины, грамм как единица массы и секунда как единица времени, была установлена в 1881 г. I Международным конгрессом электриков. Конгресс установил систему СГС по принципам, предложенным Гауссом, и ввел наименование для двух важнейших производных единиц: дина — для единицы силы и эрг — для единицы работы. Для измерения мощности в системе СГС применяется эрг в секунду, для измерения кинетической вязкости — стокс, динамической вязкости — пуаз.

Давление в системе СГС измеряется в динах на квадратный сантиметр. Эта единица в прошлом называлась бар, однако в связи с переименованием в бар единицы давления, равной 10^5 Н/м^2 , для единиц давления СГС иногда применяется наименование бар и одновременно микробар (так как она равна одной миллионной нового бара).

В области механических измерений система СГС охватывается на три основные единицы, из которых остальные образуются как производные.

Сложнее обстоит дело с применением системы СГС для электрических и магнитных измерений. Исторически сложилось так,

что для них к настоящему времени существует семь видов системы СГС для электрических и магнитных величин, из которых наиболее распространены следующие три.

1. Система СГСЭ, построенная на трех основных единицах — сантиметре, грамме, секунде; диэлектрическая проницаемость вакуума принята равной безразмерной единице. Эта система называется также *абсолютной электростатической системой единиц*.

2. Система СГСМ, основные единицы которой такие же, как и у системы СГСЭ, — сантиметр, грамм, секунда, а магнитная проницаемость вакуума принята равной безразмерной единице. Эта система называется также *абсолютной электромагнитной системой единиц*.

3. Система СГС, называемая также симметричной системой, или *системой Гаусса*. В ней электрические единицы совпадают с электрическими единицами СГСЭ, а магнитные — с магнитными единицами СГСМ.

2.2.2. Система МКГСС

Как известно, в период установления метрической системы мер, в конце XVIII в., килограмм был принят единицей веса.

Применение килограмма в качестве единицы веса, а в последующем как единицы силы вообще привело в конце XIX в. к формированию системы единиц физических величин с тремя основными единицами: метр — единица длины, килограмм-сила — единица силы и секунда — единица времени (система МКГСС).

Килограмм-сила (кгс) — это сила, которая сообщает массе, равной массе международного прототипа килограмма, ускорение $9,80665 \text{ м/с}^2$ (нормальное ускорение свободного падения).

Эта система единиц широко распространилась в механике и в технике, получив неофициальное наименование «техническая». Одной из причин распространения системы МКГСС явилось удобство выражения сил в единицах веса и удобный размер основной единицы силы — килограмм-силы.

За единицу массы в системе МКГСС принята масса тела, получающего ускорение 1 м/с^2 под действием приложенной силы 1 кгс . Эта единица (килограмм-сила-секунда в квадрате на метр) иногда называется технической единицей массы (т.е.м.) или инертной, хотя оба эти наименования не установлены ни в одной из рекомендаций на единицы физических величин. Единица массы МКГСС — $\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м} = 9,81 \text{ кг}$ — единицы массы СИ.

Широко применялись в технике единицы работы и энергии МКГСС — килограмм-сила-метр ($\text{кгс} \cdot \text{м}$) и единица мощности — килограмм-сила-метр в секунду ($\text{кгс} \cdot \text{м/с}$).

2.2.3. Система МТС

В системе единиц МТС основными единицами являются: единица длины — метр, единица массы — тонна и единица времени — секунда.

Эта система единиц впервые была установлена в 1919 г. во Франции, где была принята в законоположении о единицах измерений. В 1927 — 1933 гг. система МТС была рекомендована советскими стандартами на механические единицы. Выбор тонны в качестве основной единицы массы казался удачным, так как достигалось соответствие между единицами длины и объема, с одной стороны, и единицей массы, с другой (с точностью, достаточной для большинства технических расчетов, 1 т соответствует массе 1 м^3 воды). Кроме того, единица работы и энергии в этой системе (килоджоуль) и единица мощности (киловатт) совпадали с соответствующими кратными практическими электрическими единицами.

В системе МТС единицей силы служит стен (сн), равный силе, сообщающей массе 1 т ускорение 1 м/с^2 , единицей давления — пьеза (1 сн/м^2).

2.2.4. Абсолютная практическая система электрических единиц

Эта система была установлена в 1881 г. I Международным конгрессом электриков в качестве производной от системы СГСМ и предназначалась для практических измерений в связи с тем, что электрические и магнитные единицы системы СГС оказались неудобными для практики (одни были слишком велики, другие слишком малы). В числе первых практических электрических единиц были приняты:

- практическая единица электрического сопротивления, равная 10^9 единицам сопротивления СГСМ, которая получила впоследствии наименование ом;
- практическая единица электродвижущей силы, равная 10^8 единицам электродвижущей силы СГСМ, названная вольт;
- практическая единица силы электрического тока — ампер, равная 10^{-1} электромагнитным единицам силы тока СГСМ;
- практическая единица электрической емкости, равная 10^{-9} единицам электрической емкости СГСМ, названная фарадом.

II Международный конгресс электриков в 1889 г. включил в список практических электрических единиц еще три:

- джоуль как единицу энергии, равную 10^7 единицам энергии СГСМ;
- ватт, равный 10^7 единицам мощности СГСМ;

- квадрант (впоследствии это наименование заменено на генри) как единицу индуктивности, равную 10^9 единицам индуктивности СГСМ.

В дальнейшем решениями Международной электротехнической комиссии и генеральных конференций по мерам и весам были установлены другие практические электрические и магнитные единицы (вебер, сименс, тесла и др.).

В 1893 г. в Чикаго III Международный конгресс электриков принял *международные электрические единицы*, отличавшиеся от единиц абсолютной практической системы электрических единиц тем, что они базировались не на теоретическом определении единиц, а на их эталонах.

Конгресс установил три основные международные электрические единицы:

- международный ом, для определения которого использовали ртутный эталон;
- международный ампер, определяемый с помощью серебряного вольтметра;
- международный вольт, определяемый по элементу Кларка.

Остальные электрические единицы (международный кулон, международный фарад и др.) были определены как производные от них.

Завершением работы по установлению международных электрических единиц и четкому разграничению абсолютных практических единиц и международных явились решения Международной Лондонской конференции электриков в 1908 г. В качестве единиц, которые с достаточным приближением при практических измерениях и для законодательных целей воспроизводят электрические единицы, конференция рекомендовала принять международный ом, международный ампер, международный вольт и международный ватт.

2.2.5. Система МКСА

Основы этой системы были предположены в 1901 г. итальянским ученым Джорджи (поэтому система имеет и второе наименование, принятое в 1958 г. Международной электротехнической комиссией, — «система Джорджи», но не получившая, однако, распространения). Основными единицами системы МКСА являются метр, килограмм, секунда и ампер. В системе МКСА сила измеряется в ньютонах, работа и энергия — в джоулях, мощность — в ваттах.

В системе МКСА механические единицы полностью согласованы с единицами абсолютной практической системы электрических и магнитных единиц — ампером, вольт, омом, кулоном и др. Система МКСА является частью Международной системы единиц (СИ).

2.2.6. Внесистемные единицы

Несмотря на определенные преимущества, которые дает применение единиц, определяемых той или иной системой, до настоящего времени широко распространены различные единицы, не укладывающиеся ни в одну из систем. Число так называемых *внесистемных единиц* довольно велико, и от многих из них нельзя отказаться ввиду удобства их применения в определенных областях, остальные сохранились в силу исторических традиций.

Так, исторически возникла единица давления — атмосфера, равная давлению, производимому силой 1 кгс на площадь 1 см², так как атмосфера близка по размеру к среднему давлению атмосферного воздуха на уровне моря.

К числу важнейших внесистемных единиц, имеющих широкое применение, относятся единицы длины — ангстрем, световой год, парсек; площади — ар, гектар; объема — литр; массы — карат; давления — атмосфера, бар, миллиметр ртутного столба, миллиметр водяного столба; количества теплоты — калория; электрической энергии — электроп-вольт, киловатт-час; акустических величин — децибел, октава; ионизирующих излучений — рентген, рад, кюри.

Следующую группу внесистемных единиц образуют единицы, построенные из основных единиц системы не по десятичному принципу. К ним в первую очередь относятся такие распространенные единицы времени, как минута и час.

Наконец, последнюю группу образуют единицы, не связанные с какой-либо системой. Сюда входят все устаревшие национальные единицы, такие как старые русские, английские и т. д.

2.2.7. Относительные и логарифмические величины и единицы

В науке и технике широкое распространение получили относительные и логарифмические величины и их единицы, которые характеризуют состав и свойства материалов, отношения энергетических и силовых величин, например относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, усиление и ослабление мощностей и т. п.

Относительная величина представляет собой безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную. В число относительных величин входят и относительные атомные или молекулярные массы химических элементов, выражаемые по отношению к одной двенадцатой ($1/12$) массы атома углерода — 12.

Относительные величины могут выражаться в безразмерных единицах (когда отношение двух одноименных величин равно еди-

нице), в процентах (когда отношение равно 10^{-2}), промилле (отношение равно 10^{-3}) или в миллионных долях (отношение равно 10^{-6}).

Логарифмическая величина представляет собой логарифм (десятичный, натуральный или при основании 2) безразмерного отношения двух одноименных физических величин. Логарифмические величины применяются для выражения уровня звукового давления, усиления, ослабления, выражения частотного интервала и т. п.

Единицей логарифмической величины является бел (Б), определяемый соотношением $1 \text{ Б} = \lg P_2/P_1$ при $P_2 = 10P_1$ (где P_2 и P_1 — одноименные энергетические величины мощности, энергии, плотности энергии и т. п.). Долю единицы от бела является децибел (дБ), равный 0,1 Б.

Так, в случае характеристики усиления электрических мощностей при отношении полученной мощности P_2 к исходной P_1 , равной 10, логарифмическая величина усиления будет составлять 1 бел, или 10 дБ, при увеличении или уменьшении мощности в 1 000 раз логарифмическая величина усиления составит 3 Б, или 30 дБ, и т. д.

2.3. Международная система единиц физических величин

В 50—60-е гг. XX в. все чаще проявлялось стремление многих стран к созданию единой универсальной системы единиц, которая могла бы стать международной. В числе общих требований к основным и производным единицам выдвигалось требование когерентности такой системы единиц.

Дело в том, что одновременное применение разных систем единиц в отдельных областях привело, по сути дела, к засорению многих расчетных формул числовыми коэффициентами, не равными единице, что сильно усложнило расчеты. Например, в технике стало обычным применение для измерения массы единицы системы МКС — килограмма, а для измерения силы единицы системы МКГСС — килограмм-силы. Это представлялось удобным с той точки зрения, что числовые значения массы (кг) и веса (кгс), т. е. силы притяжения к Земле, оказались равными (с точностью достаточной для большинства практических случаев). Однако следствием приравнивания значений разнородных, по существу, величин были появление во многих формулах числового коэффициента 9,81 и смешения понятий массы и веса, которое вызвало много недоразумений и ошибок.

Такое многообразие единиц и связанные с этим неудобства породили идею создания универсальной системы физических ве-

личин всех отраслей науки и техники, которая могла бы заменить все существующие системы и отдельные внесистемные единицы.

Такой системой стала Международная система единиц.

В 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам установила шесть основных единиц для международных отношений: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц, обозначаемую сокращенно SI (начальные буквы французского наименования *Système International*), в русской транскрипции — СИ.

В результате некоторых видоизменений, принятых Генеральными конференциями по мерам и весам в 1967, 1971, 1979 гг., в настоящее время система включает в себя семь основных единиц (табл. 2.1).

Универсальность СИ обеспечивается тем, что семь основных единиц, положенных в ее основу, являются единицами физических величин, отражающих основные свойства материального мира, и дают возможность образовывать производные единицы для любых физических величин во всех отраслях науки и техники. Этой же цели служат и дополнительные единицы, необходимые для образования производных единиц, зависящих от плоского и телесного углов.

Преимущества СИ перед другими системами единиц следующие:

1) СИ является универсальной, охватывая все области науки, техники, производства;

2) она построена для некоторой системы величин, позволяющих представить явления в форме математических уравнений; некоторые из физических величин приняты основными, и через них выражены все остальные производные физические величины.

Таблица 2.1

Наименование	Единица измерений	Обозначение	
		Международное	Русское
Длина	Метр	m	м
Масса	Килограмм	kg	кг
Время	Секунда	s	с
Сила электрического тока	Ампер	A	А
Термодинамическая температура	Кельвин	K	К
Количество теплоты	Моль	mol	моль
Сила тока	Кандела	cd	кд

Для основных величин установлены единицы, размер которых согласован на международном уровне, а для остальных величин образуются производные единицы;

3) построенная таким образом система единиц и входящие в нее единицы называются когерентными (связанными, согласованными). Коэффициенты пропорциональности в физических уравнениях, определяющих единицы производных величин, равны безразмерной единице;

4) в СИ устранена множественность единиц (унификация единиц для всех видов измерений) для выражения величин одного и того же ряда. Например, вместо большого числа единиц давления, применявшихся на практике, единицей давления в СИ принята только одна единица — паскаль.

В области тепловых измерений произведен переход от раздельного измерения работы и количества теплоты в джоулях и калориях к единому измерению в джоулях;

5) установление для каждой физической величины своей единицы позволило разграничить понятие массы (кг) и веса (Н).

Понятие массы следует использовать во всех случаях, когда имеется в виду свойство тела или вещества, характеризующие его инертность и способность создавать гравитационные поля, а понятие веса следует использовать в тех случаях, когда имеется в виду сила, возникающая вследствие взаимодействия с гравитационным полем;

6) определение основных единиц СИ возможно с высокой степенью точности, что в конечном счете не только позволяет повысить точность измерений, но и обеспечить их единство. Это достигается путем «материализации» единиц в виде эталонов и передачи от них измерений с помощью комплекса образцовых средств измерений

Международная система единиц благодаря своим преимуществам получила широкое распространение в мире. Так, все страны перешли на единицы СИ. Страны, где ранее применялась английская система мер (Великобритания, Австралия, Канада, США и др.), также внедряют единицы СИ.

2.4. Определение содержания основных единиц СИ

В соответствии с решениями Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ), принятыми в разные годы, действуют следующие определения основных единиц СИ.

Единица длины — метр — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ доли секунды (решение XVII ГКМВ в 1983 г.)

Единица массы — килограмм-масса, равная массе международного прототипа килограмма (решение I ГКМВ в 1889 г.)

Единица времени — секунда — продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, не возмущенного внешними полями (решение XIII ГКМВ в 1967 г.).

Единица силы электрического тока — ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между этими проводниками силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины (одобрено IX ГКМВ в 1948 г.).

Единица термодинамической температуры — кельвин (до 1967 г. имел наименование градус Кельвина) — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Допускается выражение термодинамической температуры в градусах Цельсия (резолюция XIII ГКМВ в 1967 г.).

Единица количества вещества — моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг (резолюция XIV ГКМВ в 1971 г.).

Единица силы света — кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/283$ Вт/ср (резолюция XVI ГКМВ в 1979 г.).

Дополнительные единицы СИ. Дополнительные единицы имеют специфическое применение и необходимы для образования производных единиц, связанных с угловыми величинами. Поэтому эти единицы не могут быть отнесены ни к основным, ни к производным, так как они не зависят от выбора основных единиц (за исключением единицы силы света).

Международная система единиц включает в себя две дополнительные единицы для измерения плоского и телесного углов.

Единица плоского угла — радиан (рад, rad) — угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми по длине равна радиусу. В градусном исчислении угол $\alpha = 57^{\circ} 17' 44,8''$.

Единица телесного угла — стерadian (ср, sr) — телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который «вырезает» на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной по длине радиусу сферы.

Как радиан, так и стерadian размерности не имеют. Безразмерность этих единиц означает то, что при определяющем уравнении $\alpha = l/r$ принятая, например, единица плоского угла оказывается одной и той же независимо от размера основных единиц (длины).

На практике измерения плоских углов допускается производить в угловых градусах (минутах, секундах). Именно в этих еди-

никах проградуированы шкалы большинства угломерных средств измерений.

Производные единицы СИ. Производные единицы образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами, или на основании принятых определений физических величин.

В данном разделе даются примеры нескольких физических величин, широко применяемых в технике.

Сила. Определяющее уравнение силы

$$F = ma,$$

где m — масса тела, кг; a — ускорение, м/с^2 .

Единица силы — ньютон (Н , N) — сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с^2 в направлении действия силы.

Размерность единицы силы

$$F = [m] \cdot [a] = LMT^2.$$

В системе СГС единицей силы является дина: $1 \text{ дина} = 1 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}$, $1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дин}$.

С понятием силы и ее единицы измерения связаны понятия силы тяжести и веса. Сила тяжести представляет собой равнодействующую силы тяготения тела к Земле и центробежной силы инерции, обусловленной вращением Земли. Вес тела — сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору или подвес, удерживающих его от свободного падения. Если тело и опора неподвижны относительно Земли, то вес тела равен его силе тяжести.

Определяющее уравнение для силы тяжести (веса)

$$G = mg, \quad (2.2)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

Отсюда следует, что единицей силы тяжести (веса) является ньютон.

Уравнение (2.2) позволяет пояснить разницу между понятиями «масса» и «вес тела», что накладывает соответствующие условия на измерение этих величин. Если масса тела измеряется с помощью весов, то вес — с помощью динамометра.

Ускорение свободного падения в первом приближении зависит от географической широты места и его высоты над уровнем моря. «Нормальное» ускорение свободного падения над широтой 45° (на уровне моря) составляет $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$, на экваторе $g = 9,780 \text{ м/с}^2$, а на полюсе $g = 9,8324 \text{ м/с}^2$. Таким образом, на экваторе тело массой m весит меньше, а на полюсе больше. Например, человек массой в 80 кг на экваторе имеет вес, который равен $782,4 \text{ Н}$, а переместившись на один из полюсов Земли, он будет весить около $786,5 \text{ Н}$.

Заметим попутно, что в геофизике ускорение свободного падения обычно выражается внесистемной единицей — миллигалом (мГал), названной в честь Г. Галилея. При этом $1 \text{ Гал} = 1 \text{ см/с}^2 = 10^3 \text{ мГал}$.

Давление. Определяющее уравнение для действия силы F , направленной перпендикулярно к поверхности площадью S ,

$$p = F/S,$$

где p — давление в паскалях (Па, Pa), если сила F выражена в ньютонах, площадь S — в квадратных метрах.

В этих же единицах измеряется нормальное напряжение $\sigma = F/S$, вызываемое силой 1 Н , равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 , нормальной к ней.

Размерность давления (нормального напряжения)

$$p = L^{-1}MT^2.$$

При измерении давления в свое время применялось большое число единиц. В настоящее время применяются (временно) такие внесистемные единицы, как миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), бар (bar). Паскаль имеет следующее соотношение с этими единицами: $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$; 1 бар равен силе 10^6 дин, действующей на площадь в 1 см^2 , что эквивалентно давлению ртутного столба высотой в $750,08 \text{ мм}$ над уровнем моря для широты 45° (при этом $1 \text{ бар} = 105 \text{ Па}$). В метрологии применяется дольная единица — миллибар ($1 \text{ мбар} = 100 \text{ Па}$). Из числа устаревших единиц, не рекомендуемых к применению, но встречающихся в научно-технической литературе, являются:

- нормальная (физическая) атмосфера (атм, Atm), равная давлению ртутного столба высотой 750 мм при температуре 0°C и при нормальном ускорении свободного падения $9,80665 \text{ м/с}^2$. В 1954 г. эта единица была рекомендована X ГКМВ к применению в физике и метеорологии ($1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$);

- техническая атмосфера (ат, at), или килограмм-сила на квадратный сантиметр (кгс/см^2). Равна давлению, вызываемому силой в 1 кгс , равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 см^2 ($1 \text{ ат} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Па}$). При приближенных измерениях одну атмосферу (1 атм) можно заменить одним баром ($1 \text{ бар} = 0,98692 \text{ атм}$).

В зарубежной литературе иногда при измерениях малых давлений используется единица, размер которой совпадает с 1 мм рт. ст. , а называется она «торр» (torr) по имени итальянского ученого Э. Торричели.

Работа. Для работы A силы, перемещающей некоторое тело в направлении действия силы на длину l , определяющее уравнение

$$A = Fl.$$

Единица работы — джоуль (Дж, J) — работа силы, равной 1 Н, при перемещении ею точки приложения на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Размерность

$$A = [F] \cdot [l] = L^2MT^2.$$

Энергия. Энергия является общей мерой различных процессов и видов взаимодействия. При этом все формы движения превращаются друг в друга в строго определенных количествах. Энергия может быть механической, тепловой, химической, электромагнитной, ядерной, гравитационной и т. п. В теории относительности установлена связь между энергией E и массой m

$$E = mc^2,$$

где c — скорость света в вакууме, м/с.

Размерность энергии

$$E = [m] \cdot [c]^2 = L^2MT^2.$$

Таким образом, работа и энергия имеют одинаковую размерность и измеряются в джоулях.

В физике и атомной энергетике до последних лет применялись единицы энергии: эрг, равный 10^{-7} Дж; электрон-вольт (1 эВ = $1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж). Иногда работа и энергия выражаются с помощью внесистемной единицы количества теплоты. Одна международная калория равна 4,1868 Дж. Применяется термохимическая калория, равная 4,1840 Дж.

Мощность. Представляет собой выполненную работу в единицах времени

$$P = A/t.$$

Единица мощности — ватт (Вт, W) — мощность, при которой за время 1 с выполняется работа 1 Дж. Размерность мощности

$$P = [A]/[t] = L^2TM^{-3}.$$

В ряде случаев еще пользуются нерекомендуемой единицей мощности лошадиной силой (л.с.), причем 1 л.с. = 735,499 Вт.

Кратные и дольные единицы. Для удобства применяют единицы физических величин для образования десятичных кратных (больших) единиц и дольных (меньших) единиц, приведенных в табл. 2.2.

Например, в радиоэлектронике широко применяются следующие кратные и дольные единицы:

частота — 10^6 Гц = 1 МГц; 10^9 Гц = 1 ГГц;

напряжение — 10^3 В = 1 кВ; 10^{-3} В = 1 мВ; 10^{-6} В = 1 мкВ;

длительность импульса — 10^{-3} с = 1 мс; 10^{-6} с = 1 мкс; 10^{-9} с = 1 нс; 10^{-12} с = 1 пс;

емкость — 10^{-12} Ф = 1 пФ; 10^{-9} Ф = 1 нФ; 10^{-6} Ф = 1 мкФ.

Таблица 2.2

Кратные и дольные единицы системы СИ

Единицы	Приставка	Множитель	Наименование русское	Наименование международное
Кратные	экса	10^{18}	Э	E
	пета	10^{15}	П	P
	тера	10^{12}	Т	T
	гига	10^9	Г	G
	мега	10^6	М	M
	кило	10^3	к	k
	гекто	10^2	г	h
Дольные	дека	10^1	да	da
	деци	10^{-1}	д	d
	санتي	10^{-2}	с	s
	мили	10^{-3}	м	m
	микро	10^{-6}	мк	μ
	нано	10^{-9}	н	n
	пико	10^{-12}	п	p
	фемто	10^{-15}	ф	f
	атто	10^{-18}	а	a

Контрольные вопросы

1. Что такое единица физической величины?
2. Что представляет собой измерение физической величины?
3. Чем отличаются основные и производные единицы физических величин?
4. Что представляет собой система единиц физических величин?
5. Чем отличаются системы СГС, МКГСС, МТС, абсолютная практическая система, МКСА?
6. Что такое внесистемные единицы?
7. Каковы преимущества Международной системы единиц СИ?
8. Каково содержание основных единиц СИ?
9. Какие производственные единицы СИ наиболее часто применяются?
10. Что такое дольные, относительные и логарифмические единицы?

ГЛАВА 3

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ

3.1. Классификация средств измерений

Средством измерений называется техническое средство (или их комплекс), используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики. В отличие от таких технических средств, как индикаторы, предназначенных для обнаружения физических свойств (компас, лакмусовая бумага, осветительная электрическая лампочка), средства измерений позволяют не только обнаружить физическую величину, но и измерить ее, т.е. сопоставить неизвестный размер с известным. Если физическая величина известного размера есть в наличии, то она непосредственно используется для сравнения (измерение плоского угла транспортиром, массы с помощью весов с гирями). Если же физической величины известного размера в наличии нет, то сравнивается реакция (отклик) прибора на воздействие измеряемой величины с проявившейся ранее реакцией на воздействие той же величины, но известного размера (измерение силы тока амперметром). Для облегчения сравнения еще на стадии изготовления прибора отклик на известное воздействие фиксируется на шкале отсчетного устройства, после чего наносится на шкалу деления в кратном и дольном отношениях. Описанная процедура называется градуировкой шкалы. При измерении она позволяет по положению указателя получать результат сравнением непосредственно по шкале отношений. Итак, средства измерений (за исключением некоторых мер — гирь, линеек) в простейшем случае производят две операции: обнаружение физической величины, сравнение неизвестного размера с известным или сравнение откликов на воздействие известного и неизвестного размеров.

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

техническое средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени).

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

По конструктивному исполнению средства измерений подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные системы (комплексы) (рис. 3.1).

Меры физической величины — средства измерений, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров. Различают меры: однозначные (гиря 1 кг, калибр, конденсатор постоянной емкости); многозначные (масштабная линейка, конденсатор переменной емкости); наборы мер (набор гирь, набор калибров). Набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях, называется магазином мер. Примером такого набора может быть магазин электрических сопротивлений, магазин индуктивностей. Сравнение с мерой выполняется с помощью специальных технических средств — компараторов (рычажные весы, измерительный мост и т.д.).

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

Стандартный образец состава вещества (материала) — стандартный образец с установленными значениями величин, харак-



Рис. 3.1. Классификация средств измерений

теризующих содержание определенных компонентов в веществе (материале).

Стандартный образец свойств вещества (материала) — стандартный образец с установленными значениями величин, характеризующих физические, химические, биологические и другие свойства.

Новые СО допускаются к использованию при условии прохождения ими метрологической аттестации. Указанная процедура — это признание этой меры, узаконенной для применения на основании исследования СО. Метрологическая аттестация проводится органами метрологической службы.

Примером СО состава является СО состава углеродистой стали определенной марки. Примером СО свойств является шкала твердости Мооса, которая представляет собой набор 10 эталонных минералов для определения числа твердости по условной шкале. Каждый последующий минерал этой шкалы является более твердым, чем предыдущий. Эту шкалу используют для оценки относительной твердости стекла и керамики.

Одна из главных функций СО состава и свойств — контроль методики выполнения измерений (МВИ) в порядке внутреннего контроля испытательных лабораторий и внешнего контроля. Например, если аналитическая лаборатория металлургического предприятия располагает аттестованным СО углеродистой стали конкретной марки, то она на указанном СО может проверить надежность методики качественного и количественного химического анализа.

В зависимости от уровня признания (утверждения) и сферы применения различают категории СО: межгосударственные, государственные, отраслевые и СО предприятия (организации).

В практике метрологическими службами используются СО разной категории для выполнения различных задач.

Так, создаваемые в Центральном институте агрохимического обслуживания сельского хозяйства государственные и отраслевые образцы состава почв аттестованы на содержание макро- и микроэлементов (марганца, кобальта, цинка, меди, молибдена, бора) и другие характеристики (величина pH и др.). Эти СО были аттестованы в межлабораторном эксперименте и предназначены для градуировки приборов, поверки средств измерений, для контроля правильности анализов почв по аттестованным в СО показателям, для аттестации СО предприятий методом сличения.

Измерительные приборы — средства измерений, предназначенные для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Прибор, как правило, содержит устройство для преобразования измеряемой величины и ее индикации в форме, наиболее доступной для восприятия. Во многих случаях устройство для индикации имеет шкалу со стрелкой, диаг-

рамму с пером или цифроуказатель, с помощью которых могут быть произведены отсчет или регистрация значений физической величины. В случае сопряжения прибора с мини-ЭВМ отсчет может производиться с помощью дисплея.

По виду индикации значений измеряемой величины измерительные приборы подразделяются на показывающие и регистрирующие. Показывающий прибор допускает только отсчитывание показаний измеряемой величины (микрометр, аналоговый или цифровой вольтметр). В регистрирующем приборе предусмотрена регистрация показаний в форме диаграммы путем печатания показаний (термограф, разрывная машина с пишущим элементом, измерительный прибор, сопряженный с ЭВМ, дисплеем и устройством для печатания показаний).

Измерительные преобразователи — средства измерений, служащие для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований. По характеру преобразования различают аналоговые (АП), цифроаналоговые (ЦАП), аналого-цифровые (АЦП) преобразователи. По месту в измерительной цепи различают первичные ИП, на которые непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, и промежуточные ИП, занимающие место в измерительной цепи после первичных ИП).

Конструктивно обособленный первичный ИП, от которого поступают сигналы измерительной информации, называется *датчиком*. Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы. Например, датчики запущенного метеорологического радиозонда передают информацию о температуре, давлении, влажности и других параметрах атмосферы.

Если преобразователи не входят в измерительную цепь и их метрологические свойства не нормированы, то они не относятся к измерительным. Таковы, например, силовой трансформатор в радиоаппаратуре, термopара в термоэлектрическом холодильнике.

Измерительная система — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта в целях измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту. Примером может служить радионавигационная система для определения местоположения судов, состоящая из ряда измерительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительном расстоянии друг от друга.

«Лицо» современной измерительной техники определяется автоматизированными измерительными системами (АИС), инфор-

мационно-измерительными системами (ИИС), измерительно-вычислительными комплексами (ИВК). Типичная ИИС содержит в своем составе ЭВМ и обеспечивает сбор, обработку и хранение информации, поступающей от многочисленных датчиков, характеризующих состояние объекта или процесса. При этом результаты измерений выдаются как по заранее заданной программе, так и по запросу.

Применение новейших измерительных систем позволяет не только ускорить процесс измерения (что немаловажно для скоропортящихся товаров), но и дать более объективную характеристику качества конкретной партии товара.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин и расположенных в одном месте. Примером являются установка для измерения удельного сопротивления электротехнических материалов, установка для испытаний магнитных материалов. Измерительную установку, предназначенную для испытаний каких-либо изделий, иногда называют испытательным стендом.

По метрологическому назначению все средства измерений подразделяются на два вида: рабочие средства измерений и эталоны.

Рабочие средства измерений предназначены для проведения технических измерений. По условиям применения они могут быть:

- лабораторными, используемыми при научных исследованиях, проектировании технических устройств, медицинских измерениях;
- производственными, используемыми для контроля характеристик технологических процессов, контроля качества готовой продукции, контроля отпуска товаров;
- полевыми, используемыми непосредственно при эксплуатации таких технических устройств, как самолеты, автомобили, речные и морские суда и др.

К каждому виду рабочих средств измерений предъявляются специфические требования: к лабораторным — повышенная точность и чувствительность; производственным — повышенная стойкость к ударно-вибрационным нагрузкам, высоким и низким температурам; полевым — повышенная стабильность в условиях резкого перепада температур, высокой влажности.

Эталоны являются высокоточными средствами измерений, поэтому используются для проведения метрологических измерений в качестве средств передачи информации о размере единицы. Размер единицы передается «сверху вниз», от более точных средств измерений к менее точным «по цепочке»: первичный эталон —

вторичный эталон — рабочий эталон 0-го разряда — рабочий эталон 1-го разряда — ... — рабочее средство измерений.

Передача размера осуществляется в процессе поверки средств измерений. Целью поверки является установление пригодности средств измерений к применению. Соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочему средству, устанавливается в поверочных схемах средств измерений.

Госстандарт России располагает самой современной эталонной базой. Она входит в тройку самых совершенных наряду с базами США и Японии. Эталонная база в дальнейшем будет развиваться в количественном и главным образом в качественном отношении. Перспективно создание многофункциональных эталонов, т.е. эталонов, воспроизводящих на единой конструктивной и метрологической основе не одну, а несколько единиц физических величин или одну единицу, но в широком диапазоне измерений. Так, метрологические институты страны создают единый эталон времени, частоты и длины, который позволит уменьшить погрешность воспроизведения единицы длины до $1 \cdot 10^{-11}$.

Если технический уровень первичных эталонов в России благодаря успехам науки и энтузиазму ученых можно оценить как вполне удовлетворительный, то состояние парка средств измерений, находящихся в практическом обращении, прежде всего рабочих эталонов и рабочих средств измерений, внушает тревогу. Если в 1980-х гг. срок обновления отечественной измерительной техники, как правило, составлял пять-шесть лет (для сравнения в США и Японии не более трех лет), то наблюдаемый сейчас регресс в области отечественного приборостроения еще больше увеличил сроки обновления рабочих эталонов и рабочих средств измерений, что ведет к значительному старению измерительной техники.

Другой проблемой отечественных производителей средств измерений является высокая стоимость их разработок по сравнению с зарубежными фирмами. Для преодоления традиционного отставания необходимо также в отечественных приборах предусматривать: высокую степень автоматизации на базе микропроцессорной технологии, быстродействие, высокую надежность, пониженные массу, габаритные размеры и энергопотребление, высокий уровень эстетики и эргономики.

Многообразие средств измерений обуславливает необходимость применения специальных мер по обеспечению единства измерений. Как указывалось ранее, одно из условий соблюдения единства измерений — установление для средств измерений определенных (нормированных) метрологических характеристик.

3.2. Система воспроизведения единиц физических величин

Система воспроизведения единиц физических величин и передачи информации об их размерах всем без исключения средствам измерений в стране составляет техническую базу обеспечения единства измерений.

В соответствии с основным уравнением измерения (2.2) измерительная процедура сводится к сравнению неизвестного размера с известным, в качестве которого выступает размер соответствующей единицы Международной системы единиц (СИ). Воспроизведение единицы представляет собой совокупность операций по материализации единицы физической величины с наивысшей в стране точностью с помощью государственного эталона или исходного рабочего эталона. Различают воспроизведение основных и производных единиц. Размеры единиц могут воспроизводиться там же, где выполняются измерения (децентрализованный способ), либо информация о них должна передаваться с централизованного места их хранения или воспроизведения (централизованный способ).

Децентрализованно воспроизводятся единицы многих производных физических величин. Основные единицы сейчас воспроизводятся только централизованно.

Централизованное воспроизведение единиц осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых эталонами. Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью, называется *первичным эталоном*. Первичные эталоны — это уникальные средства измерений, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники на данный период. Эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и служащий для этих условий, называется *специальным эталоном*. Официально утвержденные в качестве исходного для страны первичный и специальный эталоны называются *государственными*.

Эталон, получающий размер единицы путем сличения с первичным эталоном рассматриваемой единицы, называется *вторичным эталоном*.

Эталон должен отвечать трем основным требованиям:

- неизменность (способность удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени);
- воспроизводимость (воспроизведение единицы с наименьшей погрешностью для данного уровня развития измерительной техники);

- сличаемость (способность не претерпевать изменений и не вносить каких-либо искажений при проведении сличений).

Государственные эталоны представляют собой национальное достояние и поэтому должны храниться в метрологических институтах страны в специальных эталонных помещениях, где поддерживаются строгий режим по влажности, температуре, вибрациям и другим параметрам. Для обеспечения единства измерений физических величин в международном масштабе большое значение имеют международные сличения национальных государственных эталонов. Эти сличения помогают выявить систематические погрешности воспроизведения единицы национальными эталонами, установить, насколько национальные эталоны соответствуют международному уровню, и наметить пути совершенствования национальных (государственных) эталонов.

3.3. Эталонная база России

С середины 1970-х гг. в обиход метрологов вошло и укрепилось (почти как шаблон) выражение: «Эталонная база страны по своим метрологическим и техническим характеристикам не уступает, а во многих случаях и превосходит лучшие зарубежные аналоги». Несмотря на некоторую возвышенность эта фраза абсолютно достоверно соответствовала реальной ситуации. К концу 1975 г. эталонная база насчитывала ровно 100 государственных эталонов. А если быть точным, то именно 31 декабря 1975 г. на заседании коллегии Госстандарта были утверждены 97, 98, 99 и 100-й государственные эталоны в области аптечных измерений («Разработать и утвердить 100 государственных эталонов» — таким был первый пункт плана Госстандарта на IX пятилетку).

Создание официальной эталонной базы страны имело огромное значение. По сути, оно явилось крупным научным прорывом, открывшим широкие возможности для коренного перелома во всех отраслях промышленности, в повышении эффективности общественного производства, интенсификации экономики, в укреплении международного престижа, усилении обороноспособности страны.

Разумеется, исходные (т.е. наивысшие по точности) средства измерений (или меры) в нашей стране существовали и ранее. Так, еще 11 октября 1835 г. именным указом, данным Сенату, утверждена система Российских мер и весов, в которой за основные меры были приняты сажень, фунт, ведро, четверик и аптекарский фунт ($\frac{1}{8}$ от российского фунта). Однако эта система практически не была взаимосвязана с системами других государств, и только в 1889 г. Россия стала обладателем международных, идентичных для 30 ведущих государств прототипов метра и килограмма. Этим про-

тотипам в последующем был присвоен статус Государственных эталонов СССР.

В 1971 г. Госстандарт СССР официально утвердил 21 государственный эталон с государственными стандартами на государственные поверочные схемы, в которых устанавливались характеристики эталонов и порядок передачи размеров единиц рабочим измерительным приборам. В числе первых государственных эталонов были эталоны, возглавляющие наиболее широко распространенные в стране области измерений: длины, массы, силы, давления, температуры, плоского угла, силы электрического тока, силы света и т.д. Все они в основном находились во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

К концу 1980-х гг. эталонную базу страны составляли 146 государственных эталонов, обеспечивавших хранение, воспроизведение и передачу размера единиц 70 физических величин. Не следует забывать о втором элементе эталонной базы — комплексе установок высшей точности (УВТ), предназначенных для воспроизведения единиц величин в тех областях измерений, в которых создание государственных эталонов было определено технически и экономически нецелесообразным, но также было признано необходимым иметь исходную меру для страны. К вышеупомянутому сроку число таких установок составляло 66, и все они были созданы в метрологических институтах Госстандарта.

После распада СССР ряд государственных эталонов и установок высшей точности (УВТ) остались за рубежом (в Украине, Грузии и Армении), а состав эталонной базы России сократился до 115 из 146 государственных эталонов и до 56 из 66 УВТ.

Однако в кратчайшие сроки «прорехи» в эталонной базе были восполнены Госстандартом России, и сегодня практически ни одна из областей измерений не осталась без высшего измерительного звена.

Эталонная база России сегодня, как и ранее, является центральным элементом метрологического обеспечения промышленности. Уровень эталонной базы в конечном счете определяет уровень всех технических измерений, так как именно государственные эталоны и УВТ создают объективную основу для получения достоверной и точной измерительной информации (о количестве и качестве продукции, сырья, материалов, энергоресурсов), т.е. для решения главной практической задачи метрологии — обеспечения единства измерений. Следует особо отметить, что у эталонной базы ярко выражен и чисто экономический аспект: по расчетам, основанным на реальных цифрах, экономическая эффективность от внедрения и функционирования эталонной базы составляет в среднем 10 : 1, т.е. 10 р. эффекта на 1 р. затрат. Следует сказать также, что фундаментальные физические исследования, тщательный и всесторонний анализ современных достижений науки,

техники и технологии, выполняемые при создании эталонов, как правило, находят применение и в других научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках.

Эталонная база (сегодня в нее входят 122 государственных эталона и 80 УВТ) была создана с достаточным «запасом прочности», так как основывалась на концепции опережающего развития эталонной базы страны. Но следует учитывать, что многие государственные эталоны эксплуатируются уже не один десяток лет. За это время повысился уровень технических измерений, освоены новые виды продукции и технологических процессов, повышены требования к качеству продукции. Не следует забывать и о физическом износе эталонов.

Госстандартом России и его главными научными метрологическими центрами подготовлена Программа развития эталонной базы России, предусматривающая совершенствование существующих эталонов, создание новых эталонов и систем взаимосвязанных эталонов в области электрических, магнитных, температурных и теплофизических измерений, измерений массы, расхода, параметров оптических излучений и др., предусматривающая также расширение областей применения эталонов для обеспечения единства измерений в экстремальных условиях, особых средах.

Одной из ведущих тенденций, заложенных в основы Программы, является традиционная тенденция постоянного повышения точности государственных эталонов. Устойчивость этой тенденции объясняется прежде всего тем, что именно на уровне предельной точности измерений физических величин, обеспечиваемой государственными эталонами, происходит наиболее эффективный прогресс научных исследований в области естественных наук, который дает в конечном счете наиболее ощутимые сдвиги в технологии общественного производства.

Как правило, это требует «научного прорыва», т.е. создания принципиально новых методов, технологий и конструкций аппаратуры на основе использования современных достижений естественных наук, научного приборостроения, техники и промышленности.

Примерами могут служить государственный эталон вольты на основе использования эффекта Джозефсона, государственный эталон ома на эффекте квантования холловского сопротивления, перспективный эталон килограмма с использованием постоянной Авогадро.

Другой тенденцией развития эталонной базы является переход от единичных эталонов и их совокупности к системе взаимосвязанных естественных эталонов на основе использования фундаментальных физических констант и стабильных физических явлений. Так, в частности, объединение эталонов времени, частоты и

длины на основе лазерной технологии позволило повысить точность измерений длины в 250 раз (с $5 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-11}$).

К числу эффективных направлений развития эталонной базы следует отнести также сокращение числа ступеней систем передачи размера единиц величин. Собственно говоря, точность государственного эталона при этом останется той же, но сокращение потерь точности за счет меньшего числа разрядных рабочих эталонов позволит улучшить главное качество государственного эталона — обеспечение необходимой точности технических измерений. Однако повышение нагрузки на эталон (увеличится число аттестуемых на нем рабочих эталонов) потребует его конструктивного совершенствования, повышения уровня автоматизации работ на эталоне, других работ, обеспечивающих его достаточный технический ресурс. В этом плане крайне перспективным делом представляется децентрализация воспроизведения единиц величин.

Все это свидетельствует о том, что метрологи Госстандарта России уже определили, по каким направлениям и с какими приоритетами должно осуществляться совершенствование эталонной базы России. Однако явно недостаточное бюджетное финансирование не позволяет полноценно развернуть хотя бы первоочередные работы.

Кроме бюджетного рассматриваются и другие источники финансирования развития эталонной базы страны.

Так, в частности, вполне реальным представляется создание централизованного фонда за счет отчислений от доходов, получаемых аккредитованными организациями при поверке, калибровке, аттестации рабочих эталонов и рабочих средств измерений. Юридическая легитимность такого подхода обусловлена тем, что такие организации используют для получения доходов исходные рабочие эталоны, метрологическая исправность которых может быть обеспечена только государственными эталонами — интеллектуальной собственностью Госстандарта России (ныне Федеральной службой по техническому регулированию и метрологии).

Эталонная база России в некотором смысле является таким же национальным богатством нашей страны, как, например, Алмазный фонд или природные ресурсы. В эталонах воплощается все новое, передовое, все достижения науки, техники, технологии, концентрируется научно-технический потенциал страны. Нарастая мощь эталонной базы, создавая «запас точности и прочности», метрологи работают для завтрашнего дня, для открытий, которые еще не сделаны, для продукции и технологий, которые еще не освоены. Именно поэтому совершенствование эталонной базы страны следует считать одной из важнейших, приоритетнейших задач научно-технического прогресса и международной интеграции.

3.4. Государственная система обеспечения единства измерений

Центральная задача в организации измерительных работ — достижение сопоставимых результатов измерений одних и тех же объектов, выполненных в разное время, в разных местах, с помощью разных методов и средств. Эта задача решается путем обеспечения единства измерений. В свою очередь, это единство достигается в результате деятельности метрологических служб, направленной на достижение и поддержание единства измерений в соответствии с государственными актами, правилами, требованиями, нормами, установленными стандартами в области метрологии.

В организационном плане это единство обеспечивается субъектами метрологии: государственной метрологической службой страны, увязывающей свою деятельность с международными метрологическими организациями, метрологическими службами федеральных органов исполнительной власти России и метрологическими службами юридических лиц.

Важнейшей формой обеспечения единства измерений со стороны государства является *Государственный метрологический контроль и надзор* (ГМКиН).

Нормативной базой обеспечения единства измерений является законодательная метрология, а технической базой служит рассмотренная система воспроизведения единиц физических величин и передачи информации об их размерах всем без исключения средствам измерений в стране (рис. 3.2).

Совокупность операций, выполняемых в целях определения и поддержания действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений,

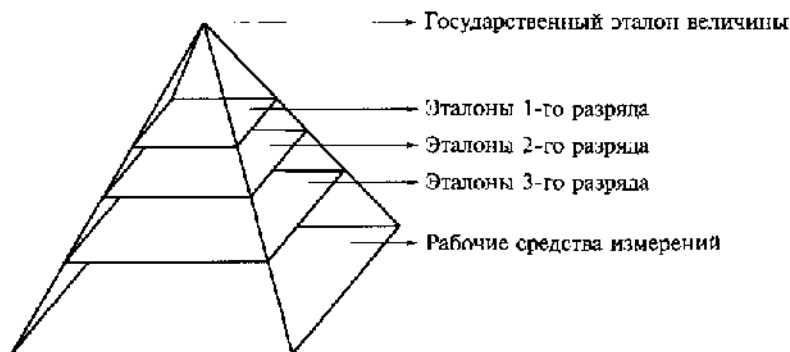


Рис. 3.2. Схематическое изображение системы передачи размера единицы величины

не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору, называется *калибровкой*.

Из определения можно сделать два вывода:

- калибровка проводится для тех средств измерений, которые не используются в сферах ГМКиН, установленных ст. 13 Закона РФ от 27.04.93 № 4871-1 «Об обеспечении единства измерений», а значит, не подлежат поверке;
- калибровка выполняет две функции: определение и подтверждение действительных значений метрологических характеристик средств измерений; определение и подтверждение пригодности средств измерений к применению.

В первом случае лаборатория, калибрующая по заявке (договору) заказчика средства измерений, не делает вывода о пригодности прибора. Установленные характеристики могут отличаться от паспортных, и только в компетенции заказчика определять, в каких условиях и для каких целей можно и нужно использовать данные средства измерений.

Во втором случае средство измерений признается пригодным, если действительное значение его метрологических характеристик соответствует техническим требованиям, установленным в нормативном документе (НД) или заказчиком. Вывод о пригодности средства измерений в этом случае делает калибровочная лаборатория.

В решаемых на практике измерительных задачах калибровка может сводиться только к проверке пригодности средства измерений, т.е. его работоспособности. В частности, требуется знать не действительные значения измеряемой величины, нужно лишь констатировать наличие величины измеряемого сигнала определенного уровня. Примером может служить калибровка устройств — сигнализаторов предельного значения температуры. В сигнализаторах, имеющих одну или несколько сигнальных лампочек, включение или выключение последних свидетельствует о достижении предельных значений величины. В устройствах, имеющих шкалу в виде нескольких цветовых секторов (подобных посуде фирмы «Цептер»), положение указательной стрелки в пределах конкретного сектора означает определенное состояние объекта измерений.

В ст. 23 ранее названного Закона указывается на добровольный характер и область применения калибровки: «Средства измерений, не подлежащие поверке, могут подвергаться калибровке при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже». Добровольный характер калибровки не освобождает метрологическую службу от необходимости использования при калибровочных работах эталонов, соподчиненных с Государственными эталонами единиц величин.

Калибровка может быть возложена как на метрологическую службу (МС) юридического лица, так и на любую другую организацию, способную выполнить калибровочные работы.

Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средство измерений, записью в эксплуатационных документах или сертификатом о калибровке.

На основе договоров, заключаемых с государственными научными метрологическими центрами или органами Государственной метрологической службы (ГМС), заинтересованные метрологические службы юридических лиц могут быть аккредитованы на право проведения калибровочных работ. В этих случаях последним предоставляется право выдавать сертификаты о калибровке от имени органов и организаций, которые их аккредитовали.

Аккредитация — процедура добровольная. Она необходима прежде всего тогда, когда предприятие поставляет продукцию на зарубежные рынки. В этом случае торговый партнер (покупатель) может потребовать от продавца подтверждения того, что характеристики продукции измерялись приборами, проверенными аккредитованной метрологической службой. В 1994—1995 гг. в России сформировалась Российская система калибровки (РСК). В «Положении о Российской системе калибровки» регламентированы следующие вопросы:

- ♦ организация, структура и функции РСК;
- ♦ права и обязанности входящих в нее юридических лиц независимо от форм собственности и пр.

В создании РСК соблюден ряд принципов. Во-первых, система создается на добровольной основе. Никто не вправе навязывать аккредитацию метрологической службы. Добровольность вступления в РСК предусматривает процедуру признания, а следовательно, и выполнения всех действующих в системе нормативных документов. Во-вторых, в качестве аккредитующих органов могут выступать государственные научные метрологические центры и органы ГМС. В-третьих, аккредитованная МС выдает сертификаты и ставит оттиски калибровочных клейм от имени аккредитующего органа. В-четвертых, РСК строится на принципе компетентности, в соответствии с которым аккредитацию МС проводят аккредитующие органы, компетентные в заявленной области аккредитации. В-пятых, это принцип самоокупаемости. Он означает, что аккредитация МС является платной услугой.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию средств измерения.
2. Что такое мера физической величины?
3. Что такое стандартный образец?

4. Чем отличаются измерительные приборы от измерительных преобразователей?
5. Дайте определение терминов «измерительная система» и «измерительная установка».
6. Что представляют собой рабочие средства измерения?
7. Что такое эталон физической величины?
8. Что такое эталонная база?
9. Какова в настоящее время эталонная база России?
10. Как организована система воспроизведения единиц физических величин?
11. Как построена Государственная система обеспечения единства измерений?
12. Как производится калибровка средств измерения?

ГЛАВА 4

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ НОРМИРОВАНИЕ

4.1. Принципы выбора и нормирования метрологических характеристик средств измерений

При использовании средств измерений принципиально важно знать степень соответствия информации об измеряемой величине, содержащейся в выходном сигнале, ее истинному значению. С этой целью для каждого средства измерений вводятся и нормируются определенные метрологические характеристики (МХ). *Метрологические характеристики* — это характеристики свойств средства измерений, оказывающие влияние на результат измерения и его погрешности. Характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называются *нормируемыми*, а определяемые экспериментально — *действительными*. Номенклатура МХ, правила выбора комплексов нормируемых МХ для средств измерений и способы их нормирования определяются стандартом ГОСТ 8.009—84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

Метрологические характеристики средств измерений позволяют:

- определять результаты измерений и рассчитывать оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерения в реальных условиях применения средств измерений;
- рассчитывать МХ каналов измерительных систем, состоящих из ряда средств измерений с известными МХ;
- производить оптимальный выбор средств измерений, обеспечивающих требуемое качество измерений при известных условиях их применения;
- сравнивать средства измерений различных типов с учетом условий применения.

При разработке принципов выбора и нормирования средств измерений необходимо придерживаться ряда положений, изложенных далее.

1. Основным условием возможности решения всех перечисленных задач является наличие однозначной связи между нормируемыми МХ и инструментальными погрешностями. Эта связь устанавливается посредством математической модели инструмен-

тальной составляющей погрешности, в которой нормируемые МХ должны быть аргументами. При этом важно, чтобы номенклатура МХ и способы их выражения были оптимальны. Опыт эксплуатации различных средств измерений показывает, что целесообразно нормировать комплекс МХ, который, с одной стороны, не должен быть очень большим, а с другой — каждая нормируемая МХ должна отражать конкретные свойства средств измерений и при необходимости может быть проконтролирована.

2. Нормирование МХ средств измерений должно производиться исходя из единых теоретических предпосылок. Это связано с тем, что в измерительных процессах могут участвовать средства измерений, построенные на различных принципах.

3. Нормируемые МХ должны быть выражены в такой форме, чтобы с их помощью можно было обоснованно решать практически любые измерительные задачи и одновременно достаточно просто проводить контроль средств измерений на соответствие этим характеристикам.

4. Нормируемые МХ должны обеспечивать возможность суммирования составляющих инструментальной погрешности измерений. В общем случае она может быть определена как сумма (объединение) следующих составляющих погрешности:

- $\Delta_0(t)$, обусловленная отличием действительной функции преобразования в нормальных условиях от номинальной, приписанной соответствующими документами данному типу средства измерений. Эта погрешность называется *основной*;

- $\Delta_{\text{ср}}$, обусловленная реакцией средства измерений на изменение внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала относительно их номинальных значений. Эта погрешность называется *дополнительной*;

- $\Delta_{\text{дин}}$, обусловленная реакцией СИ на скорость (частоту) изменения входного сигнала. Эта составляющая, называемая *динамической* погрешностью, зависит и от динамических свойств средств измерений, и от частотного спектра входного сигнала;

- $\Delta_{\text{вт}}$, обусловленная взаимодействием средств измерений с объектом измерений или с другими средствами измерений, включенными последовательно с ним в измерительную систему. Эта погрешность зависит от характеристик и параметров входной цепи средств и выходной цепи объекта измерений.

5. Нормируемые МХ должны быть инвариантны к условиям применения и режиму работы средств измерений и отражать только его свойства. Выбор МХ необходимо осуществлять так, чтобы пользователь имел возможность рассчитывать по ним характеристики средств измерений в реальных условиях эксплуатации.

6. Нормируемые МХ, приводимые в нормативно-технической документации, отражают свойства не отдельно взятого экземпляра средств измерений, а всей совокупности средств измерений

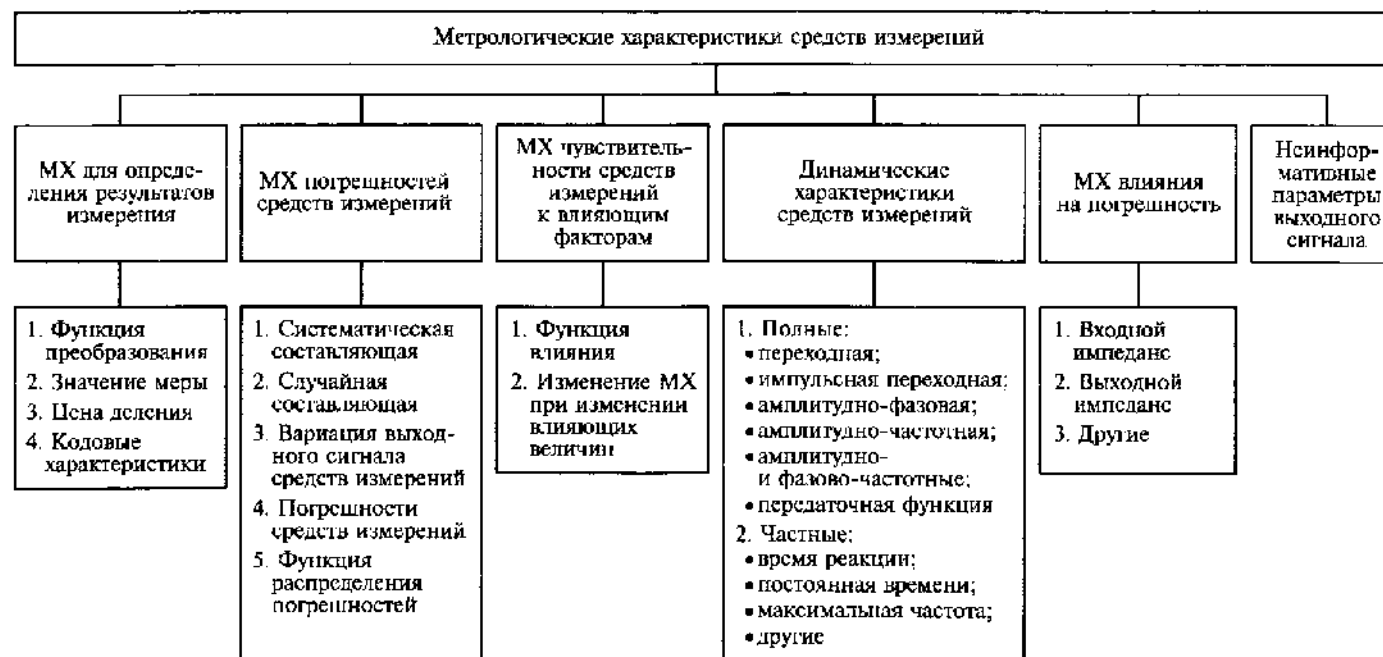


Рис. 4.1. Номенклатура метрологических характеристик средств измерений

данного типа, т. е. являются номинальными. Под типом понимается совокупность средств измерений, имеющих одинаковое назначение, схему и конструкцию и удовлетворяющих одним и тем же требованиям, регламентированным в технических условиях.

Метрологические характеристики отдельного средства измерений данного типа могут быть любыми в пределах области значений номинальных МХ.

Перечень нормируемых МХ подразделяется на шесть основных групп (рис. 4.1).

4.2. Метрологические характеристики, предназначенные для определения результатов измерений

Функция преобразования $F(X)$. Данная функция нормируется для измерительных преобразователей и приборов с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины. Она задается в виде формулы, таблицы или графика и используется для определения значений измеряемой величины X в рабочих условиях применения средств измерений по известному значению информативного параметра его выходного сигнала: $X = F^{-1}(Y)$, где F^{-1} — функция, обратная функции преобразования; Y — показания средства измерений.

Для стандартизованных средств измерений серийного производства нормируют номинальную функцию преобразования. Для приборов мелкосерийного производства нормируют индивидуальные функции преобразования. Для стандартизованных средств измерений, конструктивные особенности которых обуславливают существенный разброс индивидуальных функций преобразования, нормируют пределы (граничные значения), в которых они должны находиться при заданных условиях. Для линейных функций преобразования, проходящих через начало координат, может нормироваться номинальный или индивидуальный коэффициент преобразования.

Значение Y однозначной или значение Y_i многозначной меры. Для этих характеристик нормируются номинальные или индивидуальные значения. Они используются для устройств, применяемых в качестве мер. Например, у нормального элемента нормируется номинальное значение генерируемой им электродвижущей силы, у кварцевого генератора — значение частоты его колебаний и т. д.

Цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры. Нормирование цены деления производится для показывающих приборов с равномерной шкалой, функция преобразования

которых отображается на именованной шкале. При неравномерной шкале нормируется минимальная цена деления.

Характеристики цифрового кода. К ним относятся: вид выходного кода, число его разрядов, цена единицы младшего разряда. Эти характеристики нормируются для цифровых приборов.

4.3. Метрологические характеристики погрешностей средств измерений

Эта группа характеристик описывает погрешности, обусловленные собственными свойствами средств измерений в нормальных условиях эксплуатации. Суммарное их значение образует основную погрешность средств измерений.

Характеристики систематической составляющей погрешности. Эти характеристики отражают свойства совокупности средств измерений данного типа (а не отдельного экземпляра) и описываются либо только значением систематической составляющей Δ_{0S} , либо его математическим ожиданием (МО) $M[\Delta_{0S}]$ и средним квадратическим отклонением (СКО) $\sigma[\Delta_{0S}]$. Нормировать последние две величины целесообразно в том случае, если можно пренебречь их изменением как во времени, так и под влиянием других величин.

Обычно под *систематической* погрешностью понимают постоянную или закономерно изменяющуюся детерминированную (неслучайную) величину. Если же из физических соображений ясно, что некоторая составляющая погрешности постоянна или закономерно изменяется, т.е. по определению является систематической, но ее значение неизвестно, а известны лишь пределы, в которых она может находиться, то учитывать эту погрешность можно лишь как случайную величину, каким-то образом распределенную в заданных пределах.

Такой подход объясняется еще тем, что характеристики систематической погрешности нормируются для большой совокупности средств измерений данного типа. При этом погрешности каждого конкретного прибора уже объективно являются частными реализациями случайно распределенной (по экземплярам) величины. Характеристики систематической составляющей нормируются путем установления пределов допускаемой систематической погрешности

$$\Delta_{0Sp} = M[\Delta_{0S}] + k_P \sigma[\Delta_{0S}],$$

где k_P — коэффициент, определяемый законом распределения погрешности и принятым значением доверительной вероятности P . Могут также нормироваться $M[\Delta_{0S}]$ и $\sigma[\Delta_{0S}]$. Эти величины характеризуют разброс систематической составляющей по сово-

купности экземпляров средств измерений данного типа и при необходимости позволяют приближенно учесть его.

Характеристики случайной составляющей погрешности. Под случайной составляющей инструментальной погрешности Δ_0 понимается случайная составляющая погрешности средства измерений, обусловленная только его собственными свойствами. Она представляет собой центрированный случайный процесс и описывается либо СКО — $\sigma[\Delta_0]$, либо СКО совместно с нормализованной автокорреляционной функцией $r_\Delta(\tau)$, либо функцией спектральной плотности $S(\omega)$.

Характеристики случайной составляющей нормируются путем установления предела допускаемого СКО. Возможно нормирование номинальной нормализованной автокорреляционной функции или номинальной функции спектральной плотности, а также пределов их отклонения от номинальных.

Характеристика случайной составляющей погрешности от гистерезиса. Эта характеристика называется *вариацией выходного сигнала*. Под случайной составляющей погрешности от гистерезиса Δ_{0H} понимается случайная составляющая погрешности средства измерений, обусловленная отличием показаний данного экземпляра измерительного прибора от информативного параметра входного сигнала при различных скорости и направлении его изменения.

Характеристика случайной составляющей погрешности от гистерезиса нормируется путем установления предела H_{0P} допускаемой вариации выходного сигнала (показания) средства измерений.

Допускается при малой случайной погрешности производить нормирование составляющих не отдельно, а в целом погрешности средства измерений, включая случайную составляющую от гистерезиса.

Если известны нормированные значения характеристик составляющих инструментальной погрешности $M[\Delta_{0S}]$, $\sigma[\Delta_{0S}]$, $\sigma[\Delta_0]$ и H_{0P} , то пределы, в которых с заданной вероятностью лежит основная погрешность любого экземпляра средства измерений данного типа, определяется формулой

$$\Delta_0 = M[\Delta_{0S}] \pm k \sqrt{\sigma^2[\Delta_{0S}] + \sigma^2[\Delta_0] + \sigma^2[\Delta_{0H}]},$$

где k — коэффициент, значение которого зависит от доверительной вероятности P . Дисперсия вариации $\sigma^2[\Delta_{0H}] = H_{0P}^2/12$, так

как случайная погрешность от гистерезиса имеет равномерный закон распределения в пределах от 0 до H_{0P} .

Если нормированные значения $M[\Delta_{0S}]$ и $\sigma[\Delta_{0S}]$ не заданы, а известно нормированное значение Δ_{0SP} , то основная погрешность

$$\Delta_0 = \pm k \sqrt{\Delta_{0SP}^2/3 + \sigma^2 \left[\frac{0}{\Delta_0} \right] + H_{0P}^2/12}.$$

Здесь учтено, что систематическая составляющая погрешности распределена по равномерному закону в пределах $\pm \Delta_{0SP}$.

4.4. Нормирование динамических характеристик средств измерений

Любое отличие частотного спектра входного сигнала от принятого вызывает динамическую погрешность. Выделение этих погрешностей практически целесообразно тогда, когда изменение частотного спектра входного сигнала средств измерений приводит к существенному изменению точности. Это означает, что для одного и того же средства измерений при каком-либо одном частотном спектре входного сигнала нужно учитывать динамическую погрешность, а при другом в этом нет необходимости.

Решение вопроса о том, учитывать погрешность как статическую или как динамическую, зависит не только от частотного спектра входного сигнала. Важным фактором является также соотношение между отличием частотного спектра от нормального и инерционностью средства измерений. Именно это соотношение определяет уровень динамической погрешности по отношению к статической.

Для описания динамических погрешностей используются следующие характеристики.

1. Полная динамическая характеристика аналоговых средств измерений, в качестве которой используют одну из характеристик: переходную, импульсную переходную, амплитудно-фазовую, амплитудно-частотную, совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной, передаточную функцию.

Полную динамическую характеристику нормируют путем установления номинальной и пределов допускаемых отклонений от нее. Нормировать следует такую характеристику, которая может быть относительно просто определена экспериментально.

2. Частотные динамические характеристики аналоговых средств измерений, которые можно использовать как линейные. К ним относятся время реакции, коэффициент демпфирования, постоянная времени и т.д.

3. Частотные динамические характеристики АЦП и цифровых измерительных приборов, время реакции которых не превышает интервала между двумя измерениями, соответствующего максимальной частоте (скорости) измерений. К ним относятся время реакции, погрешность датирования отсчета, максимальная частота измерений и др.

4. Динамические характеристики аналого-цифровых средств измерений, время реакции которых больше интервала между двумя измерениями, соответствующего максимально возможной для данного типа средств измерений частоте (скорости) измерений. К ним относятся полные динамические характеристики эквивалентной аналоговой части аналого-цифровых средств измерений, погрешность датирования отсчета, максимальная частота (скорость) измерений и др.

Под временем реакции понимается:

- для показывающего измерительного прибора — время установления показаний;
- для ЦАП и многозначной управляемой меры — время, прошедшее с момента подачи управляющего сигнала до момента, начиная с которого выходной сигнал преобразователя или меры отличается от установившегося значения не более чем на заданное значение;
- для АЦП и цифрового измерительного прибора — время, прошедшее с момента скачкообразного изменения измеряемой величины в сторону возрастания и одновременной подачи сигнала запуска до момента, начиная с которого показания цифрового прибора или выходной код АЦП отличаются от установившегося показания или значения выходного кода на величину, не превышающую заданное значение.

Для ЦАП и многозначных мер может нормироваться переходная характеристика или время реакции, поскольку при использовании таких средств измерений обычно необходимо знать, через какое время после подачи сигнала управления можно считывать установившееся значение выходной величины.

Особую группу средств измерений составляют АЦП, у которых выходной сигнал изменяется дискретно в соответствии с управляющей частотой дискретизации. Как правило, в этих устройствах все переходные процессы и процесс преобразования заканчиваются за время, которое меньше минимального интервала дискретизации. Поэтому для них часто достаточно нормировать время реакции. При длительных переходных процессах во входных цепях, когда время реакции аналого-цифрового преобразования больше минимального интервала между двумя измерениями, целесообразно нормировать динамические характеристики только аналоговой части АЦП, т.е. такие же, как для аналоговых средств измерений.

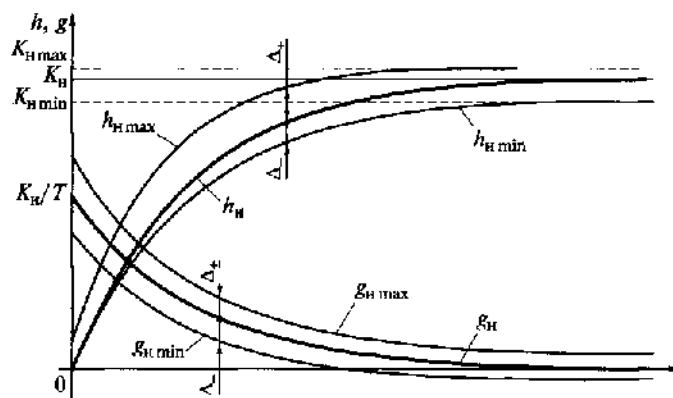


Рис. 4.2. Номинальные переходная и импульсная функции и допустимые отклонения от них, указанные различными способами

Пример. Для средств измерений температуры характерным динамическим свойством является тепловая инерция, поэтому большинство из них представляют собой динамические звенья первого порядка. Их динамические МХ нормируются путем указания номинальных переходной и импульсной переходной функции и допустимых отклонений от них.

Номинальные функции могут задаваться аналитическими выражениями. Однако ввиду сложности подбора аналитического выражения чаще их задают графически, как показано на рис. 4.2. Допустимые от номинальных функций отклонения могут быть представлены различными способами:

- заданием аналитических выражений, описывающих верхнюю ($h_{n\max}(t)$ и $g_{n\max}(t)$) и нижнюю ($h_{n\min}(t)$ и $g_{n\min}(t)$) допустимые границы для значений нормируемой функции. Если вид временной зависимости, описывающей границы значений нормируемой функции, отличается от нее самой только значениями коэффициента K_n , то могут нормироваться допустимые отклонения его значений $K_{n\max}$ и $K_{n\min}$;
- построением графических зависимостей $h_{n\max}(t)$, $g_{n\max}(t)$, $h_{n\min}(t)$ и $g_{n\min}(t)$, описывающих верхнюю и нижнюю допустимые границы для значений нормируемой функции;
- указанием допустимых отклонений Δ_1 и Δ_2 от номинальной функции в отдельные моменты времени.

4.5. Классы точности средств измерений

Характеристики, введенные ГОСТ 8.009—84, наиболее полно описывают метрологические свойства средств измерений. Однако

в настоящее время в эксплуатации находится достаточно большое число средств измерений, метрологические характеристики которых нормированы несколько по-другому, а именно на основе классов точности.

Класс точности — это обобщенная характеристика средства измерений, выражаемая пределами допускаемых значений его основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности не является непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим средством измерений, поскольку погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерений данного типа.

Пределы допускаемой основной погрешности средства измерений (СИ) $\Delta_{СИ}$, определяемые классом точности, — это интервал, в котором находится значение основной погрешности средства измерений. Если средство измерений имеет незначительную случайную составляющую, то определение $\Delta_{СИ}$ относится к нахождению систематической погрешности и случайной погрешности, обусловленной гистерезисом, и является достаточно строгим. При этом предел $\Delta_{СИ} = \Delta_{0,5P} + 0,5H_{0,P}$.

Если средство измерений имеет существенную случайную погрешность, то для него определение предела допускаемой основной погрешности является нечетким. Его следует понимать как интервал, в котором находится значение основной погрешности с неизвестной вероятностью, близкой к единице:

$$\Delta_{СИ} = \pm(\Delta_{0,5P} + K\sigma(\Delta_0) + 0,5H_{0,P}),$$

где K — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P .

Классы точности средств измерений устанавливаются в стандартах или технических условиях. Средство измерений может иметь два и более класса точности. Например, при наличии у него двух или более диапазонов измерений одной и той же физической величины ему можно присваивать два или более класса точности. Приборы, предназначенные для измерения нескольких физических величин, также могут иметь различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей. Выбор формы представления зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средств измерений.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности устанавливаются по одной из формул:

$$\Delta = \pm a \text{ или } \Delta = \pm(a + bx),$$

где x — значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале; a, b — положительные числа, не зависящие от x .

Первая формула описывает чисто аддитивную погрешность (рис. 4.3, а), а вторая — сумму аддитивной и мультипликативной погрешностей (рис. 4.3, в). В технической документации классы точности, установленные в виде абсолютных погрешностей, обозначают, например, «класс точности M », а на приборе — буквой « M ». Для обозначения используются прописные буквы латинского алфавита или римские цифры, причем меньшие пределы погрешностей должны соответствовать буквам, находящимся ближе к началу алфавита, или меньшим цифрам.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяются по формуле $\gamma = \Delta/x_N = \pm p$, где x_N — нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ; p — отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда значений: $(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n$; $n = 1; 0; -1; -2 \dots$

Нормирующее значение x_N устанавливается равным большему из пределов измерений для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалами и для измерительных преобразователей, если нулевое значение выходного сигнала находится на краю или вне диапазона измерений.

Для средств измерений, шкала которых имеет условный нуль, x_N равно модулю разности пределов измерений. Например, для вольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений от 100 до 600 °С нормирующее значение равно 500 °С. Для средств измерений с заданным номинальным значением x_N принимают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины, а

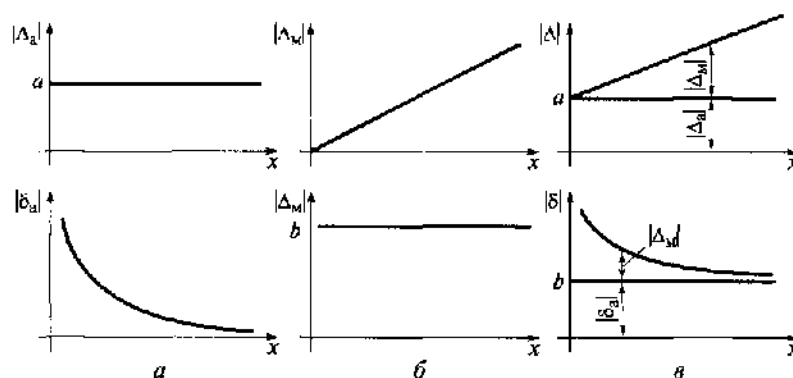


Рис. 4.3. Аддитивная (а), мультипликативная (б) и суммарная (в) погрешности в абсолютной и относительной формах

на основе измерений класс точности условно обозначают, например, в виде значка $\sqrt{0,5}$, где 0,5 — значение числа p . В остальных рассмотренных случаях класс точности обозначают конкретным числом p , например 1,5. Обозначение наносится на циферблат прибора.

4.6. Метрологическая надежность средств измерений

В процессе эксплуатации метрологические характеристики и параметры средств измерений претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам, т.е. к невозможности средств измерений выполнять свои функции. Отказы подразделяются на неметрологические и метрологические.

Неметрологическим называется отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят главным образом явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки.

Метрологическим называется отказ, вызванный выходом МХ из установленных допустимых границ. Как показывают исследования, метрологические отказы происходят значительно чаще, чем неметрологические. Это обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения. Метрологические отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

Внезапным называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т.е. по характеру проявления они являются явными. Особенность внезапных отказов — постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. В связи с этим в дальнейшем отказы такого рода не рассматриваются.

Постепенным называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля средств измерений. В дальнейшем рассматриваются именно такие отказы.

С понятием «метрологический отказ» тесно связано понятие «метрологической исправности» средства измерений. Под ней понимается состояние средства измерений, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям. Способность средств измерений сохранять его метрологическую ис-

правность в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называется *метрологической надежностью*. Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособным и неработоспособным. Постепенное изменение погрешности средств измерений позволяет ввести сколь угодно много работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий. Важно и то, что зафиксировать точное время наступления метрологического отказа ввиду скрытого характера его проявления невозможно, в то время как явные отказы, с которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения. Все это потребовало разработки специальных методов анализа метрологической надежности средств измерений.

Надежность средств измерений характеризует их поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых средств измерений) и сохраняемость.

Стабильность средства измерений является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологическая надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того же процесса старения средств измерений. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его внутреннее свойство. Надежность, наоборот, является внешним свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.

Рекомендации по межгосударственной стандартизации (РМГ 29—99) вводят еще понятие нестабильности средства измерений, отражающей изменение его МХ за установленный интервал времени. Например, нестабильность нормального элемента характеризуется изменением его ЭДС за год (2 мкВ/год).

Безотказностью называется свойство средства измерений непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: рабо-

тоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности средства измерений. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы средства измерений.

Долговечностью называется свойство средства измерений сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. Работоспособное состояние — это такое состояние средства измерений, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям. Предельным называется состояние средства измерений, при котором его применение недопустимо.

После метрологического отказа характеристики средства измерений путем соответствующих регулировок могут быть возвращены в допустимые диапазоны. Процесс проведения регулировок может быть более или менее длительным в зависимости от характера метрологического отказа, конструкции средства измерений и ряда других причин. Поэтому в характеристику надежности введено понятие «ремонтпригодность».

Ремонтпригодность — свойство средства измерений, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление средства измерений после метрологического отказа и на поддержание его в работоспособном состоянии.

Процесс изменения МХ идет непрерывно и независимо от того, используется ли средство измерений или оно хранится на складе. Свойство средства измерений сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования называется его *сохраняемостью*.

Прежде чем перейти к рассмотрению показателей, характеризующих метрологическую надежность средств измерений, необходимо выяснить характер изменения во времени его МХ.

Одной из основных форм поддержания средства измерений в метрологически исправном состоянии является его *периодическая поверка*. Она проводится метрологическими службами согласно правилам, изложенным в специальной нормативно-технической документации. Периодичность поверки должна быть согласована с требованиями к надежности средства измерений. Поверку необходимо проводить через оптимально выбранные интервалы време-

ни, называемые *межповерочными интервалами* (МПИ). Момент наступления метрологического отказа может выявить только поверка средства измерений, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие поверки могут привести к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов.

Межповерочные интервалы устанавливаются в календарном времени для средств измерений, изменение метрологических характеристик которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Значения МПИ рекомендуется выбирать из следующего ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; $6K$ месяцев, где K — целое положительное число. Для средств измерений, у которых изменение MX является следствием износа его элементов, зависящего от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки.

При нахождении МПИ выбирается MX , определяющая состояние метрологической исправности средства измерений. В качестве таких характеристик, как правило, используются основная погрешность, среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько MX , то из них выбирается та, по которой обнаруживается наибольший процент брака при поверках.

Вопросу обоснованного выбора продолжительности МПИ посвящено большое число работ. В настоящее время существуют три основных пути их определения:

- на основе статистики отказов;
- на основе экономического критерия;
- произвольное назначение первоначального МПИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы средства измерений.

Выбор конкретного метода определения продолжительности МПИ зависит от наличия исходной информации о надежности и стабильности средства измерений. Первый способ является эффективным при условии, что известны показатели метрологической надежности. Наиболее полная информация такого рода содержится в моделях, описывающих изменение во времени MX средств измерений. При известных параметрах моделей МПИ определяется моментом выхода погрешности за нормируемый для данного средства измерений допуск. Однако большой разброс параметров и характеристик процессов старения средств измерений приводит к большой погрешности расчета МПИ с помощью таких моделей.

Применение методов расчета МПИ, основанных на статистике скрытых и явных отказов, требует наличия большого количества экспериментальных данных по процессам изменения во времени МХ средств измерений различных типов. Такого рода исследования весьма трудоемки и занимают значительное время. Этим объясняется тот факт, что опубликованных статистических данных о процессах старения приборов различных типов крайне мало. В технических описаниях средств измерений, как правило, приводится средняя наработка до отказа, средний или гамма-процентный ресурс и срок службы. Этого явно недостаточно для расчета МПИ.

Определение межповерочного интервала по экономическому критерию состоит в решении задачи по выбору такого интервала, при котором можно минимизировать расходы на эксплуатацию средства измерений и устранить последствия от возможных ошибок, вызванных погрешностями измерения. Исходной информацией для определения МПИ служат данные о стоимости поверки и ремонта средства измерений, а также об ущербе от изъятия его из эксплуатации и от использования метрологически неисправного прибора. Основная сложность применения этого метода состоит в следующем. Затраты на ремонт и поверку средств измерений достаточно легко определяются по нормативным документам. В отличие от них потери из-за использования приборов со скрытым метрологическим отказом на практике, как правило, неизвестны. Приходится прибегать к приближенным моделям, описывающим затраты на эксплуатацию средства измерений со скрытыми метрологическими отказами в виде функции потерь того или иного вида.

Наиболее простым является метод, состоящий в произвольном назначении МПИ с последующей корректировкой его величины. В этом случае при минимальной исходной информации назначается первоначальный интервал, а результаты последующих проверок являются исходными данными для его корректировки.

Первый МПИ выбирается в соответствии с рекомендациями нормативных документов государственных и ведомственных метрологических служб.

Последующие значения МПИ определяются путем корректировки первого интервала с учетом результатов проведенных проверок большого числа однотипных средств измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое отказ? Чем отличается метрологический отказ от неметрологического?
2. Сформулируйте определение метрологической исправности средств измерений.

3. Что такое метрологическая надежность средств измерений?
4. Сформулируйте определение стабильности, безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости средств измерений.
5. Чем вызвано изменение во времени метрологических характеристик средств измерений?
6. Назовите основные показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости средств измерений.
7. Что называется межповерочным интервалом?
8. Какие способы выбора межповерочных интервалов существуют?

ГЛАВА 5

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

5.1. Классификация аналоговых измерительных приборов

Измерительный прибор представляет собой устройство, предназначенное для преобразования измерительной информации в форму, доступную для непосредственного восприятия наблюдателем.

Аналоговый измерительный прибор характеризуется тем, что информативный параметр входного сигнала (измеряемая величина) преобразуется в информативный параметр выходного сигнала (измеренное значение), при этом информативный параметр выходного сигнала в зависимости от значения измеряемой величины может принимать любые значения в пределах заданных границ.

Для обеспечения возможности дать заключение относительно значения неизвестной входной величины (измеряемой величины), исходя из выходного сигнала измерительного прибора (измеренного значения), необходимо знать градуировочную характеристику измерительного прибора, т. е. особенности преобразования сигналов при воздействии влияющих величин. Измеряемая величина поступает на выходе измерительного преобразователя, сравнивается с сигналом согласующего устройства, усиливается, ослабляется и (или) преобразуется, а затем выдается выходным устройством в виде однозначной информации, воспринимаемой человеком или же направляемой в вычислительный блок.

Каждый измерительный прибор в принципе состоит из трех функциональных блоков (рис. 5.1): первичного измерительного преобразователя, согласующего устройства (блока сравнения) и устройства вывода измеряемого сигнала. Каждый функциональный блок может рассматриваться как соединение одинаковых или различных по своим функциональным характеристикам элементов и узлов. При этом не всегда возможно однозначно разграничить отдельные функциональные блоки. В настоящее время имеется свыше 10^6 различных аналоговых приборов, поэтому возникает необходимость классификации измерительных приборов, но при этом она становится все сложнее.

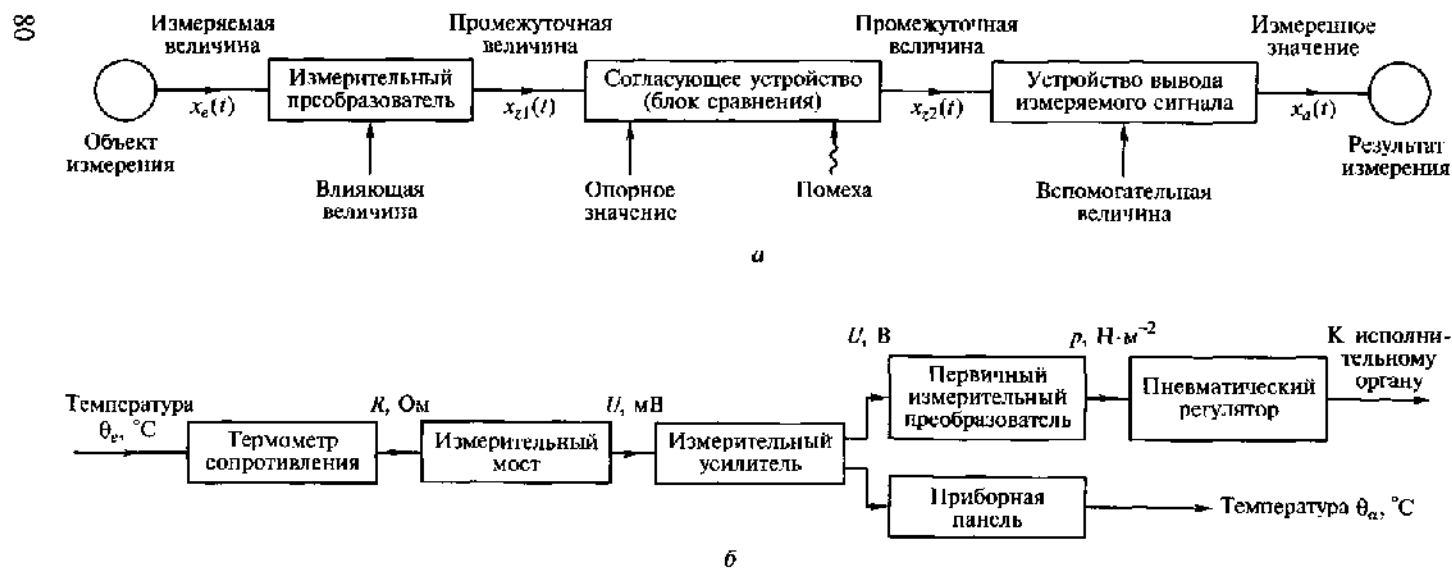


Рис. 5.1. Функциональная схема измерительной системы:

а — общая схема; б — схема измерения температуры

Такая классификация может быть осуществлена, например, исходя из следующих признаков:

- измеряемая величина (прибор для измерения линейных размеров, прибор для измерения температуры);
- принцип измерения (электромеханический, термоэлектрический);
- вид измерительного сигнала, преимущественно используемый в измерительном приборе (механический, электрический);
- метод измерения (непосредственная оценка измеряемой величины, компенсационный метод);
- тракт измерительного сигнала (разомкнутый, замкнутый);
- характер изменения измерительного сигнала (линейный, нелинейный);
- режим передачи измерительного сигнала (статический, динамический).

Механические измерительные приборы обычно характеризуются довольно простым конструктивным исполнением и надежным функционированием. Поскольку все измерительные преобразователи и усиливающие блоки имеют некоторую массу, они оказывают обратное воздействие на объект измерения и часто вызывают довольно значительные искажения результатов при проведении динамических измерений. Этот недостаток частично может быть исключен путем перехода к оптическим сигналам, поэтому в настоящее время при проведении точных линейных измерений широкое применение находят оптико-механические системы.

Быстрое развитие измерительной техники в течение последних десятилетий связано преимущественно с применением электрических и электронных измерительных приборов. Электрическими аналоговыми приборами называются приборы, измеряющие различные физические величины и преобразующие их в аналоговые электрические сигналы. Эти приборы характеризуются высоким временным разрешением, простой реализуемостью математических операций, большим усилением и использованием в ряде случаев бесконтактных первичных измерительных преобразователей.

К этому необходимо добавить осуществление многоканальных измерений и отсчетов, практически неограниченную возможность дистанционной передачи данных, простую регистрацию, а также возможность машинной обработки результатов измерений с помощью аналоговых вычислительных машин. К недостаткам аналоговых электрических измерительных приборов можно отнести подверженность внешним помехам, например воздействиям температуры и электрических полей. Довольно часто электрические измерительные приборы оказываются более дорогими по сравнению с механическими.

5.2. Аналоговые первичные измерительные преобразователи

В пределах одной измерительной системы *первичный преобразователь* осуществляет связь между измеряемым объектом и элементами измерительной цепи, обрабатывающими измерительный сигнал. Первичный преобразователь непосредственно или косвенно воспринимает измеряемую величину и формирует информативный параметр измерительного сигнала. При этом необходимо, чтобы при соединении первичного преобразователя с измеряемым объектом влияние этого преобразователя было незначительным. Первичный преобразователь является единственным элементом или звеном измерительной цепи (см. рис. 5.1), имеющим непосредственный контакт с измеряемым объектом. Его свойства довольно часто обуславливают в известной мере свойства всей измерительной системы.

Первичные преобразователи могут быть активными или пассивными элементами измерительной системы. Активные первичные преобразователи требуют обычно дополнительных источников энергии.

5.2.1. Механические первичные преобразователи

Механические преобразователи линейных размеров. При реализации механического преобразования длины (линейных перемещений) первичный преобразователь должен быть непосредственно связан с объектом измерения с использованием силовой или реже кинематической связи. Для преобразования очень малой длины требуется усиливать преобразуемый измерительный сигнал.

Усиление сигнала может быть осуществлено с помощью рычажной, резьбовой (винтовой) или зубчатой передачи (рис. 5.2).

Для сигнала на выходе справедливо следующее соотношение:

$$\Delta s_a = \Delta s_e / i,$$

где Δs_a — изменение длины (пути) на выходе; Δs_e — изменение длины на входе; i — передаточное отношение (обратное чувствительности).

При последовательном включении нескольких передач получают общее передаточное отношение:

$$i_{\text{общ}} = \prod_{k=1}^n i_k,$$

где n — число передач; i_k — передаточные отношения отдельных передач.

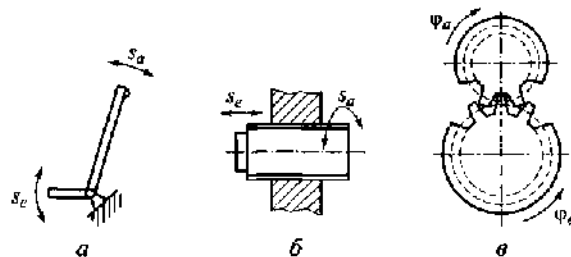


Рис. 5.2. Механические преобразователи:

a — рычажная передача; *b* — резьбовая передача; *в* — зубчатая передача

Механические системы обеспечивают получение передач с передаточным отношением до 1 : 1 000. При этом следует отметить, что механические первичные преобразователи характеризуются простым конструктивным исполнением и незначительной подверженностью внешним возмущениям, однако из-за использования подвижных масс они находят применение преимущественно для статических измерений.

Механические преобразователи силы. Силу невозможно воспринять непосредственно, она воспринимается только через ее воздействие.

При механическом измерении силы в качестве первичных преобразователей используются деформируемые элементы, формы которых определяются задачами измерений. Так, в качестве первичных преобразователей силы служат специальные пружины, работающие на изгиб или кручение, для малых усилий и компактные сжимаемые тела для больших усилий.

В пределах области упругости для одноосного состояния напряжения согласно закону Гука имеется линейная зависимость между деформацией ϵ и механическим напряжением σ :

$$\sigma = \epsilon E,$$

где E — модуль упругости.

Так как

$$\epsilon = \Delta s/s,$$

где s — длина; Δs — изменение длины, причем при растяжении или сжатии, и

$$\sigma = F/A,$$

где A — площадь поперечного сечения; F — усилие, то определение силы сводится к определению изменения длины:

$$\Delta s = (s/AE)F.$$

При использовании пружин, работающих на изгиб или кручение, нагрузка вводится как момент. При этом деформация s пружины, работающей на изгиб, в точке x определится из выражения:

$$d^2s/dx^2 = M_b/(EI),$$

а угол закручивания φ пружины, работающей на кручение, — из выражения:

$$\varphi = M_t/(GW_p).$$

Здесь E — модуль упругости; G — модуль сдвига; I — момент инерции; M_b — изгибающий момент; M_t — момент кручения; W_p — полярный момент сопротивления.

Возникающие под воздействием усилия изменения длины Δs_a определяются с помощью первичного преобразователя длины. Только в простейших случаях, например при использовании винтовой пружины, можно непосредственно отсчитать значение изменения длины.

Это осуществимо в определенном допустимом диапазоне:

$$\Delta s_a = \Delta F_e/c,$$

где ΔF_e — изменение усилия на входе; c — жесткость пружины.

Механические преобразователи температуры. Механические первичные преобразователи температуры основаны на использовании термомеханического эффекта, т. е. теплового расширения твердых тел, жидкостей и газов. Коэффициент линейного расширения α_l твердого тела определяется следующим образом:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T},$$

где Δl — изменение длины; l — длина; ΔT — изменение температуры.

Коэффициент линейного расширения α_l зависит от материала твердого тела и температуры T . В определенном диапазоне можно с допустимой погрешностью принять среднее значение коэффициента линейного расширения. Тогда изменение длины в этом диапазоне представится в виде:

$$\Delta s_a = l_0 \alpha_{l0} (T_e - T_0) = l_0 \alpha_{l0} \Delta T,$$

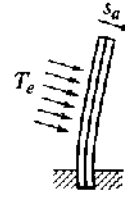
где l_0 — исходная длина при начальной температуре; T_e — значение температуры, при которой произведено измерение; T_0 — начальное значение температуры.

Таким образом, температуру можно определить по изменению длины двух твердых тел (стержней), если, например, температура

одного из них поддерживается постоянной. В dilatометрических термометрах используются два стержня одинаковой длины l_0 , имеющие различные значения коэффициента линейного расширения, и по разности изменений длины стержней определяется изменение температуры:

$$\Delta s_a = l_0 (\alpha_{l_{01}} - \alpha_{l_{02}}) (T_e - T_0).$$

Рис. 5.3. Биметаллический термометр



Разность температур оценивается с помощью первичного преобразователя длины. Прямое измерение возможно в тех случаях, когда оба стержня жестко соединены между собой в продольном направлении и составляют биметаллический термометр (рис. 5.3).

5.2.2. Пневматические первичные преобразователи

Пневматические преобразователи длины и температуры. По принципу действия пневматические преобразователи можно подразделить на статические и динамические. Статические преобразователи основаны на уравнении состояния идеального газа:

$$pV/T = mR = k, \quad (5.1)$$

где p — давление; V — объем газа; T — абсолютная температура; m — масса газа; R — газовая постоянная; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт·с/К — постоянная Больцмана.

Эта зависимость с достаточно хорошим приближением справедлива и для реальных газов.

Из уравнения (5.1) вытекает, что изменение длины и температуры можно измерить по изменению давления. Если в идеальном цилиндрическом сосуде с площадью поперечного сечения A возможно перемещение s только в осевом направлении, то, учитывая зависимость $V = As$ при постоянной температуре, получаем

$$p = k \frac{T}{A} \frac{1}{s}.$$

При изменении давления p до значения $p + \Delta p$ происходит также изменение s до $s + \Delta s$, т.е.

$$p + \Delta p = k \frac{T}{A} \frac{1}{s + \Delta s}.$$

Из этих уравнений следует:

$$\Delta p = - \frac{kT}{A} \frac{1}{(s + \Delta s)s}.$$

При условии, что $\Delta s \ll s$, получаем

$$\Delta p \approx (-k_2/s^2)\Delta s.$$

Таким образом, изменение длины практически пропорционально изменению давления.

При условии постоянства объема существует аналогичная пропорциональная зависимость между изменением температуры и изменением давления:

$$\Delta p = k_3 \Delta T.$$

Для преобразования малой длины целесообразно использовать систему сопло — заслонка. Измерение осуществляется бесконтактным методом. Поток воздуха, выходящий из измерительного сопла над давлением, попадает на измерительную поверхность. При небольшом расстоянии s_e между соплом и измерительной поверхностью под влиянием скоростного напора возникает заметное противодействие в направлении напорного трубопровода. Изменение давления является мерой расстояния s_e . При диаметре сопла d для расстояния в диапазоне $0 < s_e < 0,15d$ между изменением давления Δp_a и изменением длины Δs_e существует приближенная линейная зависимость

$$\Delta p_a \approx k s_e.$$

Для сохранения области линейной зависимости в большинстве случаев производят дифференциальные измерения. Градуировка осуществляется методом сравнения с использованием образцового сопла, устанавливаемого параллельно градуируемому соплу. При применении соответствующих образцов сравнения возможны измерения параметров цилиндрической поверхности или шероховатости поверхности.

5.2.3. Оптические первичные преобразователи

Оптические преобразователи, основанные на использовании законов геометрической оптики. Принципиальные основы оптических первичных преобразователей базируются на законах формирования изображения геометрической оптики. Соответствующие системы, реализующие эти принципы, предусматривают возможность непосредственного измерения длины оптическим методом с использованием компарирования путем сравнения с точной стеклянной линейной шкалой (образцом сравнения). Для сравнения применяют измерительный микроскоп.

Измеряемые величины можно представить непосредственно или же косвенным путем, используя определенные угловые положения отражающей поверхности так, что измерительный сигнал по-

лучают в виде оптического сигнала в результате смещения световой метки. Отклонение отраженного от зеркала светового пучка вдвое превышает угол наклона. Поскольку оптический сигнал считывается на довольно больших расстояниях, можно достичь высокой чувствительности.

Оптические преобразователи, основанные на использовании законов волновой оптики. Преобразование различных измеряемых величин возможно также с помощью измерительных преобразователей, использующих законы волновой оптики. Поляризация света применяется для анализа внутренних механических напряжений материалов, пропускающих световое излучение для измерения концентрации растворов, прозрачных для светового излучения.

Для преобразования линейных размеров, в особенности небольших изменений длины, нашли применение методы, основанные на использовании интерференции света. Оптическая разность длин, обусловленная геометрической разностью длин, вызывает смещение фазы волнового фронта. Это смещение оценивается с помощью интерференционной картины. Разность фаз

$$\Delta\varphi = 2\pi n\Delta s_e/\lambda,$$

где n — показатель преломления; Δs_e — изменение длины; λ — длина волны света.

При сохранении постоянных геометрических длин оптическая разность хода может также возникнуть вследствие различных значений показателя преломления сред. Даже незначительное различие показателей преломления можно оценить этим оптическим методом. Поскольку такое различие возникает в растворах разной концентрации, обеспечивается возможность с помощью рефрактометра по изменению показателя преломления определить концентрацию раствора.

5.2.4. Электрические первичные преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи силы (длины, давления). В твердых материалах, характеризующихся дипольной структурой, например в кварце, турмалине, сульфате лития и специальных видах керамики, возникает пьезоэлектрический эффект. Этот эффект целесообразно использовать для измерений в тех случаях, когда элементарные диполи находятся в определенном положении. При механической деформации кристалла прекращается взаимная компенсация зарядов, так что на внешних поверхностях возникает разностный заряд, который может быть измерен при использовании проводящих пленок. При этом электрическое поле из-за обратимости явления вызывает вторичную деформацию, которая пренебрежимо мала.

Возникающий заряд пропорционален прикладываемому усилию. Причем пьезомодуль

$$\delta = Q/F,$$

где Q — заряд; F — прикладываемое усилие, зависит от свойств материала и направления прикладывания нагрузки. В обычных условиях пьезомодуль для кварца и турмалина составляет $\delta = 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н}^{-1}$, а для промышленной керамики — $\delta = 10^{-10} \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н}^{-1}$.

Поскольку преобразователь, заключенный между двумя проводящими пленками, имеет емкость, то возникает напряжение:

$$u_a = Q/C = (\delta/C)F_e,$$

где Q — заряд; δ — пьезомодуль; C — емкость; F_e — усилие.

Ввиду того что при практической реализации таких систем размеры пленок ограничены, максимально достижимая чувствительность δ/C кристаллического преобразователя составляет $10^{-2} \text{ В} \cdot \text{Н}^{-1}$, а керамического преобразователя — $10^{-1} \text{ В} \cdot \text{Н}^{-1}$.

При практическом использовании этих преобразователей следует учитывать, что возникающие заряды не стабильны во времени и в связи с этим пьезоэлектрические преобразователи не могут быть использованы для статических измерений. Наиболее целесообразно их применять для преобразования ускорения.

Электродинамические преобразователи колебаний. Под воздействием переменного магнитного потока в катушке индуцируется напряжение e , пропорциональное скорости изменения потока. Если изменение магнитного потока вызвано перемещением катушки в постоянном магнитном поле, то изменение напряжения зависит от скорости движения катушки. Основанные на таком принципе преобразователи имеют обычно один электромагнит цилиндрической формы. В соответствии с законом электромагнитной индукции напряжение, наведенное в катушке, определяется соотношением

$$u_a = -n \frac{d\Phi}{dt} = -nB \frac{dA}{dt},$$

где n — число витков; Φ — магнитный поток; t — время; B — магнитная индукция; A — эффективная площадь.

Если катушка находится в однородном участке постоянного магнитного поля и $A = ls_e$, то

$$u_a = -nBl \frac{ds_e}{dt} = kv(t),$$

где l — диаметр катушки; s_e — глубина втягивания; k — постоянная; v — скорость.

Скорость и наведенное напряжение взаимно пропорциональны. Этот метод может быть использован также для косвенных измерений длины и ускорения, если напряжение измеряется после вычислительного звена (интегратора или дифференциатора).

Электрические преобразователи температуры. Преобразование температуры с помощью термоэлементов основывается на использовании термоэлектрического эффекта. Если два проводника из разных материалов соединены гальванически друг с другом в двух точках, например сваркой, то возникает напряжение в месте контакта. Это может быть объяснено различной температурной зависимостью работы выхода у соединенных материалов. Напряжение отсутствует, если оба контактирующих участка имеют одинаковую температуру. При однородных проводниках термоЭДС зависит только от разности температур в участках. Тогда

$$\Delta u_a = [e_1(T) - e_2(T)] \Delta T_e.$$

Абсолютное значение термоЭДС e_i определяют для разности температур 1 К, и оно само зависит от температуры.

Выбор материала термоэлектродов в значительной степени определяется предполагаемым диапазоном температур. Поскольку термоЭДС обусловлена разностью температур, значение температуры в одном из контактирующих участков поддерживается постоянным. Обычно опорные значения температур составляют 0 или 50 °С, что обеспечивается термостатом.

Резистивные преобразователи длины. Измерение длины путем преобразования ее в изменение сопротивления резистора довольно широко распространено. При этом резистор может быть выполнен в форме проволоки, спирали, столба проводящей жидкости, например ртути, или же проводящего тонкого слоя. Зависимость выходного напряжения от измеряемой длины имеет вид

$$U_a = U_b \left(R_a \parallel R \frac{s_e}{l} \right) / \left[R \left(1 - \frac{s_e}{l} \right) + \left(R_a \parallel R \frac{s_e}{l} \right) \right] = U_b \frac{1}{\frac{1}{s_e} + \frac{R}{R_a} \left(1 - \frac{s_e}{l} \right)},$$

где U_a — напряжение на выходе; U_b — рабочее напряжение; R_a — нагрузочное сопротивление; R — общее активное сопротивление потенциометра; s_e — измеряемая длина; l — длина потенциометра.

При условии $R \ll R_a$ получаем

$$U_a \approx \left(\frac{U_b}{l} \right) s_e = k s_e.$$

Для этого случая характеристика преобразователя приблизительно линейная. Такие преобразователи применяются только для

сравнительно грубых измерений. Ввиду того что в большинстве случаев осуществляется механическое опутывание (скользящий контакт), эти системы предпочтительно используются для статических измерений.

Резистивные тензометрические преобразователи длины. Тензометрический преобразователь представляет собой проволоку высокого сопротивления, наклеенную на специальную бумагу, обычно в форме мандра. Недавно стали получать тензометрические преобразователи в виде печатных схем. Относительное изменение сопротивления при растяжении проволоки используется в качестве меры изменения длины. При этом изменение сопротивления обусловлено не только изменением геометрической формы, но и внутренними механическими напряжениями.

Сопротивление проводника, имеющего сечение круглой формы,

$$R = \rho l / A = 4\rho l / D^2 \pi,$$

где ρ — удельное сопротивление; l — длина; A — площадь поперечного сечения; D — диаметр.

После логарифмирования этого выражения и последующего дифференцирования получают компоненты изменения сопротивления:

$$dR/R = d\rho/\rho + dl/l - 2dD/D.$$

Заменяв дифференциалы разностями и выразив поперечное сжатие через удлинение с помощью уравнения Пуассона, получим

$$\Delta D/D = -\nu \Delta l/l,$$

где ν — коэффициент поперечного сжатия.

Подставим в выражение для изменения удельного сопротивления

$$\Delta\rho/\rho = p(\Delta l/l),$$

где p — коэффициент пропорциональности.

Тогда относительное изменение сопротивления измерительной проволоки:

$$\Delta R/R = (p + 1 + 2\nu) \Delta l/l;$$

$$\Delta R_a/R_a = k(\Delta l/l) = k_1(s_e/l).$$

Коэффициент k указывается для каждого тензометрического преобразователя. Для металлической проволоки $k \approx 2$, так как $\nu \approx 0,3$ и $p \approx 0,3 \dots 0,4$. Для полупроводников этот коэффициент существенно больше. Изменение сопротивления измеряется мостом.

При использовании тензометрических преобразователей следует принимать во внимание, что влияние температуры может сильно искажать результаты измерений. Однако при выполнении измерений с помощью двух тензометрических преобразователей температурное влияние снижается; оба преобразователя подвергаются воздействию одной и той же температуры, однако только один из них деформируется. В качестве результата измерения берется разность сопротивлений двух преобразователей.

Резистивные преобразователи силы. Для прямого преобразования силы можно использовать изменение переходного сопротивления контакта при различном усилии прижима контакта двух проводников. Угольные пластинки толщиной около 1 мм накладываются таким образом, чтобы прикладывание осевого усилия изменяло переходное сопротивление контакта, которое практически и составляет активное сопротивление всего столба пластинок.

Для общего активного сопротивления столба справедливо выражение

$$R_a = R_0 + R_k = R_0 + k/F_e,$$

где R_0 — сопротивление пластинок; R_k — контактное сопротивление между пластинками (переходное сопротивление контакта); k — коэффициент пропорциональности; F_e — сила.

Исходя из этого, изменение сопротивления в зависимости от прикладываемой нагрузки можно представить в виде

$$\Delta R_a = -k \frac{1}{F_e (F_e + \Delta F_e)} \Delta F_e.$$

Наряду с простотой конструктивного исполнения такие преобразователи характеризуются высокой чувствительностью. Однако им свойственны относительно большие погрешности измерений (нестабильность нуля и нестабильность, обусловленная старением). Вместо угольных пластинок в настоящее время находят применение полупроводниковые резисторы, чувствительные к давлению.

Резистивные преобразователи температуры. Измерение температуры с помощью резисторов основывается на температурной зависимости сопротивления большинства проводников или полупроводников. Изменение сопротивления, которое может быть измерено с помощью мостовой схемы, является мерой изменения температуры.

Металлические измерительные преобразователи температуры изготавливаются предпочтительно из никеля или платины. Принимая во внимание зависимость

$$R = R_0 [1 + \alpha_{R_0} (T - T_0)],$$

изменение сопротивления в рабочем диапазоне можно представить в следующем виде:

$$R_a = R_0 \alpha_{R_0} \Delta T_c.$$

Поскольку температурный коэффициент α_{R_0} в рабочем диапазоне измерительного резистора практически можно принять постоянным, характеристика получается линейной.

В настоящее время для измерения температуры до 100 °С широко используют термисторы, представляющие собой полупроводниковые резисторы с очень высокой температурной чувствительностью. Сопротивление этих резисторов в зависимости от температуры можно выразить следующим образом:

$$R_T = R_0 \exp(b/T),$$

или

$$\Delta R = -R_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{b \Delta T}{T(T + \Delta T)} \right] \right\}.$$

Достоинством термисторов является высокая чувствительность, а недостатком — нелинейность.

Емкостные преобразователи. Емкостные преобразователи состоят из цилиндрических или пластинчатых конденсаторов с изменяющейся площадью электродов (или диэлектриков) либо с постоянной площадью электродов, но с регулируемым расстоянием между ними. Изменение емкости измеряется с помощью мостовой схемы.

Выражение для емкости C пластинчатого конденсатора можно представить в виде:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{\text{отн}} A/s,$$

где ϵ_0 и $\epsilon_{\text{отн}}$ — абсолютная и относительная диэлектрические постоянные; A — эффективная площадь; s — расстояние между пластинами.

Емкостные преобразователи длины. Измерение (преобразование) длины с помощью пластинчатого конденсатора возможно непосредственно по расстоянию между пластинами (рис. 5.4, а) или же косвенно по результатам оценки изменения эффективной площади (например, в поворотном конденсаторе переменной емкости) (рис. 5.4, б), а также по соотношению параметров двух различных диэлектриков между пластинами (рис. 5.4, в).

При неизменном диэлектрике и постоянном расстоянии между пластинами можно записать

$$C = k/s.$$

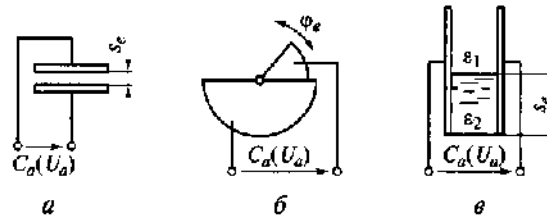


Рис. 5.4. Емкостные преобразователи длины с помощью пластинчатого конденсатора (а), поворотного конденсатора (б) и двух различных диэлектриков между пластинами (в)

При изменении расстояния между пластинами на Δs емкость также изменяется на

$$\Delta C = k \left[1 / (s + \Delta s) - 1/s \right] = -k \Delta s / [s(s + \Delta s)],$$

и для малой длины $\Delta s \ll s$ можно определить соответствующее изменение емкости

$$\Delta C_a = -k \frac{1}{s^2} \Delta s_e.$$

Эта зависимость свидетельствует о почти пропорциональной зависимости емкости от изменения длины. Лучшую линейность и в более широком диапазоне можно получить с помощью дифференциального конденсатора, когда изменение длины фиксируется средней пластиной. В этом устройстве общая емкость остается постоянной. Изменение длины пропорционально разности частичных емкостей.

При симметричном расположении, т.е. при установке дифференциального конденсатора в положение, когда $C_1 = C_2$ и, следовательно, $s_1 = s_2 = s$, изменение длины Δs приводит к разности емкостей:

$$\Delta C = k \left(\frac{1}{s + \Delta s} - \frac{1}{s - \Delta s} \right) = -k \frac{2\Delta s}{s^2 - (\Delta s)^2}.$$

Поскольку для $\Delta s \ll s$ величиной $(\Delta s)^2$ практически можно пренебречь, запишем окончательно

$$\Delta C_a = -(2k / s^2) \Delta s_e.$$

Наряду с улучшенной линейностью по сравнению с линейностью простых конденсаторов почти вдвое увеличивается также и чувствительность.

Емкостные преобразователи уровня. Если пространство между пластинами конденсатора заполнено двумя ве-

ществами, имеющими различные диэлектрические свойства, например воздухом и неэлектропроводной жидкостью, то изменение положения поверхности раздела двух сред вызывает изменение емкости конденсатора. На этом принципе можно создать очень простое устройство для измерения уровня.

Конденсатор располагают таким образом, чтобы поверхность раздела сред была перпендикулярной (см. рис. 5.4, в) поверхности пластин конденсатора.

Индуктивные преобразователи. Если под влиянием измеряемой величины происходит изменение магнитного сопротивления измерительной катушки, то это приводит к изменению индуктивности катушки, которая может быть измерена с помощью мостовой схемы.

Уравнение для определения индуктивности L катушки имеет вид

$$L = n^2 / R_m, \quad (5.2)$$

где n — число витков; R_m — сопротивление магнитной цепи.

Формула (5.2) выражает принцип действия индуктивного преобразователя. Изменение магнитного сопротивления происходит благодаря изменению магнитного пути (преобразователь с поперечным якорем) или магнитной проницаемости (преобразователь с втяжным якорем, магнитоупругий преобразователь).

Индуктивные преобразователи перемещения с поперечным якорем. Поскольку магнитная проницаемость железа μ_{Fe} существенно превышает магнитную проницаемость воздуха $\mu_{возд}$, то обеспечивается возможность определения очень малых изменений длины по изменению ширины воздушного промежутка (рис. 5.5, а).

Магнитное сопротивление R_m такой магнитной цепи составляет

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} A} + \frac{l_{возд}}{\mu_{возд} A}.$$

Если площадь поперечного сечения A магнитной цепи принимается постоянной, то ввиду условия $\mu_0 \approx \mu_{возд}$ получаем

$$R_m = \frac{1}{A\mu_0} \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_{отнFe}} + 2S_e \right).$$

В результате подстановки можно вывести выражение, определяющее индуктивность L_u :

$$L_u = \frac{A\mu_0 n^2}{l_{Fe} / (\mu_{отнFe} + 2S_e)}.$$

После логарифмирования, последующего дифференцирования и перехода к разностям при $\Delta s_e \ll s_e$ получаем:

$$\frac{\Delta L_a}{L_a} = \frac{2\Delta s_e}{l_{Fe}/(\mu_{отнFe} + 2s_e)};$$

$$\Delta L_a = -L_a \Delta s_e / (k_2 + s_e).$$

Здесь A — эффективная площадь поперечного сечения; L_a — индуктивность; R_m — магнитное сопротивление; l_{Fe} — путь в магнитной цепи; $l_{возд}$ — путь в воздухе, $l_{возд} = 2s_e$; n — число витков; μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость; μ_{Fe} — абсолютная магнитная проницаемость железа; $\mu_{возд}$ — абсолютная магнитная проницаемость воздуха; $\mu_{отнFe}$ — относительная магнитная проницаемость железа.

При небольших перемещениях преобразователь с поперечным якорем также имеет линейную статическую характеристику.

Лучшая линейность с одновременным повышением чувствительности и подавлением действия внешних влияющих величин обеспечивается в дифференциальной системе. Этот метод целесообразно использовать при бесконтактных измерениях механических вибраций или же эксцентриситета вращающихся валов. Погрешность измерения при этом может составлять менее 1 мкм.

Индуктивные преобразователи перемещения с втяжным якорем. При перемещении ферромагнитного сердечника, частично входящего в катушку, изменяется соотношение между силовыми линиями поля в сердечнике и воздушном промежутке. Это соответствует изменению относительной магнитной проницаемости всей магнитной цепи и приводит к изменению индуктивности в зависимости от перемещения s_e (рис. 5.5, б).

Система, состоящая из двух дросселей, работающих в двухтактном режиме, имеет лучшую линейность. По сравнению с преобразователем с поперечным якорем погрешность измерения здесь больше, но зато появляется возможность измерения значительно большей длины.

Индуктивные магнитоупругие преобразователи силы. В индуктивных преобразователях силы (рис. 5.5, в) ис-

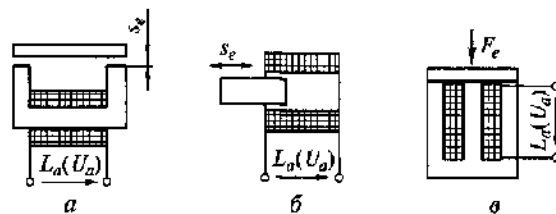


Рис. 5.5. Индуктивные преобразователи:

а — перемещения с поперечным якорем; б — перемещения со втяжным якорем; в — магнитоупругие силы

пользуется принцип магнитоупругости. Магнитная проницаемость ряда материалов зависит от механического напряжения. Особенно четко это свойство проявляется в железоникелевых сплавах. При механическом напряжении $10 \text{ Н} \cdot \text{мм}^{-2}$ происходит изменение магнитной проницаемости до 40 %. При этом наблюдается почти линейная зависимость между механическим напряжением и магнитной проницаемостью.

Магнитоупругие преобразователи силы характеризуются высокой нагрузочной способностью и простотой эксплуатации.

5.2.5. Аналоговые показывающие приборы

Представление измеренного значения в аналоговой форме характеризуется непрерывным изменением относительного положения указателя (индекса, метки) и шкалы. В зависимости от вида представляемых входных сигналов существуют системы с механическими, пневматическими или электрическими измерительными свойствами.

Считывание результатов измерений производится оператором.

При этом в аналоговой технике весьма большое значение имеет умение операторов правильно считывать результаты измерений.

5.2.6. Аналоговые регистрирующие приборы

В целях снижения субъективных влияний, особенно при измерении быстро изменяющихся во времени величин, осуществляется регистрация выходных величин.

Тем самым обеспечивается возможность многократной проверки действий оператора им самим или же другими операторами. Получаемая запись используется также в качестве документа. Измерительные механизмы самопишущих приборов часто идентичны измерительным механизмам показывающих измерительных приборов.

Регистрирующие приборы с непрерывной записью представляют собой аналоговые приборы, регистрирующие измерительный сигнал в функции времени. Регистрирующая бумага перемещается с постоянной скоростью относительно записывающего элемента измерительного механизма.

С помощью электронно-лучевых осциллографов осуществляется обычно только непосредственная индикация. Однако возможно ввести фотонасадку для фотосъемки изображений с экрана осциллографа и последующей их обработки. В запоминающем осциллографе происходит запоминание воспроизводимого на экране осциллографа изображения. Основой электронно-лучевого ос-

циллографа является электронно-лучевая трубка, в которой испускаемые с поверхности катода электроны фокусируются и ускоряются в направлении анода. С помощью двух электрических или магнитных полей возможно любое отклонение пучка электронов.

Усиленный измерительный сигнал (напряжение, сила тока) подается на систему вертикального отклонения электронного пучка. Подача напряжения развертки на систему горизонтального отклонения вызывает перемещение электронного пучка с постоянной скоростью по горизонтали светового экрана. При периодических измерительных сигналах благодаря синхронизации напряжения развертки с частотой сигнала достигается неподвижность изображения.

Вместо напряжения развертки может подводиться второй периодический измерительный сигнал или сигнал сравнения. При этом отношение частот обоих сигналов определяется по фигурам Лиссажу.

Находят применение также многолучевые осциллографы с многоцветным изображением.

Регистрация на магнитной ленте представляет собой обычную запись электрического сигнала на магнитной ленте. С помощью записывающей головки создается магнитодвижущая сила $\theta = ni$, вызывающая магнитный поток $\Phi = \theta/R_m$, где n — число витков; i — сила тока; R_m — сопротивление магнитной цепи.

Магнитный поток, пронизывающий перемещаемую магнитную ленту, создает в ней остаточную магнитодвижущую силу $\theta_{\text{ост}} = ki = k'\Phi$.

Обратное преобразование информации происходит аналогично. В индукционной катушке согласно закону индукции возникает напряжение, пропорциональное магнитному потоку. Регистрация на магнитной ленте обеспечивает возможность непосредственной фиксации электрических измерительных сигналов, которые затем могут быть многократно воспроизведены и обработаны любым методом. Путем изменения скорости перемещения магнитной ленты при записи и воспроизведении возможно последующее преобразование частоты, например преобразование высокочастотных измерительных сигналов в сигналы такой частоты, при которой можно использовать обычные регистрирующие приборы.

Контрольные вопросы

1. Какие признаки используются для классификации аналоговых измерительных приборов?
2. Из каких функциональных блоков состоит измерительный прибор?
3. Каковы функции первичного измерительного преобразователя?
4. Чем отличаются активные и пассивные первичные преобразователи?

5. Какие существуют виды механических первичных преобразователей?
6. Приведите схемы преобразователей линейных размеров, силы, движения и температуры.
7. Приведите схемы пневматических и гидравлических преобразователей. Какие величины могут быть преобразованы этими видами преобразователей?
8. Для чего предназначены оптические преобразователи? Какие величины они могут преобразовывать?
9. Какие имеются разновидности электрических первичных преобразователей? Приведите их основные схемы.
10. Какие существуют виды емкостных и индуктивных преобразователей и для чего они предназначены? Приведите основные схемы.
11. Приведите основные схемы аналоговых показывающих приборов. Какие величины могут ими измеряться?
12. Каково назначение регистрирующих аналоговых приборов?

ГЛАВА 6

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

6.1. Общие вопросы измерений неэлектрических величин

Контроль технологических процессов, а также исследование параметров машин и агрегатов неразрывно связаны с измерениями различных неэлектрических величин.

Большинство величин измеряются при помощи электрических измерительных средств. Это связано с рядом преимуществ электрических средств по сравнению с другими: высокой чувствительностью и малой инерционностью приборов, возможностью измерения на значительном расстоянии и простотой автоматизации измерения и обработки результатов.

Разнообразие неэлектрических величин, измеряемых при помощи электрических средств, потребовало создания большого разнообразия средств измерений. Номенклатура приборов для измерения неэлектрических величин значительно больше, чем для электрических. Это связано с тем, что число неэлектрических величин, требующих измерения, значительно больше числа электрических измеряемых величин.

Общность методов и средств измерений неэлектрических величин состоит в том, что измеряемая величина предварительно преобразуется пропорциональную ей электрическую (силу тока, напряжение, сопротивление, частоту), а затем измеряется известными средствами. При этом измерительное преобразование неэлектрической величины в электрическую предназначено только для отражения размера одной физической величины размером другой физической величины. Такой подход к измерению неэлектрических величин — единственный при создании измерительных средств, использующих различные функциональные связи между величинами.

Общность методов и средств измерения неэлектрических величин позволяет представить структурную схему измерительной цепи, вид которой в значительной мере определяется используемым измерительным преобразователем. Обобщенная структурная схема цепи для измерения неэлектрических величин при помощи электрических средств приведена на рис. 6.1 (пунктиром в схеме

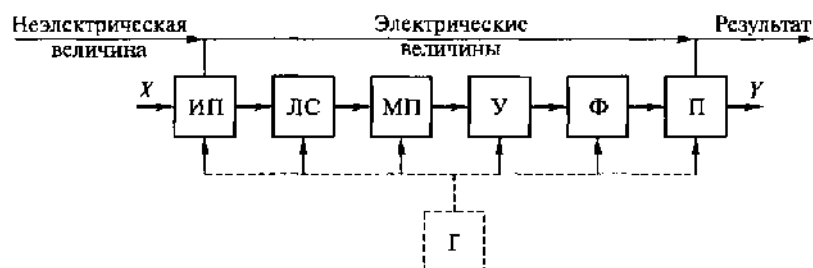


Рис. 6.1. Обобщенная структурная схема цепи для измерения неэлектрических величин

показаны элементы цепи, которые в зависимости от вида преобразователя могут не применяться). Измеряемая неэлектрическая величина X подается на вход первичного измерительного преобразователя ИП, который предназначен для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателей. Выходной величиной измерительного преобразователя является пропорциональный величине X электрический сигнал, который по линии связи ЛС поступает на масштабный преобразователь МП, предназначенный для выбора масштаба. Далее после преобразования в усилителе $У$ сигнал подвергается статистической обработке при помощи фильтра $Ф$. Последним элементом цепи является измерительное устройство $П$, а для питания цепи — источник $Г$.

Основное требование, предъявляемое к измерительным цепям измерения неэлектрических величин, — минимальные потери информации при преобразовании. В зависимости от метода преобразования измеряемых неэлектрических величин (прямого преобразования или уравнивания) возникают те или иные погрешности измерений.

Метод прямого преобразования состоит в том, что измерительная информация преобразуется в измерительном устройстве в одном направлении: от входа

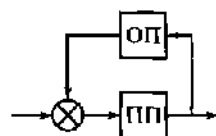


Рис. 6.2. Обобщенная структурная схема прибора с уравнивающим преобразованием

через ряд преобразователей к выходу. Общая погрешность измерений при использовании метода прямого преобразования примерно в одинаковой мере определяется погрешностями отдельных преобразователей всей измерительной цепи.

Метод уравнивания (рис. 6.2) дает меньшие погрешности. Особенность этого метода в том, что в

измерительной цепи два параллельных канала первичного ПП и обратного ОП преобразований. Измеряемая величина X преобразуется параллельно в первичном и обратном преобразователях в пропорциональный электрический сигнал. Поэтому на вход цепи прямого преобразования подается только сигнал несоответствия сигналов преобразования и входной величины. При этом наибольший эффект преобразования достигается в том случае, когда обратным преобразованием охвачены все элементы измерительной цепи. Погрешности измерений методом уравнивания определяются в основном погрешностями обратного преобразования.

6.2. Общие свойства и классификация измерительных преобразователей

На вход измерительного преобразователя кроме измеряемой величины воздействуют многочисленные посторонние факторы — механические возмущения, изменения температуры, влажности, электрические и магнитные поля и др. Поэтому к числу основных задач измерительных преобразователей наряду с минимальными потерями информации при преобразовании относят минимальную чувствительность к посторонним воздействиям.

Разнообразные по устройству и принципу действия измерительные преобразователи имеют различные характеристики и параметры. Основные из них — градуировочная характеристика, коэффициент преобразования, погрешности и диапазон преобразования.

Градуировочная характеристика — зависимость между выходной и входной величинами измерительного преобразователя $y = f(x)$.

Примерная градуировочная характеристика преобразователя показана на рис. 6.3.

Коэффициент преобразования — это отношение изменения сигнала на выходе измерительного преобразователя Δy , отображающего измеряемую величину, к вызвавшему его изменению сигнала на входе преобразователя Δx :

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

Коэффициент преобразования измерительной цепи, состоящей из ряда последовательно соединенных преобра-

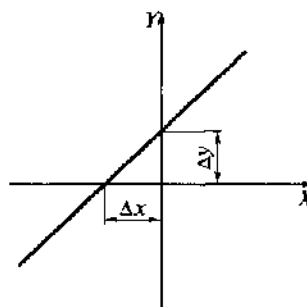


Рис. 6.3. Примерная градуировочная характеристика измерительного преобразователя

зователей, равен произведению коэффициентов всех преобразователей.

Погрешности преобразователей подразделяют на абсолютные и относительные. В отличие от погрешностей мер и приборов погрешности преобразователей определяют по входу и выходу.

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу (выходу) — это разность между значением величины на входе (выходе) преобразователя, определяемым в принципе по действительному значению величины на его выходе (входе) при помощи градуировочной характеристики, приписанной преобразователю, и действительным значением величины на входе (выходе) преобразователя.

Относительная погрешность измерительного преобразователя по входу (выходу) — это отношение абсолютной погрешности преобразователя по входу (выходу) к истинному значению величины на входе (к значению величины на выходе, определяемому в принципе по истинному значению величины на входе по градуировочной характеристике, приписанной преобразователю).

Погрешности измерительных преобразователей подразделяют на основные и дополнительные, возникающие вследствие влияния посторонних факторов.

Диапазон преобразования — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности преобразователя.

Кроме перечисленных характеристик преобразователей при их оценке учитывают следующие свойства: постоянство характеристик во времени, степень обратного воздействия преобразователя на измеряемую величину (например, за счет собственного потребления мощности), условия эксплуатации, взаимозаменяемость, масса, габаритные размеры, стоимость и др.

Измерительные преобразователи неэлектрических величин классифицируются в основном по назначению и принципу действия.

По назначению измерительные преобразователи подразделяют на преобразователи механических, тепловых, химических, биологических и других физических величин.

По принципу действия преобразователи подразделяются на генераторные и параметрические (рис. 6.4).

В генераторных преобразователях измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в пропорциональные ЭДС или силу тока. К таким преобразователям относятся, например, электромагнитные, основанные на эффекте Холла, пьезоэлектрические и оптические.

В параметрических преобразователях измеряемая величина преобразуется в различные параметры электрических цепей: сопротивление, емкость, индуктивность, частоту. К параметрическим относятся резистивные (контактные, реостатные, тензорезистор-

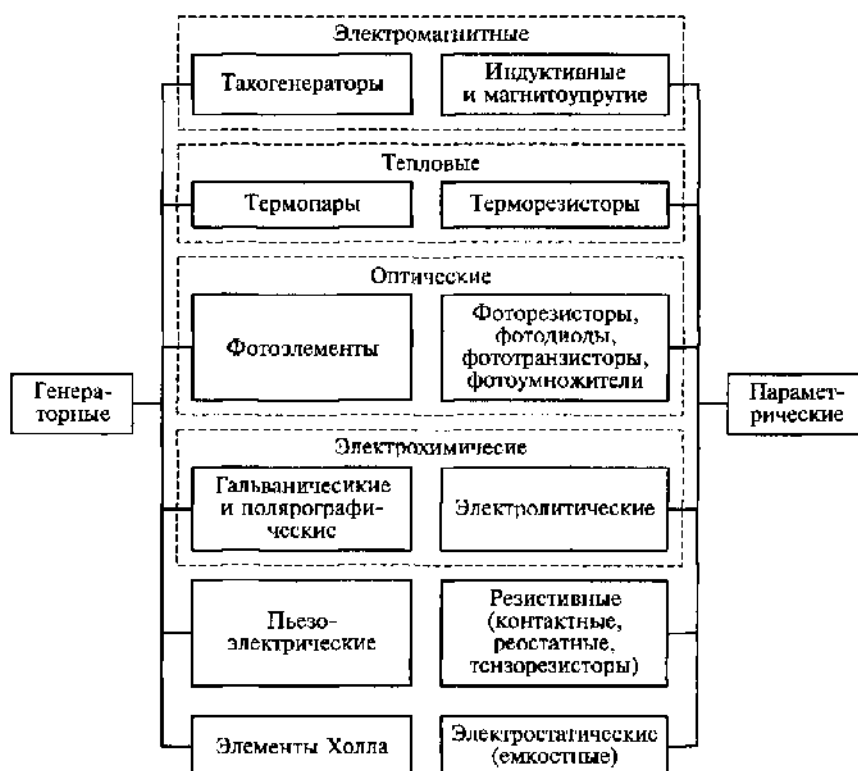


Рис. 6.4. Классификация измерительных преобразователей по принципу действия

ры), электростатические, электромагнитные (индуктивные и магнитоупругие), оптические и другие преобразователи.

На практике для преобразования одной и той же неэлектрической величины в зависимости от условий используют различные типы измерительных преобразователей.

6.3. Электромагнитные измерительные преобразователи

Общие сведения. В электромагнитных преобразователях измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в пропорциональную электрическую за счет изменения магнитных свойств материалов. Из числа электромагнитных преобразователей наибольшее распространение получили индукционные, индуктивные и магнитоупругие.

Индукционные преобразователи. В индукционных преобразователях (рис. 6.5) линейная или угловая скорость (частота вращения) исследуемого объекта преобразуется в пропорциональную ЭДС. Принцип действия индукционных преобразователей основан на явлении электромагнитной индукции. Входной величиной в таких преобразователях является линейная или угловая скорость исследуемого объекта. По конструктивному исполнению индукционные преобразователи бывают с подвижной катушкой и неподвижным магнитом (рис. 6.5, *а* и *б*) или с неподвижными катушкой и постоянным магнитом (рис. 6.5, *в*).

Как видно из рис. 6.5, индукционные преобразователи в основном представляют собой электрические машины постоянного или переменного токов, называемые тахогенераторами.

Характеристика тахогенератора постоянного тока представляет собой зависимость его выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от угловой скорости вращения якоря ω :

$$U_{\text{вых}} \omega = k\omega,$$

где k — статический коэффициент преобразования, или постоянная тахогенератора.

Эта зависимость справедлива для идеального тахогенератора постоянного тока. В реальном преобразователе на значение выходного напряжения оказывают влияние реакция якоря, ослабляющая основной магнитный поток машины, и падение напряжения на переходном сопротивлении щеточного контакта. Поэтому реальная характеристика тахогенератора постоянного тока нелинейна:

$$U_{\text{вых}} = \frac{k\omega - U_{\text{ш}}}{1 + R_{\text{я}}/R_{\text{сш}}},$$

где $U_{\text{ш}}$ — падение напряжения на переходном сопротивлении щеточного контакта, В; $R_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря, Ом;

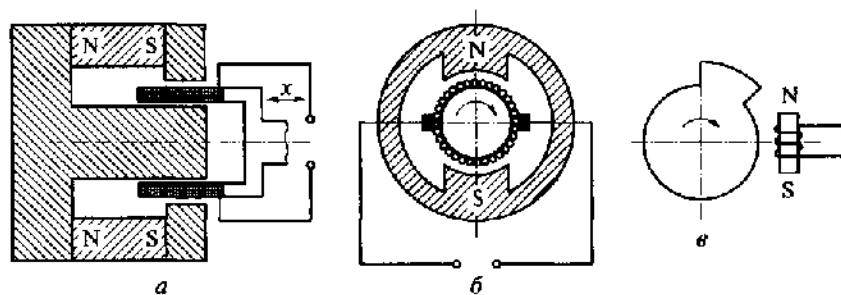


Рис. 6.5. Конструкции индукционных преобразователей неэлектрических величин с подвижной катушкой и неподвижным магнитом (*а* и *б*) и с неподвижными катушкой и магнитом (*в*)

$R_{из}$ — сопротивление измерительной цепи, в которую включен тахогенератор, Ом.

Погрешности преобразования скорости при помощи тахогенераторов постоянного тока возникают вследствие нагрева его обмоток, асимметрии выходного напряжения и неустойчивости переходного сопротивления щеточного контакта.

Основное достоинство тахогенераторов постоянного тока — это отсутствие влияния характера нагрузки на качество преобразования скорости. Поэтому у таких преобразователей фазовая погрешность отсутствует. Однако наличие в тахогенераторе подвижного электрического контакта (щетка-коллектор) и вследствие этого низкочастотных пульсаций выходного напряжения, а также сложность конструкции ограничивают их применение по сравнению с тахогенераторами переменного тока.

Из числа тахогенераторов переменного тока наибольшее распространение получили трехфазные синхронные машины. Частота ЭДС, вырабатываемой такими преобразователями, зависит от частоты вращения его ротора:

$$E = k\Phi \frac{pn}{60},$$

где Φ — основной магнитный поток, Вб; p — число пар полюсов машины; n — частота вращения ротора, с^{-1} .

Поскольку параметры тахогенератора и в большинстве случаев измерительной цепи являются частотно-зависимыми, характеристика преобразователя нелинейна. Применение таких преобразователей в сочетании с выпрямителем позволяет получить высокую частоту пульсаций ЭДС на выходе. Кроме того, такие преобразователи не имеют подвижного электрического контакта и обладают высокой надежностью. Эти особенности позволяют использовать тахогенераторы переменного тока для преобразования угловых скоростей и ускорений в большом диапазоне.

Для преобразования осевых (линейных) перемещений объектов применяют индукционные преобразователи, устройство которых показано на рис. 6.5. Частота ЭДС на выходе такого преобразователя изменяется во времени по закону изменения положения его подвижной катушки. Так, если измеряемая величина x изменяется по закону $x = x_m \sin \omega t$, то мгновенное значение ЭДС на выходе преобразователя

$$e = \omega x_m B w l_{cp} \sin \omega t,$$

где x_m — амплитуда измеряемого перемещения, м; B — индукция в зазоре преобразователя, Тл; w — число витков катушки преобразователя; l_{cp} — средняя длина витка катушки преобразователя, м.

Основной недостаток индукционных преобразователей — нелинейность их характеристики. Рациональным выбором геомет-

рии магнитопровода и размещением катушки достигают минимальных погрешностей. Кроме того, на погрешности преобразователей влияют изменения магнитного потока с течением времени и температуры. Выпускаемые промышленностью тахогенераторы переменного тока имеют погрешности 0,2...0,5 %.

Индуктивные преобразователи. Конструкции наиболее распространенных индуктивных преобразователей показаны на рис. 6.6. Принцип действия индуктивных преобразователей основан на преобразовании входной величины в соответствующее изменение индуктивности за счет изменения параметров магнитной цепи. Измерительные цепи с индуктивными преобразователями должны содержать источник питания. В преобразователе, показанном на рис. 6.6, а, малый воздушный зазор δ_3 изменяется вследствие перемещения части магнитопровода под воздействием измеряемой величины. В реальных преобразователях такого типа перемещение подвижной части обычно не превышает 10 мм. В преобразователе с разомкнутым магнитопроводом, представляющем собой катушку со стальным сердечником (рис. 6.6, б), рабочее перемещение может достигать 100 мм. В преобразователе, показанном на рис. 6.6, в, индуктивность зависит от магнитного сопротивления воздушного зазора, изменяемого подвижным немагнитным сердечником. Выбором формы сердечника можно получить любую зависимость индуктивности от перемещения сердечника. Такие преобразователи применяются для измерения углов до 180°.

Процессы, происходящие в индуктивном преобразователе при воздействии измеряемой величины x , могут быть представлены в виде связи: $x \rightarrow \delta_3 \rightarrow R_m \rightarrow \mu \rightarrow L \rightarrow Z$.

Изменение зазора (или положения сердечника) магнитной цепи преобразователя δ_3 оказывает влияние на магнитное сопротивление R_m , которое связывает значение воздушного зазора (входяще-

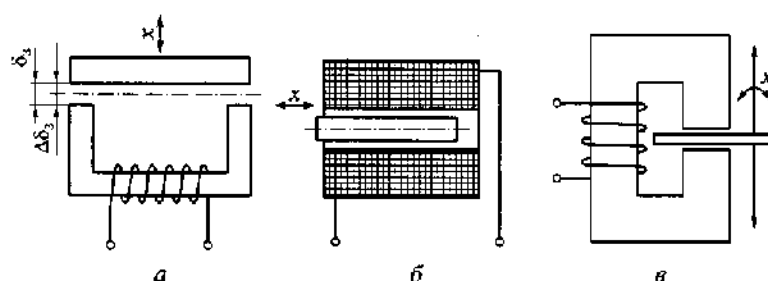


Рис. 6.6. Конструкции индуктивных преобразователей неэлектрических величин:

а — с воздушным зазором; б — с разомкнутым магнитопроводом; в — с подвижным немагнитным сердечником

го в длину магнитопровода l) и магнитную проницаемость μ зависимостью

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu S},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; S — площадь поперечного сечения магнитопровода.

Индуктивность преобразователя определяется отношением полного потокосцепления к силе тока в катушке:

$$L = \frac{w\Phi}{I},$$

или

$$L = \frac{\mu S w^2}{l},$$

где w — число витков катушки преобразователя.

Полное сопротивление преобразователя при бесконечно малом воздушном зазоре определяется по формуле

$$Z = R + j \frac{\omega w^2}{R_m} + jx_m,$$

где R — активная составляющая сопротивления катушки; x_m — реактивная составляющая магнитного сопротивления.

Зависимость полного сопротивления преобразователя от воздушного зазора приведена на рис. 6.7. Одна из особенностей этой зависимости — большая нелинейность. Практически при использовании таких преобразователей линейный участок характеристики ограничен диапазоном

$$\delta_z = (0,1 \dots 0,15) \delta_{z0},$$

где δ_{z0} — значение начального зазора.

Нелинейность характеристики и температурные влияния на параметры преобразователя — его основные недостатки.

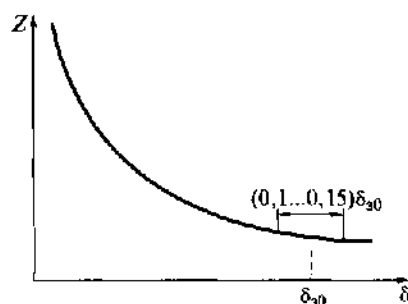


Рис. 6.7. Зависимость полного сопротивления индуктивного преобразователя от воздушного зазора

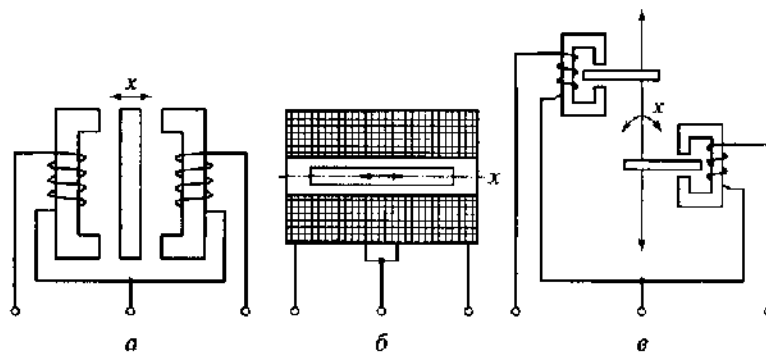


Рис. 6.8. Конструкции индуктивных дифференциальных преобразователей

Значительно лучшими свойствами обладают аналогичные индуктивные дифференциальные преобразователи, конструкции которых приведены на рис. 6.8, *а...в*. Характеристика дифференциального преобразователя линейна в большем, чем у обычного, диапазоне изменения воздушного зазора (рис. 6.9). Рабочее изменение зазора в таких преобразователях достигает 0,3...0,4 начальной величины. На их параметры меньше оказывает влияние изменение температуры.

Индуктивные преобразователи дифференциального типа получили широкое распространение в производстве для измерения линейных и угловых перемещений, уровней жидкостей и др.

Магнитоупругие преобразователи. В магнитоупругих преобразователях механическое воздействие на магнитную цепь (магнитопровод) приводит к изменению собственной индуктивности. Действие магнитоупругих преобразователей основано на явлении изменения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов μ при возникновении в них механических напряжений σ . Процессы, происходящие при этом в преобразователе, можно представить в следующем виде:

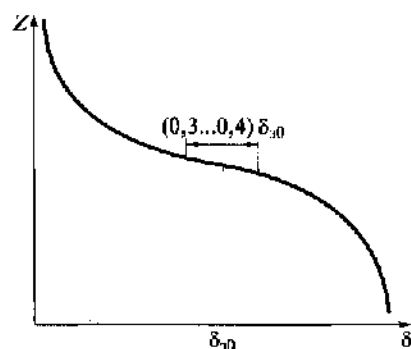


Рис. 6.9. Характеристика индуктивного дифференциального преобразователя

Явление магнитоупругого эффекта может быть различно, в

$$x \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_m \xrightarrow{e} Z$$

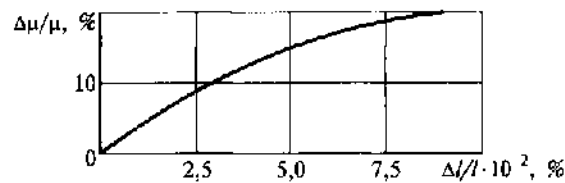


Рис. 6.10. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного материала от его механической деформации

некоторых материалах магнитная проницаемость под действием механического напряжения одного и того же направления может возрастать, а в некоторых — уменьшаться. На рис. 6.10 приведена зависимость относительного изменения магнитной проницаемости материала от относительного изменения его длины, пропорционального механическому напряжению.

Конструкции магнитоупругих преобразователей весьма разнообразны. Их можно подразделить на две основные группы. Одна из групп объединяет преобразователи, в которых магнитная проницаемость материала изменяется в одном направлении (см. рис. 6.10). К другой группе относятся преобразователи с взаимно перпендикулярным изменением магнитной проницаемости (магнитного сопротивления R_m) (рис. 6.11).

Магнитопровод преобразователя, схема которого показана на рис. 6.12, а, выполнен в виде набора листовой стали. Это необходимо для уменьшения потерь на перемагничивание при питании измерительной цепи переменным током. Для достижения максимальной чувствительности преобразователя намагничивающий ток в его катушке должен быть наибольшим.

В магнитоупругих преобразователях с взаимно перпендикулярным расположением двух катушек (они получили название трансформаторных) магнитный поток катушки w_1 (рис. 6.12, б) неизменный. Поэтому, сцепляясь с витками катушки w_2 , магнитный поток не наводит в них ЭДС. При механическом воздействии на

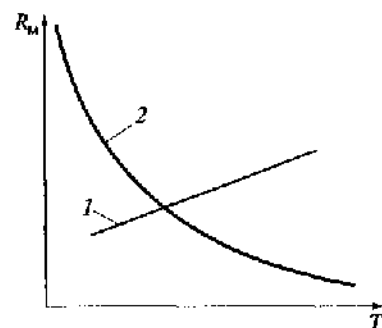


Рис. 6.11. Температурные характеристики металлического (кривая 1) и полупроводникового (кривая 2) терморезисторов

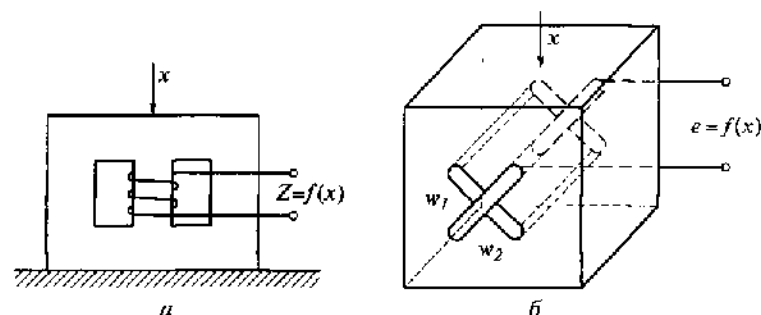


Рис. 6.12. Виды магнитоупругих преобразователей:

а — с изменением магнитной проницаемости в одном направлении; *б* — с взаимно перпендикулярным изменением магнитной проницаемости

преобразователь магнитное поле катушки w_1 , деформируясь в направлении большей проницаемости, сцепляется с витками второй катушки w_2 . ЭДС, наводимая во второй катушке, пропорциональна силе механического воздействия, а ее фаза определяется направлением этого воздействия.

Причинами погрешностей магнитоупругих преобразователей являются магнитный гистерезис материала, нелинейность зависимостей $\mu = f_1(\sigma)$ и $Z = f_2(\mu)$, нестабильность (во времени из-за старения) магнитоупругой чувствительности и влияние температуры. В результате суммарного влияния перечисленных факторов погрешность магнитоупругих преобразователей обычно не менее 2 %.

Магнитоупругие преобразователи используются в приборах для измерения механических усилий, давлений, вибраций, моментов и др.

6.4. Тепловые измерительные преобразователи

Общие сведения. Принцип действия тепловых преобразователей основан на изменении свойств металлов и полупроводников при воздействии температуры. Входной (измеряемой) величиной таких преобразователей является температура. Ее преобразование осуществляется на основании уравнения теплового баланса, которое имеет следующий вид:

$$Q_{тс} = Q_{т.о} + Q_{т.э}, \quad (6.1)$$

где $Q_{тс}$ — теплосодержание преобразователя; $Q_{т.о}$ — количество теплоты, участвующей в обмене с окружающей средой; $Q_{т.э}$ — теплота, выделяемая в преобразователе под действием электрического тока.

Уравнение (6.1) показывает, что при неизменном количестве теплоты, участвующей в теплообмене с окружающей средой, теплосодержание преобразователя будет определяться только тепловым действием тока. К преобразователям, в которых используется это свойство, относятся термопары и терморезисторы (термисторы).

Термопары. Действие термопар основано на термоэлектрическом эффекте. Его сущность состоит в том, что при соединении двух разнородных металлов или полупроводников в месте соединения возникает термоЭДС, зависящая от вида металлов или полупроводников и от температуры места соединения. При изменении температуры места соединения I (рис. 6.13) по отношению к свободным концам $2-2$ между ними появляется термоЭДС, значение которой определяется разностью температур места соединения T_1 и свободных концов T_2 :

$$E_T = \alpha_T(T_1 - T_2),$$

где α_T — температурный коэффициент материалов.

Так как значение термоЭДС, развиваемой термопарой, зависит не только от разности температур соединенных и свободных концов, но и от свойств материалов, необходимо при изготовлении преобразователей сочетать такие металлы или полупроводники, которые имеют возможно большие термоЭДС один по отношению к другому. В зависимости от диапазона преобразуемых температур термопары изготавливают из меди и константана (для температур до 270°C), платинородия и платины (до 1300°C), платинородия и платинородия (до 1800°C), вольфрама и рения (до 2500°C) и др.

Для измерения термоЭДС, развиваемых термопарами, применяют магнитоэлектрические милливольтметры или компенсаторы постоянного тока. Их подключают к свободным концам термопары. Градуируют схемы с термопарами при температуре их свободных концов, равной нулю.

Погрешности измерений температуры при использовании термопар возникают в основном вследствие нелинейной зависимости термоЭДС от температуры, изменения температуры свобод-

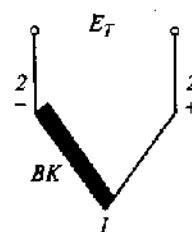


Рис. 6.13. Принципиальная схема термопары:
 I — место соединения; $2-2$ — свободные концы

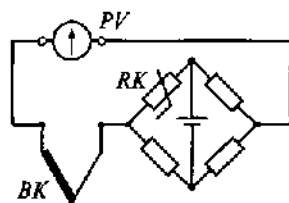


Рис. 6.14. Схема включения термопары для компенсации изменений температуры свободных концов

ных концов термопары и возникновения паразитных термоЭДС. Для уменьшения влияния нелинейности характеристики термопары используют различные корректирующие элементы, включаемые в измерительную цепь.

Один из способов уменьшения нестабильности температуры свободных концов термопар — автоматическое введение поправки. В качестве примера на рис. 6.14 приведена схема включения термопары для компенсации нестабильности температуры ее свободных кон-

цов. При изменении температуры свободных концов термопары нарушается равновесие моста постоянного тока, в одно из плеч которого включен резистор RK с термозависимым сопротивлением (терморезистор). Возникающее на измерительной диагонали моста напряжение при изменении сопротивления терморезистора компенсирует ту часть термоЭДС, которая обусловлена изменением температуры свободных концов термопары. Эффект термокомпенсации тем больше, чем выше термостабильность моста. Для этого в три плеча моста включают резисторы с малым температурным изменением сопротивления (чаще всего для их изготовления применяется манганин), а терморезистор располагают в зоне действия температуры свободных концов термопары.

Погрешности измерений температуры при помощи термопар обычно не превышают нескольких процентов. Инерционность схем с термопарами достигает нескольких минут.

Терморезисторы. Резисторы, сопротивление которых является функцией температуры, получили название терморезисторов. Материалом для терморезисторов служат химически чистые металлы и полупроводниковые материалы, обладающие стабильным температурным коэффициентом сопротивления (зависимость сопротивления от температуры).

Действие терморезисторов основано на теплообмене проводника, обтекаемого током, с окружающей средой, температуру которой требуется преобразовать в пропорциональное изменение электрического сопротивления. Возрастающее при увеличении температуры тепловое возбуждение электронов металла или полупроводника вызывает изменение их проводимости. В терморезисторах температурные изменения проводимости обусловлены в основном содержанием примесей в полупроводниковом материале.

Основные требования, предъявляемые к материалам терморезисторов, — возможно больший и стабильный температурный коэффициент сопротивления, устойчивость материала преобра-

зователя к воздействию химических сред и окислению, механическая прочность и высокая температура плавления.

Из числа терморезисторов наибольшее распространение получили преобразователи, выполненные из меди, никеля или платины. Для медных терморезисторов применяется чистая электротехническая медь, которая из условий минимального окисления допускает нагрев до 200 °С. Особенность медных терморезисторов — почти линейная зависимость сопротивления от температуры в диапазоне от -200 до +200 °С.

Платиновые терморезисторы допускают нагрев без окисления до 1 200 °С. Несмотря на высокую стоимость платины и нелинейность ее характеристики она обладает высокой воспроизводимостью характеристики, а также химической стойкостью и пластичностью.

Преобразователи из никеля применяются до 250...300 °С. Причем почти в половине указанного диапазона температур характеристика преобразователя линейна. Кроме того, преобразователи из никеля обладают высоким температурным коэффициентом сопротивления (примерно в 5 раз больше, чем у меди).

Терморезисторы представляют собой намотанный из металла на изолирующем каркасе резистор, помещенный в защитную оболочку. Номинальное сопротивление медных терморезисторов обычно не превышает 10 000 Ом, платиновых — до 500 Ом. Допустимая сила тока терморезисторов не превышает 10...15 мА. Для изготовления полупроводниковых терморезисторов используется германий и кремний, реже графит. Полупроводниковые преобразователи в отличие от металлических обладают большим (отрицательным) температурным коэффициентом сопротивления. Это сопротивление для любого значения температуры можно определить по формуле

$$R_T = R_1 e^{B(1/T_1 - 1/T_2)},$$

где $B = \left(\frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \right) \ln \frac{R_1}{R_2}$ (R_1 и R_2 — сопротивление терморезистора при температурах T_1 и T_2 соответственно).

Поскольку удельное сопротивление полупроводниковых материалов велико, можно изготавливать преобразователи температуры с большим сопротивлением при малых габаритных размерах. Такие преобразователи, кроме того, имеют большое быстродействие (вследствие малой массы). Большинство терморезисторов, выпускаемых промышленностью, предназначено для работы в диапазоне температур от -100 до +300 °С.

Недостатки терморезисторов — нелинейность характеристики и плохая ее воспроизводимость.

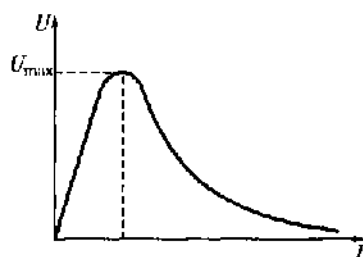


Рис. 6.15. Вольт-амперная характеристика терморезистора

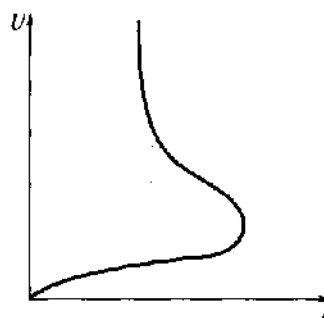


Рис. 6.16. Вольт-амперная характеристика позистора

Терморезисторы отличаются не только по температурным, но и по вольт-амперным характеристикам. В качестве примера на рис. 6.15 приведена наиболее типичная вольт-амперная характеристика терморезистора.

Конструкции современных терморезисторов весьма разнообразны. Отдельные их конструкции выполняют в виде цилиндрических стержней длиной несколько десятков миллиметров. Минимальные размеры терморезисторов (без токоподводящих проводников) достигают долей миллиметра.

Промышленность выпускает также полупроводниковые преобразователи температуры с положительным температурным коэффициентом сопротивления — позисторы. Материалом для изготовления позисторов служит в основном титанат бария с некоторыми примесями. Позисторы изменяют сопротивление под действием температуры только в определенном диапазоне. Вне этого диапазона температурный коэффициент позистора отрицательный. Другая особенность позисторов — наличие на вольт-амперной характеристике почти прямолинейного участка (рис. 6.16). Наибольшее распространение позисторы получили как преобразователи температуры в цепях контроля и автоматического регулирования.

Для измерения температуры терморезисторы включают в цепи измерения сопротивлений (чаще всего мосты). При этом существует несколько разновидностей схем включения терморезисторов в зависимости от требований к метрологическим свойствам приборов. Общей особенностью всех схем включения терморезисторов является необходимость исключения влияний на результат измерения температуры сопротивления соединительных проводов. Как правило, измерительные цепи с терморезисторами предусматривают дополнительные элементы, корректирующие их температурную нестабильность.

Контрольные вопросы

1. В чем преимущество измерения неэлектрических величин при помощи электрических измерительных средств?
2. Представьте и объясните обобщенную структурную схему цепи для измерения неэлектрических величин при помощи электрических средств.
3. Чем отличаются методы прямого преобразования и метод управляющих величин?
4. Какие имеются общие свойства и характеристики у измерительных преобразователей? Что такое градуировочная характеристика?
5. Приведите классификацию измерительных преобразователей по принципу действия.
6. Приведите основные схемы индуктивных и индукционных преобразователей. Для чего они применяются?
7. На чем основан принцип действия магнитоупругих преобразователей? Как выглядят их характеристики?
8. Какие существуют виды тепловых измерительных преобразователей?
9. На каких принципах основано действие термопар и терморезисторов?
10. Какие разновидности термопар и терморезисторов существуют? Назовите их основные характеристики.

ГЛАВА 7

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ

7.1. Области измерения времени

В процессе производства на предприятии все рабочие операции происходят в определенной последовательности и нормируются по времени. Особенно важен временной режим производства на предприятиях, имеющих поточные линии и монтажные конвейеры. В химической промышленности часто наблюдается прямая связь между длительностью реакции и качеством продукции.

Благодаря точным оценкам времени можно установить ошибки в технологии в организации обработки продукции. Исправление этих ошибок приводит к интенсификации производства и, следовательно, к повышению эффективности.

На транспорте временные графики являются основой обеспечения эффективности в надежности перевозок грузов и пассажиров.

В морском транспорте, в авиации необходимы точные часы для определения местонахождения судов и самолетов.

В естественных науках, и прежде всего в физике, химии и астрономии, необходимы очень точные измерения времени для получения новых данных и подтверждения теории. Так, например, для определения периода полураспада радиоактивного изотопа ^{212}Po (около $3 \cdot 10^{-6}$ с) потребовалась система измерения времени, обеспечивающая погрешность не более 10^{-8} с.

Дистанционное управление космическими кораблями основывается на точном программировании продолжительности отдельных этапов.

В оборонной технике решающим фактором успеха операции является обеспечение точного времени в шумопеленгаторах для определения местонахождения орудий противника. В радиолокационных системах противовоздушной обороны на видеоэкране время между посылкой и возвратом отраженного импульса воспроизводится через расстояние между световыми индексами. По результатам измерений этих коротких промежутков времени определяется расстояние до летящего объекта.

7.2. Величины, единицы и эталоны времени

В Международной системе единиц (СИ) в качестве одной из основных величин принято время. Единицей времени является секунда.

Воспроизведение секунды осуществляется с помощью объемных резонаторов с цезиевой атомно-лучевой трубкой. Электромагнитные колебания в объемном резонаторе, частота которых совпадает с резонансной частотой энергетического перехода атомов цезия, управляют кварцевыми часами. Вся система носит название атомных часов, с помощью которых воспроизводят так называемое атомное время. Относительная погрешность воспроизведения единицы времени менее $5 \cdot 10^{-13}$, что соответствует погрешности 1 с за 100 000 лет.

Передача размера единицы времени, а также кратных и дольных единиц времени осуществляется при помощи резонаторов с рубидиевыми и таллиевыми газовыми ячейками или водородных генераторов.

В основе астрономических расчетов и вычислений с 1952 г. используется секунда эфемеридного времени. Она составляет 31 556 925,974 7 части тропического 1900 г. Она также пересчитывается относительно всемирного времени на 31.12.1899 на 12 ч пополудни.

Астрономическое время определяют исходя из продолжительности прохождения небесных тел. При этом, как правило, производится оценка за очень длительное время. Для этих интервалов времени в качестве мер, воспроизводящих единицу времени, используют часы. Различные часы в зависимости от их принципа действия характеризуются разными погрешностями измерений (погрешностью хода).

Измерение времени основано на двух основных принципах.

Принцип вращения (принцип колебания). Если маркировать и наблюдать равномерно вращающиеся объекты, то можно использовать для измерения периодически возникающие индексы или маркерные знаки. Одинаковые виды движения колеблющихся объектов, таких как маятники с грузами, пружинные маятники, электрические колебательные контуры, можно свести к вращению.

Принцип накопления. В науке и технике известны многочисленные явления, которые характеризуются равномерным или подчиняющимся определенному закону возрастанием (снижением) количества вещества или уровня энергии. К ним относятся равномерное заполнение или опорожнение сосудов, зарядка или разряд конденсаторов и т.д. Если эти процессы воспроизводимы и наблюдаемы, то можно их использовать для измерения времени.

7.3. Системы измерения времени

7.3.1. Меры времени, основанные на принципе колебаний

Механические вращающиеся системы. В основе деления времени (календарного деления) на дни и годы лежат периодически повторяющиеся явления, связанные с собственным вращением Земли (дни) и вращением Земли вокруг Солнца (годы). Они определяют ритм жизни человека. Существующий в настоящее время календарь, введенный еще папой Григорием XIII в 1582 г., состоит из 365 дней, разделенных на 12 месяцев и 52 недели.

Возникающие при этом различия во времени вращения Земли вокруг Солнца выравниваются путем введения добавочного дня високосного года (29 февраля).

Для экономики страны разная длительность месяцев и меняющиеся выходные дни являются неблагоприятным фактором. Поэтому имеется тенденция к разработке такого календаря, в котором исключены недостатки григорианского календаря.

Кроме того, в азиатском и африканском регионах существуют еще календарные системы, основывающиеся на периодах вращения Луны, но их значение ограничивается национальными и религиозными областями.

Для деления дня используется положение Солнца в зените. Длительность солнечного дня определяется как интервал времени между двумя положениями Солнца в зените. Из-за эксцентриситета орбиты Земли и эклиптики имеются отклонения длительности солнечных дней по 30 мин. Поэтому «средний солнечный день» определяется как среднее значение продолжительности всех солнечных дней одного года. День разделяется на 24 ч по 60 мин, или 86 400 с. Ввиду вращения Земли нельзя установить единое местное время. Поэтому местное время на разных меридианах по отношению к нулевому меридиану устанавливается через 30° и определяется как поясное время, которое в соответствующих странах принимается за образцовое время.

Время на нулевом (Гринвичском) меридиане определяется как всемирное время (UT — Universal Time) и используется прежде всего в авиации и морском флоте.

Для всемирного времени начало дня 0^h устанавливается по зениту среднего Солнца на 180-м градусе долготы; а конец дня 24^h — по зениту следующего дня.

В направлении с востока на запад начало дня смещается в соответствии с разностью значений поясного времени по отношению ко всемирному времени.

Текущее время (момент времени, отсчет времени по часам) определяется путем сравнения с астрономическими явлениями, всемирным временем или же с поясным временем. Указание вре-

мени производится путем обозначения верхним индексом единицы времени, например запись $12^h 18^{\min} 24^s$ означает момент времени 12 ч, 18 мин и 24 с.

Указание интервалов времени (разности значений текущего времени) производится в форме 12 ч, 18 мин и 24 с.

Электрические вращающиеся системы. Типичным примером стабильных во времени электрических вращающихся систем служат синхронные двигатели, работающие от переменного напряжения постоянной частоты. Синхронные двигатели являются широко распространенными образцовыми мерами в коммутационных реле и электрических часах.

7.3.2. Меры времени с колебательной системой

Меры времени (рис. 7.1) подразделяются на две группы: с колебательной системой и без колебательной системы.

Механические колебательные системы. Механические колебания реализуются с помощью систем с накопителем энергии (маятник, пружина), имеющем положение равновесия. При отклонении, например, маятника возникают силы, возвращающие его в положение равновесия.

У маятниковых колебательных систем (рис. 7.2, а) при малых углах отклонения φ период колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{I_A mgl},$$

где I_A — момент инерции относительно оси; m — масса маятника; g — ускорение свободного падения; l — расстояние между осью и центром тяжести маятника.

Вращающаяся колебательная система (рис. 7.2, б), состоящая из спиральной пружины и элемента массы, имеет период колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{I/c},$$

где I — момент инерции массы; c — момент спиральной пружины.

Электрические колебательные системы. Колебательный контур LC состоит из катушки и конденсатора, в которых возбуждаются электрические колебания (рис. 7.2, в). Когда конденсатор заряжается, колебательный контур получает энергию, которая преобразуется из энергии электрического нуля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и обратно. Период колебаний T определяется как

$$T = 2\pi / \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)},$$

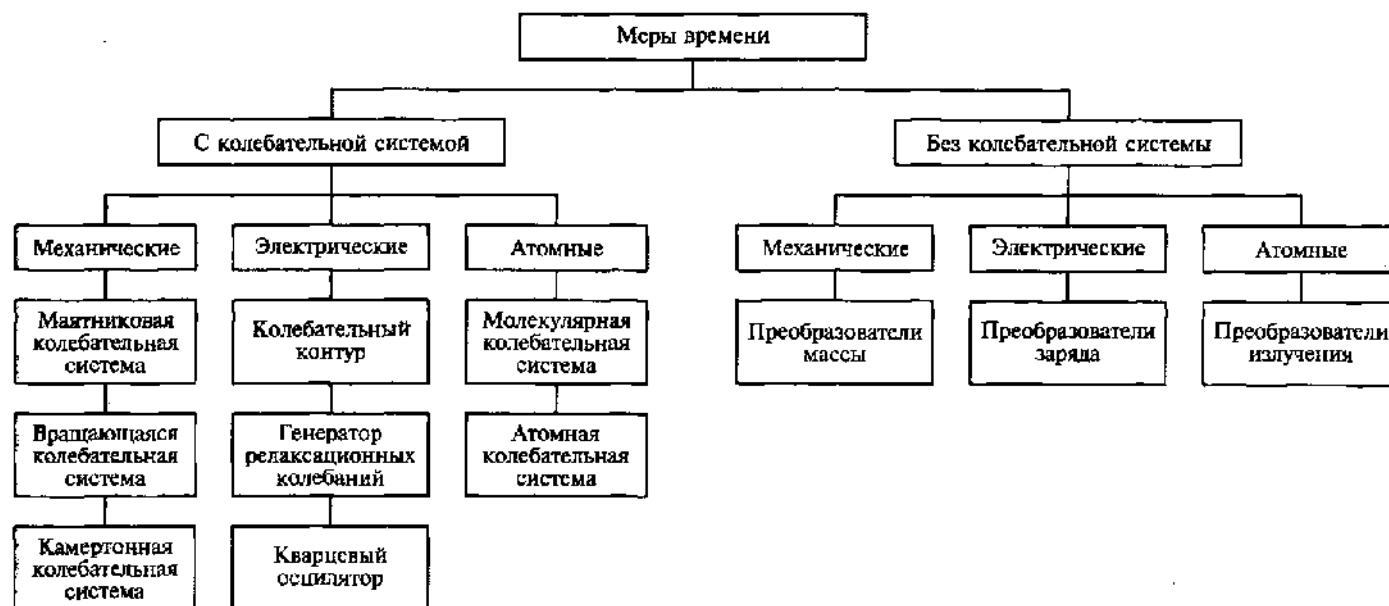


Рис. 7.1. Меры времени

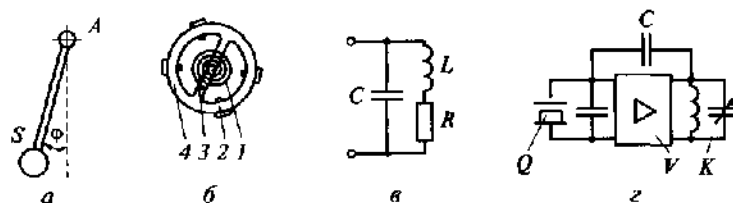


Рис. 7.2. Меры времени с колебательной системой:

a — маятниковая: *A* — ось маятника; *S* — центр тяжести маятника; φ — угол поворота; *б* — вращающаяся: *1* — ось подшипника; *2* — винт для уравнивания; *3* — спиральная пружина; *4* — вибрирующее кольцо; *в* — колебательный контур; *г* — кварцевый генератор: *Q* — кварцевый осциллятор; *V* — усилитель; *K* — резонансный контур; *C* — конденсатор обратной связи

где *L* — индуктивность катушки; *C* — емкость конденсатора; *R* — омическое сопротивление катушки и проводов.

Электрические колебания затухают. Они могут поддерживаться путем внешнего подвода энергии через электронные схемы.

В кварцевых генераторах (рис. 7.2, *г*) при механической деформации кристаллов кварца или турмалина возникают электрические заряды и, наоборот, под действием электрического поля происходит их механическая деформация (прямой и обратный пьезоэлектрический эффект). При прикладывании к кристаллу периодически изменяющегося электрического поля кристалл начинает колебаться с частотой возбуждающего поля, если частота его собственных колебаний с ней совпадает. Амплитуда собственных колебаний зависит от структуры кристалла, его размеров и температуры.

7.3.3. Меры времени без колебательной системы

Механические меры времени. В водяных или песочных часах в качестве меры времени используется масса (объем) вытекающей (втекающей) воды или песка. Вытекающая масса зависит от диаметра выходного отверстия и давления у выхода из отверстия. В качестве меры времени в механотермических часах могут использоваться процессы горения масляных ламп, свечей, поджигаемых шнуров, фитилей.

Длительность процесса горения зависит от химического состава сгораемого вещества, подвода кислорода и структуры горелки.

Электрические меры времени. Для измерения очень коротких промежутков времени используется процесс заряда (разряда) конденсаторов через резисторы, который происходит по экспоненциальному закону. При заряде конденсатора:

$$u_C = U(1 - e^{-t/T});$$

$$i_C = \frac{U}{R} e^{-t/T},$$

где u_C — напряжение конденсатора; i_C — сила тока заряда; T — постоянная времени; t — время.

При разряде конденсатора:

$$u_C = U_0 e^{-t/T};$$

$$i_C = \frac{U_0}{R} e^{-t/T},$$

где U_0 — напряжение конденсатора до разряда; i_C — сила тока разряда; T — постоянная времени, $T = RC$.

Атомные меры времени. Для определения длительных промежутков времени используются радиоактивные процессы распада.

На основании закона радиоактивного распада вещества

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ или } N = N_0 e^{-\ln(2)t/t_N},$$

где N — число активных ядер; N_0 — начальное число активных ядер; λ — постоянная распада; t — период полураспада.

В органических веществах с помощью изотопа углерода C_{14} с периодом полураспада 5760 лет можно определить «возраст» до 40 000 лет.

7.4. Приборы для измерения времени

7.4.1. Механические приборы для измерения времени

С помощью приборов для измерения времени (рис. 7.3) определяются текущее время или интервалы времени. Все приборы для измерения времени соотносят измеряемое время с физическим процессом, зависящим от времени.

В стационарных приборах для измерения времени структура, принцип измерения времени, тип привода и габаритные размеры зависят от места установки.

Передвижные приборы для измерения времени могут перемещаться в процессе измерения, не вызывая больших влияний на результаты измерений.

Механические приборы для измерения времени (в дальнейшем рассматриваются механические часы) используются для измерения длительности процессов.

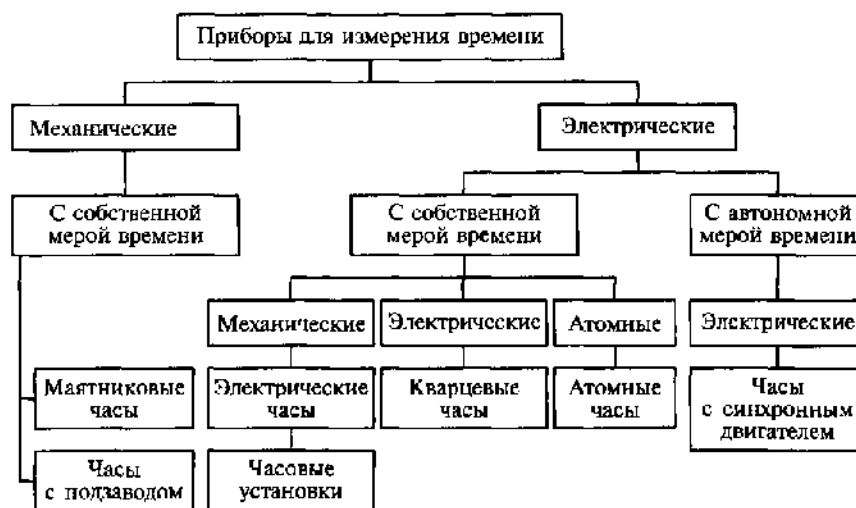


Рис. 7.3. Приборы для измерения времени

Часы называют механическими также в тех случаях, когда завод или включения и выключения механического часового механизма осуществляются электрически.

7.4.2. Механические часы с собственной механической мерой

Подзавод может осуществляться механически, электрически или вручную. Механический автоподзавод применяется, например, в наручных часах. При движении руки инерционная масса совершает маятниковые движения. Возникающий при этом момент передается на привод. Электрический завод с помощью двигателя или электромагнита находит применение прежде всего в стационарных часах.

Привод часов является источником и накопителем энергии. Прерывисто поступающая энергия при подзаводе накапливается приводом и непрерывно подается на спусковой механизм и регулятор хода. Механические приводы (системы подзавода) представляют собой гири или специальные плоские пружины. Гиревые двигатели применяются только для стационарных часов. При подзаводе гири, поднимаемая на высоту h , накапливает потенциальную энергию

$$W_{\text{пот}} = mgh,$$

где m — масса гири; g — ускорение свободного падения.

При перемещении груза через зубчатое колесо или тросиком через барабан энергия передается на ведущее колесо и регулятор хода. Для этой системы привода характерны постоянство крутящего момента и простота конструкции.

Привод со спиральной пружиной (пружинный двигатель) работает независимо от положения часов. Спиральная пружина в напряженном состоянии создает крутящий момент (при постоянном двустороннем закреплении)

$$M = Ebs^3\phi/12l,$$

где E — модуль упругости; b — ширина пружины; s — толщина пружины; ϕ — угол закручивания; l — длина пружины.

Регулятор хода часов состоит из механического осциллятора, анкерного колеса и анкера. Для поддержания постоянной частоты колебания движение этого механизма попеременно тормозится анкером и снова освобождается.

Времязадающим звеном является осциллятор. При полном перемещении осциллятора анкерное колесо поворачивается на один зуб. Анкерное колесо жестко связано с приводом и механизмом хода и возмещает потерю энергии осциллятора от трения.

В качестве осцилляторов используются маятниковые и вращающиеся системы. Маятниковые колебательные системы колеблются с частотой от 0,05 до 0,5 Гц. Вращающиеся колебательные системы работают в частотном диапазоне от 2,5 до 5 Гц.

Механизм хода является связующим звеном между системой привода, регулятором хода и блоком индикации. Он состоит из нескольких зубчатых передач, передающих крутящий момент от привода и определенную регулятором хода частоту вращения в блок индикации, преобразующий эту частоту в перемещение отдельных указателей.

Индикация времени в механических часах осуществляется с помощью указателей на неподвижном циферблате. Указание дат (числа и месяца) производится с помощью дисков. В специальных конструкциях используются указатели барабанного типа.

К специальным устройствам механических часов относятся звуковое сигнальное устройство, ударный механизм и блок включения системы индикации времени.

Звуковое сигнальное устройство и ударный механизм представляют собой самостоятельные звенья с собственным приводом и механизмом спуска. В качестве звуковых сигнальных устройств могут быть использованы также электрические или электронные системы. В секундомерах с помощью стопорного устройства включается и выключается процесс измерения промежутка времени.

Возврат указателя осуществляется с помощью центрального зубчатого колеса, которое при нажатии на кнопку возвращает все указатели в нулевое положение.

В специальных вариантах секундомеров обеспечивается прерывание измеряемого промежутка времени или измерение промежуточных интервалов.

Механические часы всегда имеют собственные меры времени.

7.4.3. Электрические приборы для измерения времени

Электрические часы с собственной механической мерой времени. Электрические часы представляют собой приборы для измерения времени, в которых по крайней мере одна из функций — привод, регулирование хода, передача энергии к блоку индикации или же указание времени — реализуется с помощью электрических элементов и устройств.

В электрических часах привод осуществляется с помощью электрических накопителей энергии (батарей, сети низкого напряжения питания).

В качестве колебательной системы применяются вращающиеся осцилляторы или камертоны, которые снабжены зубцами из магнитомягкой стали, постоянными магнитами или катушками. Осциллятор связан механически или магнитной связью с механизмом спуска и непосредственно его взводит. Подача энергии к колебательной системе регулируется самим осциллятором.

При контактном управлении подача энергии производится через переключающие контакты. Их недостаток заключается прежде всего в механическом износе контактов. При бесконтактном регулировании подача энергии осуществляется с помощью переключающих транзисторов.

Частотный диапазон при использовании вращающихся колебательных систем находится ниже 5 Гц. Камертоны работают с частотой около 300 Гц. В камертонных системах для передачи энергии от камертона к механизму хода необходима прецизионная зубчатая передача с большим передаточным числом.

Электрические часы устанавливаются на предприятиях, в школах и т. д. Часто возникает необходимость соединить основные (главные) часы с сигнальной системой, электрическими таймерами, звуковыми сигнальными устройствами для управления производственными процессами.

Электрические часовые установки состоят из главных часов и нескольких вторичных часов. Главные и вторичные часы соединены собственной сетью проводов. Главные часы подзаводятся электрически через одинаковые интервалы времени; они снабжены маятником, приводимым с помощью гири или спиральной пружины.

Маятник колеблется с частотой от 0,5 до 1 Гц. Эта частота механически редуцируется в часовом механизме. С помощью храпового колеса или кулачка включаются переключающие контакты,

которые разлагают сигнал постоянного тока на положительные и отрицательные импульсы. Эти импульсы поступают во вторичные часы. Следует различать секундные часы (один импульс включения за 1 с) и минутные часы (один импульс включения за 1 мин). Вторичные часы приводят в действие (с помощью шагового переключателя через передачу) систему индикаций.

Число обслуживаемых вторичных часов ограничивается потреблением энергии и допускаемой силой тока включения (переключения) главных часов.

В большинстве установок несколькими вторичными часами управляют промежуточные часы. Таким образом, при внезапном отключении напряжения сети часы не остановятся, а будет включено батарейное питание, заряжаемое автоматически от сети. Известны также системы с аккумуляторными источниками питания, автоматически включаемыми при внезапном отключении напряжения сети.

Контрольные вопросы

1. В каких областях науки и техники требуются измерения времени?
2. Какие существуют величины, единицы и эталоны времени?
3. Какие возникают погрешности при измерении времени различными часами?
4. Приведите классификацию мер времени с колебательной и без колебательной системы.
5. Какие существуют меры времени с колебательной системой? Приведите их основные схемы, укажите достоинства и недостатки.
6. Какие существуют меры времени без колебательной системы? Укажите их достоинства, недостатки и области применения.
7. Какие существуют виды часов с собственными механическими и электрическими мерами времени?
8. Как обеспечивается поддержание постоянной частоты колебаний и регулирование хода часов с приводом от спиральной пружины?
9. На чем основан принцип работы электрических часов с собственной механической мерой времени?
10. Что такое электрические установки? Какие функции выполняют главные и вторичные часы?

ГЛАВА 8

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

8.1. Общие сведения

Изготовление изделий машиностроения, микроэлектроники, оптоэлектроники и вычислительной техники связано с обработкой материалов по заданным размерам, форме и качеству поверхности. При этом качество изделий контролируется средствами измерения геометрических величин. По принятой классификации к технике измерения геометрических величин относят измерения длин и углов, отклонений размеров, формы и расположения поверхностей, параметров конусов, резьб и зубчатых колес.

Область линейно-угловых измерений характеризуется огромным числом измерительных задач и объектов измерения. Так, измерения отклонений формы и расположение поверхностей включает в себя измерения параметров шероховатости, отклонения от параллельности, биений, отклонений от перпендикулярности, эксцентриситетов и т. д. Множество измерительных задач возникает при контроле размеров конусов, резьб и зубчатых колес. Одно из главных мест в линейно-угловых измерениях занимает измерение длины. Диапазон задаваемых линейных размеров здесь простирается от долей микрометра (при измерении микронеровностей поверхности) до десятков миллиметров (в электронике) и метров (в машиностроении).

Методы и средства измерения геометрических величин подразделяют на несколько групп, основными из которых являются группы механических и оптико-механических приборов. Но сначала изложим общие правила выполнения линейных и угловых измерений.

При проведении линейных и угловых измерений на результат измерения значительное влияние оказывают: температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность, вибрация и т. д. Для того чтобы избежать дополнительных погрешностей, вызываемых условиями, при которых выполняют измерения, ГОСТом установлены следующие требования производства линейных и угловых измерений:

- температура окружающей среды — 20 °С;

- атмосферное давление — 101 324,72 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающей среды — 58 %;
- ускорение свободного падения — 9,8 м/с²;
- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных поверхностей — вертикальное, в остальных случаях — горизонтальное;
- относительная скорость измерения углов равна нулю.

ГОСТом также установлено, что результаты измерений для сопоставимости должны приводиться к указанным нормальным значениям влияющих величин. Пределы допускаемых отклонений от нормальных условий измерения нормированы для различных видов измерений.

Большое значение для точности линейных и угловых измерений имеет поддержание стабильной нормальной температуры в зоне измерения. Во избежание дополнительных погрешностей рекомендуется, чтобы измеряемые изделия выдерживали при нормальной температуре от 2 до 36 ч в зависимости от их массы и допусков на линейные размеры.

Средства же измерения должны находиться в условиях, соответствующих указанному в стандартах, не менее 24 ч до начала измерений.

Изготовление изделий микроэлектроники, оптоэлектроники и вычислительной техники связано с точной обработкой материалов по заданным размерам, форме и качеству поверхности. Диапазон задаваемых линейных размеров широкий: от долей микрометра (при измерении микронеровностей поверхности) до десятков миллиметров. Измерения геометрических размеров, формы и показателей качества поверхности осуществляется с помощью средств линейных и угловых измерений. Эти средства подразделяются на несколько групп, основными из которых являются группы механических и оптико-механических приборов.

8.2. Механические средства измерения длин

Различают средства линейных и угловых измерений общего назначения и узкоспециализированные, предназначенные для решения частных измерительных задач. К механическим средствам измерения длины общего назначения относятся штриховые и концевые меры длины, штангенприборы, микрометрические приборы, индикаторы часового типа, измерительные головки.

Штриховыми мерами длины называются меры, у которых размер, выраженный в единицах длины, определяется расстоянием между осями двух соответствующих штрихов. Штриховыми мерами являются измерительные линейки, рулетки, брусковые штриховые меры.

Брусковые штриховые меры длины представляют собой металлические или стеклянные бруски различного сечения с нанесенными на них штрихами или шкалами. Эти меры применяются как для непосредственного измерения линейных размеров, так и в качестве шкал приборов и станков.

Основные типы, параметры и размеры брусковых штриховых мер стандартизованы. Промышленностью выпускаются брусковые меры с номинальной длиной 6...2 000 мм. Допускаемые отклонения от номинальной длины нормируются шестью классами точности, обозначаемыми условно от 0 до 5. Наименьшая цена деления брусковых мер длины 0,01 мм.

Плоскопараллельные концевые меры длины (ПКМД) воспроизводят единицу длины одного фиксированного размера и выполняются в виде прямоугольного параллелепипеда из стали или твердого сплава с двумя взаимно параллельными измерительными поверхностями. Расстояние между измерительными поверхностями определено с высокой точностью и известно (рис. 8.1). Измерительные поверхности отличаются от других поверхностей меры малой шероховатостью, благодаря чему ПКМД обладают свойством притираемости, т.е. способностью измерительной поверхности одной меры плотно сцепляться с измерительной поверхностью другой меры. Притираемость обусловлена силами молекулярного взаимодействия поверхностей.

Эти средства измерения выпускаются в наборах с числом мер разного номинала от 10 до 112. Номинальные значения мер стандартизованы, поэтому притираемость мер позволяет собрать из них блок необходимой длины (от 0,1 до 1 000 мм).

В зависимости от точности изготовления ПКМД относят к классам точности 00; 01; 0; 1; 2; 3.

Перед притиркой выбранные для сопоставления блоки мер очищают от смазки, промывают бензином и вытирают насухо чистой салфеткой. После этого прикасаться руками к измерительной поверхности нельзя. Подготовленные таким образом меры притирают путем прикладывания или надвигания одной меры на другую. Для удобства пользования мерами к наборам ПКМД поставляются приборы принадлежности.

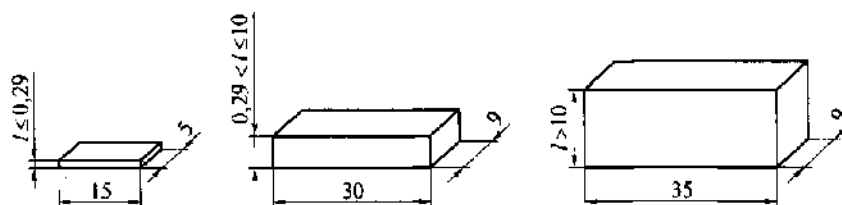


Рис. 8.1. Плоскопараллельные концевые меры длины

Штангенприборами называются средства линейных измерений, объединенные общим принципом построения отсчетных устройств, основанным на применении линейного нониуса. В зависимости от назначения различают штангенциркули, штангенглубиномеры, штангенрейсмусы.

Штангенциркуль (рис. 8.2) — универсальное средство измерения длины, диаметров валов и отверстий, глубины отверстий и расстояния между центрами отверстий.

Штангенглубиномер предназначен для измерения глубины отверстий, пазов и т. п.

Штангенрейсмус — средство измерения высотных размеров изделий.

Принцип построения нониуса заключается в совмещении соответствующих штрихов двух линейных шкал, интервалы деления которых отличаются на определенную величину. В общем случае штангенприбор (см. рис. 8.2) состоит из штанги 1 с неподвижной измерительной губкой и рамки 3, перемещающейся по штанге с другой измерительной губкой. На штанге нанесена шкала с ценой деления 1 мм. На скосе рамки нанесена вспомогательная шкала, называемая нониусом 5, с ценой деления 0,9 мм, по которой отсчитываются дробные доли миллиметра.

Для фиксирования рамки на рабочей части штанги служит винт 4. Рамка жестко связана с линейкой глубиномера 6. Верхние губки 2 предназначены для измерения внутренних размеров, а нижние — наружных.

При совмещении нулевой шкалы нониуса с нулевой отметкой шкалы штанги первая за нулевой отметка шкалы нониуса оказывается смещенной относительно первой отметки шкалы штанги на 0,1 мм; соответственно вторая отметка шкалы нониуса будет смещена на 0,2 мм, а десятая — на 1 мм, т. е. последняя отметка шкалы нониуса точно совпадает с отметкой 0,9 мм на шкале штанги.

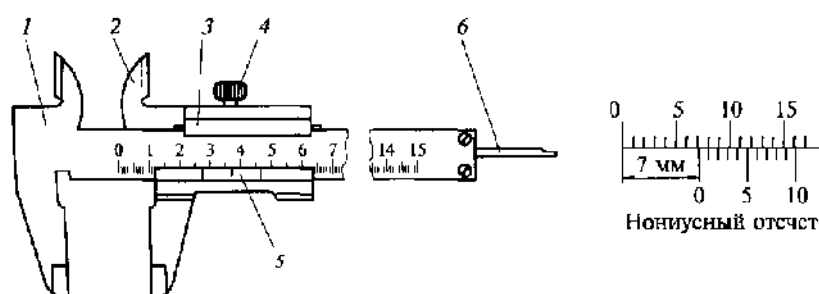


Рис. 8.2. Штангенциркуль:

1 — штанга; 2 — верхние губки; 3 — рамка; 4 — винт; 5 — нониус; 6 — глубиномер

Если при измерении размера шкала нониуса располагается так, что одна из отметок нониуса (не нулевая) совпадает с какой-либо отметкой шкалы штанги (не нулевой), то результат измерения определяется как сумма отсчетов по шкале штанги и произведения разности цены деления шкал штанги и нониуса на номер деления шкалы штанги, с которым совпала отметка нониуса. Так, измеренное значение на рис. 8.2 будет равно $l = 7 + 0,1 \cdot 1 = 7,1$ мм. Таким образом, с помощью нониуса можно произвести отсчет размера с точностью до 0,1 мм. В штангенприборах часто применяется растянутый нониус, обеспечивающий отсчет размера до 0,05 мм.

В некоторых современных моделях штангенприборов вместо нониуса применяются индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Микрометрические приборы (микрометры, микрометрические глубиномеры, микрометрические нутромеры) являются более точными, чем штангенприборы. Принцип действия микрометрических приборов основан на преобразовании вращательного движения точного микрометрического винта, установленного в неподвижную гайку, в его поступательное движение вдоль оси. Большинство микрометрических приборов имеет винт с шагом 0,5 мм, поэтому поворот винта в гайке на 360° приводит к его перемещению вдоль оси на 0,5 мм.

Микрометр (рис. 8.3) состоит из скобы 1, с одной стороны которой запрессована неподвижная пятка 2, а с другой укреплен микрометрический винт, состоящая из стебля 5, барабана 6 в сборе с микровинтом 3 и механизмом трещотки 7. При вращении барабана стебель совершает поступательное движение и приводится в контакт с измеряемым объектом. Механизм трещотки обеспечивает при этом постоянство измерительного усилия. Винт 4 фиксирует положение микровинта. Перемещение микровинта от-

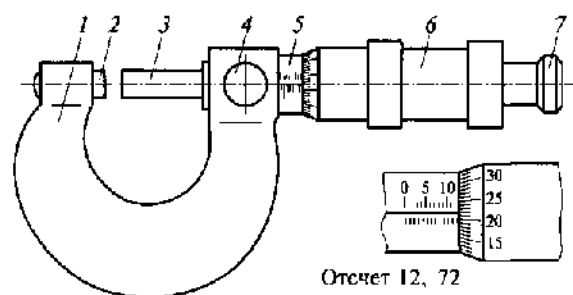


Рис. 8.3. Микрометр:

1 — скоба; 2 — неподвижная пятка; 3 — микровинт; 4 — винт; 5 — стебель; 6 — барабан; 7 — трещотка

считывается по двум шкалам: одной, нанесенной по длине стебля, и второй, нанесенной по окружности барабана. Деления на стебле нанесены через 0,5 мм, а на шкале барабана имеется 50 отметок. Таким образом, одно деление шкалы барабана соответствует перемещению микровинта на $0,5/50 = 0,01$ мм.

Для микрометрических приборов установлены два класса точности (1 и 2). Предельно допускаемая погрешность микрометрических приборов зависит от диапазона измерения. Так, для микрометров с пределами измерения 0...25 мм 1-го класса точности погрешность прибора не превышает $\pm 0,002$ мм, а у микрометров для измерения длин в диапазоне 400...500 мм не превосходит $\pm 0,005$ мм.

Для измерения линейных размеров прецизионных деталей микроэлектроники и точного приборостроения выпускается настольный микрометр с цифровым электронным отсчетом, обеспечивающий измерения размеров в диапазоне 0...10 мм с погрешностью не более $\pm 0,002$ мм.

Индикаторы часового типа (рис. 8.4) являются типовыми представителями приборов с зубчатой передачей, содержат стержень 4 с нарезанной зубчатой рейкой 6, зубчатые колеса 2, 3, 5 и 7, спиральную пружину 1, стрелку 8. Возвратно-поступательное перемещение измерительного стержня 4 преобразуется в круговое движение стрелки 8.

Один оборот стрелки соответствует перемещению измерительного стержня на 1 мм. Целые миллиметры отсчитываются по шкале при помощи стрелки 9. Шкала прибора имеет 100 делений, цена деления индикатора равна 0,01 мм.

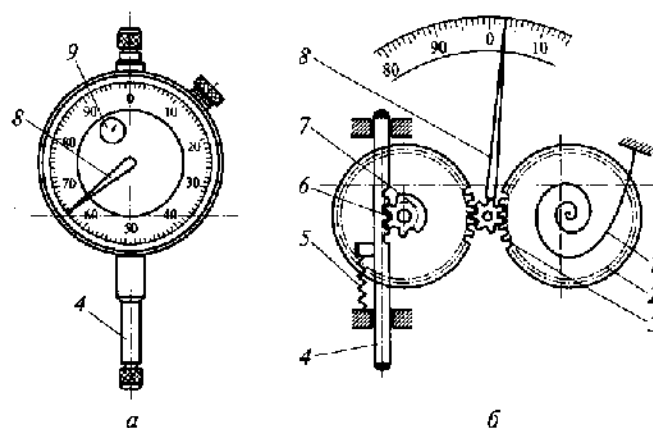


Рис. 8.4. Индикатор часового типа (а) его схема (б):

1 — спиральная пружина; 2, 3, 5, 7 — зубчатое колесо; 4 — стержень; 6 — зубчатая рейка; 8, 9 — стрелка

Таблица 8.1

Основные метрологические характеристики индикаторов часового типа

Тип прибора (ГОСТ 577—68)	Цена деления шкалы, мм	Пределы измерения прибором, мм	Переделные погрешности прибора во всем диапазоне, мкм	Измери- тельное усилие, Н
ИЧ, ИТ	0,01	0...2	10	1,5
ИЧ	0,01	0...5	12	1,5
	0,01	0...10	15	1,5
	0,01	0...25	22	3,0

Индикаторы часового типа выпускают двух классов точности (0 и 1) в двух модификациях: индикаторы типа ИЧ с перемещением измерительного стержня параллельно шкале и индикаторы типа ИТ с перемещением измерительного стержня перпендикулярно шкале. Выпускаются также индикаторы часового типа с цифровым (электронным) отсчетом.

Основные метрологические характеристики индикаторов часового типа представлены в табл. 8.1.

Для закрепления индикатора и установки измеряемых изделий поставляются вспомогательные приспособления: стойки, штативы, кронштейны.

Для повышения точности измерения применяют многооборотные индикаторы, измерительный механизм которых обеспечивает получение цены деления 0,001 и 0,002 мм.

Наивысшую среди механических средств измерения геометрических размеров точность обеспечивают *пружинные измерительные головки*. Эти головки не содержат кинематических пар с внешним трением; в качестве передаточного механизма от измерительного стержня к стрелке используется закрученная в разные стороны металлическая лента или пружина. К пружинным измерительным головкам относят микрокаторы, микаторы, миникаторы и оптекаторы. Допускаемая погрешность этих приборов оценивается величинами порядка десятых долей микрометра. Подробные сведения о механических средствах измерения можно найти в соответствующих стандартах и справочниках.

8.3. Оптико-механические средства измерения длин

Оптико-механическими называют средства измерения геометрических размеров, действие которых основано на использовании законов геометрической оптики (измерительные микроскопы,

оптиметры) или явлений интерференции когерентных пучков света (интерференционные микроскопы, компараторы).

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

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

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

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

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

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

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

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

Измеряемое изделие устанавливается на столе микроскопа. Точки отсчета определяются по показаниям визирного микроскопа. При визировании ось микроскопа совмещается со штрихами на изделии или с его краями. Для этого перемещают стол с изделием или сам микроскоп относительно изделия. Перемещение соответствует измеряемой длине или расстоянию и определяется как разность между начальным и конечным положением стола. Для удобства работы выпускают измерительные микроскопы с цифровым отсчетом и внешней установкой показания на ноль. При отсчете

начального показания от нуля результат измерения фиксируется на табло сразу без пересчета.

8.4. Средства и методы измерения углов

Объекты угловых измерений весьма разнообразны по размерам, величинам измеряемых углов и требуемой точности измерения. Это обуславливает большое разнообразие методов и средств измерения углов, которые могут быть объединены в три группы.

Первая группа методов и средств объединяет приемы измерения углов с помощью так называемых «жестких мер»: угольников, угловых плиток, многогранных призм.

Вторую группу образуют гониометрические методы и средства и измерений, у которых измеряемый угол сравнивают с соответствующим значением встроенной в прибор круговой или секторной шкалы.

Третья группа тригонометрических методов и средств отличается тем, что мерой, с которой сравнивают измеряемый угол, является угол прямоугольного треугольника.

Призматические угловые меры (рис. 8.5) изготавливают нескольких типов: плитки с одним рабочим углом или четырьмя рабочими углами, шестигранные угловые призмы с неравномерным угловым шагом. Угловые плитки выпускают в виде набора плиток, подобранных с таким расчетом, чтобы из них можно было составить блоки с углами в пределах от 10° до 90° . По точности изготовления угловые меры относятся к одному из трех классов точности (0; 1; 2). Погрешность изготовления угловых мер 1-го класса $\pm 10''$, 2-го класса $\pm 30''$. Призматические угловые меры обладают свойством притираемости.

Принцип гониометрического метода измерения легко представить, если предположить, что измеряемое изделие abc жестко связано с угловой мерой — круговой шкалой D (рис. 8.6). В некотором положении относительно какой-либо плоскости I берут отсчет по

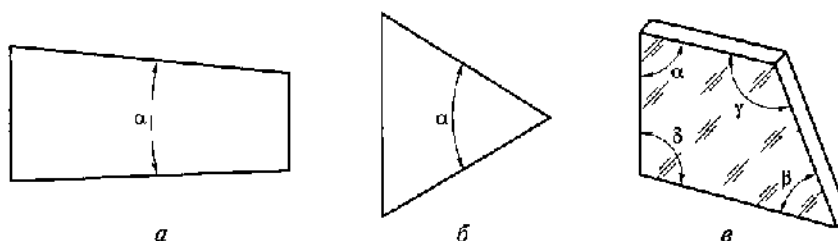


Рис. 8.5. Призматические угловые меры

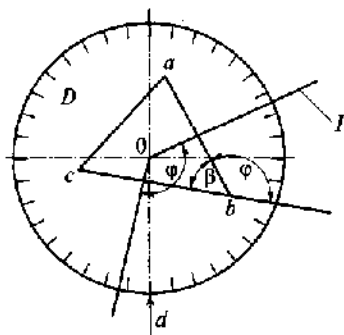


Рис. 8.6. Гониометрический метод измерения:

abc — измеряемое изделие; d — неподвижный указатель; D — круговая шкала; I — плоскость

неподвижному указателю d . Затем шкалу поворачивают до такого положения, когда сторона bc совпадает с плоскостью, в которой до поворота находилась сторона ab , или с другой плоскостью, ей параллельной. После этого снова производят отсчет по указателю.

При этом лимб повернется на угол ϕ между нормальными к сторонам угла, равный разности отсчетов до и после поворотов лимба. Если измеряемый угол β , то $\beta = 180^\circ - \phi$.

К таким же результатам придем, если шкала с изделием останется неподвижной, а поворачиваться вокруг оси 0 будет указатель d , укрепленный на поворотном устройстве. Для

повышения точности отсчета углов поворота в выпускаемых промышленностью угломерных приборах применяются угловые нониусы и оптические устройства.

8.5. Приборы активного контроля

На рис. 8.7 изображены схемы измерительных устройств активного контроля, основанных на *прямом методе* измерения. При контроле в процессе обработки к таким устройствам относятся двухконтактные и трехконтактные приборы, осуществляющие диаметральные измерения, а также системы с жесткими калибрами. Данные устройства, в свою очередь, можно подразделить на приборы с «плавающими» корпусами и приборы, у которых корпус является неподвижным, а перемещаются только измерительные стержни и рычаги. С точки зрения влияния вибраций на точность предпочтительнее приборы с «плавающими» корпусами.

На рис. 8.7, а приведена схема двухконтактного «плавающего» прибора. База измерения прибора — измерительный наконечник A — совпадает с поверхностью обрабатываемой детали. В процессе обработки положение базы измерения непрерывно изменяется в результате изменения размера детали и ее силовой деформации. В этих условиях прибор должен иметь одну степень свободы. Трехконтактные «плавающие» приборы, показанные на рис. 8.7, б и в, должны иметь возможность перемещаться в двух направлениях. Необходимость этого также вызывается изменением при обработке положения баз измерения, которыми в данном случае являются измерительные наконечники A и B .

Трехконтактные приборы обладают несколько большей точностью, чем двухконтактные. На точность двух контактных устройств могут частично влиять силовые деформации обрабатываемых деталей. Это поясняется схемой, изображенной на рис. 8.7, з. Силовая деформация оси деталей, равная величине a , может вызывать при точечном контроле погрешность

$$\Delta = 2(R - \sqrt{R^2 - a^2}).$$

Так, например, при $a = 0,1$ мм и $R = 5$ мм величина $\Delta \approx 0,002$ мм. Возникновение погрешности Δ объясняется тем, что при двухконтактных измерениях условия настройки прибора не могут пол-

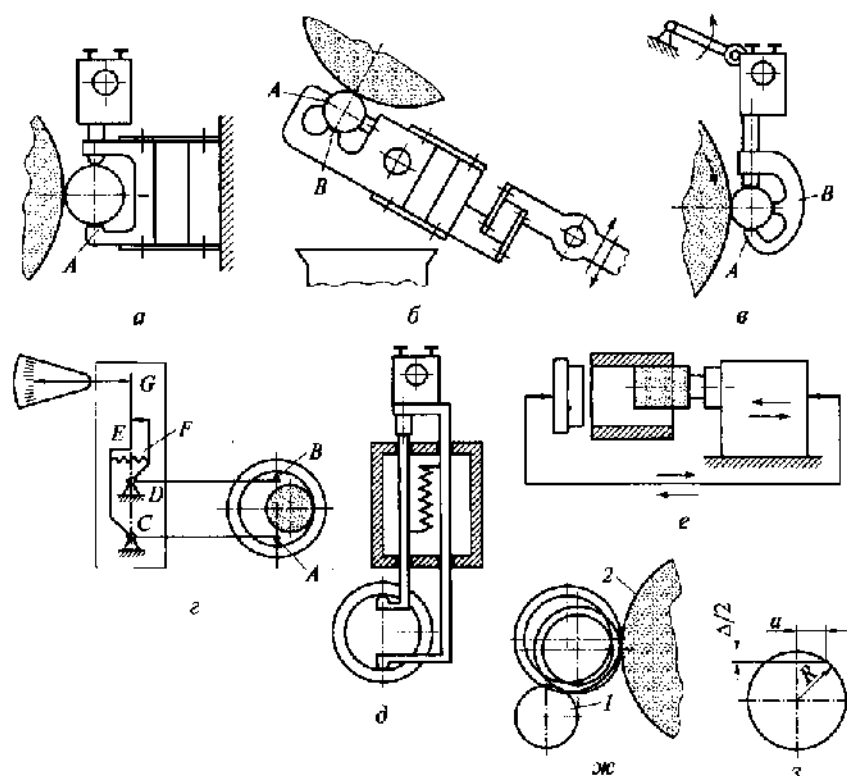


Рис. 8.7. Схемы измерительных устройств, основанных на прямом методе контроля:

a — двухконтактного «плавающего» прибора; *б, в* — трехконтактных «плавающих» приборов; *г* — прибора Мазина; *д* — прибора Лукашова; *е* — устройства с жесткими калибрами; *ж, з* — схемы возникновения погрешностей соответственно при одноконтактном и двухконтактном измерениях; *A, B* — измерительные наконечники; *C, D, E, F, g* — кинематические точки; *1, 2* — ролики

ностью совпадать с условиями работы, поскольку прибор настраивают по образцовой детали, которая не подвергается силовым деформациям. Погрешность Δ нельзя полностью компенсировать внесением корректировки в настройку прибора, поскольку силовые деформации носят случайный характер и колеблются в значительных пределах. Наибольшая идентичность условий настройки и работы прибора возможна только при трехконтактных измерениях, поэтому на точность этих методов не влияют силовые деформации обрабатываемых деталей (за исключением силовых деформаций, вызывающих изменение геометрической формы детали в плоскости, перпендикулярной к ее оси). Погрешность Δ возникает, разумеется, и при одноконтактных измерениях. Указанная погрешность в значительной степени зависит от формы контактной поверхности измерительных наконечников прибора. С учетом погрешности Δ при использовании одноконтактных и двухконтактных приборов (рис. 8.7, ж, з) измерение следует проводить в диаметральной плоскости.

Для устранения влияния на точность двухконтактных приборов силовых деформаций обрабатываемых деталей необходимо, чтобы измерительные наконечники приборов имели плоскую форму и были параллельны друг другу. Вместе с тем следует отметить, что, какую бы начальную форму мы не придавали измерительным наконечникам, с течением времени они принимают под влиянием износа самую неопределенную форму. При двухконтактных измерениях прибор перемещается обычно до некоторого упора. Для уменьшения влияния на точность обработки тепловых деформаций самих приборов упор должен располагаться как можно ближе к оси измеряемой детали.

На точность трехконтактных «плавающих» приборов в меньшей мере влияют вибрации, поскольку две степени свободы предохраняют от влияния вибраций в двух направлениях, а не в одном, как при двухконтактном измерении. С точки зрения уменьшения влияния вибраций наиболее целесообразной является схема измерения, представленная на рис. 8.7, б, в. Трехконтактные приборы в большей степени, чем двухконтактные, обладают способностью «гасить» вибрации обрабатываемых деталей. При наружном шлифовании суммарная погрешность трехконтактных устройств составляет 0,003 ... 0,005 мм.

На рис. 8.7, г приведена схема измерительного прибора Мазина (с суммирующим рычагом). Нетрудно показать, что при соотношении плеч рычагов

$$\frac{AB}{CF} \frac{EF}{EG} = \frac{2}{1} \frac{1}{2} = 1;$$

$$\frac{BD}{DE} \frac{EF}{FG} = \frac{3}{1} \frac{1}{3} = 1$$

перемещение точки G равно сумме перемещений точек A и B , т. е. равно изменению величины диаметра контролируемых деталей. Для уменьшения износа в подвижных соединениях цепи передачи прибора, а также для устранения кинематических погрешностей точки G , E , F и C должны располагаться на одной прямой.

На рис. 8.7, d изображена схема прибора Лукашова. Прибор управляет процессом внутреннего шлифования желобов на бесцентрово-шлифовальном автомате. При обработке кольцо базируется на роликах 1 и 2 (рис. 8.7, $ж$). Вследствие этого положение оси кольца определяется величиной диаметра его наружной базовой поверхности. В таких условиях только метод прямого контроля, т. е. диаметральный измерение, может обеспечить необходимую точность обработки. Это в равной степени относится и к обработке на жестких опорах (башмаках).

Как следует из приведенных схем, приборы такой конструкции относятся к приборам с неподвижными корпусами, что является их недостатком с точки зрения влияния вибраций.

При внутреннем шлифовании широкое распространение получили системы с жесткими калибрами (рис. 8.7, $е$). Поскольку детали обрабатываются на проход, точность таких систем в значительной степени зависит от толщины слоя металла, снимаемого с детали за каждый проход. Кроме того, на точность схем с жесткими калибрами влияют попадание между калибром и объектом измерения стружки и абразивной пыли, непостоянство величины измерительного усилия, износ калибров и их биение, перекос калибров в результате несоосности контролируемого отверстия и калибра, износ правящего алмаза, а также качество направляющих фасок калибра и обрабатываемой детали.

Для уменьшения возможности попадания между калибром и деталью стружки и абразивной пыли необходимо применять обильное и соответствующим образом направленное охлаждение.

Непостоянство измерительного усилия является следствием изменения характеристики сил трения в системе привода калибров, поэтому необходимо стремиться к повышению ее чувствительности.

Одним из крупных недостатков систем с жесткими калибрами является невозможность регулирования их размеров при износе измерительных поверхностей. Для уменьшения износа калибры армируются твердым сплавом. Небольшой износ калибров можно компенсировать регулированием натяжения пружины, создающей измерительное усилие.

Износ алмаза, при помощи которого правится круг, оказывает косвенное влияние на точность обработки: увеличиваются силовые деформации системы, а следовательно, и толщина слоя металла, снимаемого с детали за проход. Поэтому указанный из-

нос необходимо компенсировать путем периодической подачи алмаза в сторону круга.

По данным различных фирм, погрешность систем с жесткими калибрами составляет величину порядка 0,01 мм.

Положительная особенность данных систем заключается в возможности преобразования незначительных изменений контролируемой величины в значительные перемещения калибра, что позволяет в качестве органов управления использовать обычные конечные выключатели (в этих условиях погрешность срабатывания не имеет значения). Системы с жесткими калибрами нечувствительны к вибрациям и позволяют наиболее просто контролировать прерывистые поверхности. На рис. 8.8 приведены принципиальные схемы измерений, позволяющие повысить точность *косвенных методов* активного контроля.

На рис. 8.8, а показано косвенное измерение с использованием седлообразного прибора. Поскольку база измерения совпадает с поверхностью шлифуемой детали, такой метод устраняет влияние силовых деформаций детали (помимо компенсации влияния износа круга, а также тепловых и силовых деформаций станка и режущего инструмента). Однако в данном случае обычно невозможно по эксплуатационным соображениям выполнить угол призмы равным 39° , при котором точность косвенного метода измерения теоретически равна точности прямого. Не удастся также использовать призму с углом 60° . В этих условиях целесообразна такая конструкция прибора, которая бы обеспечивала независимость результата измерения от угла призмы. Для этого служит изображенная на схеме рычажная передача. При использовании рычага передаточное отношение прибора независимо от угла призмы равно 1:2.

На рис. 8.8, б, в изображены схемы контроля расстояния между кругами при бесцентровом шлифовании соответственно контактным и бесконтактным методами (последний осуществляется пневматическим и гидравлическим способами). Такой косвенный метод измерения по точности приближается к прямому, поскольку размер детали определяется расстоянием между кругами. Несмотря на то, что в данном случае контролируется положение режущей поверхности шлифовального круга, прибор позволяет кроме его износа компенсировать влияние тепловых и силовых деформаций станка.

При внутреннем шлифовании применяются двухконтактные измерительные устройства, контролируемые по схеме, изображенной на рис. 8.8, г. Однако при автоматическом внутреннем шлифовании обычно используется круги большого диаметра. В этих условиях единственной возможной точкой контакта прибора с обрабатываемой деталью является точка А (это особенно относится к отверстиям с малыми диаметрами). Вместе с тем при использо-

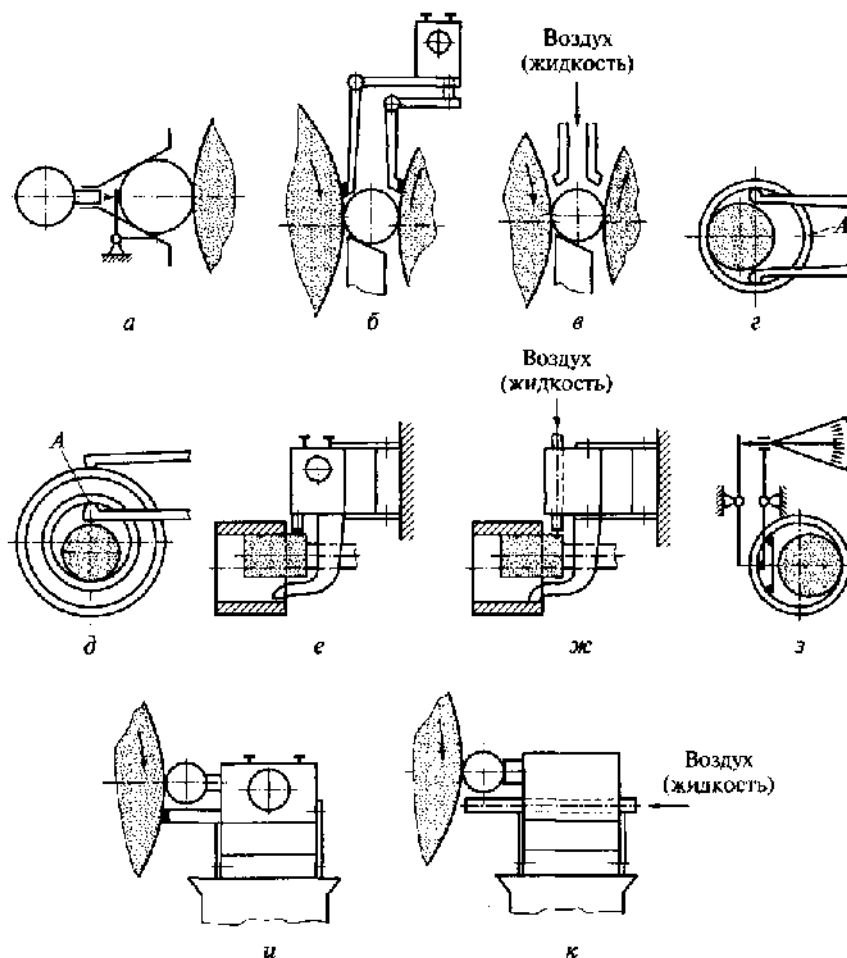


Рис. 8.8. Схемы измерений, повышающие точность косвенных методов активного контроля:

а — с использованием седлообразного прибора; *б, в* — бесцентровое шлифование; *г...з* — внутреннее шлифование; *и, к* — шлифование в центрах; *А* — точка контакта

вании одноконтанного измерительного устройства с контактом в точке *А* на точность контроля влияет силовые деформации обрабатываемой детали.

Это влияние можно принципиально устранить с помощью схем измерения, представленных на рис. 8.8, *д...ж*. В первом случае в качестве базы измерения используется установочное кольцо, закрепленное на шпинделе бабки изделия. При силовом отжатии шлифуемой детали одновременно отжимается и шпиндель бабки

изделия, вследствие чего указанная силовая деформация автоматически компенсируется. На рис. 8.8, *е, ж* показаны схемы «плавающих» комбинированных устройств, одновременно контролирующих положение режущей поверхности шлифовального круга и обрабатываемой поверхности. В первом случае положение режущей поверхности круга контролируется контактным методом, а во втором — бесконтактным (пневматическим или гидравлическим).

На рис. 8.8, *з* изображена схема косвенного метода измерения отверстий при помощи трехконтактного прибора. Последний измеряет высоту сегмента, и поэтому его точность ниже точности диаметального измерения. Однако достоинство данной схемы состоит в том, что на точность обработки практически не влияют силовые деформации обрабатываемых поверхностей.

На рис. 8.8, *и, к* приведены еще две схемы комбинированных устройств (соответственно контактный и бесконтактный методы), которые можно использовать при круглом или наружном шлифовании. Кроме того, что в этом случае устраняется влияние на точность обработки износа инструмента и силовых деформаций шлифуемых деталей, данные схемы измерения обладают существенным достоинством: при снятии и установке детали измерительное устройство остается неподвижным. Благодаря этому значительно упрощается конструкция прибора. Особенно целесообразно использовать указанные методы при контроле деталей малых размеров, которые весьма трудно контролировать прямым методом.

Для повышения точности регулирования размеров необходимо во всех случаях, где это только возможно, переходить от одноконтактных измерений к двухконтактным, а еще лучше к трехконтактным; причем при модернизации одноконтактных устройств нужно стремиться к тому, чтобы корпуса приборов, в которых монтируется датчики, были «плавающими» (для уменьшения влияния вибраций).

Последнее время стали появляться устройства для комплексного (сопряженного) шлифования валов и отверстий. Известно также устройство для комплексного шлифования колец шарикоподшипников. Необходимо подчеркнуть, что применение таких устройств целесообразно только в том случае, если после рассеивания размеров шлифуемых деталей достаточно мало, т.е. при высокой точности обработки. В этих условиях особенно необходимо использовать прямые методы контроля.

8.6. Пневматические приборы для линейных измерений

В пневматических приборах для линейных измерений используется зависимость между площадью f проходного сечения канала

истечения и расходом G сжатого воздуха. Площадь канала истечения изменяется за счет измеряемого линейного перемещения.

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

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

Пневматический прибор в общем виде может быть представлен структурной схемой на рис. 8.9.

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

Пневматические приборы обладают высокой точностью, позволяют производить дистанционные измерения, малогабаритная пневматическая измерительная оснастка позволяет производить измерения в относительно труднодоступных местах и создавать наиболее простые конструкции многомерных устройств для контроля практически любых линейных параметров деталей.

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

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

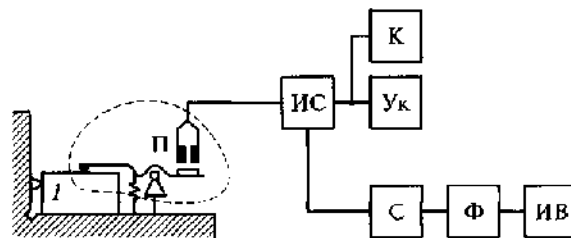


Рис. 8.9. Структурная схема пневматического прибора

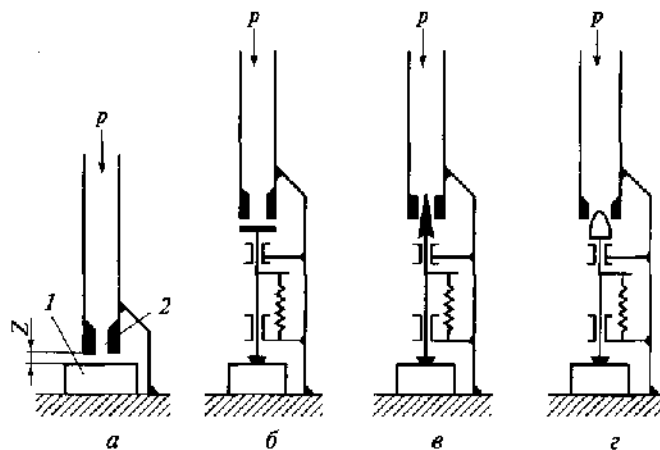


Рис. 8.10. Принципиальные схемы пневматических преобразователей:
а, б — с плоской заслонкой; *в* — с конической заслонкой; *г* — с заслонкой —
 параболоидом вращения; *1* — контролируемая деталь; *2* — измерительное сопло;
Z — зазор между соплом и деталью

При бесконтактном измерении детали пневматический преобразователь, показанный на рис. 8.10, *а*, представляет собой измерительное сопло 2, в качестве заслонки которого служит контролируемая деталь 1. Расход воздуха в данном случае будет определяться площадью кольцевого зазора, образованного торцом измерительного сопла с диаметром проходного сечения и поверхностью контролируемой детали

$$f_2 = \pi d_2 Z.$$

Практически измерение возможно при условии

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

В противном случае изменение площади канала истечения не будет зависеть от изменения *Z*. Преобразователи с плоской заслонкой могут быть выполнены и для контактных измерений (рис. 8.10, *б*). Из-за простоты изготовления эти преобразователи очень широко применяются в пневматических приборах.

8.7. Индуктивные приборы

В индуктивных приборах используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее параметров, определяющих величину индуктивности *L*.

Для получения возможно большей индуктивности катушка, как правило, выполняется с магнитопроводом из ферромагнитного материала (рис. 8.11). Один из элементов магнитопровода выполняется подвижным (якорь) и его положение относительно неподвижной части магнитопровода будет определять величину изменения магнитного сопротивления цепи, а следовательно, и индуктивности катушки.

Изменение индуктивного сопротивления катушки ведет к соответствующему изменению ее полного сопротивления Z . Таким образом, если связать перемещение якоря с измеряемой величиной δ при $U = \text{const}$, возникает функциональная зависимость между δ и электрическим параметром L :

$$L = f(\delta).$$

Индуктивный прибор может быть представлен структурной схемой, показанной на рис. 8.12.

Выражение для определения индуктивности катушки преобразователя имеет вид

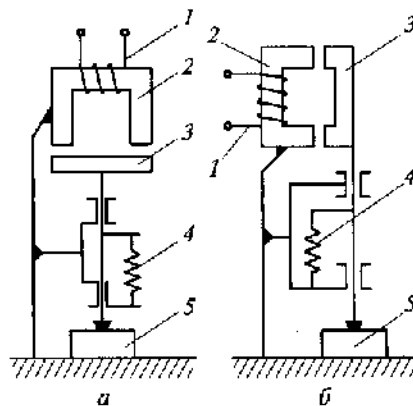
$$L = \frac{4\pi w^2}{\frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} + \frac{\delta_1}{\mu_1 S_1}}, \quad (8.1)$$

где w — число витков катушки; δ_0 , S_0 — длина и площадь воздушного зазора между якорем и неподвижной частью магнитопровода соответственно; δ_1 , S_1 — длина магнитных линий и площадь сечения магнитопровода соответственно; μ_0 , μ_1 — магнитная проницаемость воздуха и материала магнитопровода соответственно.

Изменение индуктивности L согласно формуле (8.1) можно осуществить путем изменения длины δ_0 или площади S_0 воздушного зазора и длины δ_1 , площади S_1 или магнитной проницаемости μ_1 магнитопровода.

Рис. 8.11. Принципиальные схемы индуктивных преобразователей:

a — преобразователь, у которого измеряемая величина вызывает изменение длины зазора δ ; *б* — преобразователь, у которого измеряемая величина вызывает изменение площади воздушного зазора S ; 1 — катушка преобразователя; 2 — магнитопровод; 3 — якорь преобразователя; 4 — пружина, создающая измерительное усилие; 5 — контролируемая деталь



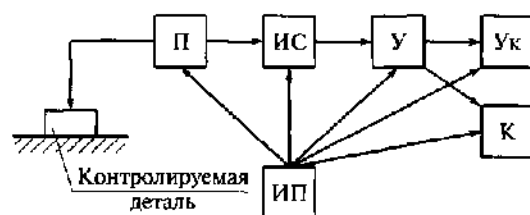


Рис. 8.12. Структурная схема индуктивного прибора:

П — индуктивный преобразователь; ИС — измерительная система, служащая для преобразования сигнала преобразователя в удобный для измерения другой электрический параметр (напряжение, силу тока); У — электронный усилитель; Ук — указательная система; К — устройство для подачи команд; ИП — источник питания

В применяемых в настоящее время индуктивных преобразователях для линейных измерений изменение индуктивности достигается посредством изменения величины δ_0 (см. рис. 8.11, а) или площади S_0 (см. рис. 8.11, б).

Характеристика индуктивного преобразователя с переменным зазором $L = f(\delta)$ приведена на рис. 8.13, а, преобразователя с переменной площадью — на рис. 8.13, б.

Из рассмотрения кривой, показанной на рис. 8.13, а, следует, что характеристика преобразователя с переменным зазором нелинейна, но в то же время позволяет получить высокочувствительную измерительную систему. Для повышения чувствительности

величину $\frac{dL}{d\delta}$ воздушного зазора следует уменьшать.

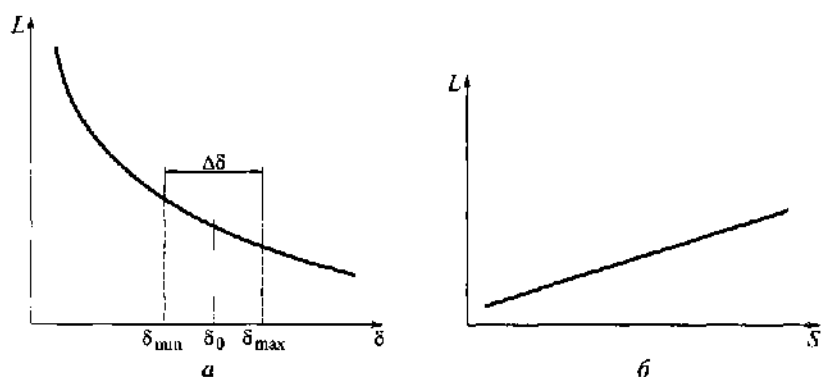


Рис. 8.13. Характеристики индуктивных преобразователей:

а — характеристика преобразователя с переменным зазором $L = f(\delta)$; б — характеристика преобразователя с переменной площадью $L = f(S)$

Чтобы с заданной степенью точности можно было считать чувствительность преобразователя величиной постоянной, необходимо рабочий участок $\Delta\delta = \delta_{\max} - \delta_{\min}$ ограничить допустимыми зазорами $\delta_{\max}$ и $\delta_{\min}$, причем минимальная величина воздушного зазора должна быть тем больше, чем больше диапазон изменения зазора в процессе измерения.

Чем меньше отношение $\frac{\Delta\delta}{\delta_0}$, тем меньше величина нелинейности характеристики преобразователя. Для того чтобы степень нелинейности преобразователя не превышала, например, 10 %, необходимо, чтобы $\frac{\Delta\delta}{\delta_0} = 0,15 \dots 0,2$.

8.8. Емкостные приборы

В емкостных приборах используется в качестве преобразователя конденсатор, величина емкости которого изменяется с изменением измеряемой величины.

Емкость плоского конденсатора, как известно, выражается формулой

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta}, \quad (8.2)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; S — площадь поверхности обкладки; δ — расстояние между обкладками.

Изменение емкости C можно осуществить путем изменения величины ϵ , S или δ . Наибольшее распространение для линейных измерений получили емкостные датчики, в которых измеряемая величина зависит от изменения зазора δ или площади S .

Зависимость емкости конденсатора от расстояния δ между пластинами имеет гиперболический характер (рис. 8.14), что непосредственно вытекает из приведенного уравнения (8.2).

С одной стороны, в таких схемах, где измеряется емкость конденсатора, приходится рассчитывать преобразователь для работы на начальном участке кривой, т. е. при малых расстояниях между пластинами, что обеспечивает получение лучшей линейности характеристики преобразователя с высокой чувствительностью к из-

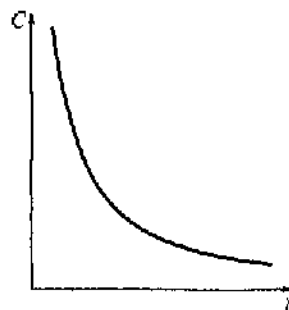


Рис. 8.14. Характеристика емкостного преобразователя

менению расстояния δ . С другой стороны, емкостное сопротивление X_C линейно зависит от расстояния δ между пластинами:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{\delta}{\omega \epsilon S},$$

где ω — угловая частота.

Для линейных измерений в основном применяются дифференциальные емкостные преобразователи (рис. 8.15), которые менее чувствительны к колебаниям напряжения питания, частоты, температуры окружающей среды.

При разработке емкостных приборов необходимо иметь в виду, что емкостные преобразователи обладают на промышленной частоте малой мощностью. Это объясняется тем, что емкость преобразователя невелика, а следовательно, его реактивное сопротивление очень высокое.

Так, например, при емкости датчика 100 пФ реактивное сопротивление его на частоте напряжения питания 50 Гц приблизительно равно $3 \cdot 10^7$ Ом. Высокое сопротивление преобразователя ставит особые требования к сопротивлению изоляции цепи измерительной схемы, а также к сопротивлению изоляции цепи входа усилителя.

Так, при сопротивлении преобразователя в $3 \cdot 10^7$ Ом сопротивление изоляции указанных цепей должно быть не менее 10^9 Ом. В противном случае токи утечки схемы будут сравнимы с измерительным током преобразователя.

Поэтому питание емкостных приборов осуществляется от специальных источников напряжения высокой частоты, что значительно увеличивает мощность преобразователя и уменьшает его сопротивление.

В качестве измерительных схем в емкостных приборах чаще применяются мостовые схемы, иногда включают емкостный преобразователь в контур задающего генератора.

В этой схеме при изменении емкости меняется частота генератора.

По величине изменения частоты можно судить о размере контролируемой детали. Генераторная схема значительно чувствительнее мостовой, но более подвержена всевозможным явлениям извне.

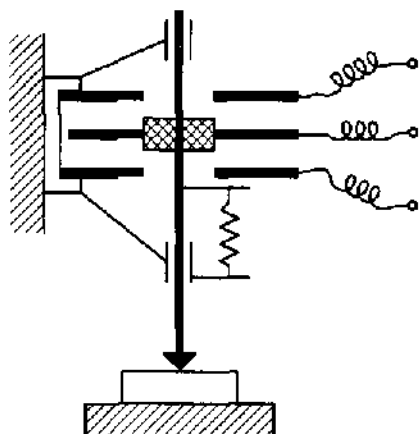


Рис. 8.15. Принципиальная схема дифференциального емкостного преобразователя

В качестве усилителей измерительного сигнала в этих приборах используются усилители переменного тока с высоким входным сопротивлением.

Из-за сложности электронных схем, особых требований к защите измерительных цепей емкостные приборы не нашли широкого применения в машиностроении.

Однако особые достоинства этих приборов — крайне малые измерительные усилия, высокая линейность в достаточно широком диапазоне измерений, возможность бесконтактных измерений — представляют особый интерес для автоматизации контроля в машиностроении.

8.9. Применение технического зрения для контроля геометрических характеристик

К числу наиболее важных и актуальных задач в приборостроении относятся повышение качества выпускаемой продукции.

Надежность правильно сконструированного прибора, функционирование его узлов в рабочем режиме, а значит, и рабочий ресурс зависят главным образом от геометрической точности изготовления деталей по сопрягаемым поверхностям. Вполне естественно в данном случае, что все большее внимание уделяется контрольно-измерительным операциям, которые являются наиболее ответственными и трудоемкими независимо от типа производственного процесса.

Для выполнения подобных операций необходимы высоконадежные и удобные в эксплуатации технические средства восприятия, преобразования и передачи информации о состоянии и свойствах контролируемых объектов с отображением ее в удобной для оператора или системы управления форме. При этом качество управления производственным процессом зависит от своевременности и ценности информации, выдаваемой отдельными техническими средствами на всех ступенях ее преобразования и передачи, т. е. от работы измерительной системы в реальном масштабе времени.

Большинство приборов и измерительных систем высокоточного контроля геометрических размеров работают по жесткому алгоритму и идеально приспособлены к данному типу деталей, но могут стать непригодными при изменениях в конструкции выпускаемых изделий. Все это затрудняет быстрое освоение новых видов продукции. Поэтому необходимо обеспечить измерительное устройство возможностью определять тип изделия, поступающего на контрольную позицию, контролировать его характерные размеры, самостоятельно принимать решение о годности изделия и автоматически производить разбраковку.

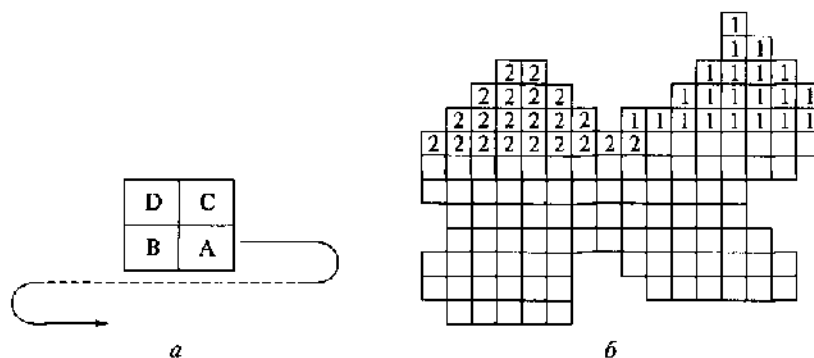


Рис. 8.16. Пример исследования бинарного изображения:
a — локальное окно; *б* — вид последовательной разметки

маркера — локального окна размером 2×2 элемента (рис. 8.16, *a*), поэтому обработке подвергаются лишь две строки изображения: текущая и предыдущая. Надо отметить, что это лишь один из множества возможных вариантов разметки, при этом выбор метода для данного объекта целиком зависит от особенностей его формы.

Преимуществами данного метода разметки является то, что он лучше приспособлен к последовательному сканированию изображения и не нуждается в рекурсивных вызовах, использование которых при работе с большими объемами информации влечет за собой неэффективное использование памяти и не позволяет использовать параллельный метод обработки.

Допустим, что сканирование ведется строка за строкой, сверху вниз и слева направо (траектория сканирования показана на рис. 8.16, *a*). Тогда при обработке элемента А мы знаем, что левый элемент В, так же как и верхний С, уже помечен. Далее элемент D, расположенный над В, считается связанным с А и потому также должен быть принят во внимание.

Для простоты предположим, что ведется разметка лишь одного компонента объекта. Тогда, если А содержит нуль, то можно идти дальше. Если А содержит единицу, а D уже помечен, то достаточно просто скопировать эту метку и продолжить работу. То же самое необходимо сделать, если помечен один из элементов В или С. Если же ни В, ни С не помечены, то необходимо выбрать новую метку для А. Тем самым в рассмотрение вводится новый компонент. Оставшаяся возможность: как В, так и С имеют метки. Проблем не возникает, когда эти метки одинаковые; но поскольку по схеме (см. рис. 8.16, *a*) они не являются соседями, их метки могут быть различными. В этом случае получается, что две разные метки использовались для различных частей одного компонента изображения (рис. 8.16, *б*). Они соединяются через точку А. Далее

необходимо указать, что обе метки эквивалентны, и использовать одну из них для А. В конце просмотра для объединения меток необходимо сделать второй просмотр изображения, присваивая каждой области метку представителя того класса эквивалентности, которому принадлежит ее исходная метка.

Подобная разметка позволяет провести предварительный анализ изображения и выделить на нем сегменты, оперируя которыми, можно решать поставленные перед системой задачи с минимально возможными временными затратами, так как нет необходимости в последующем рассмотрении всего изображения.

8.9.2. Рабочий и отладочный комплексы информационно-измерительных систем

Информационно-измерительная система, имеющая минимальное количество периферийного оборудования и, как следствие, низкую стоимость, представляет собой «рабочий комплекс ИИС». Его назначение заключается в обработке изображений деталей по заранее заданной программе непосредственно в цеховых условиях.

В то же время для автоматизированного проектирования прикладных программ целесообразней использовать отладочный комплекс ИИС. Он имеет расширенный состав периферийных устройств, максимально облегчающий процесс исследования и разработки программного обеспечения. Отладочный комплекс ИИС включает в себя помимо устройств, входящих в рабочий комплекс, различные типы накопителей, дисплей, печатающее устройство, вспомогательные графические устройства, расширенный набор программного обеспечения и др.

Большая часть программного обеспечения системы реализуется на языке программирования PASCAL с использованием концепций структурного программирования. Программные модули строятся по возможности системно независимо. Благодаря модульному принципу построения, система может собирать технологические цепочки последовательностей операций для решения конкретных задач. Например, задача выделения контурных линий для полутоновых изображений может решаться в следующей последовательности: подавление шума, контрастирование, применение градиентного оператора для выделения границ, отслеживание контурных линий, где величина перепада яркости превышает заданный глобальный или локальный порог. Решению этой задачи могут предшествовать операции, связанные с поиском заданного изображения в базе видеоданных — составной части базы знаний системы.

Структура программного обеспечения, показанная на рис. 8.17, рассчитана на обработку как бинарных, так и полутоновых изображений и имеет следующий состав:



Рис. 8.17. Структура программного обеспечения ИИС

- комплект сервисных программ, который осуществляет управление приводом видеодетектора, сжатие и обмен видеoinформацией с другими ИИС, запись видеoinформации на внешний носитель и ряд других функций;
- комплект отладочных программ, при помощи которых осуществляются масштабирование изображения, программный выбор квантования видеосигнала по уровню, автономная проверка функционирования ИИС и сети в целом;
- комплект прикладных программ, который строится на основе одного из методов извлечения характерных геометрических особенностей объекта контроля.

Комплект может меняться в зависимости от наличия вспомогательных устройств или дополнительной аппаратной поддержки ЭВМ. Например, при наличии проектора, позволяющего получить силуэт объекта в одной из плоскостей, нет необходимости оснащать программный пакет возможностью работы с полутонными изображениями, однако в данном случае, как говорилось ранее, круг решаемых системой задач существенно сужается.

Контрольные вопросы

1. Какие виды измерительных задач и объектов измерения существуют в технике измерения геометрических величин?
2. Каковы общие правила выполнения линейных и угловых измерений?
3. Каковы диапазоны измеряемых нелинейных размеров и необходимых возможностей измерений?
4. Какие существуют механические средства измерений длины общего назначения?
5. Что представляют собой штриховые, брусковые и плоскопараллельные концевые меры длины?
6. Как пользоваться штангенциркулем и его нониусом?
7. Как устроены микрометр и индикатор часового типа и какие точности измерений они обеспечивают?
8. Какие существуют и как работают оптико-механические средства измерений угла?
9. Какие имеются методы и средства измерений углов?
10. В чем состоит принцип активного контроля размеров? Каковы его преимущества?
11. Какие существуют типовые схемы измерительных устройств, основанные на прямом методе активного контроля?
12. С помощью каких схем измерений можно повысить точность известных методов активного контроля?
13. На каком принципе основана работа пневматических приборов для линейных измерений?
14. Как работают индуктивные и емкостные приборы для измерений размеров и перемещений? Каковы их основные характеристики?
15. Как работают и для чего применяются приборы технического зрения?

ГЛАВА 9

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

9.1. Общие положения

Все твердые тела, жидкости и газы имеют массу, взаимно притягиваются, обладают инерцией при изменении направления движения и под влиянием внешних воздействий могут делиться и соединяться.

Масса — одна из основных физических характеристик материи, являющаяся мерой ее информационных и гравитационных свойств.

Свойство тел создавать гравитационное поле и получать ускорение в поле других тел характеризуется гравитационной (тяжелой) массой.

Под инертной массой понимается свойство тел быть инертными при изменении их движения. Обе массы строго пропорциональны.

Масса тела образуется совокупностью его материальных частиц.

Измерение макроскопических масс осуществляется при помощи взвешивания, основанного на определении силы тяжести тел, а измерение микроскопических масс — путем наблюдения их инерционной характеристики под влиянием внешних сил масс-спектрометром.

Техника взвешивания и силоизмерительная техника тесно связаны между собой. Они нашли широкое применение в металлургии, машиностроении, химической промышленности, производстве стекла, керамики, строительных материалов, пищевой промышленности и торговле.

Измерение масс и сил вносит вклад в экономию материалов, повышение качества продукции и увеличение производительности. Поэтому системы измерения массы, силы и давления все шире внедряются в технологические процессы. Это касается, например, таких важных технологических процессов, как производство машин, станков, металла, цемента, бетона, технического стекла, продуктов питания и др. Измерения сил и давления служат для оптимизации и сигнализации предельных значений давления пара

в энергетических установках, параметров высокопроизводительных машин обработки давлением, усилий резания в металлорежущих станках.

9.2. Механические величины, единицы и эталоны

В Международной системе измерений (СИ) масса определяется как основная механическая величина.

Единицей массы является килограмм. Воспроизведение килограмма осуществляется прототипом эталона. Масса этого эталона определяется с погрешностью 10^{-9} . Образцовые гири высшего разряда массой 1 кг имеют погрешность 10^{-7} . Как для относительно малых, так и для очень больших масс погрешность измерения возрастает. Для передачи единицы массы с высокой точностью в диапазоне от 100 г до 1 кг используются методы точных взвешиваний и весы с дистанционным управлением.

При измерении массы в пределах миллиграммов используются электронные весы, а в пределах тонн — рычажные весы для рельсовых и безрельсовых транспортных устройств.

Единицей силы является ньютон. Шкала сил для статических усилий растяжения (сжатия) воспроизводится с помощью образцовых силоизмерительных машин до 10 МН. В этих машинах на измеряемый объект при известном нормальном ускорении свободного падения $g = 9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ действуют известные массы. Нормальное ускорение свободного падения незначительно отличается от местного ускорения свободного падения. Возникающая при этом систематическая погрешность учитывается путем вычислений или экспериментальным путем. Для получения единых образцовых результатов эти массы, как правило, подгоняются с учетом ускорения свободного падения в месте наблюдения.

Для получения очень больших усилий и давлений используются механические и гидравлические преобразователи.

Давление p определяется как отношение силы F , которая действует на площадь A , т.е.

$$p = F/A.$$

Различают абсолютное давление p_a , избыточное давление $p_{изб}$, разрежение p_v и атмосферное давление p_b . Избыточным давлением $p_{изб}$ называется разность абсолютного и атмосферного давлений:

$$p_{изб} = p_a - p_b (p_a > p_b),$$

а разрежением p_v — разность атмосферного и абсолютного давлений:

$$p_v = p_b - p_a (p_a < p_b).$$

Шкала давлений воспроизводится при помощи манометров. Для области избыточного давления в качестве первичных эталонов служат грузопоршневые манометры, для атмосферного давления — эталонные ртутные манометры и для вакуума — компрессионные манометры.

Воспроизведение и передача единиц давления в промышленности осуществляются путем поверки поршневых манометров, прецизионных контрольных преобразователей давления, пружинных манометров, манометров с наклонной трубкой, ртутных барометров, компрессионных манометров, тонометров и т. д.

9.3. Принципы измерения механических величин

Принцип сравнения масс. Масса m_A гирь у равноплечих весов в нулевом положении является количественной мерой измеряемой массы m_L , т. е. $m_L = m_A$.

Для неравноплечих весов необходимо учитывать передаточное отношение.

Принцип противодействующей силы. Если твердые тела, жидкости или газы массой m движутся с ускорением a , то они создают силу

$$F = ma.$$

Любая масса создает на Земле под действием ускорения свободного падения g силу тяжести $F = mg$. Эта сила направлена к центру Земли. Когда твердые тела, жидкости или газы находятся в состоянии покоя, их сила тяжести компенсируется противодействующей силой. Эта сила формируется путем пропорционального изменения формы твердых тел, местоположения в силовых полях или давления в жидкостях и газах.

Если известны сила F и ускорение a , то можно определить искомую массу

$$m = F/a.$$

Изменения формы деформируемых тел создают в области упругих деформаций механические силы, которые пропорциональны действующей силе. Деформацию тел можно определить путем измерения геометрических или электрических величин.

Изменения положения в электростатических, электромагнитных и магнитных полях пропорциональны силам, которые определяют смещение тел в силовых полях.

Противодействующие силы формируются, как правило, электрическим способом и могут определяться путем измерения электрических и геометрических величин.

Изменения давления в жидкостях и газах определяются при помощи измерительных звеньев, у которых допускаются пропорциональные изменения формы и положения.

9.4. Системы измерения массы, силы и давления

9.4.1. Преобразователи масс

Приборы для измерения массы называются весами. Классификация весов представлена на рис. 9.1.

Измерения веса возникли на заре человечества и были вызваны практическими нуждами. В качестве единиц веса использовались самые различные предметы: камень, зерно и т. д.

В XII—XVI вв. на территории русских княжеств бытовали меры веса, отличавшиеся друг от друга. Так, гривна новгородская в 2 раза превышала по весу московскую. В пределах Вятской земли встречалось измерение веса в куницах. На Севере существовал вес с необычным названием пуз. В землях за «Большим камнем» (Уралом) меры были примерно вдвое меньше, чем в европейской Руси.

Общероссийская система мер складывалась постепенно, вместе с объединением земель и возникновением централизованного государства. Расширение торговли, образование общероссийского

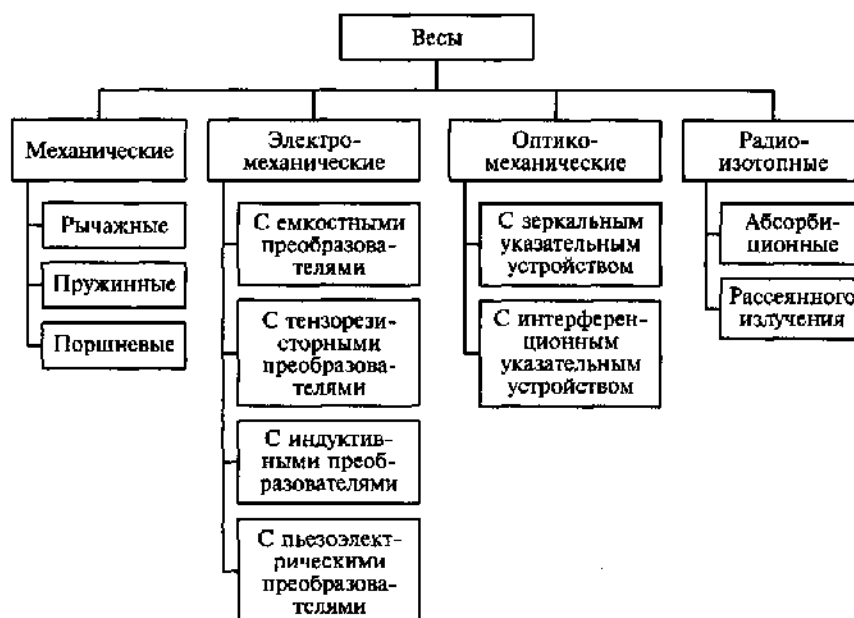


Рис. 9.1. Классификация весов

рынка делало все более нетерпимым отсутствие единых государственных мер.

Начиная со второй половины XVI и на протяжении XVII в. был издан ряд царских указов, направленных на приведение действовавших в стране мер к единой системе. Особое место в этом ряду занимает Таможенный устав 1653 г. Его положения касались измерений веса и объема товаров, осуществлявшихся по всей стране с целью сбора внутренних таможенных платежей. Наблюдение за правильностью мер и весов осуществлял Приказ Большого прихода — центральное финансовое учреждение, возникшее во второй половине XVI в. Под его контролем были изготовлены первые образцовые «заорленные» меры, обязательные для всех таможен. В ведении Приказа находились Большая Таможня и Померная изба, располагавшиеся в Москве.

В те времена широкое распространение получили контарь — весы с постоянной точкой опоры и передвижной гирей, а также безмен — весы с передвижной точкой опоры и постоянной гирей.

Во времена Петра I русские меры были приведены в соответствие с английской системой. Единицей веса стал служить фунт, равный 96 золотникам (фунт — 0,4095 кг, золотник — 4,266 г).

В начале XIX в. метрологические вопросы из финансового ведомства перешли в ведение Министерства внутренних дел. В 1827 г. высочайшим указом была учреждена специальная комиссия для приведения в порядок мер и весов в России. Плодом ее многолетней работы стал «Закон о системе российских мер и весов», подписанный 11 октября 1835 г. Через семь лет в Санкт-Петербург были доставлены изготовленные в Великобритании платиновые фунт и сажень, которые были утверждены «Положением о мерах и весах». Для их хранения в Петропавловской крепости построили специальное нестораемое здание — Депо образцовых мер и весов. Первым ученым хранителем этих эталонов стал академик А. Я. Купфер.

20 мая 1875 г. была подписана Метрическая конвенция. Ее подписали 17 стран, в том числе и Россия. А в ноябре 1892 г. ученым хранителем Депо образцовых мер и весов был назначен Д. И. Менделеев. С его именем связана реформа измерительного дела в России, и он по праву считается основоположником отечественной метрологии.

В наши дни номенклатура продукции, используемой людьми для своих нужд, значительно расширилась, во много раз возросло число видов и средств измерений. Но по-прежнему сохраняется актуальность одного из древнейших видов измерений — взвешивания.

Типичные представители преобразователей массы — рычажные. Они основаны на принципе сравнения масс, и их показания не зависят от местного ускорения свободного падения. Сравнение

масс производится при помощи рычагов (рычажной системы) и чашек весов (рис. 9.2).

Условие равновесия для любого рычажного преобразователя имеет вид

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0,$$

где M_i — момент; $i = 1, 2, \dots, n$.

Для простого неравноплечего рычага

$$F_A l_A \sin(\gamma - \alpha) - F_H h \sin(\beta + \alpha) = F_L l_L \sin(\lambda + \alpha).$$

Здесь F_A — уравновешивающая сила тяжести гирь; F_H — собственная сила тяжести рычага; F_L — сила тяжести нагрузки; h — расстояние центра тяжести от точки вращения; l_A — длина плеча рычага со стороны гирь; l_L — длина плеча рычага со стороны груза; α — угол отклонения; β, γ, λ — углы приложения сил в нулевом положении.

После простого преобразования получается уравнение для определения взвешиваемой массы:

$$m_L = \frac{m_A l_A \sin(\gamma - \alpha) - m_H h \sin(\beta + \alpha)}{l_L \sin(\lambda + \alpha)}. \quad (9.1)$$

Из уравнения (9.1) следует, что для уравновешивания массы m_L необходимо изменить по крайней мере одну из величин, стоящих в уравнении (9.1) справа. Известны следующие типы рычажных преобразователей:

- с переменной уравновешивающей массой m_A — рычаг со шкалой и гирями (рис. 9.2, а);
- с переменной длиной рычага l_A — рычаг с передвижными гирями (рис. 9.2, б, в);
- с переменным углом отклонения α — квадрант (рис. 9.2, г).

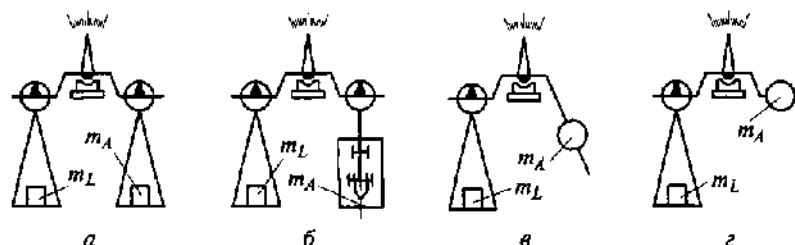


Рис. 9.2. Механические рычажные весы:

а — коромысловые равноплечие; б — гирные; в — коромысловые; г — квадрантные

Собственная масса m_H рычага и расстояние h от центра тяжести до точки вращения принимаются неизменными. В практических случаях длина плеча рычага l_L с грузом должна быть также постоянной, так как в противном случае чашка с грузом должна перемещаться вдоль своего плеча.

9.4.2. Преобразователи силы

В преобразователях силы используется принцип противодействующей силы, которая создается упругой деформацией одной или нескольких пружин. Малые деформации усиливаются и фиксируются при помощи редукторных или рычажных преобразователей гидравлических устройств или путем преобразования в электрические величины.

Если твердое тело растянуто или сжато в области упругой деформации, то его продольное удлинение $\varepsilon = \Delta l/l$ пропорционально механическому напряжению $\sigma = F/A$ и обратно пропорционально модулю упругости E (закон Гука):

$$\Delta l/l = \varepsilon = \sigma/E = F/AE,$$

где F — сила; A — площадь.

Если нагруженное с одной стороны твердое тело подвергается изгибу в области упругих деформаций, то прогиб такой балки с прямоугольным поперечным сечением определяется выражением

$$l_a = 4l^3 F/bh^3 E,$$

где l_a — прогиб в месте приложения силы в направлении ее действия; l — длина балки от места приложения силы до места заделки; F — сила, перпендикулярная оси балки; b — ширина; h — высота; E — модуль упругости. Пружина при ее упругой деформации развивает усилие:

$$F_F = c\Delta l,$$

где c — постоянная пружины; Δl — изменение длины пружины.

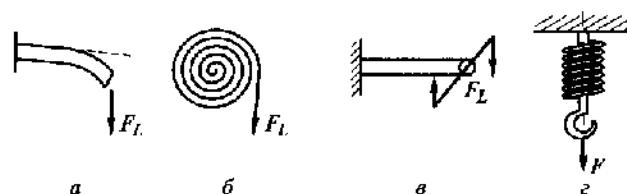


Рис. 9.3. Изгибные (а, б) и торсионные (в, г) упругие элементы:

а, в — прямые; б, г — витые

Для градуировки и поверки преобразователей силы используются гири массой m_L , которые под действием ускорения свободного падения g развивают силу тяжести

$$F_L = m_L g.$$

Пружинные преобразователи классифицируются в зависимости от используемых упругих тел. Различают изгибные (рис. 9.3, а, б) и торсионные (рис. 9.3, в, г), кольцевые (рис. 9.4, а) и тарельчатые (рис. 9.4, б) упругие элементы.

В качестве материалов для изготовления пружин используются безгистерезисные металлы или неметаллы (например, кварцевое стекло, синтетические материалы). Большие деформации измеряются преобразователями длины, малые — преобразователями растяжения (тензометрические преобразователи).

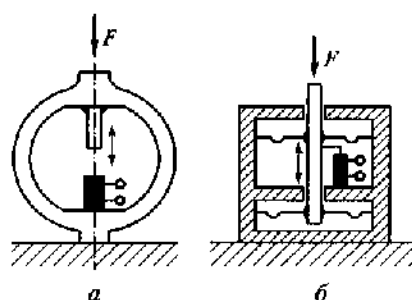


Рис. 9.4. Кольцевые (а) и тарельчатые (б) упругие элементы

9.4.3. Преобразователи давления

Системы измерения давления в зависимости от вида измеряемого давления (избыточное давление, разрежение и атмосферное давление) известны под названиями манометры, вакуумметры и барометры. Наряду с ними существуют дифференциальные манометры для измерения разности давлений и мановакуумметры для измерения избыточного давления и разрежения. В преобразователях давления используется принцип уравнивания силы.

U-образный двухтрубный манометр. U-образный двухтрубный манометр (рис. 9.5, а) — это изогнутая в виде буквы U стеклянная трубка, наполненная манометрической жидкостью (водой, спиртом, ртутью). Измерительная система находится в равновесии, когда гидростатическое давление столба жидкости длиной Δl равно разности давлений Δp :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{V_1 \rho g}{A_1} - \frac{V_2 \rho g}{A_2} = (h_1 + h_2) \rho g = \Delta l \rho g \text{ для } A_1 = A_2; \varphi = 90^\circ,$$

где Δp — разность давлений; p_1, p_2 — давление на трубки 1, 2 соответственно; V_1, V_2 — объемы вытесненной жидкости в трубках 1, 2 соответственно; ρ — плотность манометрической жидкости; g — ускорение свободного падения; A_1, A_2 — площади поперечного сечения манометрических трубок 1, 2 соответственно; h_1, h_2 — отклонения столба жидкости от нулевого положения; $\Delta l = 2h_2$ — отчитываемое значение; φ — угол наклона трубки к горизонту.

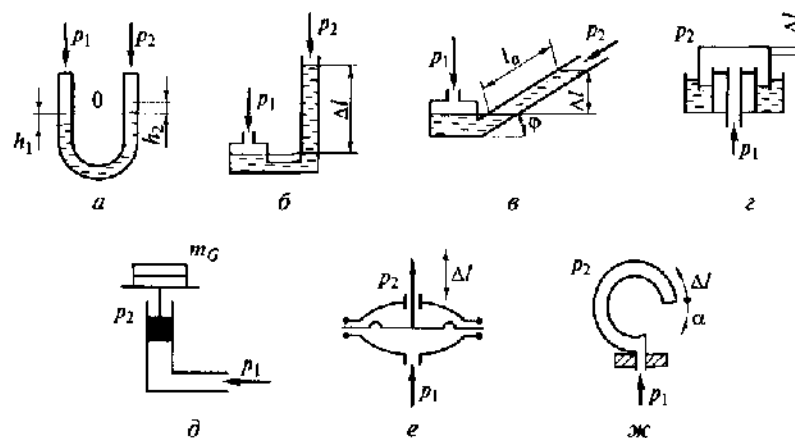


Рис. 9.5. Преобразователи давления:

a — *U*-образный двухтрубный манометр; *б* — *U*-образный однострунный манометр; *в* — манометр с наклонной трубкой; *г* — колокольный манометр; *д* — грузопоршневой манометр; *е* — манометр с плоской мембраной; *ж* — манометр с трубчатой мембраной

Однотрубные (чашечные) манометры. Однотрубные (чашечные) манометры (рис. 9.5, *б*) в отличие от двухтрубных *U*-образных имеют два колена с различными площадями поперечного сечения $A_1 > A_2$.

Уравнение для этих манометров выглядит следующим образом:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h_2(1 + A_2/A_1)\rho g = \Delta l \rho g \quad \text{для } A_1 > A_2; \varphi = 90^\circ,$$

где

$$\Delta l = h_1 + h_2 = h_2 + h_2(A_2/A_1) = h_2(1 + A_2/A_1).$$

Манометры с наклонной трубкой. У манометров с наклонной трубкой (рис. 9.5, *в*) трубка 2 отклонена относительно горизонтали на угол $0^\circ < \varphi < 90^\circ$.

Кроме того, площади поперечного сечения колен манометра различны, а именно $A_1 \gg A_2$. Эти манометры служат для измерения малых давлений согласно уравнению:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = l_0 \rho g \sin \varphi = \Delta l \rho g \quad \text{для } A_1 \gg A_2; 0^\circ < \varphi < 90^\circ.$$

Колокольные манометры. Колокольные манометры (рис. 9.5, *г*) служат для измерения минимальных избыточных давлений. Если давления p_1 и p_2 одинаковы, то сила тяжести F_G колокола компенсируется выталкивающей силой F_F вытесненной жидкости:

$$F_F = V_F \rho g = A_G h_0 \rho g = F_G, \quad (9.2)$$

где V_F — объем вытесненной жидкости; ρ — плотность затворной жидкости; g — ускорение свободного падения; A_G — площадь поперечного сечения колокола при $\Delta d \ll d$, $A_G = \pi d \Delta d$; d — внутренний диаметр колокола; Δd — толщина стенки колокола; h_0 — глубина погружения колокола при $p_1 = p_2$.

При $p_1 > p_2$ погружаемый колокол всплывает на Δl благодаря силе давления $F_p = A_i \Delta p$. Выражение для силы, создаваемой давлением жидкости в сосуде при площади сечения A_i , имеет вид

$$F_p = A_i (p_1 - p_2) = F_G - A_G h \rho g. \quad (9.3)$$

Из уравнений (9.2) и (9.3) получаем

$$A_i \Delta p = A_G \rho g (h_0 - h). \quad (9.4)$$

Перемещение Δl колокола составляет

$$\Delta l = h_0 - h - \Delta h, \quad (9.5)$$

где h_0 — внешняя глубина погружения колокола при $p_1 = p_2$; h — внешняя глубина погружения колокола при $p_1 > p_2$; Δh — опускание (снаружи) уровня жидкости при $p_1 > p_2$ благодаря всплытию колокола.

Объем жидкости $V_G = A_G \Delta l$, который не вытесняется, когда колокол поднят, равен опустившемуся объему в сосуде $V_T = (A_e + A_i) \Delta h$, где A_e и A_i — внешняя и внутренняя площади затворной жидкости в сосуде соответственно. Таким образом, из уравнений (9.4) и (9.5) получаем

$$\Delta l = \frac{A_i \Delta p}{A_G \rho g} - \frac{A_G}{A_e + A_i} \Delta l;$$

$$\Delta p = \Delta l \rho g \frac{A_G}{A_i} \left(1 + \frac{A_G}{A_e + A_i} \right).$$

Грузопоршневые манометры. Эти манометры являются наиболее точными приборами для измерения давления (рис. 9.5, д). Они имеют большой диапазон измерений и используются для градуировки и поверки других приборов измерения давления. Измеряемая разность давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ воздействует на площадь A поршня. Сила, создаваемая давлением $F_p = \Delta p A$, компенсируется силой тяжести поршня и накладных грузов:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (m_K + m_G) g / A,$$

где m_K — масса поршня с тарелкой; m_G — масса грузов; g — ускорение свободного падения.

Уравнение справедливо только при пренебрежимо малых силах трения, возникающих в паре поршень—цилиндр.

Манометры с плоской мембраной. Они содержат мембраны, испытывающие напряжение изгиба (рис. 9.5, е). Для малых разностей давлений (малых деформаций) и круглых плоских мембран существует зависимость

$$\Delta p = \Delta l \left(\frac{3}{16} \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{R^4}{d^3} \right)^{-1},$$

где Δl — отклонение центра мембраны; μ — коэффициент Пуассона; R — радиус мембраны; E — модуль упругости; d — толщина мембраны.

Манометры с трубчатой пружиной. Манометры с трубчатой пружиной являются наиболее распространенными приборами для измерения давления (рис. 9.5, ж). Пружина представляет собой закрепленную на одном конце трубку, обычно эллиптического поперечного сечения, изогнутую по окружности. Под действием разности давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ форма сечения трубки изменяется. Свободный конец трубки выгибается наружу витка (при $p_1 > p_2$) или сгибается внутрь (при $p_1 < p_2$), причем перемещение этого конца (Δl или α) пропорционально разности давлений Δp . Оно определяется экспериментально.

Линейные или угловые перемещения у всех преобразователей давления измеряются механическим, оптическим или электрическим способом.

9.5. Приборы для измерения массы, силы и давления

9.5.1. Рычажные весы

Рычажные весы бывают одно- и многорычажными. В качестве преобразователей массы используются рычажные механизмы.

Рычажные весы особенно распространены для измерения массы в аналитической измерительной технике. Существенное влияние на точность измерения массы оказывает чувствительность весов. Чувствительностью S весов называется отношение смещения Δl указателя к изменению нагрузки Δm_L , вызвавшему это смещение:

$$S = \frac{\Delta l}{\Delta m_L} \approx \frac{l_z d\alpha}{dm_L},$$

где l_z — длина стрелки; α — угол отклонения.

Измерение массы при помощи рычажных весов осуществляется тремя методами.

Пропорциональный метод не пригоден для очень точных абсолютных взвешиваний, так как коэффициент преобразования должен быть точно известен и неизменен, первоначальное уравновешивание весов также должно сохраняться длительное время неизменным. Метод используется для относительных взвешиваний.

Метод замещения особенно хорош для точных измерений одинаковых масс; результат взвешивания не зависит от погрешности коэффициента преобразования и от начального уравновешивания.

Метод перестановки используется для взвешиваний с наивысшей точностью; применяется только для равноплечих рычажных весов.

Взвешивание пропорциональным методом. В данном методе последовательно выполняют следующие этапы: уравновешивают ненагруженные весы; взвешиваемый предмет массой m_L помещают на грузоприемное устройство и компенсируют массой гирь m_A на уравновешивающем устройстве. При этом

$$m_L = im_A [(l_{a2} - l_{a1})/S],$$

где i — соотношение плеч рычагов (предварительное отношение); l_{a2} — положение равновесия, достигнутое после компенсации; l_{a1} — положение равновесия, достигнутое при уравновешивании ненагруженных весов; S — чувствительность, $S = \Delta l_a / \Delta m$ (Δl_a — смещение указателя, вызванное изменением нагрузки Δm).

Взвешивание методом замещения. В данном методе (способ Борда) последовательно выполняют следующие этапы: взвешиваемый предмет массой m_L помещают на одну из чашек весов и весы приводят в равновесие l_{a1} при помощи m_A на другой чашке. При этом:

$$m_L = im_L + l_{a1}/S;$$

предмет массой m_L заменяют гирями массой m_A , пока весы не достигнут равновесия l_{a2} . При этом

$$m_L = im_A + l_{a2}/S.$$

Масса m_L взвешиваемого тела определяется из выражения

$$m_L = m_A + \frac{(l_{a2} - l_{a1})}{iS}.$$

Взвешивание методом перестановки. В данном методе (метод Гаусса) последовательно выполняют следующие этапы: взвешиваемый предмет массой m_L помещают на грузоприемное устрой-

ство и компенсируют массой m_A гирь на уравнивающем устройстве. При этом

$$m_L = m_{A_1} i;$$

предмет массой m_L и гири массой m_A меняют местами. При этом

$$m_L = m_{A_2} / i.$$

Компенсация после перестановки достигается в большинстве случаев лишь после установки дополнительной массы Δm с учетом соотношения

$$m_{A_2} = m_{A_1} + \Delta m.$$

В этом случае искомую массу m_L , пренебрегая величинами 2-го порядка малости, определяют из выражения

$$m_L = (m_{A_1} + m_{A_2}) / 2 = m_{A_1} + \Delta m / 2.$$

Для повышения точности можно выполнить четыре взвешивания, причем указанные этапы повторяют в обратной последовательности.

9.5.2 Радионуклидные весы

К радионуклидным весам относятся абсорбционные весы и весы с рассеиванием излучения. Особенно удобны нуклидные весы для непрерывного измерения массы плоских изделий (бумажной ленты, стальной полосы). В качестве источников излучений могут быть использованы β - и γ -источники, а в качестве детекторов — ионизационные камеры.

9.5.3. Пружинные и поршневые весы

Пружинные весы выпускаются с рычажным грузоприемным устройством и без него. В качестве преобразователей используются пружины. Так как перегрузки вызывают остаточные изменения формы, то пружинные весы требуют частого контроля положения нуля и частой поверки. Для взвешивания с высокой точностью необходимо учитывать местное ускорение свободного падения.

Поршневые весы выпускаются в виде гидравлических и пневматических систем. Они особенно удобны для измерения больших масс (сил), которые скачкообразно изменяются в широком диапазоне.

9.5.4. Электронные весы

Весы позволяют нам измерить массу тела, измеряя его вес, поскольку эти величины связаны между собой соотношением $P = mg$. В настоящее время наиболее распространенным типом весов становятся электронные весы.

Вес тела деформирует упругий элемент весоизмерительного датчика электронных весов, что приводит к изменению электрического сопротивления наклеенных на него тензорезисторов, обладающих свойством изменять электрическое сопротивление под влиянием деформации.

Чаще всего используются фольговые тензорезисторы из константана — сплава меди и никеля. Вторичный прибор, включающий в себя усилитель, аналого-цифровой преобразователь и микропроцессор, обрабатывает сигнал датчика и выдает результат на цифровой индикатор. Весы подразделяются на разные типы в зависимости от вида грузоприемного устройства (например, платформенные, бункерные, монорельсовые, крюковые), способа взвешивания (статические и для взвешивания в движении), объектов взвешивания (автомобильные, вагонные, крановые, конвейерные и др.).

При взвешивании дискретных грузов — коробок, мешков, ящиков, вагонов, автомобилей и других подобных предметов — чаще всего используются платформенные весы. Самые маленькие среди них — магазинные — имеют маленькую платформу (порядка 200×300 мм) и наибольший предел взвешивания (НПВ) 3, 6 или 15 кг. Самые большие — автомобильные и вагонные с НПВ от 10 до 200 т — имеют размеры до 3×20 м.

Платформенные весы с НПВ до 1 т чаще всего имеют всего один датчик, установленный в центре платформы. Платформы больших весов обычно опираются на четыре датчика, закрепленные по углам. Самые тяжелые весы для удобства транспортировки изготавливают из нескольких модулей (платформ), и число датчиков соответственно растет.

Главными преимуществами электронных весов по сравнению с механическими являются не только более высокая точность, простота изготовления и монтажа, но и возможность передачи результатов взвешивания в локальную вычислительную сеть для последующей обработки и анализа. Для этого весовой микропроцессорный терминал обычно оснащается разъемом для связи с компьютером по интерфейсам RS-232 или RS-485.

Еще одно важнейшее преимущество электронных тензометрических весов перед механическими — это возможность взвешивания транспортных средств в движении.

Автомобиль, автопоезд или железнодорожный состав медленно, со скоростью порядка 10 км/ч, проезжают через платформу

весов, фиксирующую вес каждой оси. Компьютер с помощью специальных программ распознает тип вагона (если это железнодорожный состав), вычисляет скорость движения, рассчитывает суммарную массу.

Погрешность весов для взвешивания в движении, конечно, выше, чем у статических, и изменяется от нескольких десятых долей процента до нескольких процентов. Как правило, такие весы нельзя использовать для коммерческого взвешивания грузов. Чаще всего они используются для определения нагрузки на ось вагона или автомобиля в целях обеспечения безопасности движения.

По мере подъема отечественного производства, особенно в перерабатывающей промышленности, и автоматизации технологических процессов нашим специалистам все чаще приходится решать задачи, связанные с взвешиванием не дискретных предметов (упаковок, кусков, блоков и т.п.), а жидких и сыпучих продуктов, представляющих собой с точки зрения механики сплошные среды.

В качестве примеров можно привести процессы взвешивания молока, подсолнечного масла, патоки и нефтепродуктов на соответствующих производствах. Среди сыпучих грузов наиболее часто приходится сталкиваться с взвешиванием муки, зерна, сахара, комбикорма, семян подсолнечника, цемента и других строительных материалов.

Основным классом весов для таких задач являются бункерные весы. Грузоприемное устройство в них — бункер цилиндрической, пирамидальной или призматической формы, установленный или подвешенный на весоизмерительных датчиках.

Взвешивание продукта, как правило, происходит примерно равными порциями, размер которых задается настройкой весового терминала. Для подачи и выпуска продукта бункер снабжен заслонками — верхней впускной и нижней выпускной. Заслонки могут управляться пневматикой или электрическими моторами-редукторами.

После запуска весы работают в автоматическом режиме. Время цикла взвешивания может изменяться от нескольких секунд до нескольких минут и зависит от темпа подачи продукта, вместимости бункера, скорости работы заслонок. После отвеса заданной суммарной дозы весы автоматически останавливаются.

Самым типичным представителем таких весов являются элеваторные бункерные весы, использующиеся для взвешивания зерна, перекачиваемого с элеватора на мельницу. Вместимость бункера таких весов равна 1 или 2 т, а наибольшая производительность достигает 150 т/ч.

Взвешивание многих видов сыпучей продукции и сырья обычно связано также с приготовлением их смесей и, следовательно, с дозированием. Это, например, приготовление помольной партии

из нескольких сортов зерна перед получением муки определенного сорта, составление комбикорма, производство сухих строительных смесей, асфальта и бетона. Такие дозаторы называются многокомпонентными.

Еще один важный класс дозаторов — фасовочные. Они используются для дозирования и последующей фасовки в твердую или мягкую тару различных пищевых или химических продуктов. Размер дозы изменяется в очень широких пределах — от нескольких граммов (чай, кофе, пряности) до 1 т (большие мешки типа «Биг бэг»).

Такое многообразие весового оборудования обусловлено потребностями возрождающихся в России различных отраслей промышленности, прежде всего пищевой, перерабатывающей, металлургической, химической, строительных материалов и других, где необходимы точный учет сырья, конечной продукции и дозирование компонентов в технологических процессах.

9.5.5. Торговые весы

Историю производства весов для торговых операций в России можно разделить на два этапа. Первый из них начался в древности и продолжался до 1990-х гг. В это время производились механические весы, в которых все функции по преобразованию веса в информацию о нем осуществлялись с помощью подвижных механических элементов.

Во второй половине XX в. стремительное развитие электроники создало условия для быстрого развития электронных весов. С 1970-х гг. начался второй этап — производство электронных весов, в которых преобразование веса в информацию производится с помощью электронных средств.

В настоящее время (с 1980-х гг.) в торговле и промышленности происходит процесс смены поколений весов: механические весы постепенно уходят, на смену им приходят электронные весы. Они имеют следующие принципиальные отличия:

- почти полное отсутствие подвижных механических деталей и соответственно более высокую надежность;
- значительное увеличение количества функций, позволяющих уменьшить вероятность обмана покупателей;
- высокая точность взвешивания;
- возможность выдачи информации в компьютер и электронные сети.

Определение современных электронных настольных торговых весов можно дать на основании ГОСТ 29329—92 с помощью следующих терминов и понятий:

- *торговые весы* — передвижные настольные весы, применяемые при торговых операциях;

- *настольные весы* — весы с наибольшим пределом взвешивания до 50 кг, передвижные, устанавливаемые на столе или прилавке;

- *передвижные весы* — весы, не связанные с постоянным местом эксплуатации и перемещающиеся вручную;

- *электронные весы* — весы с уравнивающим устройством в виде преобразователя, в котором сила тяжести преобразуется в электрический сигнал.

Торговые электронные весы (табл. 9.1) можно классифицировать по основным функциям на три вида: А — простейшие весы, Б — весы с расчетом стоимости товара, В — весы с чекопечатью.

Рассмотрим основные функции весов.

Компенсация массы тары. Используется во всех весах. Создает удобство при взвешивании товара в таре.

Выход весов в нулевую точку. Функция реализуется в виде кнопки «Нуль» и индикатора нуля. Эта функция реализована во всех импортных весах, в России — в весах фирмы «Масса-К». С помощью этой функции весы выводятся в нуль (на индикаторе «Масса»), что позволяет компенсировать вес посторонних предметов на платформе весов. Индикация нулевого состояния весов со стороны покупателя предохраняет его от обманных действий (нагружение платформы весов дополнительным грузом, не имеющим отношения к товару).

Расчет стоимости товара. Эта функция является основным преимуществом электронных весов перед механическими. Она присутствует во всех импортных и отечественных весах. Некоторые отечественные фирмы (например, «Твес», «Мера») расши-

Таблица 9.1

Торговые электронные весы

Наименование функции весов	Вид весов		
	А	Б	В
Измерение массы взвешиваемого товара	+	+	+
Компенсация массы тары	+	+	+
Выход весов в нулевую точку	+	+	+
Расчет стоимости товара		+	+
Запоминание и вызов из памяти цен товаров		+	+
Печать этикеток			+
Возможность передачи информации во внешние устройства через интерфейс RS-232	+		
Оценка спроса на рынке РФ, %	20	75	5

Примечание. Символ «+» обозначает наличие данной функции.

ряют эту функцию и вводят функцию суммирования стоимостей нескольких товаров, последовательно взвешиваемых на весах.

В европейских странах операция суммирования разрешается только при выдаче покупателю чека с напечатанными стоимостями всех товаров, так как расчет суммарной стоимости без чека может использоваться для обмана покупателей.

Возможность передачи информации во внешние устройства через интерфейс RS-232. Эта функция реализована во всех импортных весах и в отечественных весах фирмы «Масса-К». В весах других отечественных фирм интерфейс реализован частично.

Виды протоколов обмена у разных фирм различны, и соответственно каждая фирма обеспечивает различные возможности связи весов с другими устройствами. Например, протокол фирмы «Масса-К», реализованный в весах с чекопечатью ВП-15Т.2, позволяет соединять до 100 весов и подключаться к компьютерной сети.

Печать этикеток. Все зарубежные фирмы выпускают весы с термопечатью этикеток. Среди отечественных фирм только фирма «Масса-К» выпускает весы, в которые встроено печатающее устройство, фирмы «Твес» и «Мера» выпускают печатающее устройство в виде отдельного блока.

Клавиатура весов. Крупные зарубежные фирмы Mettler-Toledo, Bizerba выпускают весы, в которых клавиатура расположена выше корпуса весов в виде отдельной панели. При таком расположении клавиатура хорошо защищена от грязи и повреждений, кроме того, это удобно для продавца. Но такая конструкция является более дорогостоящей по сравнению с размещением клавиатуры внизу на корпусе весов. Южнокорейская фирма CAS и отечественные фирмы «Твес» и «Мера» выпускают весы только с нижним расположением клавиатуры.

Питание весов от батарей. В импортных и отечественных весах с батарейным питанием обеспечивается длительность автономной работы 10...100 ч (в зависимости от величины энергопотребления весов). Заметным шагом вперед в этом вопросе является появление на рынке весов типа ВА фирмы «Масса-К», в которых длительность автономной работы достигает 1 000 ч (благодаря жидкокристаллическим индикаторам и низкому потреблению энергии измерительным устройством).

9.5.6. Измерение крутящих моментов

Крутящие моменты измеряют при помощи тензорезисторов, индуктивных, индукционных, электростатических и других преобразователей. Существующие средства для электрических измерений крутящих моментов можно подразделить на две основные

группы: приборы с преобразованием напряжения кручения в исследуемом материале и приборы, основанные на преобразовании угла при скручивании материала.

Для измерения моментов на валах сельскохозяйственных машин и агрегатов используются в основном тензорезисторы. Для этого преобразователи наклеивают на вал вдоль линии действия напряжения кручения τ . Крутящий момент, передаваемый валом, вычисляют по формуле

$$M_{кр} = \tau W_n,$$

где W_n — полярный момент сопротивления сплошного круглого

вала диаметром d , $W_n = \frac{\pi d^3}{16}$.

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

При измерении крутящих моментов почти не используются мостовые схемы с одним или двумя преобразователями. Наибольшее распространение получили мостовые схемы постоянного тока, в четыре плеча которых встроены по одному и более тензорезисторов. Такие схемы включения тензорезисторов при различных схемах размещения их на поверхности исследуемого вала (рис. 9.6) позволяют получить на выходе моста мощный электрический сигнал и исключить влияния изгиба вала и деформаций сдвига. Кроме того, мостовые схемы обеспечивают почти полную температурную компенсацию изменения сопротивления тензорезисторов. Структурная схема электрической цепи, наиболее часто используемой при измерении крутящих моментов, показана на рис. 9.7. Сигнал измерительной информации с моста (М), собранного из тензорезисторов, через токосъемное устройство (ТУ) поступает в усилитель (У). После усиления по мощности и статистической обработки при помощи фильтра (Ф) информация регистрируется прибором (П).

Основной недостаток рассмотренной схемы измерения крутящего момента при помощи тензорезисторов — наличие в измерительной цепи токосъемного устройства — основного источника помех. Как контактные, так и бесконтактные токосъемные уст-

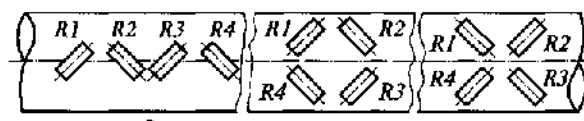


Рис. 9.6. Схемы наклейки тензорезисторов на вал для преобразования крутящего момента

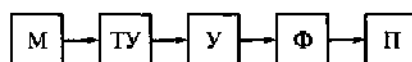


Рис. 9.7. Структурная схема электрической цепи для измерения крутящего момента при помощи тензорезистора

ройства включаются последовательно с мостовой схемой (при использовании схемы моста с двумя тензорезисторами контакты токосъемного устройства включаются последовательно с сопротивлениями плеч), из-за чего изменение переходного сопротивления их контактов воспринимается как изменение сопротивления преобразователей под действием крутящего момента. Поэтому предпочитают применять приборы для измерения крутящих моментов без токосъемных устройств.

Одна из разновидностей приборов для измерения крутящих моментов без токосъемных устройств показана на рис. 9.8. В приборе использован электростатический преобразователь момента. Для этого на валу 1 крепятся два зубчатых колеса 2. Два электрических преобразователя 3 образованы выступами зубчатого колеса и неподвижными выступами. Неподвижные элементы преобразователя включены в цепь переменного тока в противофазе через формирователь (Ф), нагрузкой которого служит регистрирующий прибор (П). Измерительная цепь получает питание от генератора высоких частот, встроенного в формирователь. При отсутствии крутящего момента сигнал на выходе формирователя отсутствует, так как сдвига фаз между токами формирователя нет. При скручивании вала моментом (в неподвижном состоянии или при вращении) за счет фазового сдвига на выходе формирователя появляется сигнал (постоянного тока), пропорциональный углу закручивания вала. Крутящий момент в таком устройстве регистрируется магнитоэлектрическим прибором.

Приборы с фотоэлектрическими преобразователями — перспективное средство бесконтактного измерения крутящих моментов. Одна из конструкций такого прибора показана на рис. 9.9. Све-

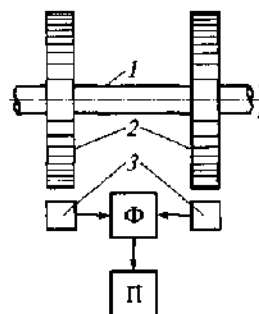


Рис. 9.8. Схема цепи и конструкция электростатического преобразователя для измерения крутящего момента без токосъемного устройства:

1 — вал; 2 — зубчатые колеса; 3 — преобразователь

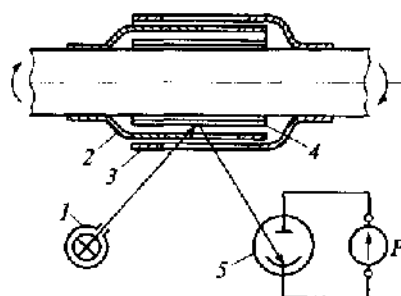


Рис. 9.9. Схема цепи и конструкция фотоэлектрического преобразователя для измерения крутящего момента:

1 — источник излучения; 2, 3 — втулки; 4 — гранное зеркало; 5 — фотоэлемент

товой поток от источника излучения 1 через прорезы в двух втулках 2 и 3, укрепленных на исследуемом валу, попадает на гранное зеркало 4. Отраженный от зеркала световой поток поступает на фотоэлемент 5, который нагружен на измерительный прибор P . Втулки с прорезями укреплены на валу одна внутри другой. При скручивании вала под действием измеряемого момента они смещаются одна относительно другой. При этом изменяется интенсивность падающего и отраженного зеркалом потоков. Чем больше крутящий момент, передаваемый валом, тем меньше интенсивность отраженного светового потока, падающего на фотоэлемент. Магнитоэлектрический прибор, включенный в цепь фотоэлемента, градуируют в единицах измерения крутящего момента.

Погрешности измерений в рассмотренном приборе определяются в основном числом прорезей во втулках и граней зеркала.

Существует ряд приборов для измерения крутящих моментов посредством магнитной записи. Структурная схема одного из них показана на рис. 9.10. На исследуемом валу 1 укрепляют два диска 2 с наклеенной магнитной лентой 3. На магнитной ленте предварительно записываются магнитографом импульсы, амплитуда и частота которых зависят от скорости вращения вала и возможности считывающего устройства. Для считывания импульсов применяются магнитные головки 4. Сигналы, получаемые с магнитных головок, после обработки формирователями $\Phi 1$ и $\Phi 2$ (преобразова-

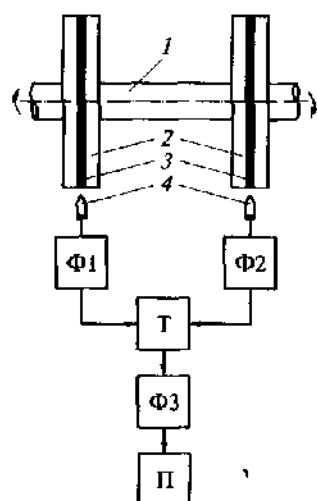


Рис. 9.10. Структурная схема прибора для измерения крутящего момента при помощи магнитной записи:

1 — вал; 2 — диски; 3 — магнитная лента; 4 — магнитные головки

ния в импульсы прямоугольной формы) поступают на счетный вход триггера Т, откуда после формирователя ФЗ — на измерительный прибор П. При отсутствии момента на валу (при вращении вала) с магнитного носителя считываются импульсы, следующие синхронно один за другим. Поэтому на выходе триггера получаются импульсы неизменной частоты и длительности. При скручивании вала под действием момента диски смещаются один относительно другого на соответствующий угол. Это приводит к рассогласованию фазы входного сигнала триггера и к изменению частоты выходного сигнала, пропорциональному измеряемому моменту, скручивающему вращающийся вал.

9.6. Измерение угловых скоростей

Угловые скорости вращающихся узлов машин и механизмов измеряются *тахометрами*. Известны два основных принципа построения тахометров: на определении частоты вращения и на сравнении частоты вращения исследуемого узла со стабильной частотой постороннего источника.

Большое распространение для измерения скорости вращения узлов машин и агрегатов получили тахогенераторы переменного тока. Напряжение с выхода тахогенератора после выпрямления трехфазным выпрямителем и через фильтр поступает на измерительный прибор (магнитоэлектрический вольтметр). Поэтому прибор градуируется в единицах измерения числа оборотов. Основным недостатком такого тахометра — механическая связь ротора тахогенератора с объектом и необходимость в трехфазной схеме выпрямления.

Современные средства измерения угловых скоростей основаны на сравнении калиброванных интервалов времени (или частоты электрических колебаний) и частоты сигнала, получаемого с измерительного преобразователя. При этом используют различные преобразователи скорости в частоту электрических колебаний — контактные, оптические, индукционные, электростатические и др. Тип измерительного преобразователя выбирают в зависимости от конструктивных особенностей объекта измерений. При использовании индукционного преобразователя на валу крепят диск из ферромагнитного материала, а магнитопровод с катушкой размещают неподвижно вблизи вращающегося диска. При вращении диска в неподвижной катушке наводится ЭДС, которая усиливается встроенным в прибор усилителем и после аналого-цифрового преобразования поступает на цифровой индикатор. Оптический преобразователь состоит из диска с отверстиями или зубцами, укрепленного на вращающемся объекте, источника света и фотоэлемента (или фоторезистора). При вращении объекта световой

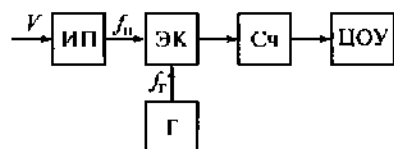


Рис. 9.11. Структурная схема цифрового тахометра ТЦ-3м

поток от источника света прерывается с частотой, кратной частоте вращения, и попадает на приемник светового потока в виде импульсов света. В приемнике (фотоэлементе или фоторезисторе) световой поток преобразуется в импульсы ЭДС или пропорциональное изменение сопротивления

фоторезистора, усиливается при необходимости усилителем и через аналого-цифровой преобразователь подается на цифровой индикатор.

Большое распространение получили тахометры, построенные на методе сравнения частот встроенного генератора и сигнала, получаемого с измерительного преобразователя. В качестве примера на рис. 9.11 приведена структурная схема цифрового тахометра ТЦ-3м. На вход электронного ключа (ЭК) прибора поступают независимо от входного сигнала импульсы стабильной частоты f_n , получаемые с генератора (Г). На другой вход ключа поступают импульсы f_n с измерительного преобразователя скорости (ИП), следующие с частотой вращения исследуемого объекта. Счетчик (Сч) просчитывает только то число импульсов с преобразователя, которое проходит за время действия одного импульса генератора. Полученные серии импульсов преобразуются в цифровой код и поступают на цифровое отчетное устройство (ЦОУ).

9.7. Измерение расхода и уровня

9.7.1. Расход жидкостей и газов

Расход жидкостей и газов в открытых и закрытых трубопроводах измеряется приборами, которые содержат преобразователи расхода в перепад давлений, в силу или перемещение, в скорость вращательного или поступательного движения и др. Приборы, предназначенные для измерения расходов, называются *расходомерами*.

Расходомеры, построенные на измерении перепада давлений (рис. 9.12), имеют суживающийся трубопровод 1 с выводными трубками, к которым подсоединена камера 2 измерительного преобразователя. Чувствительным элементом преобразователя является металлическая мембрана 3 с приваренной иглой 4. В некоторых конструкциях преобразователей на мембрану наклеивают тензорезисторы, соединяемые по мостовой схеме. Однако тензорезисторы необходимо тщательно защищать от воздействия жидкости или газа, расход которых необходимо измерять. Конец иглы 4

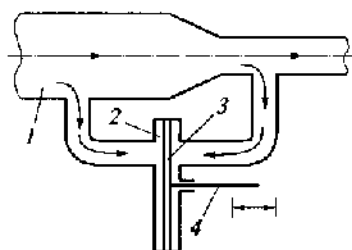


Рис. 9.12. Конструкция измерительного преобразователя расходомера с использованием перепада давлений:
1 — трубопровод; 2 — камера измерительного преобразователя; 3 — металлическая мембрана; 4 — приваренная игла

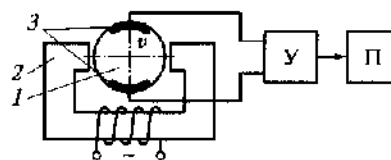


Рис. 9.13. Структурная схема цепи и конструкция индукционного расходомера:

1 — трубопровод; 2 — электромагнит;
3 — электроды

соединяют с подвижным сердечником индуктивного преобразователя или с подвижной частью электростатического преобразователя.

Для измерения расходов электропроводных жидкостей в закрытых трубопроводах часто используют индукционные расходомеры. Принцип устройства индукционного расходомера (рис. 9.13) состоит в том, что отрезок трубопровода 1 из немагнитного материала помещен в поле электромагнита 2 с переменным магнитным потоком. Внутри трубопровода укреплены два электрода 3, выполненные в виде пластин. Электроды размещены в одной плоскости с полюсами магнитопровода. При протекании жидкости между полюсами измерительного преобразователя в его катушке наводится ЭДС, которая пропорциональна индукции B , расстоянию между электродами l и скорости движения жидкости v :

$$E = Blv.$$

Недостаток таких расходомеров состоит в том, что в катушке преобразователя появляются дополнительные ЭДС, одна из которых вызвана действием внешних полей, а другая — явлением поляризации. Вместе с тем индукционные расходомеры просты и безынерционны. Они используются для измерения расходов воды, молока и других жидкостей.

9.7.2. Измерение уровней жидкости

Уровни жидкостей измеряются в основном приборами с электростатическими, индуктивными и реостатными преобразователями. Приборы для измерения уровней жидкостей получили название *уровнемеров*.

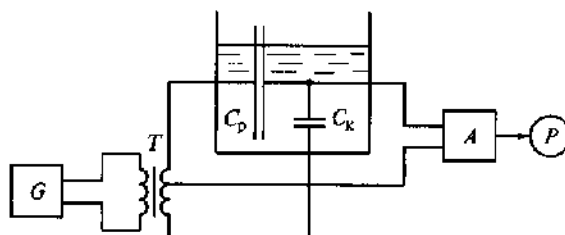


Рис. 9.14. Структурная схема цепи и конструкция уровнемера с электростатическим преобразователем

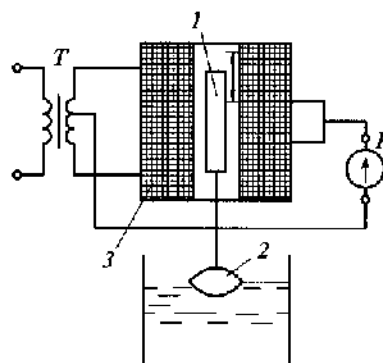
Простейший уровнемер с электростатическим преобразователем (рис. 9.14) собран из двух конденсаторов — рабочего C_p и компенсационного C_k , погруженных в жидкость, уровень которой измеряют. Измерительная цепь прибора питается от источника синусоидального тока — генератора G через трансформатор T . Вторичная цепь трансформатора и два преобразователя образуют мост переменного тока. Для стабилизации параметров уровнемера компенсационный преобразователь помещен в ту же среду, что и рабочий. Изменение уровня жидкости вызывает изменение параметров рабочего преобразователя (изменение площади пластин конденсатора, находящихся в жидкости). При этом нарушается равновесие мостовой схемы. Напряжение, снимаемое с диагонали моста, через усилитель A поступает на измерительный прибор P , проградуированный в единицах измерения уровня. Так как параметры электростатических преобразователей зависят не только от площади электродов, находящихся в контакте с жидкостью, но и от ее диэлектрических свойств, в плечи мостовой схемы с преобразователями включают дополнительные конденсаторы, помещаемые вне жидкости.

В индуктивном уровнемере (рис. 9.15) сердечник 1 преобразователя, набранный из листов трансформаторной стали, механически связан с поплавком 2. Перемещение поплавка при изменении уровня жидкости, на поверхности которой он находится, вызывает изменение положения сердечника, помещенного в поле дифференциальной катушки 3. Изменение положения сердечника нарушает равновесие мостовой цепи, образованной вторичной обмоткой трансформатора T и катушкой 3 дифференциального преобразователя. Измерительный прибор P , включенный в диагональ моста, показывает напряжение, пропорциональное изменению уровня жидкости.

Особенность уровнемеров с индуктивными преобразователями — нелинейность зависимости полного сопротивления преобразователя от перемещения сердечника. Для уменьшения влияния нели-

Рис. 9.15. Схема поплавкового уровнемера с дифференциальным индуктивным преобразователем:

1 — сердечник; 2 — поплавок; 3 — катушка дифференциального преобразователя



нейности перемещение сердечника должно быть возможно меньшим.

В уровнемерах с индуктивными преобразователями не требуется усиливать сигналы.

Для измерения уровней жидкости с высокой точностью разработаны приборы с реостатными преобразователями, подвижный контакт которых механически связан с поплавком. Реостатный преобразователь таких уровнемеров включают в два плеча мостовой схемы. В измерительную диагональ моста включен следящий реверсивный электродвигатель. Измерять (контролировать) уровень вольтметром нужно в момент касания поплавка жидкости, что позволяет уменьшить погрешность измерений.

9.7.3. Измерение уровней сыпучих материалов

Уровни сыпучих материалов измеряют (контролируют) при помощи приборов, преобразователями которых являются два электрода различных форм и размеров. Электроды включают непосредственно в цепь питания или в одно из плеч мостовой схемы. Их устанавливают в емкости, где контролируют уровень материала, на требуемом уровне от поверхности. При необходимости напряжение, снимаемое с измерительной диагонали моста, подают на вход электронного усилителя, на выходе которого включен измерительный прибор. На этом принципе основано действие многопозиционного регулирования уровней сыпучих материалов. Для питания измерительных цепей используют источники постоянного тока.

Для непрерывного дистанционного измерения уровней жидких и сыпучих материалов большое распространение получили приборы с электростатическими преобразователями. Для преобразования уровня в них используют зависимость емкости преобразователя от диэлектрических свойств жидких и сыпучих сред. Для усиления сигналов, получаемых с измерительного преобра-

зователя, применяются электронные усилители с большим входным сопротивлением. Уровнемеры с электростатическими преобразователями позволяют измерять уровни в пределах от 0 до 10 м с погрешностью $\pm 2,5\%$.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют механические величины, их единицы и эталоны?
2. Какие имеются принципы измерения механических величин?
3. Какие существуют типы механических рычажных весов? Приведите их основные характеристики. Укажите области их применения.
4. Какие имеются типы электромеханических весов? Каковы их характеристики? Объясните их применение.
5. Как работают и где применяются весы для измерения больших масс?
6. Каковы особенности весов для измерения больших масс?
7. Какие имеются типы преобразователей силы? Приведите их схемы и технические характеристики.
8. Какие применяются типы преобразователей давления? Приведите их схемы, характеристики и области применения.
9. Какие методы используются при взвешивании на рычажных весах?
10. Каким способом измеряются крутящие моменты?
11. Какие применяются схемы наклейки тензорезисторов?
12. Как работают электростатический и фотоэлектрический преобразователи крутящего момента?
13. Какими приборами измеряются угловые скорости?
14. Какими методами и средствами измеряется расход жидкостей и газов?
15. На каких принципах построены приборы для измерения уровней жидкостей и сыпучих материалов?

ГЛАВА 10

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

10.1. Общие сведения

Характер протекания многих технических, физических, химических и физиологических процессов тесно связан с тепловыми воздействиями. Поэтому результаты измерения температуры часто дают наиболее важную прямую или косвенную информацию об этих процессах.

Температура — это величина, характеризующая тепловое (энергетическое) состояние объекта.

С температурными измерениями приходится сталкиваться в исследовательских работах, при проектировании и на производстве. При изготовлении штучных изделий примерно 10 %, а в непрерывных производствах до 50 % всех измерений приходится на долю измерения тепловых величин.

Температура измерения является необходимой предпосылкой, определяющей качество, надежность и экономичность многих технологических процессов.

Температурные измерения жизненно необходимы для энергетики, пищевой и химической промышленности, многих видов современных производств массовой продукции. Для измерения температуры используются различные виды *термометров*.

Если термочувствительный элемент термометра находится в непосредственном (кондуктивном) или конвективном соприкосновении с объектом измерения, то такой термометр называется *контактным*.

Однако целый ряд задач невозможно решить с помощью контактных термометров. Это относится в первую очередь к измерениям высоких и сверхвысоких температур, температуры очень больших или очень малых объектов, а также подвижных объектов при высоких требованиях к быстродействию. В этих случаях следует отдавать предпочтение бесконтактным приборам — *оптическим пирометрам*. При использовании пирометров температура объекта определяется по интенсивности полного излучения, излучения в определенном диапазоне длин волн или по цвету излучения.

10.2. Тепловые величины, их единицы и способы воспроизведения

В средствах измерений в качестве основной тепловой величины принята *температура*. Единицей температуры является *кельвин* (К). Температура может быть также представлена в *градусах Цельсия* (°С). Разность абсолютных температур, так же как и температур по шкале Цельсия, выражается в кельвинах. Кратные и дольные единицы кельвина образуются согласно общим правилам.

Технические трудности, связанные с измерением температуры по термодинамической шкале с помощью газовых термометров, привели к тому, что для практических целей была принята Международная практическая температурная шкала (МПТШ). Эта шкала является обязательной для всех метрологических органов.

Международная практическая температурная шкала, принятая в 1968 г. (МПТШ—68), основывается на ряде воспроизводимых состояний равновесия (реперных точек) некоторых веществ, которым присвоены определенные значения температуры. Реперная точка — «тройная точка воды» — соответствует температуре плавления воды при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.) и соответствует 0 °С (точнее 0,01 °С) или 273,16 К. Интерполяция между реперными точками шкалы производится с помощью эталонного платинового термометра сопротивления в диапазоне 13,81 К... 630,74 °С и с помощью эталонного платино-платинородиевой термодпары в диапазоне 630,74... 1 064,43 °С. Выше 1 064,43 °С МПТШ реализуется в соответствии с законом излучения Планка при исходной температуре 133,58 К и постоянной излучения $C_2 = 0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}$.

Поскольку в обращении еще имеются приборы, в первую очередь термометры сопротивления и термодпары, градуировка которых выполнена в соответствии с МПТШ—68, при их использовании для получения уточненных результатов необходимо вводить поправки.

В табл. 10.1 и 10.2 приводятся сводки важнейших тепловых величин и коэффициентов.

Государственным (первичным) эталоном для воспроизведения МПТШ—68 служит комплекс средств измерений, включающий в себя устройства для воспроизведения реперных точек в диапазоне температур –259,34... +1 064,43 °С (табл. 10.3), платиновые термометры сопротивления, платино-платинородиевые термодпары и электронную измерительную аппаратуру.

Первичный эталонный комплекс служит для передачи единиц температуры образцовым средствам измерений (см. табл. 10.3). Указанные в табл. 10.3 данные о точности измерений относятся толь-

Таблица 10.1

Тепловые величины и их единицы

Величина	Температура, T	Количество теплоты, Q	Теплоемкость, G	Энтропия, S	Тепловой поток, Φ
Единица	Кельвин	Джоуль	Джоуль на кельвин	Джоуль на кельвин	Вт
Обозначение	К	Дж	Дж · К ⁻¹	Дж · К ⁻¹	Вт
Определение	Кельвин — это 1/273,16 часть (термодинамической) температуры тройной точки воды	Джоуль — это количество теплоты, эквивалентное механической работе (энергии) 1 Дж	Джоуль на кельвин — это теплоемкость тела, температура которого повышается на 1 К при подведении к нему количества теплоты 1 Дж	Джоуль на кельвин — это изменение энтропии системы в обратимом процессе, в котором при изменении температуры на 1 К сообщается количество теплоты 1 Дж	Ватт — это тепловой поток, соответствующий механической мощности 1 Вт

Таблица 10.2

Тепловые коэффициенты и их единицы

Величина	Коэффициент теплообмена, α	Коэффициент теплопередачи, k	Коэффициент теплопроводности, λ	Температурный коэффициент линейного расширения, α_T	Температурный коэффициент объемного расширения, α_V
Единица	Ватт на квадратный метр-кельвин	Ватт на квадратный метр-кельвин	Ватт на метр-кельвин	Метр на метр-кельвин	Кубический метр на кубический метр-кельвин
Обозначение	Вт · м ⁻² · К ⁻¹	Вт · м ⁻² · К ⁻¹	Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹	м · м ⁻¹ · К ⁻¹	м ³ · м ⁻³ · К ⁻¹

Таблица 10.3

**Погрешность измерения температуры, достижимая
в метрологических институтах**

Значение измеряемой температуры	Средство измерения	Абсолютная погрешность, К
–200	Платиновый термометр сопротивления	0,01
–100	Платиновый термометр сопротивления	0,01
	Медно-константановая термопара	0,2
	Стекланный термометр	0,5
0	Платиновый эталонный термометр сопротивления	0,002
	Платиновый термометр сопротивления	0,03
	Медно-константановая термопара	0,1
	Стекланный термометр	0,005
100	Платиновый эталонный термометр сопротивления	0,003
	Платиновый термометр сопротивления	0,03
	Термопара из неблагоприятных металлов	0,5
	Стекланный термометр	0,01
1 000	Платино-платинородиевая термопара	1,0
	Термопара из неблагоприятных металлов	3,0
	Визуальный квазимонохроматический пирометр	3,0
	Пирометр полного излучения	10,0
	Пирометр спектрального излучения	15,0

ко к самим средствам измерений и не учитываются такие факторы, как теплоотвод через термометр в окружающую среду.

Гораздо сложнее обстоит дело с передачей единицы температуры пирометра. Для этих целей используют квазимонохроматические пирометры с системой ослабляющих фильтров. Градуировку пирометра осуществляют по горизонтально расположенному черному излучателю при температуре затвердевания золота.

При температурах от 800 до 2 400 °С в качестве средств проверки и градуировки пирометров используют температурные лампы с накаливаемой вольфрамовой лентой. Согласование с МПТШ—68 пирометров полного излучения и спектрального распределения производится при помощи образцовых квазимонохроматических пирометров.

Градуировка высокотемпературных термопар на основе вольфрама, рения и молибдена представляет собой сложную, еще не решенную до конца задачу.

10.3. Измерение температуры

10.3.1. Общие сведения

Температура — одна из важнейших физических величин, оцениваемых в задачах различных научных, технических, промышленных исследований. Температура — это своеобразная физическая величина, которая присуща всем предметам и веществам, находящимся в любом состоянии (в твердом, жидком, газообразном и комбинированном состоянии).

В историческом плане температура — одна из самых старых измеряемых физических величин. Уже сотни лет человечество измеряет температуру. Первые средства измерений температуры (жидкостные термометры) появились в XVI в. Авторство их открытия принадлежит известному итальянскому естествоиспытателю Г. Галилею. В развитие термометрии на разных этапах внесли значительный вклад знаменитые ученые XVII—XIX вв. Г. Фаренгейт, А. Цельсий, У. Томсон (лорд Кельвин), Т. Зеебек и др. За последние десятилетия потребности практики экспериментальных исследований значительно выросли, диапазоны измерения температуры сильно расширились, требования к метрологическим и эксплуатационным характеристикам резко повысились. Одновременно возросли возможности измерительной техники, микроэлектроники, компьютерной техники, прикладной математики.

Поскольку диапазон значений измеряемых температур довольно широк (от -270°C до нескольких тысяч градусов Цельсия), требования к точности, чувствительности, быстродействию, функциональным возможностям, эксплуатационным характеристикам инструментов различны, то и применяемые методы и средства достаточно разнообразны. Современные методы и средства измерений температуры основаны на тех или иных физических особенностях (механических, электрических, оптических свойствах) жидкостей, газов, твердых тел, проявляемых при изменении температуры.

В настоящее время используются как электрические, так и неэлектрические методы и средства измерений температуры. Неэлектрические методы представлены, например, обычными жидкостными термометрами. Электрические методы (основа современных измерений) реализованы, например, в термометрах и регистраторах на основе термоэлектрических преобразователей. В подразд. 10.3 речь пойдет только об электрических методах и средствах измерения температуры.

Различают *статические* измерения (в которых предполагается неизменность значения температуры в течение времени наблюдения) и *динамические* измерения (когда процесс достаточно быстро меняется и когда принципиально важно знать характер поведе-

ния величины и (или) оперативно отслеживать все изменения, как, например, в системе автоматизированного управления). Существует также деление средств измерений температуры на *показывающие* и *регистрирующие*. Первые реализуют статические модели и имеют только шкалу или цифровой индикатор для отсчета текущего значения. Вторые предназначены для динамических моделей и позволяют записывать изменения температуры (как функции времени) в течение некоторого интервала времени.

По способам преобразования информации методы и средства измерения (регистрации) подразделяются на *цифровые* и *аналоговые*. Цифровые термометры имеют ряд известных преимуществ перед аналоговыми: более высокие метрологические и эксплуатационные характеристики, быстродействие, надежность. Кроме того, цифровая форма представления информации обеспечивает простоту дальнейшей автоматизированной обработки, хранения, передачи и представления данных.

По принципу взаимодействия прибора с объектом методы и средства измерения температуры подразделяются на *контактные* и *бесконтактные*. Первые проще в применении и могут обеспечивать более высокую точность. Вторые удобнее в работе (а в некоторых задачах просто незаменимы), позволяют получить результат быстрее, хоть, может быть, и с большей погрешностью.

Многоканальные измерители (регистраторы) температуры предназначены для регистрации нескольких процессов или синхронных измерений температуры в нескольких точках.

В настоящее время в практике температурных измерений используются, как правило, цифровые средства измерения температуры, основанные на электрических методах преобразования.

При этом применяются как статические, так и динамические модели объектов и процессов. Одинаково широко распространены и контактные, и бесконтактные методы и средства.

Одноканальные измерители применяются чаще *многоканальных*, хотя широко используются комбинированные цифровые приборы, которые могут измерять две или несколько различных физических величин, например температуру и относительную влажность воздуха или температуру и скорость потока воздуха (термоанемометр). Среди регистраторов температуры многоканальность встречается чаще, чем в показывающих приборах.

Основными требованиями, предъявляемыми к средствам измерения и регистрации температуры, являются: необходимая достоверность результатов измерения, надежность и возможность работы в жестких условиях эксплуатации, малые габаритные размеры и масса, простота и удобство работы, отсутствие влияния (точнее пренебрежимо малое влияние) на ход исследуемых процессов, наглядность представляемой информации, доступная цена.

10.3.2. Принципы действия средств измерений температуры

Использование термомеханического эффекта. Зависимость расширения твердых тел, жидкостей и газов от температуры называется *термомеханическим эффектом*. Он положен в основу построения твердотельных, жидкостных и газовых термометров.

Различие в тепловом расширении двух твердых тел или двух оболочек, заполненных жидкостью или газом, может служить мерой различия от температур, если их коэффициенты теплового расширения различны.

Использование термоэлектрического эффекта. На зависимости электрического сопротивления проводников и полупроводников от температуры основывается принцип действия термометров сопротивления.

В термоэлектрических термометрах используется *эффект Зеебека*, согласно которому при неравенстве температур мест соединения двух различных проводников, связанных в единый контур, возникает разность потенциалов, которая может служить мерой разности температур.

Использование излучения нагретых тел. Твердые тела и жидкости, если их температура выше абсолютного нуля, являются источниками электромагнитного излучения (теплового и светового). Для измерения температуры излучающих объектов используется зависимость параметров излучения от их температуры.

Согласно *закону Кирхгофа* спектральная плотность излучения $L(\lambda, T)$ реального излучателя пропорциональна спектральной плотности излучения $L_S(\lambda, T)$ абсолютно черного излучателя:

$$L(\lambda, T) = L_S(\lambda, T)/\epsilon(\lambda, T),$$

где λ — длина волны; T — абсолютная температура; L_S — спектральная плотность излучения абсолютно черного тела; ϵ — спектральный коэффициент черноты.

Значения коэффициента черноты большинства металлов, пластмасс и силикатных материалов при рабочих температурах достаточно велики. Зависимость спектральной плотности излучения черного тела от его температуры описывается *уравнением Планка*:

$$L_S(\lambda, T) = 2\pi h \lambda^{-5} \left\{ c^2 \left[\exp(h\lambda/kT) - 1 \right] \right\},$$

где h — постоянная Планка, $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; k — постоянная Больцмана, $1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹; c — скорость света в вакууме, $c = 2,997 \cdot 10^8$ м·с⁻¹.

В длинноволновой области спектра спектральная плотность растет с ростом температуры, а максимум плотности при этом сме-

щается в область все более коротких длин волн (*закон смещения Вина*).

Интегральная плотность излучения черного тела в соответствии с уравнением Стефана—Больцмана пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$\int_0^{\infty} L_s(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4,$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана, $\sigma = (5,66961 \pm \pm 0,00096) \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

При измерениях в длинноволновой области используются тепловые приемники излучения.

Использование оптоэлектроники. Яркость излучения измеряется с помощью фотоприемников, которые реагируют на число фотонов, достигших светочувствительной поверхности приемника:

$$N(\lambda, T) = 2\pi c \lambda^{-4} [\exp(c_1/\lambda T) - 1]^{-1},$$

где c — скорость света в вакууме; $c_1 = \frac{hc}{k}$.

По аналогии со спектральной интенсивностью спектральная яркость возрастает с увеличением температуры, а ее максимум смещается в сторону коротких длин волн.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют тепловые величины, их единицы и эталоны?
2. Какие основные реперные точки имеются на Международной практической температурной шкале?
3. Какие существуют тепловые коэффициенты и их единицы? Какими зависимостями они определяются?
4. Каковы достижимые минимальные значения погрешностей измерений температуры различными средствами измерений?
5. Какие существуют принципы действия средств измерений температуры?
6. Какие законы излучения имеются у идеальных излучателей?
7. Какие законы излучения действуют и используются при оценке параметров реальных излучателей?

ГЛАВА 11

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

11.1. Международная температурная шкала

Одной из важнейших характеристик, описывающих изменчивость окружающего нас мира, является температура. Среднегодовой перепад температур среды обитания человека, в которой проживает большая часть населения Земли, может достигать $-50 \dots +50^\circ\text{C}$.

Необходимость жить в таких сложных для человеческого организма условиях заставляет человека создавать все новые и новые методы сохранения тепла при низких температурах окружающей среды и, наоборот, защиты от нагрева при повышенной внешней температуре.

Измеритель температуры (термометр) после измерителей веса, объема и длины является следующим по давности его создания. История первого термометра превышает 300 лет.

После того как человек научился измерять температуру, этот вид измерительного средства постоянно расширяет свое применение в различных областях человеческой деятельности: в промышленности, науке, медицине, коммунальном хозяйстве, обороне государства. Сохраняется очевидная тенденция к повышению точности и расширению диапазона измеряемых температур. Если сегодня промышленность нуждается в измерениях температур от 10^{-2} до 10^5°C , то современная наука проводит исследования в диапазонах от 10^{-7} до 10^8°C .

В настоящее время получило развитие новое направление термометрии — *тепловидение*. Тепловизионная техника в отличие от обычных измерителей температуры, которые измеряют ее в локальной области или усредненную по контролируемому объекту, дает возможность исследовать распределение температурных участков по поверхности объекта. Такие измерения крайне важны при поиске мест потери тепла, перегретых участков в электрических и технологических схемах, поиске и обнаружении объектов противника, локализации больных органов у пациента.

Температура оказывает многообразное влияние как на процессы и реакции на физическом и биологическом уровнях в приро-

де, так и на технологические процессы, осуществляемые человеком. В связи с этим достоверность воспроизведения величины температуры чрезвычайно актуальна. В земных условиях достижимы температуры от 10^{-3} до 10^8 К (в зоне термоядерной реакции). В промышленных же технологических процессах верхний предел, как правило, ограничивается 300 К. Для измерения температуры в зависимости от конкретно поставленной задачи и достижения необходимой точности измерений применяются разнообразные средства и методы измерений.

Температура, как и любая другая физическая величина, измеряется набором определенных измерительных приборов. Средствами для измерения температуры служат термометры, входной (измеряемой) величиной которых является температура, а выходной (выходным сигналом) может быть любая величина, однозначно зависящая от температуры.

По методу измерения термометры подразделяются на *контактные термометры*, непосредственно контактирующие с измеряемым объектом, и пирометры излучения, определяющие температуру исследуемого объекта бесконтактно на расстоянии по излучаемой им энергии.

Истинное значение температуры никогда нельзя определить абсолютно точно. При измерении температуры одним из заданных способов не всегда получают одинаковые результаты измерений. Разница между измеренным и действительным значениями, определенными по реперным точкам или путем сравнения с показаниями эталонного измерительного прибора, называется *погрешностью измерения*.

Определить температуру объекта с помощью измерительных приборов можно, лишь соотнеся наблюдаемые на термометре значения температуры с некоторой эталонной температурой. Для однозначного измерения температуры необходимо было создать достоверную температурную шкалу. Уже издавна для градуировки термометров использовали температуры таяния льда и кипения воды, так как эти процессы наиболее доступны и, следовательно, температуры, им сопутствующие, наиболее легко воспроизводимы.

Эталон единицы термодинамической температуры — кельвин. До введения термодинамической шкалы температур применялись интервальные температурные шкалы (Фаренгейта, Реомюра, Цельсия), реализуемые с помощью жидкостных термометров. Их недостаток — нелинейное отклонение шкалы от термодинамической, обусловленное свойствами рабочих веществ.

Удовлетворяющая всем требованиям хорошо воспроизводимая температурная шкала, не зависящая от значения температуры и каких-либо свойств веществ, была разработана в 1848 г. У. Томсоном (лордом Кельвином) и называется *термодинамической тем-*

температурной шкалой. В 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) определила единицей термодинамической температуры градус Кельвина как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. С 1967 г. единица термодинамической температуры называется *кельвин* (К).

Международная температурная шкала. Основное требование, которое, как правило, предъявляется к температурной шкале: измеренные по ней температуры должны совпадать с температурами, входящими в формулы термодинамики и статистической физики, служащие основой для теплофизических расчетов. Такая термодинамическая шкала вводится посредством *цикла Карно*. Термодинамическая шкала может быть введена также согласно *второму началу термодинамики*.

При измерении температуры по термодинамической шкале на практике применяют обычно не цикл Карно, а одно из строгих следствий второго начала термодинамики, связывающее удобно измеряемое термометрическое свойство с термодинамической температурой: законы идеального газа, законы излучения абсолютно черного тела, закон Кюри идеального парамагнетика, формулу Найквиста для тепловых флуктуаций напряжения на электрическом сопротивлении и т. д. Термометры, для которых температурная зависимость получена из этих соотношений, часто называют первичными.

Первичные термометры высокой точности представляют собой в основном громоздкие устройства, непригодные для практических измерений. Их назначение — передать термодинамическую температурную шкалу удобным чувствительным и стабильным *вторичным термометрам*.

Способ градуировки вторичных платиновых термометров с внесением поправок в реперных точках лежит в основе международной температурной шкалы, которая воспроизводит температуры по термодинамической температурной шкале с минимальными отклонениями от последней. Важное преимущество международной температурной шкалы — ее независимость от конкретного термометра — носителя шкалы.

Реализация термодинамической шкалы на практике требует проведения большого числа экспериментов, поэтому на основе международных соглашений была принята чисто эмпирическая, легко воспроизводимая шкала, так называемая Международная практическая температурная шкала (МПТШ), которая приближается к термодинамической температурной шкале Кельвина (ТТШК). В настоящее время в качестве стандарта принята уточненная в 1990 г. шкала МТШ—90.

В диапазоне от своего нижнего предела, равного 0,65 К, и до 5 К МТШ—90 воспроизводится по давлению насыщенных паров гелия. В интервале 3...13,8 К используется газовый термометр, а в

интервале 13,8... 24,5 К допускается применение как газового термометра, так и платинового термометра сопротивления. Выше 24,5 К и вплоть до 1235 К МТШ—90 воспроизводится платиновым термометром, а при более высоких температурах — радиационным пирометром, измеряющим отношение спектральных плотностей светового потока абсолютно черных тел согласно закону излучения Планка.

11.2. Схемы приборов для измерения температуры

11.2.1. Механические контактные термометры

В контактных термометрах (рис. 11.1) реализуется термомеханический эффект.

Процесс теплового расширения веществ происходит по закону Гей-Люссака и описывается уравнением

$$A_2 = A_1 [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)],$$

или

$$\Delta A = A_2 - A_1 = A_1 \alpha \Delta \vartheta,$$

где A_1 и A_2 — размеры нагреваемого тела при температурах ϑ_1 и ϑ_2 ; α — коэффициент теплового расширения.

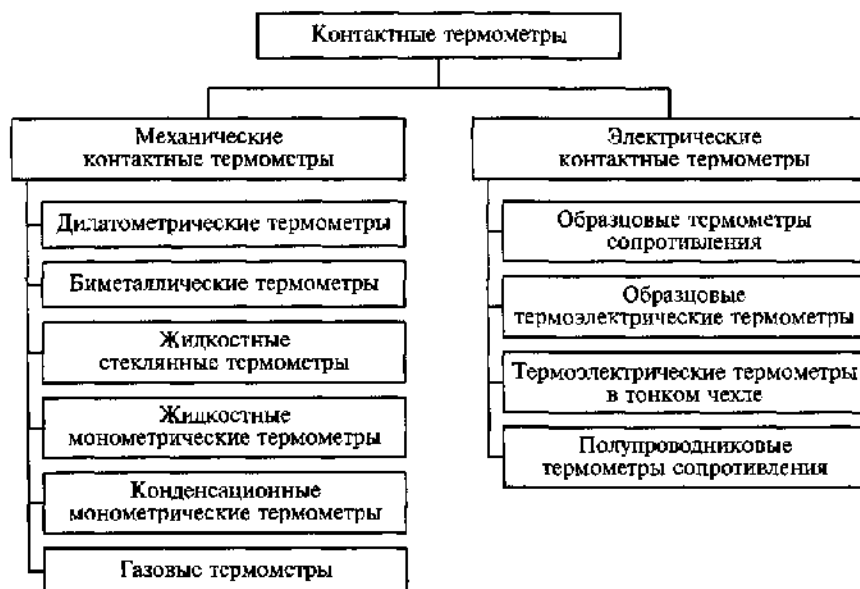


Рис. 11.1. Контактные термометры

Чувствительность термометра расширения

$$S = \Delta L / \Delta \vartheta = A_0 (\alpha_1 - \alpha_2),$$

где A_0 — протяженность двух тел, составляющих термометр, при некоторой начальной температуре ϑ ; α_1 и α_2 — коэффициенты их теплового расширения.

11.2.2. Металлические термометры расширения

Дилатометрический термометр выполняется в виде металлической трубки с большим температурным коэффициентом линейного расширения и стержня (например, фарфорового) с малым коэффициентом расширения, расположенного по оси трубки и закрепленного жестко на одном из ее концов.

Разность перемещений концов трубки и стержня, вызванная изменением температуры, воспринимается рычажно-зубчатой системой и передается на отсчетное устройство.

Среднее значение коэффициента линейного расширения α_l определяется следующим образом:

$$\alpha_l = \frac{l_2 - l_1}{l_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1)} = \frac{\Delta l}{\Delta \vartheta l},$$

где l_1 , l_2 — длина трубки (стержня) при температурах ϑ_1 и ϑ_2 .

Если $\vartheta_1 = 0^\circ \text{C}$, то выражение упрощается $\alpha_l = \Delta l / (\vartheta_2 l_0)$.

Измеряемая температура ϑ_2 при известных коэффициентах линейного расширения определяется в зависимости от относительного удлинения $\Delta l / l_0$ по формуле

$$\vartheta_2 = [\Delta l / (\alpha_l l_0)]_R - [\Delta l / (\alpha_l l_0)]_{St}.$$

Таблица 11.1

Температурные коэффициенты линейного расширения

Материал	Коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$	Материал	Коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$
Алюминий	23,8	Никель	13,0
Железо (литье)	10,4	Фарфор	3,5
Стекло	5,9	Пластмассы	80,0
Инвар	1,5	Кварцевое стекло	0,5
Медь	16,5	Сталь (легиро- ванная)	15,0
Латунь	18,4		

Здесь индекс R относится к расширению трубки, а индекс S — к стержню. Средние значения коэффициентов линейного расширения некоторых материалов в диапазоне температур 20...100 °C приведены в табл. 11.1.

Биметаллические термометры состоят из двухслойных металлических лент, образованных материалами с различными коэффициентами линейного расширения. Наибольшее распространение получили латунь (сплав меди и цинка) и инвар (железоникелевый сплав). При изменении температуры на $\Delta\vartheta$ зажатая с одного конца лента претерпевает деформацию изгиба Δx , которую с достаточной точностью можно вычислить по формуле

$$\Delta x = (l^2/2s)\Delta\alpha_l\Delta\vartheta,$$

где l — длина биметаллической ленты; s — толщина биметаллической ленты; $\Delta\alpha_l$ — разность коэффициентов линейного расширения компонентов биметалла, $\Delta\alpha_l = \alpha_{l1} - \alpha_{l2}$.

Формула справедлива при условии, что $\alpha_{l1} > \alpha_{l2}$.

Так, биметаллическая лента при $l = 5$ см, $s = 1$ мм и $\Delta\alpha_l = 15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при изменении температуры на 100 К изгибается на $\Delta x = 2$ мм.

Эта деформация на два порядка превышает перемещение, создаваемое dilatометрическим термометром.

11.2.3. Жидкостные стеклянные термометры

Основным элементом жидкостных стеклянных термометров является стеклянный баллон с капилляром, заполненным термометрической жидкостью. Возможность измерения температуры вытекает из различия в коэффициентах объемного расширения стеклянного баллона с капилляром и термометрической жидкостью. Коэффициент объемного расширения определяется как

$$\alpha_V = \frac{V_2 - V_1}{V_1(\alpha_2 - \alpha_1)} = \frac{1}{V_1} \frac{\Delta V}{\Delta\vartheta},$$

где V_1 и V_2 — объемы жидкости или соответственно стеклянного сосуда при температурах ϑ_1 и ϑ_2 .

Для исходной температуры $\vartheta_1 = 0$ °C выражение упрощается:

$$\alpha_V = \Delta V/(\vartheta_2 V_0).$$

Разность коэффициентов объемного расширения жидкости (индекс F) и стекла (индекс G)

$$\Delta\alpha_V = \alpha_{V(F),\vartheta_0,\vartheta_2} - \alpha_{V(G),\vartheta_0,\vartheta_2}$$

определяет зависимость показаний термометра от измеряемой температуры:

$$\vartheta_2 = [\Delta V / (\alpha_V V_0)]_F - [\Delta V / (\alpha_V V_0)]_G.$$

Для точных измерений используются стеклянные термометры с заполнением несмачивающими жидкостями. Чаще всего используется ртутное заполнение. Преимущество ртути как термометрической жидкости заключается в том, что она почти не окисляется на воздухе, довольно просто получается в химически чистом виде и остается жидкой в широком интервале температур (затвердевает при $-38,8^\circ\text{C}$, кипит при $+356,6^\circ\text{C}$).

Некоторым недостатком ртути по сравнению со смачивающими (органическими) жидкостями является относительно малый коэффициент объемного расширения.

11.3. Контактные методы и средства измерений температуры

Если преобразовать неэлектрическую физическую величину — температуру T — в какую-либо пропорциональную электрическую величину (ЭДС E , напряжение U , ток I , сопротивление R , частоту сигнала f и т. п.) с помощью первичных измерительных преобразователей, то затем ее значение можно легко определить средствами электрических измерений.

При построении первичных измерительных преобразователей (датчиков) используются разнообразные физические эффекты. В основном применяются следующие разновидности термоэлектрических датчиков:

- металлические термометры сопротивления (ТС);
- термоэлектрические преобразователи (ТП) — термопары;
- полупроводниковые термометры сопротивления — термисторы;
- полупроводниковые интегральные сенсоры — датчики;
- датчики на основе кварцевых резонаторов.

Основные англоязычные термины этого класса преобразователей таковы: Resistance Temperature Detector (RTD) — термометр сопротивления; Thermo-Couple (TC) — термопара; Thermistor — термистор; Monolithic Linear Temperature Sensor — монолитный полупроводниковый датчик (с линейной характеристикой преобразования); Quartz Sensor — кварцевый датчик.

Можно охарактеризовать основные особенности этих первичных измерительных преобразователей следующим образом.

Металлические ТС (рис. 11.2, а) обеспечивают высокую точность, хорошую линейность, стабильность и повторяемость ха-

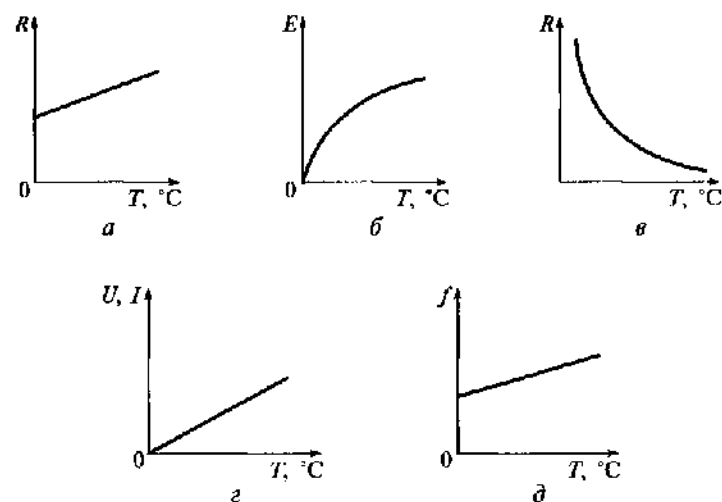


Рис. 11.2. Различные характеристики термоэлектрических датчиков:

а — металлический термометр сопротивления; *б* — термопара; *в* — термистор; *г* — полупроводниковые интегральные датчики; *д* — датчики на основе кварцевых резонаторов

рактических. Основные недостатки: возможное значительное влияние (на результат измерения) сопротивления проводников линии связи, необходимость дополнительного источника питания (напряжения или тока). Кроме того, возможен саморазогрев ТП от протекающего по нему тока, что может привести к дополнительным погрешностям.

Термопары (рис. 11.2, б) не требуют вспомогательного источника питания, имеют широкий диапазон измеряемых температур. Однако им присуща заметная нелинейность характеристики преобразования. Некоторые проблемы создаст необходимость учета (или компенсации) влияния температуры свободных концов ТП на результат измерения. Кроме того, малое выходное напряжение (и сравнительно невысокая чувствительность) требует довольно чувствительных вторичных преобразователей (усилителей) и (или) выходных приборов.

Термометры сопротивления и термопары отличаются достаточно высокой точностью, стабильностью и повторяемостью своих характеристик преобразования.

Термисторы (полупроводниковые термометры сопротивления) (рис. 11.2, в), в свою очередь, имеют высокую чувствительность, простую двухпроводную схему включения (не требующую компенсации температуры свободных концов, как у ТП), сравнительно высокое быстродействие. Но при этом у них есть серьезные недостатки: резко нелинейная характеристика преобразования и пло-

хая повторяемость характеристики. Кроме того, они имеют сравнительно узкий диапазон измеряемых температур.

Полупроводниковые интегральные датчики (рис. 11.2, *з*) характеризуются высокой линейностью характеристики преобразования, однако имеют ограниченный диапазон измеряемых температур (до 150...200 °С) и, кроме того, требуют наличия внешнего источника питания.

У датчиков на основе кварцевых резонаторов (рис. 11.2, *д*) выходной величиной является изменение резонансной частоты колебаний при изменении температуры. Такие датчики обеспечивают наиболее высокую точность, правда, в узком диапазоне температур. Кроме того, часто основные параметры характеристики преобразования таких датчиков и их температурные коэффициенты не стандартизованы и подразумевают индивидуальную градуировку.

Все упомянутые датчики выпускаются в различном конструктивном исполнении, что позволяет решать самые разнообразные задачи: работать с жидкостями, газами, сыпучими средами, с поверхностями различных профилей, в различных температурных диапазонах и др. Есть датчики для поверхностных измерений, погружные, воздушные, магнитные датчики (легко крепятся на ферромагнитных, например, стальных поверхностях), датчики, закрепленные на «липучей» ленте, датчики на подшипниках и др.

Контактные электрические методы, реализованные в различных средствах измерения на основе таких преобразователей, позволяют работать в достаточно широком диапазоне температур (–200...+2 000 °С). Погрешность таких контактных измерителей температуры зависит не только от качества первичных измерительных преобразователей (датчиков), но и от организации линии связи датчик — измеритель, а также от характеристик вторичных преобразователей. Типичные значения погрешностей таких термометров $\pm(0,2 \dots 1) \%$, хотя в некоторых моделях достигаются значения погрешностей $\pm(0,01 \dots 0,1) \%$. Типичная чувствительность результатов измерения — доли градуса Цельсия.

11.3.1. Термометры сопротивления

Приборы и преобразователи на основе металлических ТС используют зависимость электрического сопротивления металлов R_T от температуры T . У чистых металлов эта зависимость практически линейна и количественно выражается следующим образом:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_0),$$

где R_0 — сопротивление при температуре θ , °С; α — температурный коэффициент сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления α , 1/°С, определяется по формуле

$$\alpha = (\Delta R/R)/(\Delta \theta),$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления датчика при изменении температуры $\Delta \theta$.

Этот коэффициент можно задать иначе, $\%/^{\circ}\text{C}$:

$$\alpha = (\Delta R \cdot 100/R)/(\Delta \theta).$$

Значения температурного коэффициента сопротивления у современных ТС лежат в диапазоне $0,003 \dots 0,006 \text{ 1}/^{\circ}\text{C}$, что соответствует приращению сопротивления примерно на $0,3 \dots 0,6 \%$ от исходного (номинального) значения (при 0°C) при увеличении температуры на 1°C .

Наиболее часто используемые материалы: медь (для диапазона температур $-50 \dots +200^{\circ}\text{C}$) и платина (для диапазона $-250 \dots +1\,000^{\circ}\text{C}$) (рис. 11.3). Номинальные значения сопротивления ТС определяются конструкцией и материалом датчика, конкретной градуировкой и лежат в диапазоне $10 \dots 1\,000 \text{ Ом}$ (при 0°C или при комнатной температуре).

Медные ТС выпускаются с различными номинальными значениями сопротивления: $25 \dots 1\,000 \text{ Ом}$. Например, на рис. 11.3, а показана характеристика медного (^{53}Cu) ТС с номинальным (при 0°C) сопротивлением $R_0 = 53 \text{ Ом}$.

Платиновые ТС довольно широко распространены в различных технических измерениях. Они изготавливаются из чистой платины (99,99 %). Чаще всего используются ТС с номинальным сопротивлением 100 Ом (^{100}Pt) при 0°C , хотя существуют ТС и с другими значениями номинального сопротивления: $25, 500, 1\,000 \text{ Ом}$. Номинальные значения токов, протекающих по ТС, обычно таковы: 1 мА (для ^{100}Pt) и $0,1 \text{ мА}$ (для ^{1000}Pt). Температурный коэффициент сопротивления α платиновых (^{100}Pt) ТС имеет два значения: по европейской версии $\alpha_e = 0,00385 \text{ 1}/^{\circ}\text{C}$ и по американской версии $\alpha_a = 0,00392 \text{ 1}/^{\circ}\text{C}$ (рис. 11.3, б).

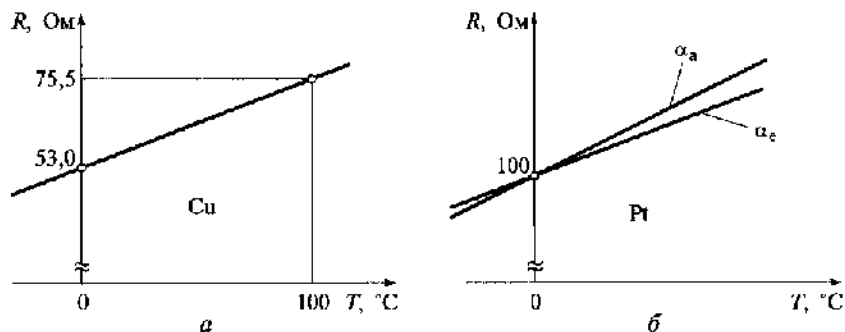


Рис. 11.3. Характеристики медных (а) и платиновых (б) термосопротивлений

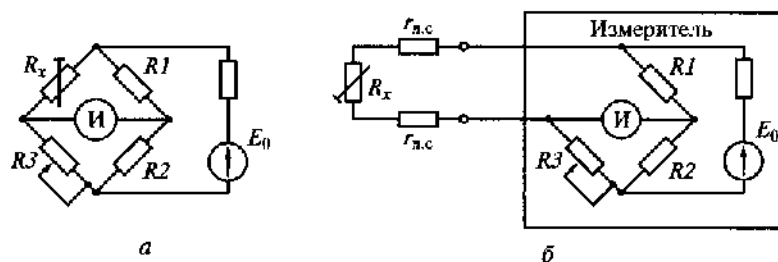


Рис. 11.4. Включение термосопротивлений в мостовую схему:
 а — принцип действия моста; б — двухпроводная схема подключения

Конструктивно ТС состоит из собственно чувствительного элемента, защитного кожуха (чехла) и элементов крепления. Чувствительный элемент представляет собой намотку из тонкой изолированной проволоки (диаметром доли миллиметра) на диэлектрическом каркасе (стержне), выполненном из слюды, керамики или стекла. Существуют также ТС фольгового (тонкопленочного — Thin Film Detector — TFD) исполнения, обеспечивающего минимальную тепловую инерционность датчика. Фольговые (пленочные) ТС имеют в 5—10 раз меньшее значение времени реакции (отклика), чем проволочные ТС, что чрезвычайно важно при работе с миниатюрными объектами в динамических измерениях при быстроменяющихся температурах.

Как правило, ТС включаются в мостовые схемы. Различают уравновешенные и неуравновешенные мостовые схемы. Уравновешенный мост имеет один или несколько резисторов, сопротивление которых может целенаправленно изменяться (вручную или автоматически) с тем, чтобы добиться равновесия. Равновесие моста характеризуется отсутствием разности потенциалов (тока) в измерительной диагонали моста (в цепи чувствительного нулевого индикатора И), что означает равенство произведений сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_x резисторов R_1, R_2, R_3, R_x противоположных плеч моста (рис. 11.4, а):

$$R_x R_2 = R_1 R_3.$$

Зная значения сопротивлений R_1, R_2, R_3 , можно определить значение неизвестного сопротивления:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2.$$

Если в качестве R_x выступает ТС с сопротивлением R_T (рис. 11.4, б), то можно, зная характеристику ТС, оценить значение температуры θ , которая действует на датчик. В случае неуравновешенного моста значение R_T сопротивления ТС (следовательно, температуры θ) определяется по значению разности потенциалов изме-

рительной диагонали моста. Уравновешенные мосты обладают более высокой точностью по сравнению с неуравновешенными.

Главная проблема при работе с датчиками ТС: влияние на результат измерения сопротивления проводников линии связи $r_{л.с.}$. Не всегда мостовая схема может быть расположена в непосредственной близости от объекта, на котором установлен датчик, поэтому в общем случае может потребоваться многометровая линия связи. В зависимости от специфики конкретных задач измерений применяются двух-, трех- или четырехпроводное подключение ТС к измерителю.

Преимущество двухпроводной схемы в том, что для подключения ТС требуются всего два проводника линии связи (что особенно важно в тех случаях, когда линия связи большой длины). Однако при двухпроводной линии связи (см. рис. 11.4, б) сопротивление $r_{л.с.}$ соединительных проводников (и его изменения при естественных колебаниях температуры окружающей среды) прямо входит в результат измерения. Поскольку длина линии связи может быть значительной (десятки метров), то и погрешность может оказаться большой.

Существуют различные способы компенсации этой погрешности. Один из них — это использование трехпроводной схемы подключения ТС (рис. 11.5, а).

В этом случае при равновесии мостовой схемы выполняется соотношение

$$(R_T + r_{л.с.})R_2 = R_1(R_3 + r_{л.с.}).$$

Если в схеме моста $R_1 = R_2$ и сопротивления $r_{л.с.}$ соединительных проводников одинаковы (это естественное предположение), то результат измерения будет определяться только температурой ТС и не будет зависеть от значения сопротивлений $r_{л.с.}$. Отметим, что сопротивление проводника $r_{л.с.}$ в цепи индикатора И не имеет значения, так как в случае равновесия моста в этой цепи тока нет.

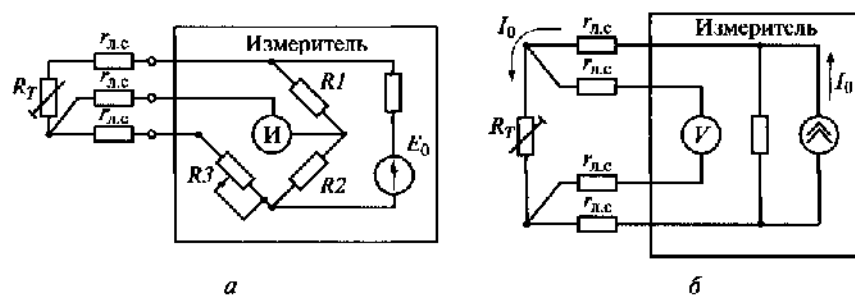


Рис. 11.5. Трехпроводное (а) и четырехпроводное (б) включения термо-сопротивлений

Применяется также и четырехпроводное включение (рис. 11.5, б). Правда, это уже не мостовая схема. В основе такого измерителя источник известного постоянного тока I_0 , который протекает через сопротивление ТС R_T . При этом сопротивления соединительных проводников $r_{л.с}$ и их изменения практически не влияют на значение тока I_0 и, следовательно, на результат измерения. Вольтметром V (с большим входным сопротивлением) измеряется падение напряжения собственно на сопротивлении ТС R_T .

Одним из проявлений методической погрешности является возможное искажение результата вследствие нагрева ТС протекающим по нему током. Уменьшение напряжения питания моста E_0 позволяет уменьшать этот ток, но в то же время приводит к снижению чувствительности. Поэтому иногда для достижения высокой чувствительности и одновременно сохранения допустимого среднего значения тока в резисторах применяют для питания моста не постоянное напряжение, а импульсное достаточно большой амплитуды.

11.3.2. Термопары

Приборы и преобразователи на основе термопар находят широкое распространение. Компактные цифровые термометры на основе термопар являются в настоящее время основным и самым массовым инструментом в температурных измерениях.

Выходной сигнал термопары — постоянное напряжение — довольно легко может быть преобразован в цифровой код и измерен простыми средствами (например, малогабаритным цифровым мультиметром). Термопары могут быть подключены для дальнейшего преобразования к различным вторичным измерительным преобразователям как аналоговым, так и цифровым для статических и динамических измерений.

Диапазон температур, измеряемых с помощью ТП, довольно широкий: от -200 до $+2000$ °С. Измерители на основе ТП отличаются высокой точностью и чувствительностью, хорошей повторяемостью характеристики преобразования. Обычный диапазон выходных напряжений составляет $0 \dots 50$ мВ (в зависимости от используемых в ТП материалов), типичный температурный коэффициент преобразования (чувствительность ТП) лежит в диапазоне $10 \dots 50$ мкВ/°С.

В основе ТП лежит термоэлектрический эффект, суть которого заключается в следующем. Если два проводника из различных металлов (сплавов) соединены в замкнутую цепь, причем температура одного соединения (спая) заметно отличается от температуры другого, то возникает термоЭДС E_T (и в замкнутой цепи будет протекать ток), значение которой зависит от разности температур спаев и характеристик материалов проводников. Если в разрыв

свободных концов включен измеритель ЭДС или вольтметр V , то его показания будут определяться разностью температур $(\theta_1 - \theta_2)$ (рис. 11.6, *а*).

Зависимость термоЭДС от разности температур спаев нелинейна, но для небольших диапазонов температур, при невысоких точностных требованиях (или упрощая взгляд на характеристику ТП) ее можно считать линейной. Тогда значение термоЭДС термопары E_T определяется (в первом приближении) следующим образом:

$$E_T = S_T(\theta_1 - \theta_2),$$

где S_T — чувствительность ТП (коэффициент преобразования); θ_1 — температура рабочего (так называемого «горячего») спа; θ_2 — температура свободных (так называемых «холодных») концов.

Для обеспечения однозначной зависимости термоЭДС от температуры θ_1 необходимо поддерживать постоянной и известной температуру θ_2 . Обычно это 0°C или 20°C . Таким образом, зная значение S_T и измерив значение термоЭДС термопар E_T , можно определить температуру θ_1 . Конечно, для работы в широких температурных диапазонах необходимо пользоваться более точными выражениями (полиномиальными аппроксимациями нелинейной зависимости E_T от разности температур). В современных цифровых термометрах применяется автоматическая линеаризация характеристик преобразования ТП.

В настоящее время, как правило, вместо методов и средств поддержания постоянства значения θ_2 применяются способы и устройства автоматической компенсации влияния температуры окружающей среды на свободные концы ТП.

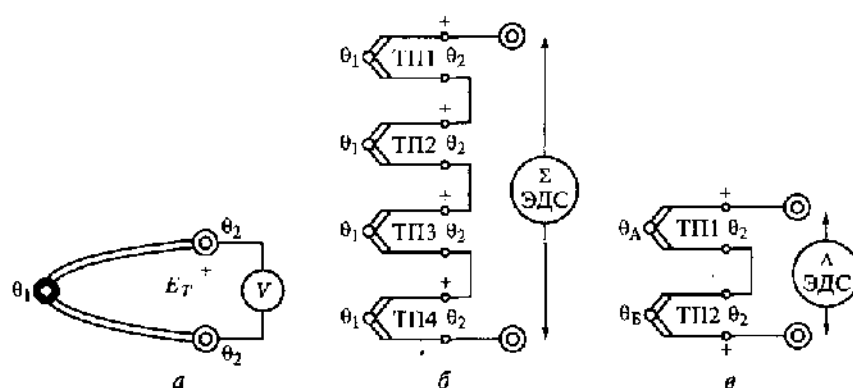


Рис. 11.6. Термоэлектрические преобразователи (термопары):

а — возникновение термоЭДС; *б* — термобатарея; *в* — дифференциальная термопара

Для повышения чувствительности таких термометров иногда объединяют последовательно несколько термопар в термобатарею (рис. 11.6, б). При этом рабочие концы всех термопар находятся при температуре исследуемого объекта θ_1 , а свободные — при постоянной (или известной) температуре θ_2 . Суммарная выходная термоЭДС, естественно, будет равна сумме термоЭДС отдельных ТП.

Для нахождения разности температур двух объектов применяются так называемые дифференциальные термопары, которые состоят из двух встречно включенных ТП (рис. 11.6, в). Рабочие концы ТП имеют разную температуру (θ_A и θ_B), а свободные — одинаковую θ_2 . В результате выходное напряжение пропорционально разности температур.

В соответствии с общепринятой международной классификацией термоэлектрические преобразователи (термопары) подразделяются на несколько типов в зависимости от применяемых материалов и характеристик. Характеристики некоторых основных типов ТП приведены в табл. 11.2.

Отметим, что в России приборостроительными фирмами ТП типа *E* и *J* не выпускаются.

Графическая иллюстрация характеристик основных типов ТП приведена на рис. 11.7. Наглядно видно, какие типы обеспечивают наибольший диапазон измерения, максимальную чувствительность или наилучшую линейность.

В практике типовых температурных измерений чаще всего используются ТП трех типов: *J*, *K*, *T*. Термопары типа *J* имеют ми-

Таблица 11.2

Основные характеристики некоторых типов термопар

Тип ТП	Материал ТП	Диапазон измерения (кратковременный), °С	Коэффициент преобразования при 20 °С, мкВ/°С
<i>E</i>	Хромель — константан	−270...+1 000	62
<i>J</i>	Железо — константан	−210...+1 000 (1 200)	51
<i>K</i> (ТХА)	Хромель — алюмель	−200...+1 000 (1 372)	40
<i>R</i> (ТПП)	Платина — платинородий (13 % родия)	−50...+1 500 (1 700)	7
<i>S</i> (ТПП)	Платина — платинородий (10 % родия)	−50...+1 600 (1 768)	7
<i>T</i> (ТМК)	Медь — константан	−270...+400	40

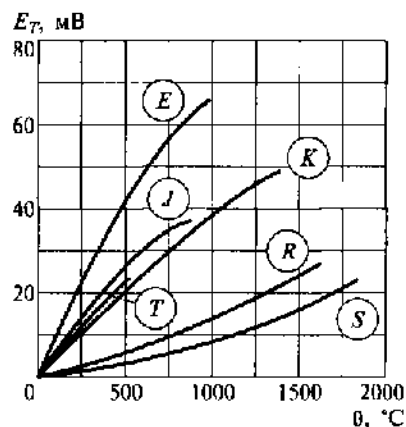


Рис. 11.7. Характеристики некоторых типов ТП:

E — хромель — константан; J — железо — константан; K — хромель — алломель; R — платина — платинородий (13 % родия); S — платина — платинородий (10 % родия); T — медь — константан

нимальную стоимость, высокую чувствительность, умеренную точность, но не могут (не должны) использоваться длительное время при экстремальных температурах (выше 1000°C), так как нарушается их градуировочная характеристика. Термопары типа K характеризуются средней стоимостью, средней точностью, хорошей чувствительностью и широким диапазоном температур (до 1300°C). Именно этот тип ТП является наиболее распространенным. Термопары типа T имеют среднюю стоимость, среднюю чувствительность, высокую точность. Они удобны для работы с невысокими температурами.

Для работы при высоких температурах или в условиях действия агрессивных сред применяются ТП типов R и S .

В настоящее время широкое распространение в мире, в том числе и в России, получили *термопарные кабели*, представляющие собой пару термоэлектродов, помещенную внутрь металлической трубки и изолированную от нее уплотненным плавным порошком MgO — периклазом.

В России выпускают термопарный кабель двух типов: КТМС-ХА и КТМС-ХК диаметром от 1 до 7,2 мм. Оболочка кабеля изготовлена из нержавеющей стали или жаростойкой стали или сплава. Термоэлектроды термопары со стороны рабочего торца сварены между собой лазерной сваркой и образуют рабочий спай внутри стальной оболочки термопарного кабеля. Рабочий торец заглушен приваренной стальной пробкой. Свободные концы термоэлектродов подключаются к клеммам головки термопреобразователя или компенсационным проводам.

Применение кабельных термопреобразователей позволяет достичь существенных преимуществ по сравнению с термопарами традиционного исполнения:

- повышенные в 2—3 раза термоэлектрическая стабильность и рабочий ресурс при сравнимых рабочих условиях;
- возможность изгибать, укладывать в труднодоступные места, в кабельные каналы, приваривать, припаивать или просто прижимать к поверхности для измерения ее температуры, при этом монтажная длина может достигать 60...100 м;

- малый показатель тепловой инерции кабельных термопреобразователей позволяет применять их при регистрации быстропротекающих процессов;

- блочно-модульное исполнение термопреобразователей в защитных чехлах обеспечивает дополнительную защиту термоэлектродов от воздействия рабочей среды и возможность оперативной замены чувствительного элемента;

- универсальность применения в различных условиях эксплуатации, хорошая технологичность, малая материалоемкость.

Сравнительные испытания термопар показали, что дрейф термоЭДС кабельной термопары КТМС-ХА с наружным диаметром 3 мм (диаметр термоэлектродов 0,65 мм) при температуре 800 °С за 10 000 ч составляет примерно 100 мкВ, тогда как у обычной термопары ТХА с термоэлектродами диаметром 3,2 мм дрейф достигает 120 мкВ, а при диаметре электродов 0,7 мм он превышает 200...250 мкВ при тех же условиях. Дрейф термоЭДС кабельных термопар в оболочке из высоконикелевых сплавов при 980 °С также вдвое меньше, чем дрейф показаний обычной термопары при той же температуре за 5 000 ч. Как уже отмечалось, дрейф проволоочной термопары ТХА с электродами диаметром 3,2 мм при температуре 1 077 °С достигает 300 мкВ за 800 ч, а при температуре 1 200 °С — за 300 ч. Повышенная стабильность кабельных термопар объясняется затруднением окисления термоэлектродов из-за ограниченного количества кислорода внутри кабеля, а также дополнительной защитой термоэлектродов от воздействия рабочей среды с помощью металлической оболочки и оксида магния.

При работе в потоках жидкости или газа, двигающихся с большой скоростью, высоких давлениях и температурах, а также в агрессивных средах кабельные термопреобразователи помещаются в защитные чехлы (гильзы), предохраняющие их от изгибов и разрушений, и служат в качестве сменных чувствительных элементов. Защитные чехлы имеют типовые габаритные размеры. Внешний вид преобразователя аналогичен традиционному внешнему виду промышленных термопар.

11.3.3. Термисторы

Существует особый класс датчиков — полупроводниковые термометры сопротивления, имеющие значительно больший, чем обычные ТС, температурный коэффициент сопротивления, равный 1...20 1/°С; причем знак этого коэффициента может быть как положительным (у позисторов), так и отрицательным (у термисторов). Это обеспечивает значительно более высокую чувствительность термометров на их основе. Основные преимущества: малые габаритные размеры и масса (следовательно, малая тепло-

емкость и тепловая инерционность), простота конструкции (следовательно, хорошие надежность и механическая прочность, а также низкая цена). Основные недостатки этих преобразователей: сравнительно узкий диапазон измеряемых температур (типично $-50 \dots +150^\circ\text{C}$), значительная нелинейность преобразования (сопротивление термисторов с ростом температуры уменьшается примерно по экспоненциальному закону), плохая повторяемость характеристики преобразования от экземпляра к экземпляру (что означает необходимость индивидуальной градуировки и затрудняет замену датчиков даже одного типа), значительная временная нестабильность характеристики, особенно при длительной работе на высоких температурах.

11.3.4. Интегральные полупроводниковые датчики

Интегральные датчики появились сравнительно недавно благодаря успехам микроэлектроники. Эти датчики обеспечивают выходной сигнал (напряжение или ток), практически линейно зависящий от температуры θ . Схемы подключения этих датчиков к собственно измерителю показаны на рис. 11.8.

На рис. 11.8, а приведена схема подключения интегрального датчика напряжения. Выходное напряжение $U = f(\theta)$ датчика через усилитель подается на вход цифрового вольтметра (ЦВ) или аналого-цифрового преобразователя (АЦП), преобразующего это напряжение, пропорциональное температуре, в цифровой код. Чувствительность таких датчиков обычно $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

Рис. 11.8, б иллюстрирует подключение интегрального датчика тока. Выходной ток $I = f(\theta)$ датчика преобразуется с помощью резистора R в пропорциональное напряжение и также подается на вход ЦВ или на вход АЦП, преобразующего далее это напряжение в цифровой код. Типичная чувствительность таких датчиков обычно составляет $1 \text{ мкА}/^\circ\text{C}$.

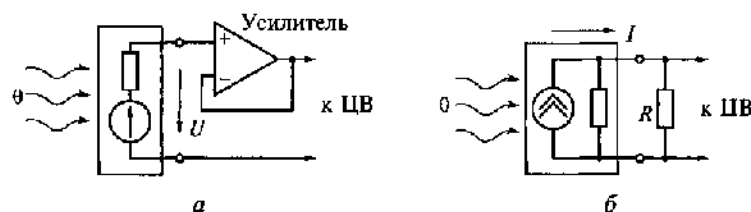


Рис. 11.8. Подключение интегральных полупроводниковых датчиков:

а — напряжения; б — тока

11.3.5. Сравнение различных датчиков температуры

Сравнить возможности различных датчиков температуры позволяет диаграмма на рис. 11.9, где показаны ориентировочные диапазоны применения наиболее распространенных первичных измерительных преобразователей температуры: термометров сопротивления — платиновых (ТСП) и медных (ТСМ); термоэлектрических преобразователей — термопар различных типов; термисторов; интегральных полупроводниковых датчиков и датчиков на основе кварцевых резонаторов.

Для динамических измерений температуры и регистрации быстроменяющихся тепловых процессов важным параметром является тепловая инерционность термоэлектрических преобразователей, которая в основном определяется конструкцией датчика и особенно устройством его защитной арматуры. В экспериментах с быстроменяющейся температурой, если не учитывать это обстоятельство, возможны значительные динамические погрешности. Это особенно важно для регистраторов и измерителей температуры, работающих в составе систем управления, где, как правило, необходимо обеспечение режима так называемого реального времени. Значение времени реакции датчиков на скачкообразное изменение температуры (времени достижения уровня 99 % асимптотического значения) лежит в диапазоне от единиц секунд до десятков минут. В отдельных специальных разработках конструкций термометров сопротивления (пленочных) и термисто-

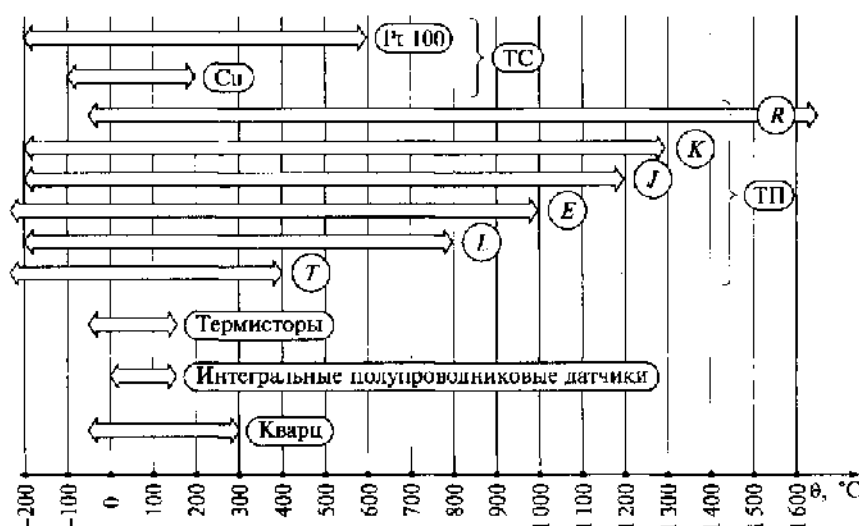


Рис. 11.9. Типичные диапазоны применения датчиков различных типов

ров могут быть достигнуты времена реакции термисторов в десятые доли секунды.

11.3.6. Цифровой термометр

Рассмотрим один из наиболее распространенных вариантов устройства цифрового термометра (ЦТ), входным датчиком которого является ТП.

На рис. 11.10 приведена упрощенная структура контактного ЦТ, которая напоминает структуру любого цифрового измерительного прибора.

Термопара подключается к входу усилителя, назначение которого поднять уровень входного сигнала с единиц-десятков милливольт до единиц вольт. Аналого-цифровой преобразователь преобразует усиленный сигнал ТП в цифровой код, пропорциональный уровню термоЭДС и, следовательно, значению измеряемой температуры. В автономных ЦТ, как правило, применяются АЦП, использующие интегрирующие методы преобразования, обеспечивающие высокие точность, чувствительность, разрешающую способность, высокое подавление периодических помех общего и нормального вида, уровень которых может быть значительным. Выходной код АЦП запоминается (и затем некоторое время хранится) в регистре и выводится на цифровой индикатор (цифровое отсчетное устройство). Микропроцессорный контроллер управляет работой всех узлов прибора. Он же выполняет функцию линеаризации характеристики ТО. С помощью клавиатуры оператор задает режимы работы. В структуре прибора может присутствовать интерфейс для обмена информацией с внешними цифровыми устройствами (например, для передачи результатов регистрации в персональный компьютер и (или) в систему автоматизированного управления).

Известны модели многоканальных ЦТ (чаще двухканальных). Отличие этих приборов — наличие коммутатора входных ТП, ко-

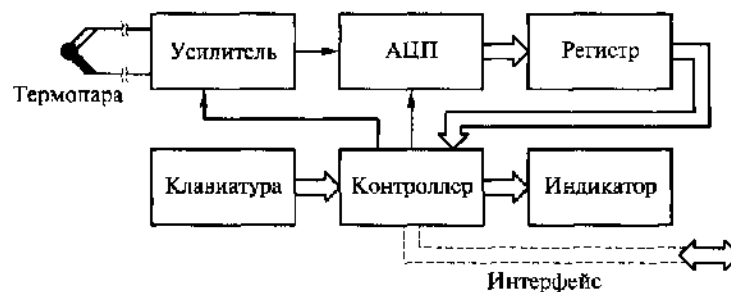


Рис. 11.10. Структура контактного цифрового термометра

торый позволяет поочередно подключать датчики ко входу усилителя. Двухканальные ЦТ обычно имеют режим измерения разности температур. Такие приборы называются дифференциальными термометрами.

Современные ЦТ отличаются малыми габаритными размерами и массой (100...500 г), сравнительно низкой стоимостью, достаточно высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

11.3.7. Особенности контактных измерений температуры

Даже при очень точном измерителе температуры можно получить большую погрешность результата из-за неправильной организации эксперимента, неудачной (неграмотной) установки датчиков на объекте. При контактных измерениях температуры поверхности необходимо учитывать следующие важные обстоятельства.

1. Если контакт датчика с объектом недостаточно хорош, мала площадь соприкосновения, то может иметь место слабая теплопередача от объекта к датчику. При этом в общем случае могут также возникать нежелательные тепловые потоки вдоль корпуса зонда (защитного чехла), которые также искажают результат измерения.

2. Датчик, установленный на поверхности объекта, в общем случае испытывает не только влияние интересующей экспериментатора температуры, но и температуры окружающей среды. Чем больше разница этих температур, тем сильнее может отличаться результат измерения от ожидаемого (истинного) значения. Кроме того, может сказываться естественная конвекция воздуха вокруг датчика.

3. Если теплоемкость объекта мала (масса и габаритные размеры невелики как, например, в случае исследования температуры поверхности контактной клеммы низковольтного маломощного электропривода), то возможно сильное влияние датчика (особенно массивного) на температуру исследуемого объекта (искажение режима объекта). Это приводит к появлению значительной погрешности взаимодействия в статических измерениях и к заметной динамической погрешности при изменениях температуры объекта.

4. Если интересует температура горячей воды, текущей внутри трубопровода, и есть результат измерения температуры внешней поверхности этого трубопровода, то необходимо отдавать себе отчет в том, что это не одно и то же. Разность результата измерения и фактической температуры воды может быть весьма значительной (несколько градусов).

Классическим примером проявления этих эффектов может служить эксперимент по определению температуры θ_4 (рис. 11.11)

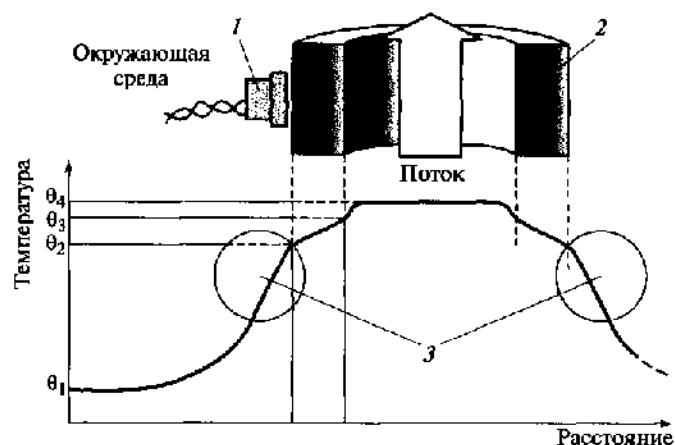


Рис. 11.11. Распределение температуры в пространстве:

θ_1 — температура окружающей среды; θ_2 — температура внешней поверхности трубы; θ_3 — температура внутренней поверхности трубы; θ_4 — температура потока; 1 — датчик; 2 — трубопровод; 3 — зоны высокого градиента температур

потока вещества (например, горячей воды), текущего внутри трубопровода, по результатам контактного измерения температуры θ_2 доступной внешней поверхности трубы при температуре окружающей среды θ_1 .

Поскольку датчик (термопара, термометр сопротивления или термистор) в общем случае испытывает влияние значительно различающихся температур (температуры внешней поверхности трубы θ_2 и температуры окружающего воздуха θ_1), то в результате измерения можно получить некое усредненное (интегральное) значение, сильно отличающееся от истинного значения температуры θ_2 . Этот результат совсем не будет похож на фактическое значение температуры θ_4 собственно потока среды, интересующей специалиста. Основные причины такого искажения результата: наличие значительного градиента (разницы) температур внешней стенки и окружающей среды и заметный градиент температур между внешней и внутренней стенками трубопровода.

Понятно, что для получения достаточно точных результатов при организации экспериментов по контактному измерению температуры необходимо тщательно продумывать установку датчиков на поверхности объекта, представлять возможное распределение температур. Можно сформулировать некоторые типовые рекомендации по организации подобных экспериментов.

Важно обеспечить хороший тепловой контакт датчика с объектом. Поверхность (площадь) соприкосновения датчика с объектом должна быть максимально возможной. Желательно использо-

вать теплопроводящие пасты, улучшающую теплопередачу от объекта к датчику. Необходимо позаботиться о теплоизоляции датчика в целях максимального уменьшения влияния окружающей среды. Применение даже простых подручных средств может дать хороший эффект (стекловата, обычная сухая ткань, резина и т. п.). При статических измерениях полезно дождаться установившегося режима, т. е. не торопиться фиксировать результат. При исследовании объектов с малой массой или быстропротекающих процессов необходимо использовать датчики с малой собственной массой, особенно в экспериментах, где важна малая динамическая погрешность.

Конечно, температуру внешней (доступной) поверхности трубопровода можно измерить с высокой точностью, но установить связь ее с температурой содержимого гораздо важнее (и одновременно сложнее). Следует попытаться определить эту связь теоретически (хотя бы с помощью грубой модели) или экспериментально, например, используя (там, где это возможно) стационарные термометры, погруженные в поток.

11.4. Бесконтактные методы и средства измерений температур

Бесконтактные измерения температуры незаменимы в тех случаях, когда нежелательно, невозможно, сложно или опасно обеспечить механический контакт датчика с объектом измерения.

Не так легко определить температуру находящегося в движении объекта, например быстродвижущейся бумажной ленты, или вращающегося барабана бетономешалки, или потока горячего асфальта. Иногда поверхность объекта, температура которого интересует, недоступна или небезопасна (например, при оценке перегрева контактного соединения воздушной линии электропередачи или высоковольтного трансформатора).

Другая ситуация: объект исследования имеет малые габаритные размеры и массу (следовательно, малую теплоемкость) и использование контактных термометров привело бы к очень большой методической погрешности (погрешности взаимодействия) за счет значительного количества тепла, отнимаемого датчиком прибора от объекта и, как следствие, недопустимого искажения режима его работы и, естественно, результата измерения. Особенно сильно это проявлялось бы при необходимости исследования достаточно быстрых изменений температуры исследуемого объекта малой массы, например в случае оценки температуры миниатюрных электронных узлов.

Бесконтактные методы и средства измерений температуры являются так называемыми неинвазивными, т. е. не требуют вмеша-

тельства в ход технологического процесса, не создают проблем с установкой датчиков, не требуют контакта с объектом исследования, не порождают погрешностей взаимодействия инструмента с объектом и некоторых других неприятностей.

Еще один класс задач, где использование бесконтактных методов и средств не только целесообразно, но и неизбежно (так как не имеет альтернативы) — измерение сверхвысоких температур (например, измерение температуры расплавленных металлов). Возможная верхняя граница контактно-измеряемых температур составляет 2 000... 2 500 °С, поэтому измерения более высоких температур производят только бесконтактными методами.

Бесконтактные методы измерения реализованы в различных инфракрасных (ИК) средствах измерения (InfraRed Instrumentation) — термометрах и измерительных преобразователях, а также в оптических термометрах — пирометрах. Инфракрасные измерители обеспечивают измерение температур в широком диапазоне температур (50... 5 000 °С). Оптические термометры (пирометры) принципиально пригодны лишь для измерения очень высоких температур, при которых поверхность объекта уже, видимо, светится (600 °С и выше). Кроме того, точность и чувствительность измерения оптическими термометрами невысоки.

Важными достоинствами ИК-термометров являются широкие диапазоны измеряемых температур, достаточно высокая точность, чувствительность и быстродействие, хорошие эксплуатационные характеристики, сравнительно невысокая стоимость. Однако не так просто реализовать основные преимущества ИК-термометров. Для достоверного результата измерения требуются достаточно высокая квалификация пользователя, знание специфики ИК-измерений, определенный опыт практических обследований.

11.4.1. Оптическое излучение

Любое тело, обладающее температурой выше абсолютного нуля (-273 °С), имеет тепловое излучение. С ростом температуры увеличиваются амплитуда и частота колебаний молекул вещества тела. Человек своими органами чувств (осязанием) воспринимает тепло и свет (зрением). Физическая природа колебаний одна и та же (тепловая), но частота колебаний различна и зависит от конкретной степени нагретости объектов. При температуре 600... 1 000 °С и выше (в зависимости от материала объекта) некоторое количество энергии тела излучается в видимой глазом части спектра.

В физике используется понятие «оптическое излучение», соответствующее электромагнитному излучению с длинами волн λ , расположенными в диапазоне 1 нм... 1 мм. Этот диапазон делится на три части. Рис. 11.12 иллюстрирует соотношение поддиапазо-

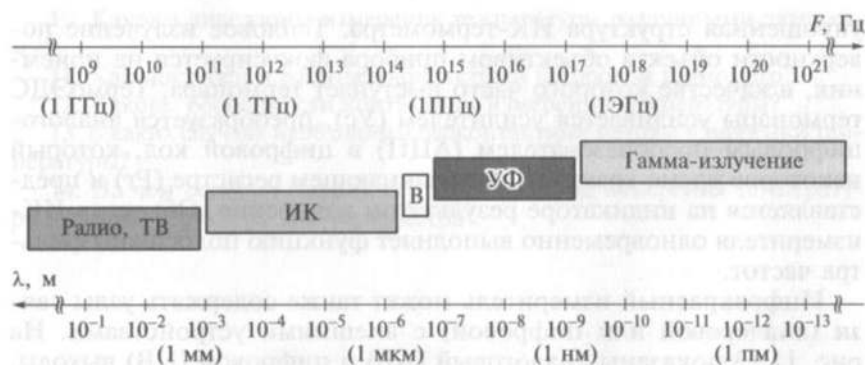


Рис. 11.12. Диапазоны частот F и длин волн λ различных излучений (в логарифмическом масштабе)

нов ИК-излучения, видимого (В), ультрафиолетового (УФ) и соседних излучений. Верхняя ось абсцисс показывает значения частот F , нижняя — соответствующие частотам значения длин волн λ (в логарифмическом масштабе).

Диапазон длин волн λ ультрафиолетового излучения составляет 1,0 нм... 0,38 мкм. Диапазон длин волн λ видимого излучения — 0,38... 0,76 мкм. Диапазон длин волн λ ИК-излучения — 0,76... 1 000 мкм.

11.4.2. Устройство ИК-термометра

Методы и приборы бесконтактного ИК-измерения основаны на количественной оценке инфракрасного (теплого) излучения объекта. Тепловое излучение обладает практически теми же свойствами, что и видимый человеком свет: распространяется прямолинейно, способно отражаться, преломляться, проникать сквозь некоторые тела, может быть сфокусировано оптической системой линз (не обязательно прозрачных) и т.д. На рис. 11.13 показана

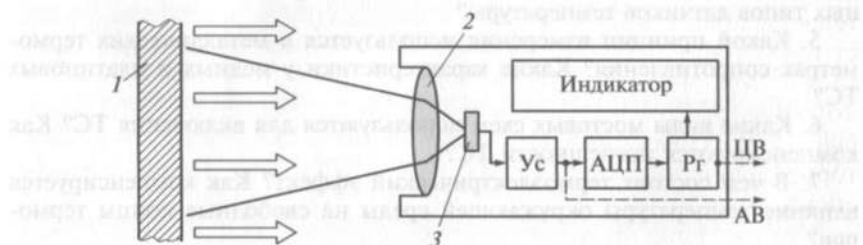


Рис. 11.13. Упрощенная структура ИК-термометра:

1 — объект; 2 — объектив; 3 — приемник

упрощенная структура ИК-термометра. Тепловое излучение поверхности объекта объективом прибора фокусируется на приемник, в качестве которого часто выступает термопара. ТермоЭДС термопары усиливается усилителем (U_c), преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в цифровой код, который некоторое время хранится в запоминающем регистре (P_t) и представляется на индикаторе результатом измерения. Объектив ИК-измерителя одновременно выполняет функцию полосового фильтра частот.

Инфракрасный измеритель может также содержать узлы связи (аналоговой или цифровой) с внешними устройствами. На рис. 11.13 показаны аналоговый (АВ) и цифровой (ЦВ) выходы. Наличие у ИК-термометра выхода аналогового сигнала, пропорционального текущему значению измеряемой температуры, позволяет подключить прибор к внешнему аналоговому самопишущему прибору или к цифровому измерительному регистратору.

Для задач длительного мониторинга применяются также инфракрасные измерительные преобразователи. Эти устройства не имеют индикатора, их выходной аналоговый сигнал представлен током (например, 4...20 мА), пропорциональным измеряемой температуре, или напряжением (например, 0...5 В). Они предназначены для работы совместно с показывающими приборами или с регистраторами в составе измерительных установок, комплексов или систем.

Контрольные вопросы

1. На каких принципах работают металлические термометры расширения?
2. Какие существуют разновидности жидкостных и газовых термометров?
3. Каковы температурные коэффициенты линейного расширения твердых тел и объемного расширения жидкости?
4. Какие существуют контактные методы и средства измерений температуры? Каковы основные характеристики наиболее распространенных типов датчиков температуры?
5. Какой принцип измерения используется в металлических термометрах сопротивления? Какие характеристики у медных и платиновых ТС?
6. Какие виды мостовых схем используются для включения ТС? Как компенсируются погрешности ТС?
7. В чем состоит термоэлектрический эффект? Как компенсируется влияние температуры окружающей среды на свободные концы термопар?
8. Каковы характеристики основных типов термопар?
9. Как работают полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы) и интегральные полупроводниковые датчики?

10. Каковы диапазоны измерения температуры различными датчиками?
11. Как построен и работает контактный цифровой термометр?
12. Каковы особенности контактных измерений температуры?
13. В каких случаях необходимы бесконтактные методы измерений температуры?
14. На чем основан бесконтактный ИК-метод измерения температуры? Какова структура ИК-термометра?

ГЛАВА 12

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

12.1. Общие сведения

Стремительное развитие науки и техники обуславливает широкое распространение электротехники и электроники, что, в свою очередь, стимулирует их дальнейшее развитие. Особенно следует отметить достигнутые успехи в области электрификации и разработки электронного оборудования для промышленности. Электрические системы привода обеспечивают получение больших мощностей для машиностроения, химической промышленности, транспорта и вносят существенный вклад в развитие экономики.

Функциональные параметры машин и получаемые изделия контролируются с помощью электронных систем. Электронные измерительные приборы обеспечивают получение доступной измерительной информации, которая сравнивается при помощи электронной вычислительной машины с находящимися в блоке памяти заданными значениями, и затем при отклонениях от заданных значений осуществляют соответствующую коррекцию.

Очевиден факт возросшего значения измерений электрических величин. Наряду с этим нельзя не заметить все расширяющийся объем электрических измерений неэлектрических величин, таких как геометрические, механические, тепловые, оптические, время и др. Следует указать на особые достоинства электрических измерений:

- высокая чувствительность (при электрическом преобразовании или усилении почти отсутствуют дополнительные погрешности преобразования) (табл. 12.1);
- высокая точность и воспроизводимость результатов (возможность регистрации быстро изменяющихся процессов, отсутствие обратного воздействия измерительной системы на измеряемый объект);
- почти неограниченная возможность усиления электрической мощности для измерительных целей;
- большой срок службы, малый износ и незначительные требования к уходу при эксплуатации;

Таблица 12.1

Погрешности измерения, достижимые в метрологических институтах

Измеряемая величина	Значение измеряемой величины	Средство измерений	Относительная погрешность измерения
Сила электрического тока	1 нА	Образцовый резистор	$1 \cdot 10^{-3}$
	1 мкА	и компенсатор	$2 \cdot 10^{-5}$
	1 А	То же	$2 \cdot 10^{-5}$
	1 кА	»	$2 \cdot 10^{-5}$
		»	$3 \cdot 10^{-4}$
Напряжение	1 мВ	Компенсатор	$5 \cdot 10^{-6}$
	1 В	»	$1 \cdot 10^{-5}$
	1 кВ	»	$1 \cdot 10^{-5}$
Сопротивление	1 МОм	Двойной мост Кельвина	$1 \cdot 10^{-6}$
	1 Ом	То же	$1 \cdot 10^{-7}$
	1 кОм	*	$5 \cdot 10^{-7}$
	1 МОм	Электрометрический мост	$2 \cdot 10^{-6}$
	1 ГОм	То же	$5 \cdot 10^{-6}$

• возможность монтажа как непосредственно на объекте измерения, так и на значительном расстоянии от него.

Любые данные, получаемые при измерении, можно фиксировать на любом расстоянии от объекта измерения, а также можно обеспечить местную или централизованную электронную обработку, контроль, регистрацию и документирование результатов измерений. Все большее значение при этом приобретает необходимость снижения объема получаемых данных путем группирования, получения средних значений и сигнализации о превышении предельных значений. Электрические измерительные устройства могут быть легко включены в системы регулирования и управления. Переход к цифровым измерительным устройствам приводит к снижению погрешностей при обработке результатов измерений и исключению субъективных погрешностей, возникающих при визуальном считывании результатов измерений.

Однако нельзя недооценивать все расширяющееся использование электрических измерительных систем в виде отдельных сопрягаемых функциональных блоков. Благодаря этому можно создавать системы из нескольких стандартизованных блоков для решения разнообразных измерительных задач. Экономическое значение таких решений заключается в сравнительно малых материальных затратах при разработке измерительной системы и в возможности относительно быстрой перестройки и переоборудования измерительной системы для решения других задач, а также

обеспечения более легкого монтажа и ремонта блоков и узлов. Кроме того, обеспечивается ускорение разработки новых приборов, поскольку блоки не должны вновь разрабатываться. Нельзя пренебрегать также преимуществами, связанными с удобствами представления результатов измерений. Переход к функционально типизированным средствам измерений позволяет улучшить всю организацию измерительного процесса с многих точек зрения, обеспечивая его унификацию, систематизацию и наглядность.

12.2. Электрические измерительные приборы и системы

12.2.1. Электромеханические измерительные приборы

Электроизмерительные приборы можно подразделить на следующие основные группы: электромеханические и электротермические (рис. 12.1).

Приборы магнитоэлектрической системы. Эти приборы могут работать на постоянном токе, а при использовании дополнительных преобразований — и на переменном токе (рис. 12.2, а).

В однородном магнитном поле постоянного магнита располагается на опорах рамка, которая может вращаться. Ток, проходя-



Рис. 12.1. Классификация электроизмерительных приборов

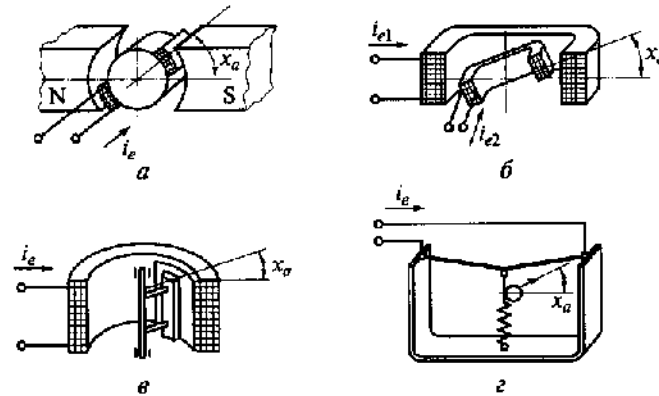


Рис. 12.2. Электроизмерительные приборы:

a — магнитоэлектрической системы; *б* — электродинамической системы; *в* — электромагнитные с подвижным сердечником; *г* — термоэлектрические с нагреваемой нитью

щий через витки этой рамки, имеет направление, перпендикулярное направлению магнитных линий поля.

Электрический ток подается через два пружинных элемента (ленточные растяжки, спиральные пружины), которые одновременно создают механический противодействующий момент. Действующий на рамку вращающий момент определяется следующим образом:

$$M_{\alpha} = \psi I_M = B_L A n I_M,$$

где I_M — измеряемая сила тока в рамке; B_L — магнитная индукция в воздушном зазоре; A — площадь рамки, которая пронизывается замкнутым магнитным потоком ψ ; n — число витков рамки.

Движение рамки описывается дифференциальным уравнением

$$\Theta \ddot{\alpha} + R \dot{\alpha} + c \alpha = M_r,$$

где Θ — момент инерции; R — коэффициент затухания; α — угол отклонения; c — жесткость пружины; M_r — устанавливающий момент.

Для стационарного состояния после завершения переходного процесса справедливо $\ddot{\alpha} = \dot{\alpha} = 0$ и $M_{\alpha} = M_r$, поэтому можно записать

$$\alpha = n A B_L I_M / c.$$

При измерении быстротекущих процессов измерительный механизм магнитоэлектрической системы ввиду инерционности дает среднее значение тока:

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T i_M dt = \bar{i}_M.$$

Важным преимуществом приборов магнитоэлектрической системы по сравнению с другими измерительными приборами является их высокая точность. Например, серийно изготавливаются приборы, имеющие погрешность не более 0,1 %.

При измерении с помощью приборов магнитоэлектрической системы заметное отрицательное влияние может оказывать температурное воздействие, поскольку при изменении температуры происходит изменение электрического сопротивления как рамки, так и противодействующей пружины. Кроме того, противодействующий момент также зависит от температуры.

Приборы электродинамической системы. Это измерительные приборы, основанные на принципе взаимодействия токов (рис. 12.2, б). Они могут применяться для измерений как на переменном, так и на постоянном токе.

Электродинамический измерительный прибор с замкнутой магнитной цепью работает как прибор магнитоэлектрической системы, но с той разницей, что вместо постоянного магнита используется электромагнит.

Для вращающего момента имеем

$$M_{\alpha} = B_F A n I_M,$$

где B_F — магнитная индукция в воздушном зазоре, создаваемая катушкой возбуждения (пропорциональна силе тока I_F в катушке возбуждения).

В электродинамическом измерительном приборе без ферромагнитного сердечника полностью отсутствуют ферромагнитные элементы. При возбуждении магнитного поля принцип действия прибора такой же, как у прибора с замкнутой магнитной цепью.

Ввиду слабого собственного магнитного поля электродинамические измерительные приборы без сердечника значительно больше, чем приборы с сердечником, подвержены помехам от воздействия внешних полей.

Особенностью электродинамических измерительных преобразователей является возможность получения в них произведения I_F и I_M . При $I_F = I_M$ виду инерционности показание прибора пропорционально квадрату эффективного значения тока любой формы:

$$\alpha \approx \frac{1}{T} \int_0^T i_M^2 dt = I_M^2_{\text{эф}}.$$

Шкала измерительного прибора градуирована таким образом, что непосредственно показывает эффективное значение тока.

Электромагнитные измерительные приборы с подвижным магнитом основаны на магнитоэлектрическом принципе (рис. 12.2, в). Они могут быть использованы для измерений на постоянном токе, а с дополнительными преобразователями — и на переменном токе.

В поле неподвижной катушки находится вращающийся постоянный магнит (магнитная игла, диск или полый цилиндр), который устанавливается в направлении постоянного внешнего поля (например, магнитного поля Земли). При прохождении тока вращающийся магнит перемещается в направлении результирующего поля, образуемого направляющим полем и полем катушки.

Прибор с подвижным магнитом представляет собой обращенный измерительный прибор магнитоэлектрической системы, т.е. катушка и постоянный магнит меняются местами. Основным достоинством измерительного прибора с подвижным магнитом является простота конструкции. Недостатком является слабое собственное поле, вследствие чего требуется защита от воздействия внешних полей.

Электроизмерительные приборы индукционной системы могут применяться только для измерений на переменном токе. Во вращающемся магнитном поле располагается подвижный замкнутый проводник (барабан или диск). В результате наведения вихревых токов подвижный проводник перемещается в направлении вращающегося магнитного поля. Само вращающееся поле образуется двумя обмотками переменного тока, поля которых сдвинуты пространственно на 90° относительно друг друга, а также смещены по фазе на $\pi/2$. Угол отклонения пропорционален произведению сил токов в обеих обмотках. Электроизмерительные приборы индукционной системы при равенстве обоих токов и сдвиге между ними на $\pi/2$ показывают квадрат эффективного значения.

Достоинством электроизмерительных приборов индукционной системы является отсутствие токоподводов к подвижному элементу. Закрытое исполнение хорошо защищает измерительный преобразователь от воздействия внешних полей.

Недостатком приборов индукционной системы является зависимость их показаний от частоты.

Электромагнитные измерительные приборы могут быть использованы для измерений на постоянном и переменном токах. Важнейшими типами этих приборов являются приборы с плоской и круглой катушками.

В приборах с плоской катушкой внутри катушки возбуждения находится эксцентрично закрепленная подвижная ферромагнитная пластина, ось поворота которой расположена перпендикулярно оси катушки возбуждения. При протекании электрического

тока пластинка под действием электромагнитного поля перемещается в катушке, т.е. поворачивается вокруг своей оси.

В приборе с круглой катушкой внутри катушки возбуждения находятся неподвижная и подвижная ферромагнитные пластинки, причем ось поворота последней параллельна оси катушки. При протекании электрического тока пластинки намагничиваются в одном направлении и, следовательно, отталкиваются друг от друга. При этом подвижная пластинка поворачивается в направлении меньшей ширины неподвижной пластинки.

Далее даны формулы, справедливые для обоих типов электромагнитных измерительных приборов. Вращающий момент, действующий на подвижную ферромагнитную пластинку,

$$M_{\alpha} = \frac{I_M^2}{2} \frac{dL}{d\alpha},$$

где I_M — измеряемая сила тока; L — индуктивность катушки возбуждения; α — угол отклонения.

Если изменение индуктивности $dL/d\alpha$, обусловленное конструктивными мерами, остается постоянным, то при $M_{\alpha} = M_r$ получаем

$$\alpha \approx I_M^2.$$

Электромагнитные измерительные приборы ввиду их простой конструкции значительно дешевле в изготовлении, чем остальные электроизмерительные приборы. Благодаря отсутствию подвижных токоподводов эти приборы допускают значительные перегрузки. Для защиты от действия полей помех они могут быть выполнены со стальными экранами. Следует иметь в виду также влияние частоты. Электромагнитные измерительные приборы представляют собой приборы для измерения эффективных значений.

Электростатические измерительные приборы могут быть использованы для измерений как на постоянном, так и на переменном токе.

Измерительный прибор состоит из конденсатора, электроды которого закреплены так, что имеется возможность, прикладывая электрическое напряжение, получать механическое усилие, действующее в направлении увеличения емкости. Изменение емкости может осуществляться путем изменения либо эффективной площади электродов, либо расстояния между электродами. Вращающий момент, действующий на подвижные электроды,

$$M_{\alpha} = \frac{U_M^2}{2} \frac{dC}{d\alpha},$$

где U_M — измеряемое напряжение; C — емкость конденсатора.

Если изменение емкости поддерживается постоянным, то для угла отклонения при $M_\alpha = M_r$ справедливо соотношение

$$\alpha \approx U_M^2.$$

Для электростатических измерительных приборов характерно очень малое потребление энергии (теоретически нулевое). К достоинству этих приборов следует отнести незначительное влияние температуры и частоты. Недостатком является заметное влияние внешних электростатических полей, которые могут привести к существенному искажению результатов измерений. Электростатические измерительные приборы измеряют эффективные значения.

12.2.2. Термозлектрические измерительные приборы

Измерительные приборы с нагреваемой нитью позволяют проводить измерения на постоянном или переменном токе и измерять эффективные значения (рис. 12.2, з). Через проволоку длиной l_0 протекает измеряемый ток. При этом в зависимости от силы тока I_M изменяются температура ϑ и длина l_0 проводника. Изменение длины Δl проводника составит

$$\Delta l \approx I_M^2.$$

Биметаллические приборы также основаны на термозлектрическом принципе измерения. Они используются для измерений на постоянном и переменном токе и измеряют эффективные значения. Биметаллическая полоска нагревается непосредственно измеряемым током силой I_M или с помощью изолированной обмотки. Спиралеобразная, укрепленная с одной стороны, биметаллическая пластинка нагревается и искривляется в зависимости от силы измеряемого тока I_M вследствие различных коэффициентов линейного расширения обоих металлов.

Деформация пластинки пропорциональна разности изменений длин металлических слоев:

$$\alpha = I_M^2.$$

Термозлектрические измерительные приборы обладают преимуществом перед остальными электроизмерительными приборами, заключающимся в том, что на результаты измерений не оказывают влияния внешние поля. В качестве недостатка можно указать влияние внешних температурных условий, что, однако, можно почти полностью исключить путем соответствующего выбора материалов. Кроме того, необходимо довольно часто проверять установку нуля. Биметаллические приборы измеряют эффективные значения.

Термоэлектрические приборы могут быть использованы для измерений на постоянном и переменном токах. Они наиболее предпочтительны для измерений высокочастотных токов. Термоэлектрические преобразователи состоят из проволоки, которая нагревается протекающим через нее измеряемым током I_M . В середине проволоки помещается измерительный участок термоэлемента. Возникающая термоЭДС пропорциональна температуре нагрева. Термоэлектрические приборы служат для измерения эффективных значений.

Погрешности, возникающие при неправильном выборе пределов измерений, можно снизить или исключить путем использования усилителей либо ослабителей, позволяющих расширить диапазон измерений (рис. 12.3).

При измерении силы тока расширение диапазона измерений осуществляется путем отщепления тока (рис. 12.3, а). При этом часть измеряемого тока направляется через градуированный (измерительный) температурно-независимый резистор. Для того чтобы одновременно исключить погрешности, возникающие в результате влияния температуры на медную обмотку, последовательно с ней подключается температурно-независимый настроечный резистор достаточно большого сопротивления

$$R_V \gg R_{GI}$$

где R_V — сопротивление настроечного резистора; R_{GI} — сопротивление измерительного резистора.

Однако если необходимо, чтобы весь измеряемый ток протекал через измерительную катушку (например, в электромагнитном измерительном приборе), то диапазон измерений может быть расширен путем соответствующего деления измерительной ка-

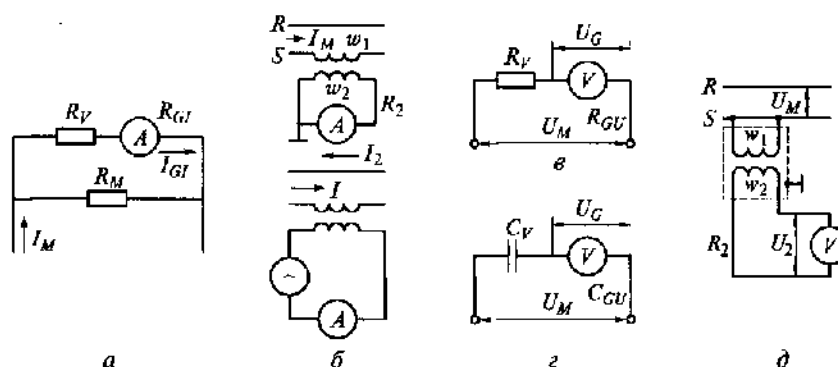


Рис. 12.3. Схемы, расширяющие диапазон измерений:

а — делитель тока; б — преобразователь тока; в — делитель напряжения; г — емкостный делитель напряжения; д — преобразователь напряжения

тушки на секции. При этом отдельные секции катушки могут быть включены последовательно или параллельно.

Для измерения больших значений переменного тока расширение диапазона измерений осуществляется с помощью трансформаторов тока (рис. 12.3, б). При этом коэффициент трансформации выбирается таким образом, чтобы обеспечивалась возможность непосредственного подключения к амперметру.

При измерении напряжения расширение диапазона измерений часто осуществляется путем последовательного подключения резистора (рис. 12.3, в). Для одновременного снижения вредного температурного влияния на преобразователь (потребление мощности катушки из медной проволоки зависит от окружающей темпера-

Таблица 12.2

Электрические измерительные системы

Наименование	Электромеханический измерительный прибор	Регулируемый вручную компенсатор	Автоматический компенсатор
Пределы измерений	В зависимости от цели применения	0,2 мВ ... 2 В	1 мВ ... 1 кВ 5 Ом ... 1 МОм 10 мкА ... 1 А
Погрешность измерения, %	$\pm (0,5 \dots 2,5)$	$\pm (0,02 \dots 0,1)$	$\pm (0,2 \dots 0,5)$
Инерционность, с	1	100	1,5; 2,5; 5; 10; 20
Достоинства	Нечувствителен к механическим воздействиям (надежный), дешевый, характеризуется универсальным применением	Нечувствителен к механическим воздействиям (надежный), высокая точность компенсации	Автоматическое уравнивание (компенсация), обеспечение регистрации измеряемого сигнала
Недостатки	Медленнодействующий	Большая трудоемкость измерений	Ограниченная точность, инерционный (медленнодействующий)
Применение	Индикация всех физических величин, представляемых с помощью электрического сигнала	Точные измерения небольших напряжений, таких как термоЭДС и др.	Измерения и регистрация электрического напряжения, силы тока и сопротивления

туры) применяют резистор из материала, сопротивление которого не зависит от температуры (константан, манганин). Сопротивление этого резистора должно быть велико по сравнению с сопротивлением резистора преобразователя напряжения: $R_V \gg R_{GU}$, где R_{GU} — сопротивление резистора преобразователя напряжения.

В электростатических измерительных приборах с малым потреблением мощности и чисто емкостным сопротивлением диапазон измерений можно расширить путем последовательного подключения конденсатора или при помощи емкостного делителя напряжения (рис. 12.3, *г*).

Поскольку емкость C_{GU} вольтметра изменяется в зависимости от угла отклонения α , необходимо проводить градуировку при использовании каждого последовательно подключаемого конденсатора. В этом случае для расширения диапазона измерений наиболее целесообразно использовать последовательно-параллельно подключенные конденсаторы C_V . Хотя и в этом случае емкость измерительного прибора C_{GU} изменяется в зависимости от угла отклонения α , однако если емкость C_V выбирается значительно больше емкости C_{GU} , то можно пренебречь небольшими погрешностями, возникающими при измерении.

При измерении переменного напряжения диапазон измерений может быть расширен с помощью трансформатора напряжения, обеспечивающего возможность непосредственного подключения к вольтметру (рис. 12.3, *д*).

В табл. 12.2 представлены основные характеристики наиболее распространенных измерительных систем.

Контрольные вопросы

1. В чем состоят достоинства электрических измерений?
2. Каковы диапазоны измерений электрических величин?
3. Какие минимальные погрешности достижимы в настоящее время при измерении силы тока, напряжения и электрического сопротивления?
4. Какие существуют виды электромеханических измерительных приборов?
5. Какие известны виды термоэлектрических измерительных приборов?
6. Какие схемы применяются для расширения диапазона измерения тока?
7. Каким образом можно расширять диапазон измерения напряжения?
8. Какие приборы и преобразователи могут быть использованы для измерений на постоянном и переменном токах?
9. Какие преобразователи предпочтительно использовать при измерении высокочастотных токов и напряжений?

ГЛАВА 13

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

13.1. Основы теории и конструкции приборов прямого действия

Электромеханический измерительный прибор прямого действия представляет собой прибор, в котором положение подвижной части зависит от значения измеряемой величины. В таком приборе происходит одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении без применения обратной связи. Независимо от назначения и принципа действия такие приборы (рис. 13.1) состоят из измерительной цепи (ИЦ), измерительного механизма (ИМ) и отсчетного устройства (ОУ).

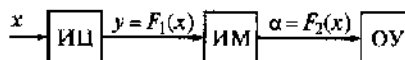
Измерительная цепь — совокупность преобразовательных элементов средств измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации. В измерительной цепи происходит одно из ряда последовательных преобразований измеряемой величины x в функционально связанную с ней электрическую величину y .

Измерительный механизм — часть конструкции средства измерений, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение. В таком механизме электромагнитная (или электростатическая) энергия, пропорциональная величине y , преобразуется в пропорциональную механическую энергию перемещения подвижной части.

Отсчетное устройство — это часть конструкции средства измерений (например, шкала и стрелка), предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины.

Общие узлы и детали аналоговых приборов. Электромеханические аналоговые приборы в зависимости от назначения и принципа действия имеют различные конструкции и типы измерительных механизмов. Несмотря на конструктивные различия приборов они имеют много общих элементов: корпус прибора, не-

Рис. 13.1. Структурная схема электромеханического прибора прямого действия



подвижную и подвижную части, противодействующие устройства, успокоитель, отсчетное устройство, корректор и аррети́р.

Корпус прибора служит для крепления всех узлов и деталей и для их предохранения от внешних воздействий.

Неподвижная часть у большинства приборов представляет собой катушку (с магнитопроводом или без магнитопровода). Некоторые приборы имеют неподвижную часть, выполненную в виде постоянного магнита или проводника (пластины).

Подвижная часть приборов выполняется в виде постоянного магнита, катушки или проводника (диска). Для вращения подвижной части вокруг оси ее крепят в опорах или подвешивают на растяжках или подвесах. Оси и опоры могут быть различных конструкций в зависимости от типа и назначения прибора.

Для создания противодействующего момента большинство приборов снабжены токопроводящими спиральными или ленточными пружинами. Особенностью спиральных пружин является почти прямая связь создаваемого противодействующего момента и угла закручивания. Благодаря применению растяжек или подвесов увеличивается чувствительность прибора и уменьшается его собственное потребление энергии за счет уменьшения трения в механизме. Противодействующие устройства изготавливают из упругих металлов — оловянно-цинковой и бериллиевой бронзы или платиново-серебряных и алюминиевых сплавов.

Успокоитель необходим для обеспечения требуемого времени успокоения подвижной части прибора. В аналоговых прибо-

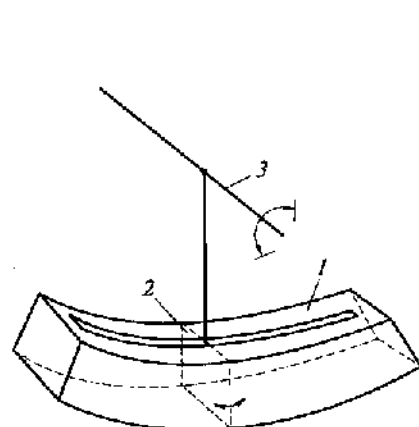


Рис. 13.2. Воздушный успокоитель:
1 — камера; 2 — легкое алюминиевое крыло; 3 — подвижная часть прибора

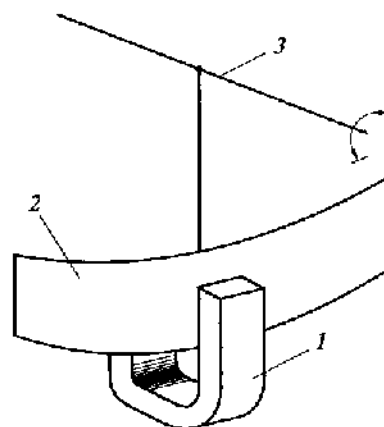


Рис. 13.3. Магнитоиндукционный успокоитель:
1 — постоянный магнит; 2 — сердечник; 3 — подвижная часть прибора

рах применяют воздушные, магнитоиндукционные или жидкостные успокоители.

Воздушный успокоитель (рис. 13.2) представляет собой закрытую камеру 1, в которой перемещается легкое алюминиевое крыло 2 или поршень, соединенные с подвижной частью прибора 3. При перемещении последней между частями камеры создается перепад давлений, вследствие чего происходит торможение крыла или поршня, способствующее успокоению подвижной части прибора. В современных аналоговых приборах воздушные успокоители применяются редко.

Магнитоиндукционный успокоитель (рис. 13.3) состоит из постоянного магнита 1, между полюсами которого перемещается укрепленный на неподвижной части прибора сердечник 2 из немагнитного материала (или короткозамкнутый проводник). При перемещении подвижной части прибора 3 в сердечнике (короткозамкнутом проводнике) индуцируется ток, который, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создает успокоительный момент.

Магнитоиндукционные успокоители просты и удобны в эксплуатации. Они обеспечивают лучшее, чем воздушные, успокоение. Вместе с тем применять их можно только в приборах, на магнитные цепи которых не оказывает влияния дополнительное магнитное поле успокоителя.

Жидкостные успокоители (рис. 13.4) используют вязкис свойства кремнийорганических жидкостей. Успокоитель состоит из двух дисков, один из которых укреплен на подвижной части прибора, а другой — на неподвижной. В зазоре между дисками (не превышающем нескольких долей миллиметра) за счет сил поверхностного натяжения удерживается полисилоксановая жидкость 4. Успокоение подвижного диска происходит за счет вязкости жидкости и из-за трения между ее слоями. Применение жидкостных успокоителей позволяет уменьшить массу и габариты аналоговых приборов.

Отсчетное устройство аналогового прибора состоит из шкалы (или нескольких шкал) и указателя. Шкала является ча-

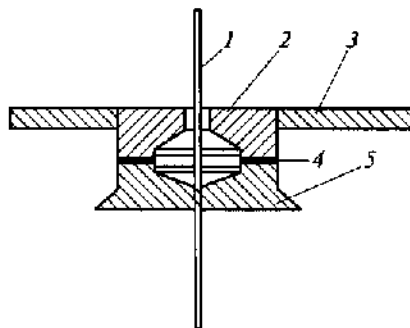


Рис. 13.4. Жидкостный успокоитель:

1 — ось; 2 — неподвижная втулка; 3 — панель; 4 — жидкость; 5 — подвижная втулка

стью отсчетного устройства, представляющей совокупность отметок и проставленных у некоторых из них чисел отсчета или других символов, соответствующих ряду последовательных значений величины. Характер шкалы зависит от вида связи вращающего момента с полученной после преобразования в приборе электрической величиной. Если эта связь линейная, шкала прибора равномерная, и, наоборот, при нелинейной связи шкала неравномерная (степенная, логарифмическая и др.). Кроме того, шкалы выполняют нулевыми или безнулевыми, а в зависимости от расположения нулевой отметки — симметричными и несимметричными, односторонними и двусторонними.

Указателем отсчетного устройства является часть его конструкции, положение которой относительно отметок шкалы определяет показание прибора. Указатели разделяют на стрелочные, световые и цифровые индикаторы. Стрелочные указатели выполняют в виде копья, ножа или нити. В качестве светового указателя применяют оптические устройства, проектирующие световой луч при помощи системы зеркал на неподвижную шкалу прибора. В интегрирующих аналоговых приборах применяются механические цифровые индикаторы, которые представляют собой роликовый счетный механизм — счетчик оборотов. Особенностью цифровых индикаторов является объективность отсчета, но вместе с тем для их работы требуется дополнительная энергия, что увеличивает собственное потребление мощности прибором.

Корректор в аналоговом приборе необходим для установки указателя против нулевой отметки шкалы при выключенном приборе. Изменения температуры, остаточные явления в механизме прибора могут привести к смещению его указателя с нулевой отметки шкалы. Эти факторы устраняют корректором, выполненным в виде поводка, связанного с подвижной частью механизма.

Арретир позволяет неподвижно закрепить (или закоротить) неподвижную часть прибора при его транспортировке или монтаже.

Моменты, действующие на подвижную часть прибора. Механические силы, действующие на подвижную часть прибора, создают вращающий момент. Его значение зависит от полученной после преобразования электрической величины U и взаимного расположения подвижной и неподвижной частей измерительного механизма (углом α):

$$M_{\text{вр}} = \gamma^n F(\alpha) = dW_{\text{э}}/d\alpha, \quad (13.1)$$

где γ — коэффициент, зависящий от системы прибора, в большинстве случаев он равен 1 или 2; $dW_{\text{э}}/d\alpha$ — производная электромагнитной энергии.

Воздействие на подвижную часть прибора только вращающего момента не позволяет определить измеряемую величину, так как

указатель прибора будет перемещаться на максимальный (бесконечный) угол. Чтобы отклонение указателя однозначно зависело от измеряемой величины, необходим противодействующий момент, возрастающий с увеличением угла перемещения подвижной части (указателя) прибора. В современных аналоговых приборах противодействующий момент создается двумя способами:

- при помощи спиральных пружин или нитей (растяжек и подвесов), один конец которых крепится к подвижной, а другой к неподвижной частям прибора. Противодействующий момент такого устройства пропорционален углу закручивания (раскручивания) пружины (растяжки):

$$M_{\text{пр}} = \alpha W, \quad (13.2)$$

где W — удельный противодействующий момент, зависящий от геометрических размеров и материала пружины (растяжки);

- за счет энергии электромагнитного поля (в логометрах). В этом случае противодействующий момент создается так же, как и вращающий.

Таким образом, вращающий момент, возникающий в измерительном механизме, закручивает (раскручивает) противодействующую пружину (или изменяет энергию электромагнитного поля) и перемещает подвижную часть до тех пор, пока вращающий момент не станет равным противодействующему:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}. \quad (13.3)$$

В результате такого равенства подвижная часть, а соответственно и указатель прибора достигают установившегося положения.

Подставляя значения моментов из выражений (13.1) и (13.2) в равенство (13.3), можно получить зависимость угла перемещения подвижной части механизма от значения измеряемой величины и конструктивных параметров прибора:

$$\alpha = \frac{y^n}{W} F(\alpha), \quad (13.4)$$

где $F(\alpha)$ — характеристика изменения кинетической энергии механизма в зависимости от угла перемещения его подвижной части.

При изменении измеряемой величины соответственно изменится и вращающий момент, что приведет к нарушению равенства (13.4). Поэтому подвижная часть прибора под действием разности моментов будет перемещаться в ту или иную сторону до момента равновесия. Время, необходимое для такого перемещения, называют временем успокоения подвижной части прибора, а устройства, обеспечивающие успокоение, — успокоителями.

Подвижную часть электромеханических приборов крепят на оси, которая вращается в опорах. Поэтому на отклонение подвижной

части оказывает влияние сила трения, возникающая между опорой и осью. Влияние трения проявляется при незначительном изменении измеряемой величины, когда вращающий момент не в состоянии преодолеть силу трения и подвижная часть не изменяет своего положения. С увеличением трения уменьшается чувствительность прибора. Сила трения в электромеханических приборах определяется моментом трения, который зависит от массы подвижной части и способа ее установки:

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} G^n, \quad (13.5)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения; G — масса подвижной части прибора; n — число, зависящее от способа установки подвижной части, $n = 1, 3 \dots 1, 5$.

Влияние трения между осью и опорой механизма прибора тем меньше, чем больший вращающий момент развивает механизм при одной и той же измеряемой величине.

13.2. Магнитоэлектрические приборы

Принцип действия магнитоэлектрических приборов основан на взаимодействии магнитного потока постоянного магнита и поля контура с током. Возникающий при этом вращающий момент поворачивает подвижную часть (катушку или постоянный магнит) относительно неподвижной. Конструктивно механизмы таких приборов выполняются с подвижной катушкой или с подвижным постоянным магнитом.

Однорамочные приборы. Магнитоэлектрические приборы с подвижным магнитом имеют большой (по сравнению с приборами с неподвижным магнитом и подвижной катушкой) диапазон измерений, малые габаритные размеры и невысокую стоимость. Однако невысокие точность и чувствительность, а также зависимость вращающего момента от угла перемещения подвижной части ограничивают их применение.

Большое распространение вследствие высокой чувствительности и точности получили однорамочные приборы с подвижной катушкой (с внешним магнитом). Механизм таких приборов состоит из постоянного магнита 3 с полюсными наконечниками 7, между которыми расположен неподвижный сердечник 8 из магнитомягкого материала (рис. 13.5). Магнит, полюсные наконечники и сердечник необходимы для создания радиального магнитного поля. В пространстве между сердечником и полюсными наконечниками помещается прямоугольная подвижная катушка 9 из тонкого провода, иногда намотанного на алюминиевом каркасе. Измеряемый ток подводится к катушке через две спиральные пружины.

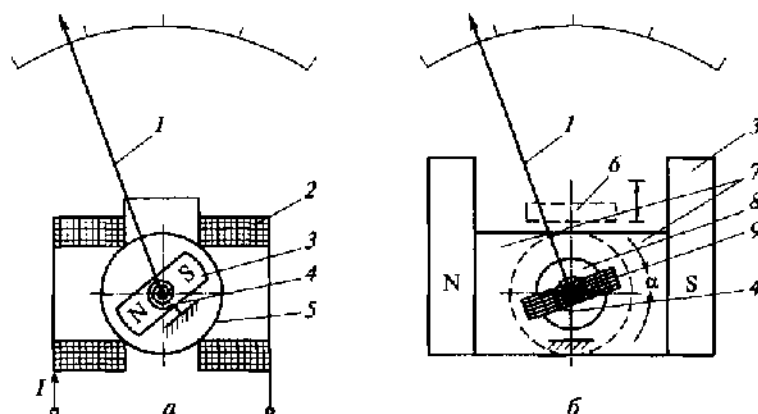


Рис. 13.5. Схема устройства магнитоэлектрического прибора:

a — с подвижным магнитом; *б* — с подвижной катушкой; 1 — стрелка; 2 — неподвижная катушка; 3 — постоянный магнит; 4 — спиральная пружина; 5 — цилиндр; 6 — шунт; 7 — полюсные наконечники; 8 — неподвижный сердечник; 9 — подвижная катушка

жины 4, создающие противодействующий момент. Стрелка (указатель) 1 и шкала образуют отсчетное устройство прибора.

При протекании измеряемого тока по подвижной катушке механизма на часть витков, находящихся в равномерном радиальном поле, действуют силы, образующие вращающий момент, который зависит от энергии магнитного поля системы. Известно, что энергия W_ψ системы, состоящей из постоянного магнита и катушки с током I , определяется произведением

$$W_\psi = \psi I, \quad (13.6)$$

где ψ — потокосцепление потока постоянного магнита с витками подвижной катушки.

Если подставить значение W_ψ из уравнения (13.1) в уравнение (13.6), то получим

$$M_{\text{вр}} = Id\psi/d\alpha. \quad (13.7)$$

Взаимодействие полей магнитной системы вызывает поворот подвижной катушки на некоторый угол α . Поэтому потокосцепление может быть вычислено по формуле

$$\psi = \frac{BbI\alpha}{2} 2w, \quad (13.8)$$

где B — магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл; b и l — соответственно ширина и длина катушки, м.

Тогда

$$\psi = 2w \frac{Bs\alpha}{2} = Bws\alpha, \quad (13.9)$$

где w — число витков катушки; s — активная площадь катушки, м^2 .

Вращающий момент, действующий на катушку, определяется при подстановке значения потокосцепления ψ из формулы (13.8) в формулу (13.7):

$$M_{\text{вр}} = BswI. \quad (13.10)$$

Установившееся положение подвижной катушки наступает при равенстве вращающего и противодействующего моментов (см. формулу (13.2)), т.е. с учетом выражения (13.3) $BswI = \alpha W$. Тогда угол отклонения указателя прибора

$$\alpha_y = \frac{Bsw}{W} I = SI, \quad (13.11)$$

где S — чувствительность прибора к току, $S = \frac{Bsw}{W}$.

Уравнение (13.11) показывает, что угол отклонения указателя пропорционален силе тока, а чувствительность прибора не зависит от угла, так как является конструктивным параметром. Следовательно, шкала магнитоэлектрического прибора равномерная. Чувствительность таких приборов можно регулировать при помощи магнитного шунта b (см. рис. 13.5), от положения которого зависит значение магнитной индукции в зазоре механизма.

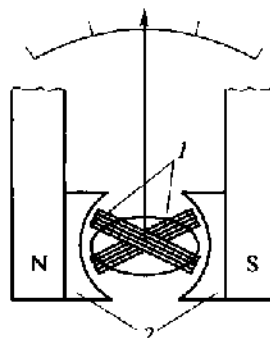
Успокоение подвижной части магнитоэлектрических приборов магнитоиндукционное, т.е. осуществляется за счет моментов успокоения, создаваемых витками подвижной катушки и каркасом. Однако основное влияние на значение момента успокоения оказывает взаимодействие магнитного потока механизма с вихревыми токами, возникающими в алюминиевом каркасе при его движении в поле постоянного магнита.

Подвижная часть магнитоэлектрического прибора обладает относительно большим моментом инерции. Поэтому при включении прибора в цепь синусоидального тока по его катушке протекает ток $I_m \sin \omega t$, среднее значение которого за период равно нулю. Вследствие этого и среднее значение вращающего момента также равно нулю.

Логометрические магнитоэлектрические приборы. В логометрических приборах (рис. 13.6) подвижная часть I , представляющая собой две катушки, укрепленные на одной оси, помещена в поле постоянного магнита 2. Форму неподвижного сердечника и полюсных наконечников постоянного магнита выбирают такой, чтобы индукция в воздушном зазоре была неравномерной и имела

Рис. 13.6. Схема устройства магнитоэлектрического логометра:

1 — подвижная часть; 2 — полюсы постоянного магнита



нерадиальное направление. Так как в приборе не требуется противодействующий момент, подвижные катушки включаются в цепь через «безмоментные» проводники. Поэтому подвижная часть прибора при отсутствии тока в катушках занимает произвольное положение.

Направления токов в катушках выбирают таким образом, чтобы моменты $M_1 = Bs_1 w_1 I_1$ и $M_2 = Bs_2 w_2 I_2$ были направлены в противоположные стороны.

Под действием этих моментов подвижная часть прибора поворачивается в сторону действия большего момента до их равенства (при повороте подвижной части моменты изменяются, так как одна из катушек из малого воздушного зазора с большей индукцией перемещается в больший зазор с меньшей индукцией, а другая — наоборот). При установившемся положении

$$Bs_1 w_1 I_1 = Bs_2 w_2 I_2,$$

откуда

$$I_1 / I_2 = Bs_2 w_2 / (Bs_1 w_1).$$

Тогда

$$I_1 / I_2 = k \frac{F_2(\alpha)}{F_1(\alpha)}. \quad (13.12)$$

Логометрические механизмы широко используются в приборах для измерения сопротивлений — омметрах и мегомметрах.

Достоинства магнитоэлектрических приборов: высокая чувствительность, большой вращающий момент при малых измеряемых токах, высокая стабильность элементов и малые влияния внешних магнитных полей — позволяют создавать приборы классов точности до 0,05 с малым собственным потреблением мощности (потребляемая мощность магнитоэлектрических амперметров не превышает нескольких долей ватта).

Недостатки магнитоэлектрических приборов: сложность конструкции, высокая стоимость, невысокая перегрузочная способность (ограничена допустимой плотностью тока противодействующих пружин) и пригодность для измерений только в цепях постоянного тока.

Магнитоэлектрические приборы широко применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока.

13.3. Магнитоэлектрические гальванометры

Общие сведения. Гальванометры — магнитоэлектрические приборы высокой чувствительности. Большое распространение получили магнитоэлектрические гальванометры с подвижной катушкой (рамкой) и световым указателем (рис. 13.7). Подвижная часть такого прибора состоит из рамки 1, по которой протекает измеряемый ток, и зеркала 2, укрепленного на токопроводящих подвесках (растяжках) 3. Подвижное зеркало освещается лампой 4, а отраженный от зеркала световой луч попадает на шкалу 5. Гальванометры с встроенными и выносными шкалами обычно градуируют условно.

Основные параметры и характеристики гальванометра определяют по результатам исследования переходных процессов, происходящих в его механизме при включении или выключении. Из механики известно, что процесс колебания массы описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Левая часть этого уравнения — момент количества движения, а правая — сумма всех моментов, действующих на колеблющуюся массу. Частное решение дифференциального уравнения движения подвижной части гальванометра позволяет определить конечное значение перемещения. В результате общего решения дифференциального уравнения получаются три вида зависимостей $\alpha_y = F(t)$, отражающих характер движения подвижной части гальванометра. Анализ этих зависимостей показывает, что возможны три характерных режима гальванометра (рис. 13.8):

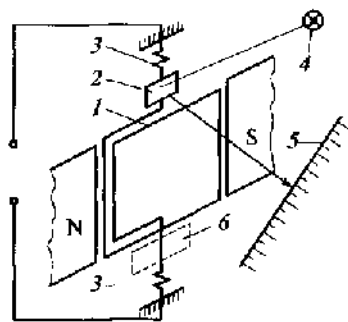


Рис. 13.7. Схема устройства магнитоэлектрического гальванометра: 1 — рамка; 2 — зеркало; 3 — подвески (растяжки); 4 — лампа; 5 — шкала; 6 — баллистическая масса

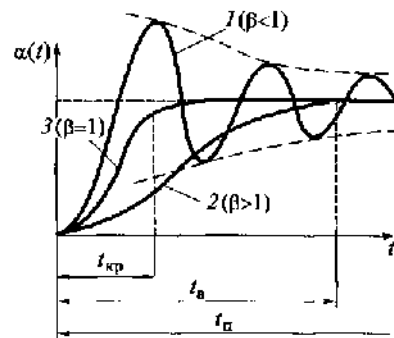


Рис. 13.8. Режимы движения подвижной части гальванометра при различной степени успокоения: 1 — периодический; 2 — аperiodический; 3 — критический

периодический (кривая 1), если подвижная часть совершает колебательные движения около установившегося положения за время t_n ;

аперриодический (кривая 2), при котором подвижная часть достигает установившегося положения без колебаний за время t_n , меньшее, чем при периодическом режиме;

критический (кривая 3), при котором подвижная часть достигает установившегося положения без колебаний за минимальное время $t_{кр}$.

Одним из важнейших параметров гальванометра является *степень успокоения* (β), которая оказывает существенное влияние на режим работы подвижной части гальванометра. Значение степени успокоения β выбирается в зависимости от параметров цепи, в которую включен гальванометр:

$$\beta = \frac{R_r + R_{вн.кр}}{R_r + R_{вн}}, \quad (13.13)$$

где R_r — сопротивление катушки (рамки) гальванометра, Ом; $R_{вн.кр}$ — критическое сопротивление внешней цепи, Ом; $R_{вн}$ — сопротивление внешней цепи, Ом.

Критическим сопротивлением внешней цепи называется то наибольшее сопротивление, при котором подвижная часть гальванометра, двигаясь аперриодически, достигает установившегося положения за минимальное время.

На практике магнитоэлектрические гальванометры используют в критическом режиме, когда $R_{вн.кр} = R_{вн}$ и время успокоения t_y подвижной части минимально (рис. 13.9).

Если внешняя цепь гальванометра разомкнута ($R_{вн} = \infty$; $\beta = 0$), его подвижная часть совершает свободные колебания с частотой ω_0 и периодом T_0 :

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (13.14)$$

Важнейшим параметром гальванометра является его *чувствительность*. При использовании гальванометра для измерения силы тока его характеризуют чувствительностью к току

$$S_I = \alpha/I, \quad (13.15)$$

при измерении напряжения — чувствительностью к напряжению

$$S_U = \alpha/U, \quad (13.16)$$

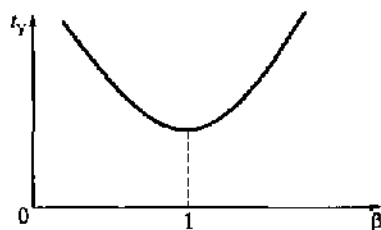


Рис. 13.9. Зависимость времени успокоения от степени успокоения гальванометра

которые связаны между собой соотношением

$$S_U = S_I / R_T. \quad (13.17)$$

Выпускаемые промышленностью магнитоэлектрические гальванометры имеют чувствительность к току, достигающую 10^{11} мм/(А · м).

Баллистический гальванометр. Магнитоэлектрический гальванометр с увеличенным (по сравнению с гальванометром, рассмотренным ранее) моментом инерции подвижной части называют баллистическим. Увеличения момента инерции достигается путем увеличения баллистической массы b (см. рис. 13.7). В этом случае гальванометр используется в качестве интегратора тока.

Импульс тока, протекающий по бескаркасной катушке (рамке) гальванометра, взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и вызывает кратковременный импульс вращающего момента. Воздействие на подвижную часть гальванометра импульса вращающего момента вызывает ее баллистический бросок, а затем возвращение в исходное состояние под действием противодействующего момента. Такой режим работы гальванометра возможен при соблюдении следующего соотношения между длительностью импульса тока t_n и периодом свободных колебаний T_0 его подвижной части: $t_n \ll T_0$.

Значение баллистического броска подвижной части гальванометра определяют по формуле

$$\alpha_b = 2\pi \frac{S_I}{T_0} Q. \quad (13.18)$$

Баллистическая чувствительность в этом случае

$$S_b = \alpha_b / Q, \quad (13.19)$$

где Q — количество электричества (импульс тока), А · с, $Q = i t$.

При этом баллистическая чувствительность зависит от степени успокоения

$$S_b = 2\pi \frac{S_I}{T_0} e^{f(\beta)}. \quad (13.20)$$

Эта зависимость показана на рис. 13.10. Анализ формулы показывает, что при каждом значении сопротивления внешней цепи необходима дополнительная градуировка гальванометра.

Наибольшее распространение баллистические гальванометры получили для измерения количе-

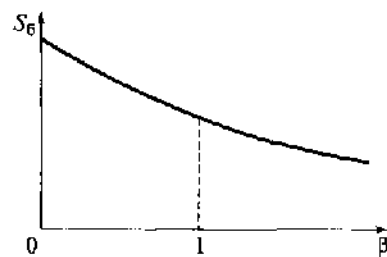


Рис. 13.10. Зависимость чувствительности от степени успокоения баллистического гальванометра

ства электричества, емкости конденсаторов и магнитных потоков.

Вибрационный гальванометр. Магнитоэлектрический прибор, магнитное поле которого образовано неподвижными электромагнитом и постоянным магнитом, называется вибрационным гальванометром. В магнитном поле неподвижного электромагнита такого прибора на растяжках укреплен подвижный постоянный магнит с зеркалом.

При включении прибора в цепь переменного тока возбуждается поле электромагнита, которое, взаимодействуя с полем подвижного магнита, вызывает его колебания. Отраженный от зеркала луч света, попадая на шкалу, образует светящуюся полосу, длина которой зависит от силы тока, протекающего по катушке электромагнита. Противодействующий момент в приборе образует поле постоянного магнита.

Вибрационные гальванометры применяются в качестве нулевых указателей в мостах и компенсаторах переменного тока промышленной частоты.

Магнитоэлектрические гальванометры широко распространены в технике измерений различных величин. Измерения при помощи гальванометров могут быть выполнены с высокой точностью и за минимальное время, если параметры прибора соответствуют следующим условиям измерений:

- чувствительность гальванометра не должна превышать действительно необходимую, так как излишняя чувствительность затрудняет процесс измерений;
- период собственных колебаний должен быть минимальным у обычных и максимальным у баллистических гальванометров;
- критическое сопротивление не должно превышать сопротивления цепи на 10...20 %.

13.4. Магнитоэлектрические приборы с преобразователями

Магнитоэлектрические приборы являются чувствительными и точными, они имеют малое собственное потребление мощности. Однако они пригодны только для цепей постоянного тока. Использование преобразователя переменного тока в постоянный позволяет выполнять измерения магнитоэлектрическим прибором в цепях переменного тока. В зависимости от вида преобразователя, используемого в приборе, различают выпрямительные и тепловые приборы.

Выпрямительные измерительные приборы. В выпрямительных приборах преобразователями переменного тока в постоянный являются полупроводниковые выпрямители на основе кремния или

германия. Такие элементы получили название *диодов*. Так как сопротивление полупроводникового диода зависит от направления протекающего по нему тока, то практически он пропускает ток только в одном направлении (т.е. пропускает только одну полуволну переменного тока, а для другой представляет большое сопротивление).

В выпрямительных измерительных приборах в зависимости от числа применяемых диодов и схемы их включения осуществляется одно- или двухполупериодное выпрямление (преобразование) переменного тока. В однополупериодной схеме прибора (рис. 13.11, а) ток через измерительный механизм прибора P проходит только в течение одного полупериода (рис. 13.11, б). Отрицательная полуволна тока проходит через цепь $VD2-R$. Сопротивление этой цепи выбирают равным сопротивлению цепи с измерительным механизмом для того, чтобы входное сопротивление прибора в оба полупериода тока получилось одинаковым.

Вследствие инерционности подвижной части магнитоэлектрического прибора действующее значение вращающего момента определяется через средний момент за период тока:

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} m_t dt,$$

где m_t — мгновенное значение вращающего момента.

Учитывая равенство (13.10), можно записать

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} B_{\text{sw}} i(t) dt = \frac{1}{2} B_{\text{sw}} I_{\text{ср}}. \quad (13.21)$$

Тогда при взаимодействии противодействующего момента угол перемещения подвижной части прибора (отклонение указателя) можно определить по формуле

$$\alpha_y = \frac{1}{2} \frac{B_{\text{sw}}}{W} I_{\text{ср}}. \quad (13.22)$$

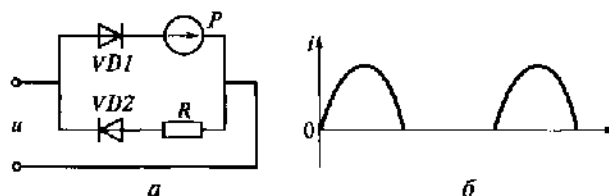


Рис. 13.11. Выпрямительный измерительный прибор с однополупериодным выпрямителем:

а — схема; б — осциллограмма тока в катушке

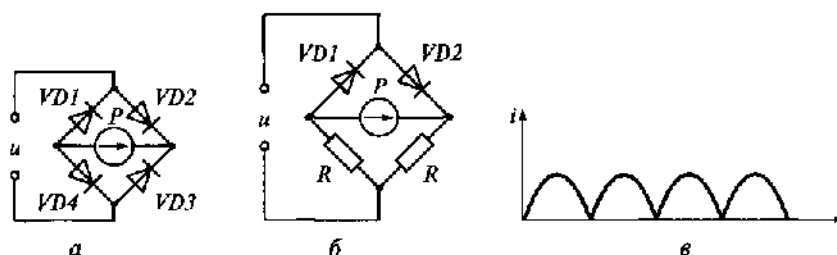


Рис. 13.12. Выпрямительный измерительный прибор с двухполупериодным выпрямлением:

a, б — схемы; *в* — осциллограмма тока в катушке

Часто при изготовлении выпрямительные измерительные приборы градуируют в действующих значениях измерительных величин. Для этого необходимо учесть коэффициент формы кривой тока $k_\Phi = I/I_{cp} = 1,11$. Тогда формула (13.22) принимает следующий вид:

$$\alpha_y = \frac{Bsw}{W} \frac{I}{k_\Phi} = 0,45 \frac{BswI}{W}. \quad (13.23)$$

В схеме выпрямительного измерительного прибора с двухполупериодным выпрямлением (рис. 13.12) через магнитоэлектрический механизм протекает ток (рис. 13.12, *a*), в 2 раза больший, чем в однополупериодной схеме, поэтому средний за период вращающий момент

$$M_{вр} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} m_t dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} B_t sw i(t) dt = Bsw I_{cp}, \quad (13.24)$$

а угол перемещения подвижной части (соответственно и указателя прибора) рассчитывается по формуле (13.23) аналогично:

$$\alpha_y = 0,9 \frac{BswI}{W}. \quad (13.25)$$

Анализ формул (13.23) и (13.25) показывает, что выпрямительные измерительные приборы можно градуировать в действующих значениях измеряемой величины при условии ее изменения во времени по синусоидальному закону.

Одним из требований, предъявляемых к схеме выпрямительного измерительного прибора, является идентичность параметров полупроводниковых диодов. Если это условие не соблюдено, показания прибора зависят от температуры окружающей среды. Для уменьшения температурной нестабильности схему часто собирают из двух идентичных диодов и двух резисторов (рис. 13.12, *б*).

Иногда в такие схемы включают термокомпенсирующие элементы из манганиновых или медных проводников.

При использовании выпрямительных измерительных приборов в цепях с токами высокой частоты возникают дополнительные погрешности измерений, связанные с влиянием емкости полупроводниковых диодов. Уменьшить эти погрешности можно различными способами. Наиболее распространенный из них — компенсация частотной погрешности при помощи конденсаторов.

Достоинства выпрямительных измерительных приборов: высокая чувствительность, малое собственное потребление мощности, широкий частотный диапазон — до 20 кГц (он ограничен частотными свойствами диодов, применяемых в выпрямителе). Недостатки этих приборов: нелинейность характеристики (вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик диодов), невысокая точность (не выше класса 1,0) и зависимость показаний от температуры окружающей среды и формы кривой измеряемого тока.

Выпрямительные измерительные приборы получили наибольшее распространение в качестве многодиапазонных комбинированных приборов (например, вольтметры) в цепях постоянного и переменного токов промышленной и повышенной частот. Для расширения диапазонов измерений этих приборов используются шунтирующие и добавочные резисторы, включаемые вне схем выпрямления.

Тепловые измерительные приборы. Основные элементы тепловых измерительных приборов — термоэлектрический преобразователь и магнитоэлектрический измерительный механизм. Термоэлектрический преобразователь состоит из проводника, по которому протекает измеряемый ток, и термопары. Для изготовления преобразователя применяют сплавы нихрома или константана, допускающие длительный нагрев под действием протекающего тока. Термопара представляет собой соединение двух разнородных металлов, дающих возможность получать термоЭДС в зависимости от нагрева. Значение термоЭДС, возникающей под действием протекающего тока, пропорционально разности температур соединенных и свободных концов термопары:

$$E_T = \alpha_T (\theta_c - \theta_{св}),$$

где α_T — температурный коэффициент термопары; θ_c и $\theta_{св}$ — температура соединенных и свободных концов термопары соответственно.

Перемещение подвижной части (соответственно и указателя) такого прибора пропорционально квадрату измеряемой силы тока:

$$\alpha_y = kI^2, \quad (13.26)$$

где k — коэффициент, зависящий от свойств термопары и особенностей измерительного механизма.

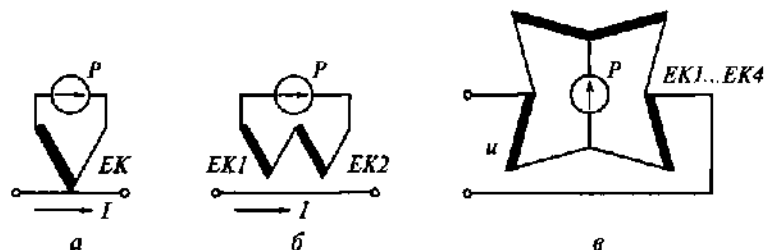


Рис. 13.13. Термоэлектрические приборы с контактным (а), бесконтактным (б) преобразователями и с преобразователями, включенными по мостовой схеме (в)

Конструктивно термоэлектрические преобразователи выполняются контактными, бесконтактными или в виде термобатарей (последовательное соединение нескольких термопар). Применение контактных преобразователей не позволяет соединять их последовательно для увеличения общей термоЭДС. Последовательное включение бесконтактных преобразователей дает возможность увеличить общую термоЭДС, но при этом уменьшается чувствительность прибора. От этого недостатка свободна мостовая схема включения термопар. Схемы термоэлектрических преобразователей измерительных приборов показаны на рис. 13.13.

Для уменьшения влияния внешней температуры каждую термопару прибора помещают в стеклянный баллон, из которого выкачан воздух. Вакуум уменьшает теплопередачу нагревателя термопаре и позволяет уменьшить мощность, потребляемую преобразователем из измерительной цепи.

Достоинства тепловых измерительных приборов: высокая точность измерений в большом частотном диапазоне и независимость показаний от формы кривой тока. Недостатки прибора: низкая чувствительность и перегрузочная способность, большое собственное потребление мощности и влияние изменений внешней температуры.

Тепловые измерительные приборы используются в основном для измерения силы тока и (реже) напряжения в цепях с несинусоидальной формой тока промышленной и повышенной частот.

13.5. Электромагнитные приборы

Действие механизмов электромагнитных приборов основано на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки, обтекаемой измеряемым током, с одним или несколькими подвижными ферромагнитными сердечниками. В конструкцию механизма таких приборов (рис. 13.14) входят неподвижная круг-

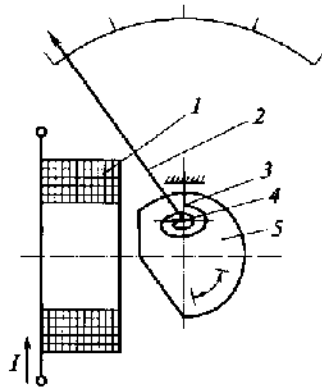


Рис. 13.14. Схема устройства электромагнитного прибора:
1 — катушка; 2 — стрелка; 3 — спиральная пружина; 4 — ось;
5 — сердечник

лая или плоская катушка 1, ферромагнитный сердечник 5, эксцентрично укрепленный на оси 4, и пара противодействующих спиральных пружин 3. Стрелка 2 прибора жестко укреплена на оси 4 вращения сердечника 5. Вместе со шкалой стрелка образует отсчетное устройство прибора. Успокоение подвижной части механизма воздушное или жидкостное (успокоитель на рис. 13.14 не показан). Магнитоиндукционные успокоители в механизмах не используются.

При включении прибора в цепь постоянного тока на подвижный сердечник действует сила, втягивающая его в полость катушки до тех пор, пока энергия магнитного поля не станет наибольшей. Вращающий момент, действующий при этом на ось прибора, будет пропорционален производной энергии поля по углу перемещения сердечника:

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_s}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \quad (13.27)$$

где $dW_s/d\alpha$ — производная энергии по углу перемещения сердечника; I — измеряемый ток; $dL/d\alpha$ — производная индуктивности катушки прибора по углу перемещения сердечника.

При включении прибора в цепь переменного тока вращающий момент, действующий на подвижную часть, пропорционален своему среднему за период значению:

$$\begin{aligned} M_{\text{вр}} &= \frac{1}{T} \int_0^T m_t dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} I_m^2 \sin^2 \omega t \frac{dL}{d\alpha} dt = \\ &= \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \end{aligned} \quad (13.28)$$

где m_t — мгновенное значение вращающего момента; I_m — амплитудное значение измеряемого тока.

Значение угла перемещения подвижной части при включении прибора в цепь постоянного и переменного токов определяется из условия равенства соответствующего вращающего и противодействующего моментов:

$$\alpha_y = \frac{1}{2} \frac{I^2}{W} \frac{dL}{d\alpha}. \quad (13.29)$$

Из формулы (13.29) следует, что шкала электромагнитного прибора неравномерная, так как угол α , пропорционален квадрату тока. Для уменьшения неравномерности шкалы необходимо,

чтобы чувствительность прибора $S = \frac{1}{2} \frac{I}{W} \frac{dL}{d\alpha}$ тоже была различна во всем диапазоне прибора. Это достигается выбором формы и пространственного расположения сердечника по отношению к неподвижной катушке. Обычно в электромагнитных приборах выбирают форму сердечника такой, чтобы получить равномерными 80...85 % шкалы.

При работе электромагнитного прибора в цепи переменного тока его показания занижены по сравнению с соответствующими показаниями в цепи постоянного тока. Это объясняется потерями в механизме на перемещение сердечника. Значение этих потерь оказывает влияние на область применения прибора. Если они не превышают установленного предела, прибор может быть использован для измерений в цепях постоянного и переменного токов. Назначение прибора (для цепей постоянного и переменного токов или только для цепи переменного тока) обычно показывают соответствующим знаком на его шкале.

Собственное магнитное поле электромагнитного прибора небольшое, поскольку оно замыкается в основном по воздуху. Поэтому на работу такого прибора влияют внешние магнитные поля, особенно если они действуют по оси катушки, а частота магнитного потока совпадает с частотой магнитного потока прибора. Влияние таких полей создает дополнительные погрешности. Уменьшить эти влияния можно экранированием механизма прибора или его астатированием.

Экранирование электромагнитных приборов выполняется при помощи ферромагнитных оболочек из материалов с высокой магнитной проницаемостью (например, пермаллой). При этом внешнее магнитное поле, огибая оболочку, почти не проникает к механизму. Эффективность экранирования повышается с увеличением числа защитных оболочек (экранов).

Астатирование электромагнитного прибора осуществляется двумя последовательно соединенными секциями неподвижной катушки. На одной оси укрепляется два подвижных сердечника, образующих с секциями катушки два измерительных механизма с одной подвижной частью. На подвижную часть такого механизма воздействует суммарный момент, создаваемый двумя механизмами. При протекании по катушке измеряемого тока создаются два одинаковых магнитных потока, направленные в противоположные стороны за счет встречного включения секций катушки. Поэтому внешний магнитный поток будет ослаблять поток одной секции и пропорционально усиливать поток другой секции катушки. Следовательно, суммарный вращающий момент,

действующий на подвижную часть прибора, остается неизменным.

Астатирование электромагнитных приборов значительно повышает их метрологические свойства, но усложняет конструкцию.

Для измерений в цепях переменного тока применяют электромагнитные логометрические приборы. Механизм таких приборов состоит из двух несвязанных неподвижных катушек и двух ферромагнитных сердечников, укрепленных на одной оси. Катушки и сердечники размещены так, что при изменении положения подвижной части индуктивность одной катушки уменьшается, а другой — увеличивается. При этом вращающие моменты, действующие на подвижную часть, направлены в противоположные стороны. Таким образом, перемещение подвижной части прибора пропорционально разности вращающих моментов или отношению токов в катушках.

Электромагнитные логометрические механизмы применяются в основном в фазометрах.

Достоинства электромагнитных приборов: пригодность для цепей постоянного и переменного токов, большая перегрузочная способность, возможность непосредственного измерения больших токов (до нескольких сотен ампер) и напряжений, простота конструкции и невысокая стоимость.

Недостатки электромагнитных приборов: неравномерная шкала, невысокая чувствительность (особенно в начале диапазона измерений), большое собственное потребление мощности, подверженность влиянию изменения частоты, воздействию внешних магнитных полей и изменений температуры.

Электромагнитные приборы преимущественно используются в качестве щитовых амперметров и вольтметров в цепях постоянного и переменного токов промышленной частоты. В цепях синусоидального тока их показания пропорциональны действующему значению измеряемых величин.

13.6. Электродинамические и ферродинамические приборы

Электродинамические приборы. Действие механизмов электродинамических приборов основано на взаимодействии магнитных полей подвижной и неподвижной катушек с токами. Механизм таких приборов состоит из неподвижной (в большинстве приборов секционированной) катушки 2 (рис. 13.15), внутри которой на оси 3 укреплен бескаркасная подвижная катушка 4. Противодействующий момент в механизме создается токопроводящими спиральными пружинами 5. На оси укреплен стрелка 1, которая вместе со шкалой образует отсчетное устройство прибора.

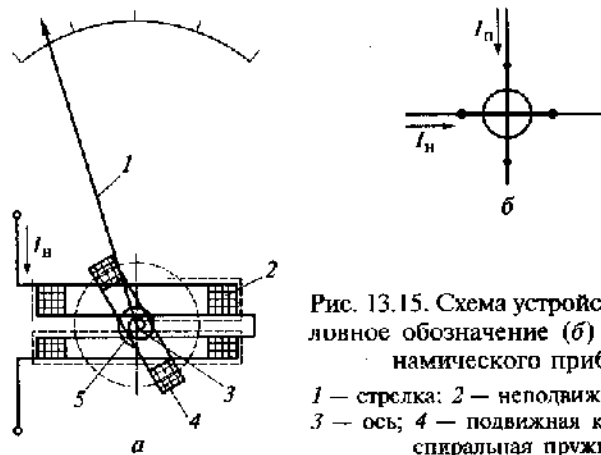


Рис. 13.15. Схема устройства (а) и условное обозначение (б) электродинамического прибора:

1 — стрелка; 2 — неподвижная катушка; 3 — ось; 4 — подвижная катушка; 5 — спиральная пружина

Взаимодействие магнитных полей подвижной и неподвижной катушек с соответствующими токами I_n и I_n создает вращающий момент, который пропорционален производной электромагнитной энергии системы по углу поворота подвижной катушки. Известно, что электромагнитная энергия такой системы в цепи постоянного тока определяется суммой:

$$W_3 = \frac{L_n I_n^2}{2} + \frac{L_n I_n^2}{2} + I_n I_n M_{n,n}, \quad (13.30)$$

где L_n и L_n — индуктивности неподвижной и подвижной катушек соответственно; I_n и I_n — токи в неподвижной и подвижной катушках соответственно; $M_{n,n}$ — взаимная индуктивность катушек.

Тогда вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора:

$$M_{вр} = \frac{dW_3}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L_n I_n^2}{2} + \frac{L_n I_n^2}{2} + I_n I_n M_{n,n}\right)}{d\alpha}.$$

Учитывая, что индуктивности L_n и L_n и токи I_n и I_n не зависят от пространственного расположения катушек, можно записать

$$M_{вр} = I_n I_n \frac{dM_{n,n}}{d\alpha}. \quad (13.31)$$

При этом подвижная часть прибора перемещается до равенства вращающего и противодействующего моментов ($M_{вр} = M_{пр}$). При этом условии угол перемещения подвижной части

$$\alpha_y = \frac{I_n I_{\Pi}}{W} \frac{dM_{\Pi, \Pi}}{d\alpha}, \quad (13.32)$$

При включении прибора в цепь синусоидального тока на его подвижную часть действует вращающий момент, мгновенное значение которого составляет

$$m_t = i_{\Pi} i_n \frac{dM_{\Pi, \Pi}}{d\alpha},$$

где i_{Π} и i_n — мгновенные значения силы тока в неподвижной и подвижной катушках соответственно ($i_{\Pi} = I_{\Pi} \sin \omega t$ и $i_n = I_{n\pi} \sin(\omega t + \psi)$).

Среднее за период значение вращающего момента

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{T} \int_0^T m_t dt = I_n I_{\Pi} \cos \psi \frac{dM_{\Pi, \Pi}}{d\alpha}, \quad (13.33)$$

где I_{Π} и I_n — действующие значения силы тока в неподвижной и подвижной катушках соответственно; ψ — угол сдвига фаз между векторами токов I_{Π} и I_n (рис. 13.16).

Угол перемещения подвижной части прибора

$$\alpha_y = \frac{I_n I_{\Pi}}{W} \cos \psi \frac{dM_{\Pi, \Pi}}{d\alpha}. \quad (13.34)$$

Если обозначить чувствительность прибора

$$S = \frac{1}{W} \frac{dM_{\Pi, \Pi}}{d\alpha},$$

тогда

$$\alpha_y = S I_n I_{\Pi} \cos \psi. \quad (13.35)$$

Уравнение (13.35) показывает, что шкала электродинамического прибора неравномерная. Вид шкалы зависит от формы и взаимного расположения подвижной и неподвижной катушек.

Достоинства электродинамических приборов: пригодность для цепей постоянного и переменного токов (при последовательном соединении катушек их показания одинаковы в цепях постоянного и переменного токов), высокая точность (возможность изготовления астатических приборов класса точности 0,05) и стабильность показаний во времени.

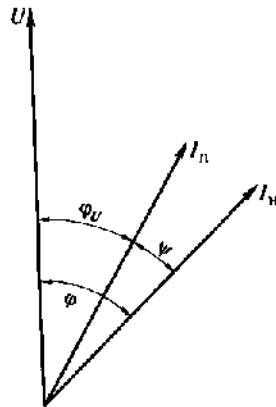


Рис. 13.16. Векторная диаграмма электродинамического прибора

Недостатки электродинамических приборов: низкая чувствительность, неравномерность шкалы и большое собственное потребление мощности (до нескольких десятков ватт у ваттметров).

Эксплуатационной особенностью электродинамических приборов является их чувствительность к направлению тока в катушках. Показания электродинамических приборов в цепях синусоидального тока пропорциональны действующим значениям измеряемых величин.

Электродинамические приборы используются в качестве амперметров, вольтметров и ваттметров в цепях переменного и постоянного токов.

Логометрические электродинамические приборы. Устройство логометрического электродинамического прибора аналогично устройству магнитоэлектрического, но магнитные поля в нем создаются электромагнитами. Подвижная часть логометрического механизма выполнена в виде двух катушек, жестко скрепленных между собой и закрепленных на одной оси (рис. 13.17, а). При взаимодействии магнитного потока, создаваемого током неподвижной катушки с двумя токами в двух подвижных катушках $I_{п1}$ и $I_{п2}$, возникают два вращающих момента. Взаимным расположением катушек и направлением токов в них достигают того, что создаваемые моменты будут направлены в разные стороны. Значения моментов, создаваемых в механизме прибора, можно рассчитать по следующим формулам:

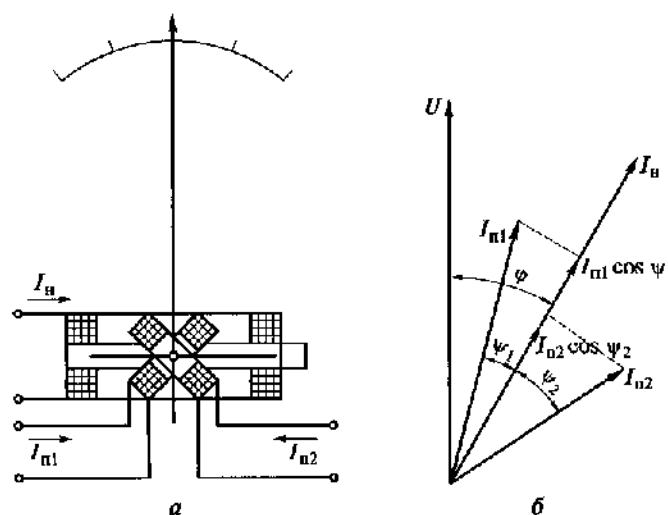


Рис. 13.17. Схема устройства (а) и векторная диаграмма (б) электродинамического логометра

$$M_{\text{вп1}} = I_{\text{н}} I_{\text{н1}} \cos \psi_1 \frac{dM_{\text{н.н1}}}{d\alpha};$$

$$M_{\text{вп2}} = I_{\text{н}} I_{\text{н2}} \cos \psi_2 \frac{dM_{\text{н.н2}}}{d\alpha},$$

где ψ_1 и ψ_2 — углы (рис. 13.17, б) между векторами токов соответственно $I_{\text{н}}$, $I_{\text{н1}}$ и $I_{\text{н}}$, $I_{\text{н2}}$; $M_{\text{н.н1}}$ и $M_{\text{н.н2}}$ — взаимные индуктивности между неподвижной и подвижными катушками соответственно.

Под действием этих моментов подвижная часть прибора перемещается до равенства моментов ($M_{\text{вп1}} = M_{\text{вп2}}$). Поэтому можно записать соотношение

$$\frac{I_{\text{н1}} \cos \psi_1}{I_{\text{н2}} \cos \psi_2} \frac{dM_{\text{н.н1}}}{dM_{\text{н.н2}}} = F(\alpha),$$

отсюда

$$\alpha_y = F \left(\frac{I_{\text{н1}} \cos \psi_1}{I_{\text{н2}} \cos \psi_2} \right). \quad (13.36)$$

Следовательно, перемещение подвижной части логометрического механизма — это функция отношения проекций векторов токов в неподвижных катушках на направление вектора тока в подвижной катушке (см. рис. 13.17, б) при условии

$$\frac{dM_{\text{н.н1}}}{d\alpha} = \frac{dM_{\text{н.н2}}}{d\alpha}.$$

Электродинамические логометрические механизмы применяются в переносных и щитовых фазометрах (при этом необходимо выполнить условие $I_{\text{н1}} = I_{\text{н2}}$) и частотомерах (при этом требуется, чтобы $\cos \psi_1 = \cos \psi_2$).

Ферродинамические приборы. Ферродинамическими называются приборы, у которых неподвижная катушка электродинамического механизма намотана на магнитопроводе (см. рис. 13.15, магнитопровод показан пунктиром). Такая конструкция прибора позволяет защитить его механизм от воздействия внешних магнитных полей и создать большой вращающий момент.

Ферродинамические приборы могут быть использованы в цепях как постоянного, так и переменного тока. Вследствие ограниченного применения таких приборов в цепях постоянного тока ниже рассмотрены вопросы их работы в цепях синусоидального тока.

Радиальное в воздушном зазоре магнитное поле неподвижной катушки, взаимодействуя с полем подвижной катушки, создает вращающий момент, мгновенное значение которого определяется аналогично формуле (13.10):

$$m_t = B_t s_n w_n i_n.$$

Если индукция в воздушном зазоре $B_z = B_m \sin \omega t$, и ток в подвижной катушке $i_n = I_m \sin(\omega t + \psi)$ синусоидальны, то среднее за период значение момента можно рассчитать по формуле

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{T} \int_0^T m_t dt = B s_n w_n I_n \cos \psi.$$

В ферродинамических механизмах выбирают прямолинейную часть зависимости:

$$B = k_n I_n,$$

где k_n — коэффициент пропорциональности.

Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, можно определить по формуле

$$M_{\text{вр}} = k_n s_n w_n I_n I_n \cos \psi. \quad (13.37)$$

Угол перемещения подвижной части (при равенстве вращающего и противодействующего моментов) с учетом формулы (13.2) составляет

$$\alpha_y = \frac{k_n s_n w_n}{W} I_n I_n \cos \psi, \quad (13.38)$$

где отношение $\frac{k_n s_n w_n}{W} = S$ определяет чувствительность механизма.

Тогда

$$\alpha_y = S I_n I_n \cos \psi, \quad (13.39)$$

что аналогично выражению (13.35).

К достоинствам ферродинамических приборов относятся большой вращающий момент, сильное собственное магнитное поле, исключаящее внешние влияния, и меньшее, чем у электродинамических, собственное потребление мощности. Однако на метрологические свойства таких приборов оказывает влияние изменение частоты тока и температуры окружающей среды, вследствие чего область их применения ограничена. Они используются в качестве шитовых и переносных приборов в цепях переменного тока, а также в механизмах самопишущих приборов. В цепях синусоидального тока их показания пропорциональны действующим значениям измеряемых величин.

Ферродинамические логометрические механизмы по принципу действия и области применения аналогичны электродинамическим.

Электродинамические и ферродинамические ваттметры. Для измерения мощности в цепях постоянного и переменного токов на

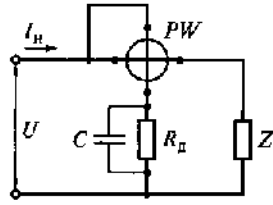


Рис. 13.18. Схема соединения катушек электродинамического ваттметра

практике большое распространение получили электродинамические и ферродинамические ваттметры. Для этого неподвижную катушку прибора включают в цепь последовательно (рис. 13.18) так, чтобы по ней протекал ток приемника энергии I_n , а подвижную катушку включают последовательно с добавочным резистором R_d и параллельно источнику энергии. Таким образом, сила тока в параллельной цепи прибора

$$I_n = \frac{U}{R_n + R_d},$$

где R_n — сопротивление параллельной цепи прибора.

Тогда угол перемещения подвижной части прибора при включении в цепь постоянного тока

$$\alpha_y = \frac{1}{W(R_n + R_d)} I_n U \frac{dM_{н.п}}{d\alpha}. \quad (13.40)$$

Если обозначить чувствительность прибора

$$S_P = \frac{1}{W(R_n + R_d)} \frac{dM_{н.п}}{d\alpha},$$

то

$$\alpha_y = S_P I_n U = S_P P, \quad (13.41)$$

т. е. его показания пропорциональны мощности цепи.

Перемещение подвижной части прибора в цепи переменного тока с учетом формулы (13.40) и рис. 13.16 можно рассчитать по формуле

$$\alpha_y = \frac{1}{W(Z_n + R_d)} I_n U \cos(\varphi - \varphi_y) \frac{dM_{н.п}}{d\alpha}, \quad (13.42)$$

где Z_n — полное сопротивление параллельной цепи прибора.

Чувствительность прибора в этом случае

$$S_P = \frac{1}{W(Z_n + R_d)} \frac{dM_{н.п}}{d\alpha},$$

а его показания пропорциональны активной мощности цепи:

$$\alpha_y = S_P I_n U \cos \varphi = S_P P, \quad (13.43)$$

так как при $\varphi \rightarrow 0 \cos(\varphi - \varphi_y) \rightarrow \cos \varphi$. Чтобы выполнить условие $\varphi_y = 0$, необходимо добавочный резистор (см. рис. 13.18) шунтировать конденсатором.

Поскольку изменение направления тока в последовательной или параллельной цепи ваттметра вызывает соответствующее изменение направления перемещения указателя прибора, входные контакты (на лицевой панели прибора) обозначают звездочкой. Такие контакты называются генераторными. Их подключают при включении ваттметра к источнику энергии.

Промышленность выпускает преимущественно многодиапазонные ваттметры. Для этого неподвижную катушку выполняют из нескольких секций, соединенных последовательно или параллельно, а добавочный резистор представляет собой ряд последовательно соединенных резисторов с выводами для получения различных падений напряжения (делитель напряжения). Секционирование последовательной и параллельной цепей ваттметра позволяет простым переключением на лицевой панели прибора выбирать диапазон измерений.

Градуются ваттметры с таким расчетом, чтобы при номинальных значениях силы тока, напряжения и коэффициента мощности указатель прибора перемещался на максимальный угол (на полное число делений шкалы N). Для расчета значения измеряемой величины по значению, показываемому прибором, отсчитанное число делений необходимо умножить на цену деления шкалы C , которую предварительно рассчитывают по формуле

$$C = UI/N.$$

Ферродинамические ваттметры включаются в цепь аналогично электродинамическим. По сравнению с электродинамическим в ферродинамическом приборе создается больший магнитный поток, что способствует лучшей защите от внешних магнитных полей. Кроме того, ферродинамические ваттметры более чувствительны и потребляют меньше мощности из измерительной цепи. Вместе с тем гистерезисные явления, происходящие в механизме ферродинамического ваттметра (особенно при включении прибора в цепь постоянного тока), существенно ухудшают его метрологические свойства. Поэтому современные ферродинамические ваттметры выпускаются классов точности 1,5 и 2,5.

Для измерения активной мощности в трехфазных цепях промышленность выпускает двухэлементные (для трехпроводных цепей) и трехэлементные (для четырехпроводных цепей) электродинамические и ферродинамические ваттметры. Они состоят соответственно из двух или трех однофазных элементов, подвижные катушки которых укреплены на общей оси. Вращающий момент таких приборов равен алгебраической сумме вращающих моментов отдельных элементов, а его показания пропорциональны активной мощности всей трехфазной системы.

13.7. Электростатические приборы

Принцип действия электростатических приборов основан на взаимодействии двух или нескольких электрически заряженных проводников. Конструктивно механизмы таких приборов представляют собой воздушный конденсатор с изменяющейся емкостью. Распространены приборы с изменяющейся активной площадью электродов и с изменяющимся расстоянием между электродами. Схемы устройства электростатических приборов показаны на рис. 13.19. Неподвижная часть прибора — это два электрода 1, между которыми помещен подвижный электрод 2. Под действием приложенного измеряемого напряжения создается электрическое поле, силы которого вызывают перемещение подвижного электрода и механически связанного с ним указателя 3. Противодействующий момент в механизме создается спиральной или ленточной пружиной 4. Успокоение — воздушное или магнитоиндукционное. Перемещение подвижного электрода происходит до тех пор, пока энергия электрического поля не станет наибольшей. При этом вращающий момент при включении прибора в цепь постоянного тока определится как производная энергии электрического поля по углу перемещения подвижного электрода:

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_s}{d\alpha} = - \frac{d\left(C \frac{U^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\alpha}, \quad (13.44)$$

где C — цена деления шкалы.

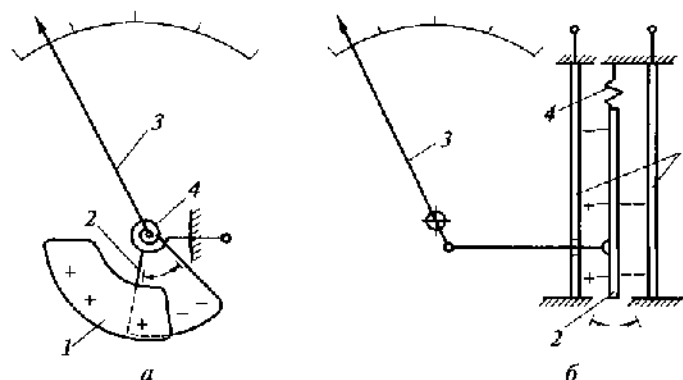


Рис. 13.19. Схема устройства электростатического прибора:

a — с изменяющейся площадью электродов; b — с изменяющимся расстоянием между электродами; 1, 2 — электроды; 3 — указатель; 4 — пружина

При включении прибора в цепь переменного (синусоидального) тока напряжением $u = U_m \sin \omega t$ перемещение подвижной части происходит под действием среднего за период момента

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (13.45)$$

Установившийся угол перемещения подвижной части прибора будет при равенстве вращающего и противодействующего моментов, т.е. при $M_{\text{вп}} = M_{\text{пр}}$. Из этого условия с учетом формулы (13.2) получим

$$\alpha_y = \frac{1}{2W} \frac{dC}{d\alpha} U^2. \quad (13.46)$$

Формула (13.46) показывает, что угол перемещения подвижной части прибора пропорционален квадрату действующего значения приложенного напряжения, следовательно, шкала прибора неравномерная (квадратичная). Выбором формы неподвижного и подвижного электродов, а также их взаимного расположения получают равномерную часть шкалы в пределах от 15 до 100 % диапазона.

В связи с тем что подвижная часть прибора перемещается только под действием заряда (приложенного напряжения), на основе электростатического механизма можно создать вольтметры постоянного и переменного токов, что является отличительной особенностью этих приборов. Поскольку вращающий момент, возникающий в механизме электростатических приборов, мал, промышленность выпускает вольтметры с начальным значением диапазона измерений более 10 В.

К достоинствам электростатических приборов следует отнести их пригодность для работы в цепях постоянного и переменного токов, малое собственное потребление мощности (в цепях постоянного тока равно нулю). На работу электростатического прибора практически не оказывают влияния изменение частоты напряжения, форма кривой измеряемого напряжения и внешние магнитные поля.

Недостатки электростатических приборов: невысокие чувствительность и точность, неравномерная шкала, подверженность влиянию внешних электрических полей и воздействию влажности.

Для расширения диапазона измерения электростатических вольтметров в цепях постоянного тока применяются делители напряжения или добавочные резисторы, а в цепях переменного тока — конденсаторные делители напряжения или добавочные конденсаторы. Включение электростатических приборов совместно с электронными усилителями позволяет создавать миллиамперметры и милливольтметры переменного тока.

13.8. Индукционные приборы

Общие положения. Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии двух или нескольких переменных магнитных потоков с индуктированными ими токами в подвижной части механизма.

Механизм прибора (рис. 13.20, *а*) состоит из двух неподвижных магнитопроводов 1 (трехстержневой с одной катушкой) и 3 (П-образный с двумя последовательно соединенными катушками), подвижного алюминиевого диска 4, жестко укрепленного на оси 2.

При подключении прибора в цепь переменного тока токи в катушках I_1 и I_2 возбуждают переменные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , которые совпадают по фазе с соответствующими токами (рис. 13.20, *б*).

Магнитные потоки, пересекая диск, индуцируют в нем переменные ЭДС E_1 и E_2 , отстающие от своих потоков на угол $\pi/2$. Под действием ЭДС в диске наводятся два вихревых тока $I_{\pi 1}$ и $I_{\pi 2}$, которые совпадают по фазе с соответствующими ЭДС, так как диск представляет собой активное сопротивление.

В результате стягивания контура тока $I_{\pi 1}$ потоком Φ_2 и выталкивания контура тока $I_{\pi 2}$ потоком Φ_1 возникают два противоположно направленных момента, которые действуют на подвижный

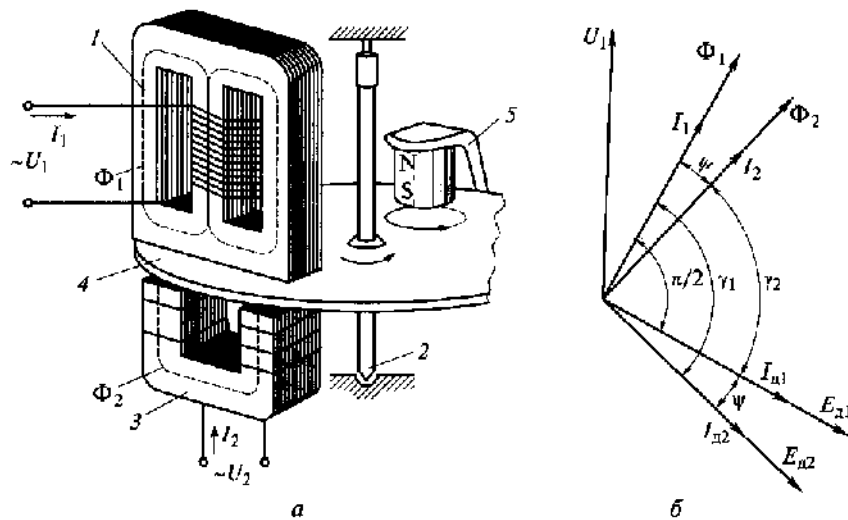


Рис. 13.20. Схема устройства (*а*) и векторная диаграмма (*б*) индукционного прибора:

1 — неподвижный трехстержневой магнитопровод; 2 — ось; 3 — неподвижный П-образный магнитопровод; 4 — подвижный алюминиевый диск; 5 — постоянный магнит

алюминиевый диск. Их направления определяются по правилу левой руки, а мгновенные значения — по известному соотношению при взаимодействии тока и потока:

$$m_{r1} = k_1 \Phi_1 i_{a2}; \quad m_{r2} = k_2 \Phi_2 i_{a1},$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности.

Если переменные магнитные потоки изменяются по закону:

$$\Phi_1 = \Phi_{m1} \sin \omega t; \quad \Phi_2 = \Phi_{m2} \sin(\omega t - \psi),$$

а из векторной диаграммы (см. рис. 13.20, б) с учетом фазовых сдвигов между векторами I_{a1} и Φ_2 , а также векторами I_{a2} и Φ_1 :

$$i_{a1} = I_{ma1} \sin(\omega t - \gamma_1); \quad i_{a2} = I_{ma2} \sin(\omega t - \gamma_2),$$

то средние значения моментов можно рассчитать по формулам:

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_{r1} dt = \frac{1}{T} k_1 \Phi_{m1} I_{ma2} \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \gamma_1) dt = k_1 \Phi_1 I_{a2} \cos \gamma_1;$$

$$M_2 = \frac{1}{T} \int_0^T m_{r2} dt = \frac{1}{T} k_2 \Phi_{m2} I_{ma1} \int_0^T \sin \omega t \sin(\omega t - \gamma_2) dt = k_2 \Phi_2 I_{a1} \cos \gamma_2.$$

Поскольку $\gamma_1 = \frac{\pi}{2} + \psi$, а $\gamma_2 = \frac{\pi}{2} - \psi$, результирующий момент, действующий на диск,

$$\begin{aligned} M_{вр} &= -M_1 + M_2 = -k_1 \Phi_1 I_{a2} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \psi\right) + k_2 \Phi_2 I_{a1} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) = \\ &= k_1 \Phi_1 I_{a2} \sin \psi + k_2 \Phi_2 I_{a1} \sin \psi = (k_1 \Phi_1 I_{a2} + k_2 \Phi_2 I_{a1}) \sin \psi. \end{aligned}$$

Если учесть, что токи, наводимые магнитными потоками в дисках, связаны с соответствующими потоками соотношениями:

$$I_{a1} = k_3 f \Phi_1; \quad I_{a2} = k_4 f \Phi_2,$$

где k_3 и k_4 — коэффициенты пропорциональности; f — частота изменения магнитных потоков (частота питающей сети), то выражение для результирующего момента примет вид

$$M_{вр} = (k_1 k_4 f \Phi_1 \Phi_2 + k_2 k_3 f \Phi_1 \Phi_2) \sin \psi,$$

или

$$M_{вр} = K f \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi, \quad (13.47)$$

где $K = k_1 k_4 + k_2 k_3$.

Анализ уравнения (13.47) показывает, что максимального значения вращающий момент достигает при угле сдвига фаз между потоками $\psi = \frac{\pi}{2}$.

Для создания тормозного момента и обеспечения равномерного вращения диска в механизме предусмотрен постоянный магнит 5 (см. рис. 13.20, *а*). Поле, создаваемое постоянным магнитом, наводит во вращающемся диске ЭДС, в результате чего возникает вихревой ток

$$I_v = k_1 \Phi_n \omega,$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности; Φ_n — магнитный поток постоянного магнита; ω — угловая скорость вращения диска.

Взаимодействие тока I_v с потоком Φ_n вызывает торможение диска моментом $M_T = k_2 \Phi_n I_v$.

После преобразования получаем

$$M_T = k_1 k_2 \Phi_n^2 \omega = k_T \Phi_n^2 \omega, \quad (13.48)$$

где $k_T = k_1 k_2$.

Таким образом, тормозной момент прямо пропорционален угловой скорости вращения диска.

Основные достоинства индукционных приборов: большой вращающий момент, слабые влияния внешних магнитных полей и большая перегрузочная способность. Вместе с тем индукционные приборы пригодны только для переменного тока, имеют невысокую точность, большое собственное потребление мощности и на их показания оказывает влияние изменение температуры окружающей среды и частоты тока.

Однофазный счетчик электрической энергии. Этот счетчик представляет собой индукционный механизм, ось вращения которого связана со счетным механизмом роликового типа. Если катушку *I* (см. рис. 13.20, *а*) включить параллельно источнику энергии, а катушку *З* — последовательно с приемником, то магнитные потоки, создаваемые этими катушками, будут пропорциональны:

$$\Phi_1 = k_1 I_1 = k_1 \frac{U_1}{Z_1} = k_1 \frac{U_1}{2\pi f L_1} = k_U \frac{U_1}{f}; \quad \Phi_2 = k_I f I_2.$$

Подставляя значения магнитных потоков в формулу (13.47), после объединения постоянных получим

$$M_{вр} = k_{вр} U_1 I_2 \sin \psi,$$

где $k_{вр}$ — коэффициент пропорциональности, $k_{вр} = k_U k_I$.

Если катушки прибора включить в цепь в соответствии с рис. 13.20, то вращающий момент будет пропорционален активной мощности цепи:

$$M_{вр} = k_{вр} P.$$

При неизменной активной мощности цепи $M_{вр} = M_r$. Поэтому $k_{вр}P = k_r\omega$, или $k_{вр} = k_r d\alpha/dt$. Если представить это равенство в виде $k_{вр}Pd\alpha = k_r d\alpha$, то после интегрирования за промежуток времени от t_1 до t_2 получаем

$$Pt = W = CN, \quad (13.49)$$

где C — постоянная прибора, $C = 2\pi k_r/k_{вр}$; N — число оборотов диска прибора за время t .

Следовательно, израсходованная в цепи энергия W пропорциональна числу оборотов диска прибора.

Коэффициент пропорциональности C в формуле (13.49) представляет собой действительную постоянную счетчика

$$C_d = W/N, \quad (13.50)$$

которая отличается от номинальной постоянной, определяемой как

$$C_n = 1/K,$$

где K — передаточное число счетчика (число оборотов диска, соответствующее изменению показаний прибора на единицу израсходованной энергии).

Расхождение между действительной C_d и номинальной C_n постоянными определяет погрешность счетчика, относительное значение которой в процентах рассчитывают по формуле

$$\delta_{сч} = \frac{C_d - C_n}{C_n} 100. \quad (13.51)$$

Эта погрешность обусловлена в основном трением в механизме прибора. Особенно она значительна при малых нагрузках (рис. 13.21). Для уменьшения погрешности от трения в счетчиках предусмотрено создание компенсационного момента за счет разделения магнитного потока параллельной катушки на две составляющие (в некоторых конструкциях счетчиков компенсационный момент создается за счет магнитного потока, возбуждаемого короткозамкнутым витком, расположенным под полюсом сердечника параллельной катушки). Когда компенсационный момент превышает значение, необходимое для компенсации трения, диск прибора вращается при отсутствии тока в цепи. Это явление, называемое самоходом, может возникнуть под действием только напря-

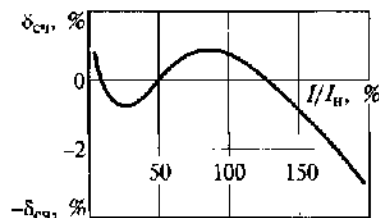


Рис. 13.21. Примерная кривая относительной погрешности индукционного счетчика

жения (тока) в параллельной катушке вследствие неправильной регулировки, превышения (больше номинального) напряжения в сети, механических воздействий и т.п. Устраняют самоход счетчика при помощи пластины, укрепляемой на сердечнике параллельной катушки, и проволоки-крючка на оси прибора. Регулируя расстояние между пластиной и крючком, изменяют силу притяжения между ними до остановки диска. Сила взаимодействия между пластиной и крючком должна быть выбрана такой, чтобы прибор имел допустимый порог чувствительности. Порогом чувствительности счетчика называют то наименьшее значение тока, нормируемое в процентах к номинальной силе тока, при котором, если напряжение, частота и коэффициент мощности имеют номинальные значения, происходит непрерывное вращение диска.

Наиболее распространен однофазный счетчик киловатт-часов типа СО-И449. Он предназначен для учета активной энергии в цепях с частотой 50 или 60 Гц. Выпускаются приборы на номинальные токи 2,5; 5,0; 10,0 и 20 А и напряжения 110, 120, 127, 220, 230, 240 и 250 В. Класс точности приборов 2,0.

Трехфазный счетчик электрической энергии. Этот счетчик представляет собой двухэлементный (для трехпроводных цепей) или трехэлементный (для четырехпроводных цепей) индукционный прибор. Подвижная часть такого прибора выполнена в виде двух или трех дисков, укрепленных на общей оси. Вращающий момент, действующий на подвижную часть, равен алгебраической сумме моментов, создаваемых каждым элементом. Двухэлементные приборы с одним диском и трехэлементные с двумя дисками не применяются из-за сложности устранения взаимных влияний магнитных систем.

В зависимости от назначения промышленность выпускает индукционные счетчики различных типов: активной энергии — однофазные СО (счетчик однофазный), трехфазные СА3 (для трехпроводных цепей) и СА4 (для четырехпроводных цепей); реактивной энергии — СР3 (для трехпроводных цепей) и СР4 (для четырехпроводных цепей), а также счетчики специального назначения. Счетчики реактивной энергии для однофазных цепей не выпускаются.

Контрольные вопросы

1. Что такое измерительная цепь, измерительный механизм, отсчетное устройство?
2. Какие существуют общие узлы и детали аналоговых приборов?
3. Какие существуют способы создания противодействующего момента в аналоговых приборах?
4. Каковы принцип действия и схема механизма магнитоэлектрических приборов?

5. В чем состоят особенности работы логометрических приборов?
6. За счет чего магнитоэлектрические гальванометры обладают высокой чувствительностью? Какие режимы работы возможны у них?
7. Какие имеются схемы включения выпрямительных измерительных приборов?
8. Как работают тепловые измерительные приборы с контактными и бесконтактными преобразователями? По какой схеме включается термобатарея?
9. Каковы схема механизма и принцип работы электромагнитных приборов?
10. В чем особенность конструкции и преимущества астатических электромагнитных приборов?
11. Объясните принцип работы, схемы механизма и векторную диаграмму электродинамического прибора.
12. Как устроен электродинамический логометр и в чем особенности его векторной диаграммы?
13. В чем особенности конструкции и каковы принципы работы ферродинамических приборов?
14. Как включаются катушки в электродинамических ваттметрах? В чем состоит принцип их работы?
15. Объясните принцип действия и схему механизма электростатических приборов.
16. Как устроены и на каком принципе работают индукционные приборы? Поясните векторную диаграмму индукционного прибора.
17. Каков принцип работы счетчика электрической энергии? Каким образом в этих приборах компенсируется погрешность от трения в опорах?

ГЛАВА 14

ЦИФРОВЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

14.1. Классификация цифровых приборов

Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называется средство измерения, автоматически вырабатывающее дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

По виду измеряемых величин цифровые измерительные приборы подразделяются:

- на вольтметры и амперметры постоянного и переменного токов (напряжений);
- омметры и мосты постоянного и переменного токов;
- комбинированные приборы;
- измерители частоты, интервалов времени и фазового сдвига;
- специализированные ЦИП, предназначенные для определения времени срабатывания различных элементов, и т.д.

Диапазон измеряемых посредством ЦИП величин обычно весьма широкий и разбивается на ряд поддиапазонов. Выбор нужного поддиапазона в процессе измерения производится вручную или автоматически. Измерение на выбранном поддиапазоне всегда осуществляется автоматически.

Основными классификационными признаками ЦИП принято считать вид измеряемой величины и способ преобразования, определяющие такие важные характеристики, как точность и быстродействие. По виду входных физических величин ЦИП объединяются в следующие основные группы приборов для измерения:

- постоянного и переменного токов (напряжений);
- параметров R , L и C электрических цепей;
- временных параметров (частоты, периода, временного интервала, фазы).

Разновидностями ЦИП, входящих в упомянутые группы, являются средства измерений с микропроцессорами, виртуальные приборы на основе компьютеров и цифровые осциллографы.

Наиболее важными техническими характеристиками ЦИП, определяющими возможность их использования для конкретной измерительной задачи, являются: пределы измерения, цена деле-

ния, входное сопротивление, быстродействие, точность, помехоустойчивость и надежность.

Пределом измерения называется максимальное значение измеряемой величины, указанное на шкале прибора.

Цену деления шкалы можно определить по формуле

$$z = x_{\text{max}}/10^m,$$

где x_{max} — максимальное значение предела измерения; m — число разрядов десятичного цифрового отсчета.

Для каждого предела измерения цена деления постоянна и определяет максимально возможную разрешающую способность для данного типа ЦИП.

Разрешающая способность — это изменение цифрового отсчета на единицу первого (младшего) разряда. Иногда под разрешающей способностью понимают значение цены деления младшего (для многопредельных приборов) предела ЦИП.

Быстродействие определяется максимальным интервалом времени, необходимым для выполнения одного полного цикла измерения (для ЦИП это время измерения и время индикации) или преобразования (для АЦП) входной величины. Для ЦИП с равномерной временной дискретизацией этот интервал измерения определяется шагом дискретизации Δt , а быстродействие — числом измерений (преобразований) в 1 с, т.е. значением $1/(\Delta t)$.

Помехоустойчивость — способность сохранять необходимую точность измерения при наличии различных возмущающих воздействий (помех). Устранить влияние помех, появляющихся вместе с сигналом на входных зажимах ЦИП, полностью нельзя. Поэтому помехоустойчивость численно характеризуется степенью подавления помех на входе ЦИП. Оценку помехоустойчивости ЦИП обычно вычисляют по отношению к аддитивным, т.е. суммирующимся с полезным сигналом, помехам.

Итак, ЦИП наиболее полно удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым в настоящее время к измерительной аппаратуре: высокая точность и быстродействие, автоматизация процессов измерения и обработки информации. Обобщенная структурная схема ЦИП показана на рис. 14.1.

В цифровом приборе измеряемая величина x подается на входное устройство (ВУ), предназначенное для выделения ее из помех и масштабного преобразования. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует величину x' в код N , который подается на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), где индицируется в виде ряда цифр. Цифровые коды могут выводиться и во внешние устройства, например в компьютер для дальнейшей обработки или хранения. Управляет работой ЦИП устройство управления (УУ) путем выработки и подачи определенной последовательности командных сигналов во все функциональные узлы прибора.

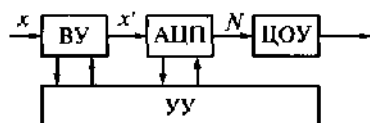


Рис. 14.1. Обобщенная структурная схема ЦИП

По способу преобразования входного сигнала ЦИП условно подразделяются на приборы прямого и уравнивающего преобразования.

В ЦИП прямого преобразования отсутствует цепь общей отрицательной обратной связи (т.е. связь выхода с входом). Они обладают повышенным быстродействием, но прецизионные измерения возможны только лишь при высокой точности всех измерительных преобразователей, поэтому применяются редко.

В ЦИП уравнивающего преобразования присутствует цепь общей отрицательной обратной связи (т.е. связь выхода с входом).

Цифровые измерительные приборы уравнивающего преобразования охвачены цепью общей обратной связи. Цепь отрицательной обратной связи представляет собой, по существу, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) выходного дискретного сигнала в компенсирующую величину x_k одной физической природы с измеряемой величиной $x(t)$.

Погрешность ЦИП уравнивающего преобразования, охваченных отрицательной обратной связью, практически не зависит от погрешностей преобразователей цепи прямого преобразования, а определяется в основном параметрами ЦАП. Поэтому в схемах ЦАП обязательно применяются элементы достаточно высокой точности и стабильности.

По характеру изменения во времени компенсирующей величины x_k ЦИП подразделяются на приборы развертывающего и следящего уравнивания.

Примером ЦИП развертывающего уравнивания являются приборы, в которых значение компенсирующей величины x_k в каждом цикле измерения возрастает от нуля ступенями, равными шагу квантования Δ (рис. 14.2, а).

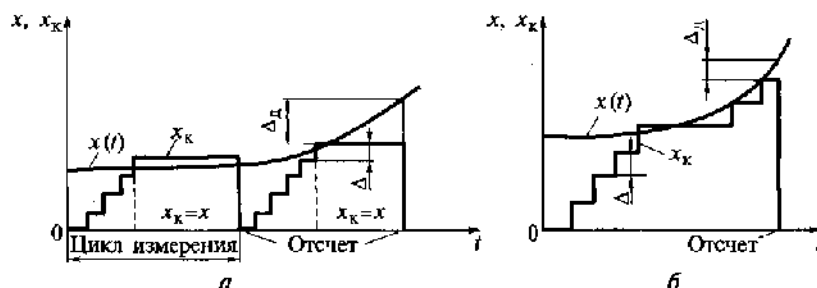


Рис. 14.2. Временные диаграммы к схемам ЦИП уравнивающего типа: а — развертывающего; б — следящего

При идентичности величин $x_k = x$ процесс уравнивания прекращается и фиксируется результат измерения, равный числу ступеней квантования компенсирующей величины. Отсчет показаний обычно производится в конце цикла изменения величины x_k . При этом возникает динамическая погрешность Δ_d , обусловленная изменением измеряемой величины $x(t)$ за интервал времени между моментами уравнивания и отсчета.

В приборах следящего уравнивания (рис. 14.2, б) уровень компенсирующей величины не возвращается к нулю после достижения равенства с измеряемой величиной, а остается постоянным. При изменении x величина x_k соответственно отрабатывает (отслеживает) это изменение так, чтобы разность $x - x_k$ не превышала значения шага квантования Δ . Отсчет производится или в момент уравнивания, или по внешним командам. Следящее уравнивание сложнее в технической реализации, но при прочих равных условиях обеспечивает меньшую динамическую погрешность, которая не превышает шага квантования.

По виду выходного дискретного сигнала ЦИП и АЦП подразделяются на приборы с двоичной, десятичной и двоично-десятичной формами представления информации. Двоичная форма является самой экономичной и используется в основном для представления информации в системных АЦП.

14.2. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи

Прежде чем перейти к анализу принципа действия схем цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей, рассмотрим важнейший элемент интегральной техники — операционный усилитель, на котором построены современные компараторы (устройства сравнения).

Операционные усилители. Операционным усилителем (ОУ) называется интегральный линейный усилитель напряжения, имеющий большой коэффициент усиления ($10^6 \dots 10^7$), высокое входное (сотни МОм) и малое выходное (единицы Ом) сопротивление. На рис. 14.3, а показано условное графическое обозначение ОУ.

По отношению к выходу один из входов ОУ является неинвертирующим U_n , а другой — инвертирующим $U_{\bar{n}}$; последний обозначается знаком инверсии (кружок на входе ОУ). Питание ОУ осуществляется от двух одинаковых разнополярных источников $+U_n$ и $-U_n$ (на графических обозначениях источники питания обычно не показывают). При таком питании входные и выходные сигналы могут быть двуполярными, а нулевым входным сигналам соответствует нулевой выходной сигнал. Выходной сигнал ОУ про-

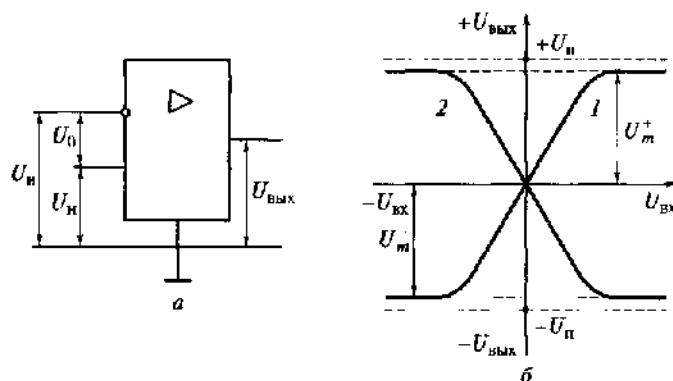


Рис. 14.3. Операционный усилитель:

a — условное графическое обозначение; *б* — передаточные характеристики

порционален дифференциальному входному сигналу — разности входных $U_0 - U_н$.

Коэффициент усиления по напряжению K_0 равен отношению выходного напряжения к дифференциальному входному напряжению:

$$K_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_0}.$$

Передаточные характеристики (рис. 14.3, *б*) имеют важнейшее значение для ОУ. Если усиливаемый сигнал подан на неинвертирующий вход, а инвертирующий вход заземлен, то знак выходного напряжения совпадает со знаком входного напряжения (линия 1). При подаче сигнала на инвертирующий вход и заземлении неинвертирующего входного напряжения будет противоположен знаку входного (линия 2). Угол наклона линейных участков передаточных характеристик пропорционален коэффициенту усиления по напряжению K_0 . Горизонтальные участки передаточных характеристик соответствуют режиму насыщения оконечных транзисторов ОУ, поэтому выходное напряжение

$$\pm U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \approx \pm U_{\text{п}}.$$

В теории интегральной усилительной техники в целях упрощения анализа и расчета схем на операционных усилителях вводят понятие «идеальный» ОУ, для которого справедливы следующие допущения: бесконечно большой коэффициент усиления $K_0 = \infty$; входное сопротивление $R_{\text{вх}} = \infty$; выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = 0$.

Из этих допущений вытекают два основных свойства (правила анализа) ОУ.

1. Дифференциальный входной сигнал равен нулю:

$$U_0 = \frac{U_{\text{вх}}}{K_0} = \frac{U_{\text{вх}}}{\infty} = 0.$$

2. Входы ОУ не потребляют ток от источника входного сигнала:

$$I_0 = \frac{U_{\text{вх}}}{K_0} = \frac{U_{\text{вх}}}{\infty} = 0.$$

Изложенное выше понятие «идеального» ОУ соответствует так называемому принципу «виртуального» (кажущегося) замыкания его инвертирующего и неинвертирующего входов. При виртуальном замыкании, как и при физическом (обычном), напряжение между соединенными зажимами равно нулю. Вместе с тем в отличие от физического замыкания ток между виртуально замкнутыми зажимами не течет. Говоря другими словами, для тока виртуальное замыкание зажимов эквивалентно разрыву электрической цепи.

В зависимости от условий подачи усиливаемого сигнала на входы ОУ и подключения к нему внешних элементов можно получить две фундаментальные схемы включения: инвертирующую и неинвертирующую. Любое схемотехническое решение с применением ОУ базируется на этих включениях. Одно из них осуществлено в компараторе.

Компаратор — устройство, осуществляющее сравнение двух аналоговых напряжений. В простейшей схеме компаратора входное напряжение сравнивается с некоторым опорным, в качестве которого используется часть выходного напряжения (рис. 14.4, а).

На инвертирующий вход ОУ поступает входное напряжение, а на неинвертирующий вход подается опорное напряжение

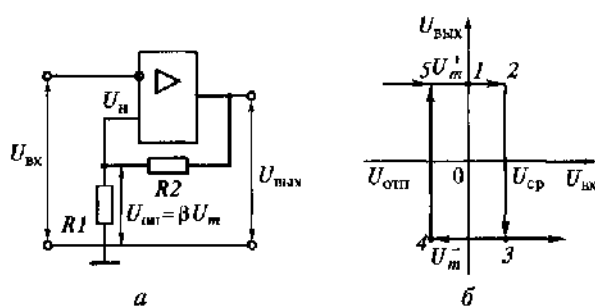


Рис. 14.4. Компаратор:

а — схема; б — передаточная характеристика

$U_n = U_{оп} = \beta U_m$, снимаемое с делителя R_1, R_2 . Таким образом, ОУ охвачен положительной обратной связью по неинвертирующему входу и выходное напряжение скачком изменяет свою полярность при сравнении входного и опорного напряжений.

Принцип действия компаратора рассмотрим с помощью передаточной характеристики — зависимости выходного напряжения от входного (рис. 14.4, б). Пусть входное напряжение $U_{вх} = 0$, а выходное $U_{вых} = U_m^+$ (точка 1 на рис. 14.4, б). Напряжение на неинвертирующем входе при этом будет

$$U_n = \beta U_m^+,$$

где β — коэффициент передачи резистивной цепи R_1, R_2 положительной обратной связи в компараторе, $\beta = R_1/(R_1 + R_2)$.

Если входное напряжение больше нуля и увеличивается, то при сравнении его амплитуды с опорным, равным напряжению срабатывания $U_{ср} = \beta U_m^+$, компаратор переключается. При этом произойдет скачкообразное изменение выходного напряжения со значения U_m^+ на значение U_m^- (переход от точки 2 к точке 3 на рис. 14.4, б). Дальнейшее увеличение входного напряжения не изменит состояния компаратора, и напряжение на неинвертирующем входе ОУ будет также постоянным: $U_n = \beta U_m^+$. При уменьшении входного напряжения до значения опорного, равного напряжению отпущения $U_{отп} = U_{ср} = \beta U_m^+$, произойдет скачкообразный возврат компаратора в исходное состояние. Выходное напряжение при этом изменится с U_m^- на U_m^+ (переход от точки 4 к точке 5 на рис. 14.4, б).

Таким образом, передаточная характеристика компаратора имеет вид петли гистерезиса. Такой компаратор обладает триггерным (переключающим) эффектом, в радиоэлектронике его называют *триггером Шмитта*.

Сумма напряжений срабатывания и отпущения

$$U_r = U_{ср} + U_{отп} = 2\beta U_m$$

является напряжением гистерезиса. Оно вводится для повышения помехоустойчивости, что позволяет устранить «дребезг» триггера, т.е. случайное его переключение напряжением помех при отсутствии входного сигнала. В компараторе на ОУ амплитуда выходного напряжения практически равна напряжению питания: $U_{вых} = U_m = \pm U_n$. Компараторы применяются для формирования сигналов прямоугольной формы из различных видов непрерывных сигналов. В частности, при подаче на вход компаратора синусоидального напряжения (рис. 14.5) на его выходе формируется симметричное прямоугольное колебание — меандр (гр. — узор, геометрический орнамент).

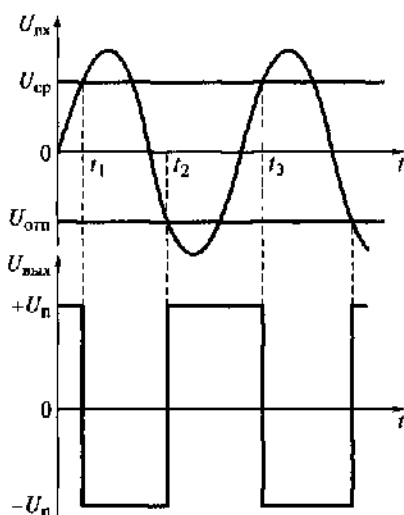


Рис. 14.5. Формирование меандра из синусоиды компаратором

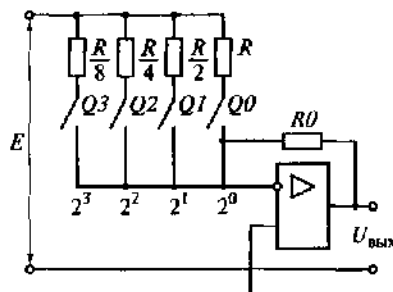


Рис. 14.6. Схема четырехразрядного ЦАП

Пусть в момент времени $t = 0$ напряжение на выходе компаратора $U = U_m^+$. В таком состоянии компаратор будет находиться, пока амплитуда входного напряжения $U_{вх} < U_{сп}$. В момент времени $t = t_1$ входное напряжение станет $U_{вх} = U_{сп}$ и компаратор переключится. При этом выходное напряжение $U_{вых}$ скачком изменится со значения U_m^+ на значение U_m^- . В момент времени $t = t_2$ входное напряжение станет равным $U_{отп}$ и произойдет новое переключение компаратора.

Цифроаналоговые преобразователи. Принцип действия четырехразрядного цифроаналогового преобразователя иллюстрируется с помощью простейшей схемы на ОУ, представленной на рис. 14.6. Основу схемы составляет матрица резисторов с источником постоянного напряжения, соединенных с инвертирующим входом ОУ ключами, которые управляются двоичным кодом (например, выходным кодом счетчика). В зависимости от поступающего кода цифрового сигнала подключаются резисторы с различными номиналами сопротивлений. В схеме ключи замыкаются только при поступлении на них команд, соответствующих логической 1. Коэффициенты усиления инвертирующего усилителя по входам 2^0 , 2^1 , 2^2 и 2^3 соответственно:

$$K_0 = -R_0 Q_0 / R; \quad K_1 = -2R_0 Q_1 / R; \quad K_2 = -4R_0 Q_2 / R; \quad K_3 = -8R_0 Q_3 / R.$$

Здесь Q_0 , Q_1 , Q_2 , Q_3 — кодовые числа, принимающие два значения: либо 1 (ключ замкнут), либо 0 (ключ разомкнут).

Отсюда следует, что четырехразрядный двоичный код преобразуется в выходное напряжение, изменяющееся по амплитуде от 0 до 15Δ (напомним, что Δ — шаг квантования). Например, двоичному числу 1001 соответствует напряжение $U_{\text{вых1}} = \Delta(1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 8 \cdot 1) = 9\Delta$, а числу 1100 — $U_{\text{вых2}} = 12\Delta$. Поскольку на вход резистивной матрицы подается постоянное напряжение E , то выходное напряжение ЦАП изменяется скачками при переключении кода цифрового сигнала. Сглаживание выходного сигнала осуществляется фильтром низкой частоты (ФНЧ).

Аналого-цифровые преобразователи. По своей структуре аналого-цифровые преобразователи (АЦП) более сложны, чем ЦАП, причем последние часто являются основным узлом АЦП. В настоящее время существуют три различных метода построения схем АЦП: последовательный, параллельный и последовательно-параллельный.

Последовательный (последовательного счета) метод построения АЦП (рис. 14.7) основан на подсчете числа суммирований опорного напряжения младшего разряда, необходимого для получения напряжения, равного входному.

При этом k -разрядный двоичный код одного отсчета определяется в схеме за 2^k интервалов дискретизации.

Начало преобразования входного непрерывного сигнала определяется временем поступления импульса запуска, который через RS-триггер T и логический элемент И подключает выход генератора тактовых (счетных) импульсов M к счетчику Сч. Схема преобразователя D/A , куда поступает цифровой код со счетчика, формирует выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, которое сравнивается в компараторе K с входным напряжением $U_{\text{вх}}$. При сравнении этих напряжений компаратор через логический элемент И выдает сигнал прекращения подачи на счетчик Сч тактовых импульсов. В результате осуществляется считывание со счетчика выходного четырехразрядного кода, представляющего в момент окончания преобразования цифровой эквивалент выходного напряжения.

В описанном АЦП значения выходного цифрового кода в процессе преобразования многократно изменяются, поэтому он обладает низким быстродействием.

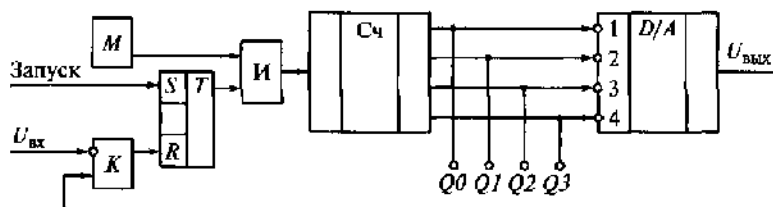


Рис. 14.7. Упрощенная структурная схема АЦП последовательного счета

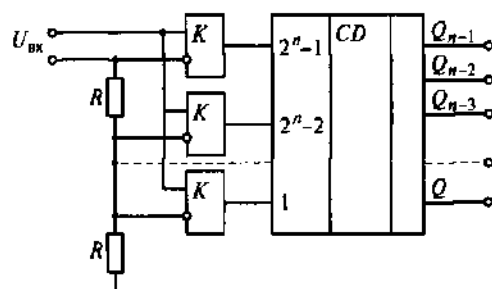


Рис. 14.8. Структурная схема параллельного АЦП

Действие параллельных (по методу считывания) k -разрядных АЦП основано на использовании $2k - 1$ компараторов (рис. 14.8). Неинвертирующие входы операционных усилителей компараторов объединены, и на них подается непрерывный сигнал, а к каждому инвертирующему входу подключено индивидуальное опорное напряжение, снимаемое с резистивного делителя. Разность между опорным напряжением двух соседних компараторов равна шагу квантования $\Delta = U_{оп}/2^k$. Компараторы, у которых входное напряжение превысит соответствующее опорное напряжение, вырабатывают логическую 1, а остальные — логический 0. Информация с выходов компараторов поступает на шифратор CD , который преобразует ее в двоичный код.

Параллельные схемы обладают наибольшим быстродействием среди других типов АЦП. Однако для повышения точности измерений и уменьшения мощности шумов квантования в параллельных АЦП требуется увеличение числа компараторов.

В последовательно-параллельных схемах АЦП используется сочетание методов последовательного и параллельного преобразования сигналов, что существенно увеличивает быстродействие последовательных преобразователей и уменьшает объем параллельных.

На рис. 14.9 показана структурная схема шестизрядного последовательно-параллельного аналого-цифрового преобразователя, в которой используются два трехразрядных параллельных АЦП, один трехразрядный ЦАП и сумматор Σ .

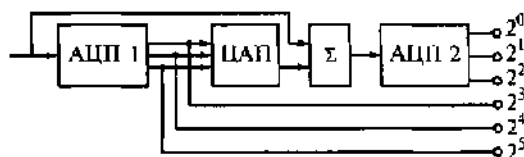


Рис. 14.9. Структурная схема последовательно-параллельного АЦП

Аналого-цифровой преобразователь формирует из входного напряжения три старших разряда выходного кода, соответствующие значениям 2^3 , 2^4 и 2^5 . Эти разряды поступают на вход трехразрядного ЦАП, в котором они вновь преобразуются в аналоговое напряжение, отличающееся от входного напряжения $U_{вх}$ на величину погрешности преобразования схемы АЦП1. Аналоговое напряжение с выхода схемы ЦАП подается на сумматор Σ , где оно вычитается из входного напряжения $U_{вх}$. Полученное разностное напряжение подается на АЦП2, в котором оно преобразуется в три младших цифровых разряда 2^2 , 2^1 , 2^0 выходного кода преобразователя.

Перспективным направлением развития ЦИП является применение микропроцессоров, которые обеспечивают управление процессом измерения, самодиагностику, автоматическую градуировку по заданной программе, а также первичную обработку результатов измерения (линеаризацию функции преобразования, коррекцию погрешностей, сжатие данных, т.е. уменьшение избыточности измеряемой информации). В настоящее время элементарной базой ЦИП являются аналоговые и цифровые интегральные микросхемы, что позволяет достигнуть высокого быстродействия и малых габаритных размеров приборов. Применение интегральных микросхем большой степени интеграции значительно расширило функциональные возможности ЦИП и повысило их надежность при одновременном снижении потребления энергии. Многие ЦИП имеют автоматический выбор пределов измерения, повышающий точность измерения при большом динамическом диапазоне входного сигнала. Большинство ЦИП могут выполнять операции интегрирования и фильтрации, что значительно повышает их помехоустойчивость.

В последние годы получили применение аналого-дискретные измерительные приборы (АДИП). В отличие от ЦИП в них используют квазианалоговые отсчетные устройства, в которых роль указателя выполняет светящаяся полоса или светящаяся точка, меняющие дискретно свою длину (полоса) или положение (точка) относительно шкалы. Квазианалоговые отсчетные устройства управляются кодом. Такие приборы сочетают в себе достоинства аналоговых приборов (аналоговые отсчетные устройства) и ЦИП (код на выходе).

В настоящее время сформировалось новое направление в метрологии и электроизмерительной технике — компьютерно-измерительные системы (КИС) и их разновидность — виртуальные приборы.

14.3. Аналоговые электронные вольтметры

Напряжение в радиоэлектронной технике практически всегда измеряют электронными вольтметрами. В электронных вольтмет-

рах, снабженных усилительными устройствами, потребление мощности из измерительной цепи ничтожно мало. К достоинствам электронных вольтметров относятся: широкие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), высокая чувствительность, хорошая перегрузочная способность, малое собственное потребление энергии.

Классифицировать электронные вольтметры можно по некоторым признакам:

- по назначению — постоянного и переменного напряжений, синусоидального и импульсного напряжений; фазочувствительные, селективные, универсальные;
- способу измерения — непосредственной оценки и приборы сравнения;
- характеру измеряемого значения напряжения — амплитудные (пиковые), среднеквадратичного значения, средневыпрямленного значения;
- частотному диапазону — низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.

Кроме того, все электронные приборы можно подразделить на две большие группы: аналоговые со стрелочным отсчетом и приборы дискретного типа с цифровым отсчетом.

В соответствии с общепринятыми обозначениями электронным вольтметрам присваивается индекс В, например ВК7-16А — вольтметр комбинированный; К — может измерять сопротивление; 7 — универсальный: на постоянный и переменный ток; 16 — номер разработки; А — модификация. Вольтметры постоянного тока имеют индексацию В2, а вольтметры переменного синусоидального тока — В3. Однако встречаются и другие обозначения, которые сложились исторически, например Щ обозначает, что это цифровой вольтметр, выпускаемый санкт-петербургским заводом «Вибратор».

При необходимости измерения силы тока электронным вольтметром ток преобразуется в напряжение по формуле $I_x R_0 = U_x$.

Аналоговые вольтметры со стрелочным отсчетом. Упрощенные структурные схемы аналоговых вольтметров представлены на рис. 14.10. В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока (рис. 14.10, а) находят ограниченное применение, так как они по своим техническим свойствам заметно уступают цифровым вольтметрам постоянного тока и практически вытесняются последними. Поэтому дальше рассматриваются только аналоговые вольтметры переменного тока.

Изображенная на рис. 14.10, б структурная схема используется в вольтметрах для измерения напряжений значительного уровня, так как обеспечить большое усиление с помощью усилителя постоянного тока сложно. Зато частотный диапазон таких усилителей может составлять сотни мегагерц. Структурная схема, пред-

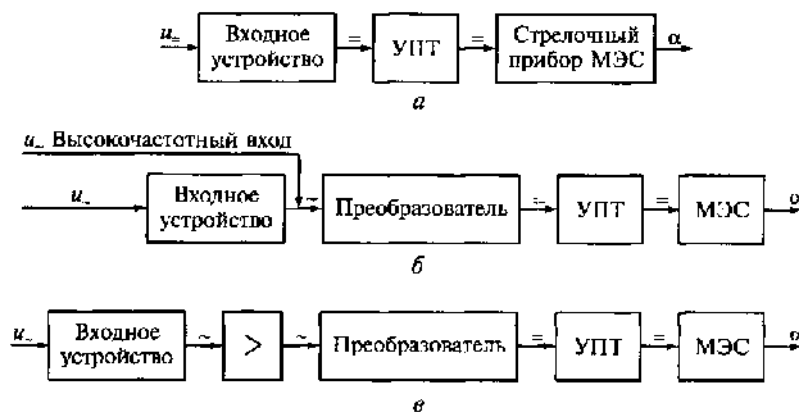


Рис. 14.10. Структурная схема аналоговых электронных вольтметров:
 а — постоянного тока; б — напряжений большого уровня; в — милливольтметра;
 УПТ — усилитель постоянного тока; > — усилитель переменного тока; МЭС —
 магнитно-электрическая схема

ставленная на рис. 14.10, а, применяется в милливольтметрах, поскольку обладает большей чувствительностью. Последнее связано с наличием дополнительного усилителя, однако частотный диапазон такой схемы ниже (до сотен килогерц), так как возникают трудности при создании широкополосного усилителя переменного тока.

Детекторы. Элементная база, используемая при создании вольтметров переменного тока, определяется существующим на момент создания вольтметра уровнем техники (от полупроводниковых образцов до микроинтегрального исполнения), однако функциональное назначение блоков идентично. При этом особенно важную функцию несут преобразователи переменного напряжения в постоянное (детекторы). Детекторы можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное на следующие типы: амплитудные (пиковые), среднеквадратичного и среднесвырявленного значений. Тип детектора во многом определяет свойства прибора: так вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с детекторами среднеквадратичного значения позволяют измерять напряжение любой формы; вольтметры среднесвырявленного значения пригодны только для измерения гармоничного сигнала, но являются самыми простыми, надежными и дешевыми. Далее приводятся некоторые простейшие структурные схемы детекторов.

Амплитудный детектор — устройство, напряжение на выходе которого, т. е. на нагрузке, соответствует максимальному (ампли-

тудному) значению измеряемого сигнала. Это осуществляется за счет запоминания напряжения (накопления энергии при протекании тока через диод) на конденсаторе.

Чтобы цепь реальной нагрузки любого детектора эффективно отфильтровала полезный сигнал (постоянную составляющую) и подавляла паразитные высокочастотные гармоники, необходимо выполнение следующего неравенства:

$$\frac{1}{\omega C_n} \ll R_n,$$

где C_n — емкость выходного фильтра; R_n — сопротивление нагрузки детектора.

Еще одно условие работы детектора: сопротивление резистора нагрузки R_n должно быть значительно больше сопротивления диода в направлении его прямой проводимости.

На рис. 14.11 изображены принципиальная и эквивалентная схемы, а также временные диаграммы амплитудного детектора с параллельным включением диода (детектор с закрытым входом).

Рассмотрим работу детектора с закрытым входом (рис. 14.11, а) при подаче на него простейшего гармонического напряжения

$$u_x = U_m \sin \omega t.$$

В моменты времени, когда на вход поступает положительная полуволна, конденсатор C заряжается через диод, сопротивление

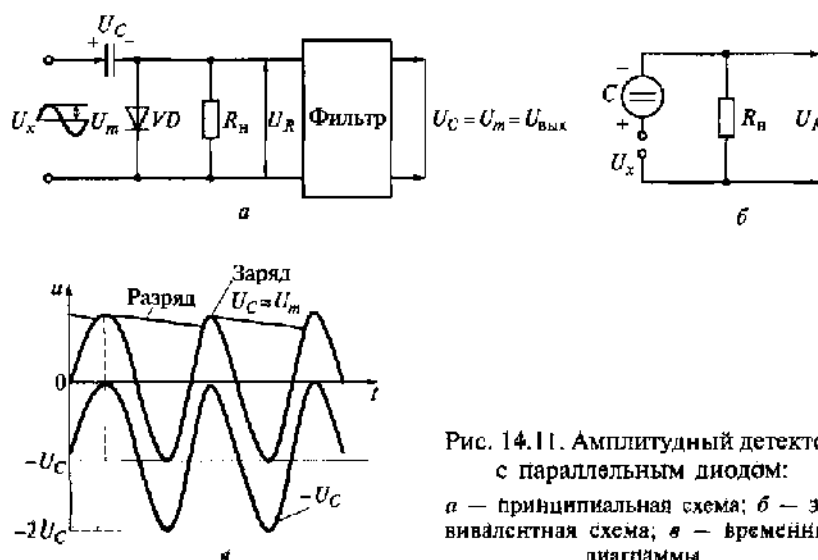


Рис. 14.11. Амплитудный детектор с параллельным диодом:

а — принципиальная схема; б — эквивалентная схема; в — временные диаграммы

которого в открытом состоянии R_0 мало ($R_0 \ll R_n$). Постоянная времени заряда $\tau_1 = R_0 C$ мала, и заряд конденсатора до максимального значения U_m происходит быстро. За время отрицательной полуволны конденсатор C разряжается, так как сопротивление нагрузки выбирается достаточно большим (50...1000 МОм). Таким образом, постоянная разрядка $\tau_p = RC$ оказывается значительно больше периода $T = 2\pi/\omega$ переменного напряжения. В результате конденсатор остается заряженным до напряжения, близкого к $U_C = U_m = U_{\text{вых}}$. Упрощенная эквивалентная схема амплитудного детектора и временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рис. 14.11, б, в.

Изменение напряжения на нагрузочном сопротивлении R_n определяется разностью амплитуд входного напряжения U_x и напряжения на конденсаторе U_C :

$$U_R = U_x - U_C.$$

Таким образом, выходное напряжение U_R будет пульсирующим с удвоенной амплитудой измеряемого напряжения, как это показано на рис. 14.11, в. Это подтверждается и простыми математическими выкладками:

$$U = U_m \sin \omega t - U_C = U_m \sin \omega t - U_m.$$

При $\sin \omega t = 1$ $U_R = 0$; при $\sin \omega t = 0$ $U_R = -U_m$; при $\sin \omega t = -1$ $U_R = -2U_m$.

Для выделения постоянной составляющей сигнала $U = -U_C$ на выходе детектора ставится емкостной фильтр, подавляющий все остальные гармоники тока.

Из изложенного следует, что чем меньше период исследуемого сигнала (чем выше частота), тем точнее выполняется равенство $U_C = U_m$. Этим объясняются высокочастотные свойства детектора. При работе с вольтметрами, имеющими амплитудный детектор, следует иметь в виду, что эти приборы чаще всего градуируются в среднеквадратичных значениях синусоидального сигнала, т. е. показания прибора $U_{\text{пр}}$ равны амплитудному значению, деленному на коэффициент амплитуды синусоиды $U_{\text{пр}} = U_m / K_a$.

Детектор среднеквадратичного значения — преобразователь переменного напряжения в постоянное, пропорциональное квадрату действующего значения измеряемого напряжения. Значит, измерение действующего напряжения связано с выполнением трех операций: возведение в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднение и извлечение корня из результата усреднения (последняя операция обычно осуществляется при градуировке шкалы вольтметра). Возведение в квадрат мгновенного значения, как правило, производится ячейкой с полупроводниковым элементом путем использования квадратичного участка его характеристики; иногда этот участок создается искусственно.

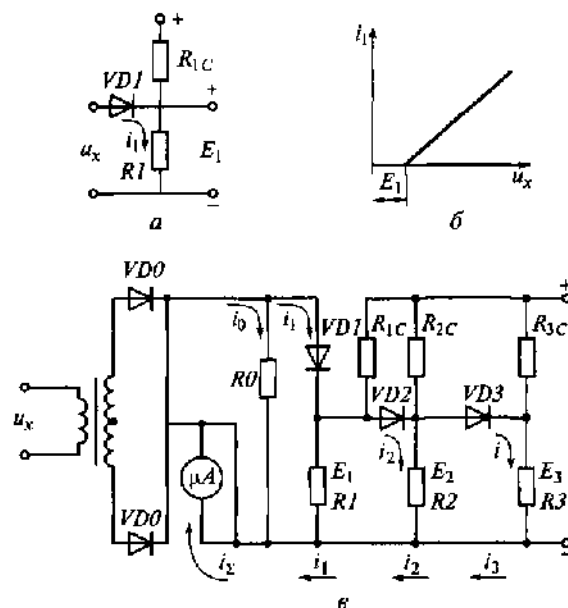


Рис. 14.12. Детектор действующего значения:
 a — диодная ячейка; $б$ — идеализированная характеристика; $в$ — схема квадратичного детектора

На рис. 14.12, a представлена диодная ячейка — $VD1 - R_{1C}$, в которой постоянное напряжение E_1 приложено к диоду $VD1$ таким образом, что он оказывается запертым до тех пор, пока измеряемое напряжение $u_x(t)$ на резисторе $R1$ не превысит величины E_1 .

Следует иметь в виду, что начальный участок вольт-амперной характеристики полупроводникового диода имеет, как правило, малую протяженность (рис. 14.12, $б$), поэтому квадратичную часть удлиняют искусственно методом кусочно-линейной аппроксимации. Для этого в схеме детектора используют несколько диодных ячеек (рис. 14.12, $в$).

На рис. 14.13 показано, как получается в этом случае квадратичная характеристика при последовательном включении цепочек сопротивлений R_{1C} , R_{2C} , R_{3C} с диодами $VD1$, $VD2$, $VD3$. Диод $VD1$ первоначально закрыт напряжением E_1 , затем, по мере роста напряжения $u_x(t)$, он отпирается и начальный участок его идеализированной характеристики увеличивается.

В схеме представленной на рис. 14.12, $в$, первоначально диоды $VD1$, $VD2$, $VD3$ закрыты напряжениями смещения E_1 , E_2 , E_3 , и при малых сигналах $u_x(t)$ ток через миллиамперметр равен i_0 . Затем последовательно все эти диоды открываются, суммарный ток

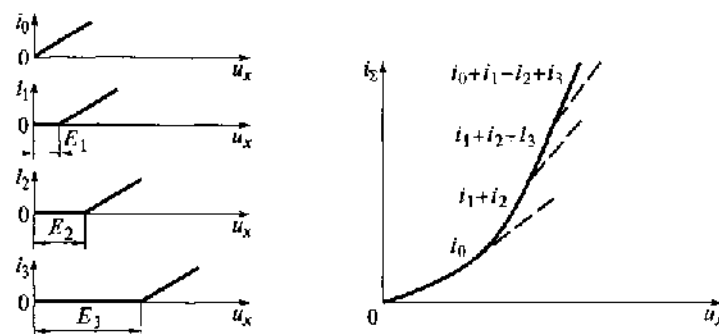


Рис. 14.13. Аппроксимация квадратичной вольт-амперной характеристики

через миллиамперметр возрастает. В результате суммарная вольт-амперная характеристика приближается по форме к квадратичной кривой.

При конструировании приборов среднеквадратичного значения возникает целый ряд трудностей, в том числе и с обеспечением широкого частотного диапазона. Тем не менее эти приборы являются самыми востребованными, так как они позволяют измерять напряжение любой сложной формы.

Детектор средневывпрямленного значения — устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянный ток, пропорциональный средневывпрямленному значению напряжения. Структура выходного тока измерительного прибора с детектором средневывпрямленного значения аналогична ранее рассмотренному узлу выпрямительной системы, и поэтому их свойства во многом идентичны. Аналоговый электронный вольтметр средневывпрямленного значения имеет более высокую чувствительность и меньшее потребление мощности от измерительной цепи, чем прибор со схемой выпрямления.

Интегральные амплитудные детекторы. Диодные (как и транзисторные) амплитудные детекторы при малых напряжениях вносят в измеряемый сигнал значительные нелинейные искажения. Поэтому в последние годы в измерительных устройствах стали применять амплитудные детекторы на интегральных микросхемах — операционных усилителях (ОУ) (рис. 14.14).

Так как детектор выполнен по инвертирующей схеме (возможно и неинвертирующее включение), то при подаче положительных полуволн напряжение u_2 на выходе ОУ будет отрицательным. При этом диод *VD1* открыт, а диод *VD2* закрыт. Выход ОУ через малое прямое сопротивление диода *VD1* подключен ко входу, что создает глубокую отрицательную обратную связь. В результате напряжение на выходе ОУ равно напряжению на его входе и близко к нулю. Выходное напряжение детектора тоже равно нулю. При

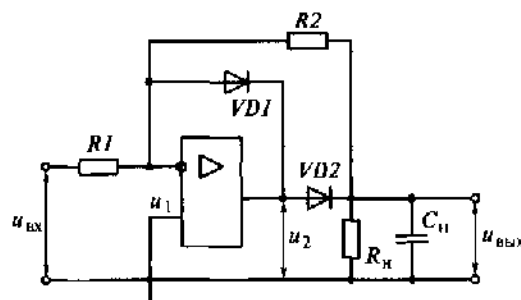


Рис. 14.14. Амплитудный детектор на ОУ

подаче отрицательной полуволны напряжение u_2 на выходе ОУ будет положительным, поэтому диод $VD1$ закрыт, а $VD2$ открыт. При этом напряжение на выходах ОУ и детектора $u_{\text{вых}} = u_2 = -u_{\text{вх}} R_1/R_2$.

14.4. Цифровые вольтметры

Цифровые вольтметры (ЦВ) являются наиболее распространенными цифровыми приборами. Упрощенная схема цифрового вольтметра представлена на рис. 14.15.

Входное устройство содержит делитель напряжения, в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представленный цифровым кодом. Использование в АЦП двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчетным устройством. Узлы схемы соединены с управляющим устройством.

По типу преобразователей цифровые вольтметры могут быть подразделены на четыре группы:

- кодово-импульсные (с поразрядным уравниванием);
- времяимпульсные;



Рис. 14.15. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

- частотно-импульсные;
- пространственного кодирования.

В настоящее время цифровые вольтметры строятся чаще на основе кодово-импульсного и времяимпульсного преобразования.

Аналого-цифровые преобразователи вольтметров преобразуют сигнал постоянного тока в цифровой код, поэтому и вольтметры также считаются приборами постоянного тока. Для измерения напряжения переменного тока на входе вольтметра ставится преобразователь, чаще всего средневыпрямленного значения. Прежде чем перейти к рассмотрению отдельных типов цифровых вольтметров постоянного тока, проанализируем основные технические характеристики среднестатистического цифрового вольтметра постоянного тока:

- диапазон измерения: 100 мВ, 1 В, 10 В, 100 В, 1000 В;
- порог чувствительности (квант или единица дискретности) на диапазоне 100 мВ может быть 1 мВ, 100 мкВ, 10 мкВ;
- число знаков (длина цифровой шкалы) — отношение максимальной измеряемой величины на этом диапазоне к минимальной. Например: диапазону измерения 100 мВ при кванте 10 мкВ соответствует 10^4 знаков;
- входное сопротивление — высокое, обычно более 100 МОм;
- помехозащищенность — цифровые вольтметры обладают высокой чувствительностью, поэтому важно обеспечить хорошую помехозащищенность.

Упрощенная структурная схема, характеризующая принцип возникновения помех на входе цифрового вольтметра, показана на рис. 14.16. Здесь E_c — источник сигнала; $E_{н.в.}$ — помеха, приложенная ко входу вольтметра (помеха нормального вида, наводки); $E_{о.в.}$ — помеха общего вида, возникающая из-за разности потенциалов корпусов источника сигнала и вольтметра; R_i — внутреннее сопротивление источника сигнала; $R_{вх}$ — входное сопротивление вольтметра.

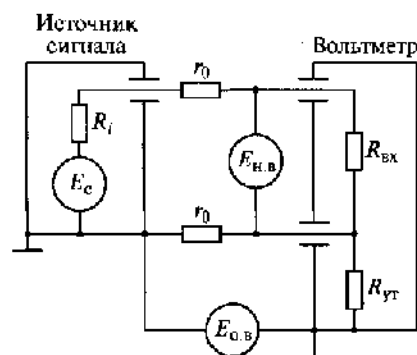


Рис. 14.16. Схема возникновения помех на входе цифрового вольтметра

Помеха общего вида возникает из-за несовершенства источников питания на частотах 50 и 100 Гц, создает падение напряжения на сопротивлении r_0 соединительного провода и переходит во входную цепь вольтметра, если сопротивление утечки R_{yr} между клеммами и корпусом невелико. Если же одну из клемм заземлить, то доля помехи общего вида, переходящая во входную цепь, увеличится. Поэтому при измерении малых сигналов пользуются изолированным от земли (корпуса) входом вольтметра.

Способы уменьшения влияния помех:

- использование экранированных проводов и изолированного входа вольтметра;
- применение интегрирующих вольтметров; при этом период помехи $u_{\text{пом}}(t) = U_{m\text{пом}} \sin \omega t$ кратен времени измерения и помеха устраняется по периоду

$$u_{\text{пом}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{m\text{пом}} \sin \omega t dt \rightarrow 0;$$

- на вход вольтметра ставится фильтр с большим коэффициентом подавления помехи (60...70 дБ).

Коэффициент подавления помехи определяется следующим образом:

$$K_{\text{под}} = 20 \lg(U_{\text{пом.вх}}/U_{\text{пом.вых}}),$$

где $U_{\text{пом.вх}}$ — амплитуда помехи на входе фильтра, $U_{\text{пом.вых}}$ — амплитуда помехи на его выходе.

Точность цифровых вольтметров. Распределение погрешности по диапазону измерения определяется в соответствии с формулой характеризующей класс точности средств измерений:

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right],$$

где c и d — соответственно относительные приведенные суммарная и аддитивная составляющие погрешности; U — измеряемое напряжение; U_k — конечное значение диапазона измерений.

Числовые значения c и d для диапазонов измерения 0,1...1 В находятся в пределах 0,001...0,5 %, причем всегда $c > d$.

Быстродействие цифровых вольтметров. Современные схемы АЦП могут обеспечить очень большое быстродействие, однако из соображений точной регистрации полученного результата и усреднения осевой помехи у цифровых вольтметров оно уменьшается примерно до 20...50 измерений в секунду.

Кодово-импульсные вольтметры. В кодово-импульсных цифровых вольтметрах реализуется принцип компенсационного метода измерения напряжения. Упрощенная структурная схема такого вольтметра представлена на рис. 14.17.

Измерение напряжения U'_x , полученное с входного устройства, сравнивается с компенсирующим напряжением U_k , вырабатываемым прецизионным делителем. Компенсирующее напряжение имеет несколько квантовых уровней в соответствии с двоично-десятичной системой счисления. Например, двухразрядный цифровой вольтметр, предназначенный для измерения напряжений до 100 В, может включать в себя следующие уровни: 80, 40, 20, 10 и 8, 4, 2, 1 В.

Сравнение по величине двух напряжений (измеряемого U'_x и компенсирующего U_k) производится последовательно по команде с управляющего устройства. Процесс сравнения показан на рис. 14.18. Управляющие импульсы U_y через определенные промежутки времени переключают сопротивление точного делителя таким образом, что на выходе делителя возникает последовательно сигнал 80, 40, 20, 10, 8, 4, 2, 1 В; одновременно к соответствующему выходу прецизионного делителя подключается устройство сравнения.

Если соотношение напряжения $U_k > U'_x$, то с устройства сравнения поступает сигнал U_{cp} на отключение в делителе соответствующего звена, чтобы снять сигнал U_k . Если $U_k < U'_x$, то сигнал с устройства сравнения не поступает. После окончания процесса сравнения полученный сигнал $U_{код}$ положения ключей прецизионного делителя и является тем кодом, который считывается отсчетным устройством. На рис. 14.18 показан процесс кодирования аналогового напряжения 63 В, из которого видно, что код, соответствующий этому сигналу, будет таким: 01100011.

Процесс измерения напряжения в кодово-импульсном приборе напоминает взвешивание на весах, поэтому приборы иногда называют поразрядно уравнивающими. Точность кодово-импульсного прибора зависит от стабильности источника опорного напряжения, точности изготовления делителя, порога срабатыва-

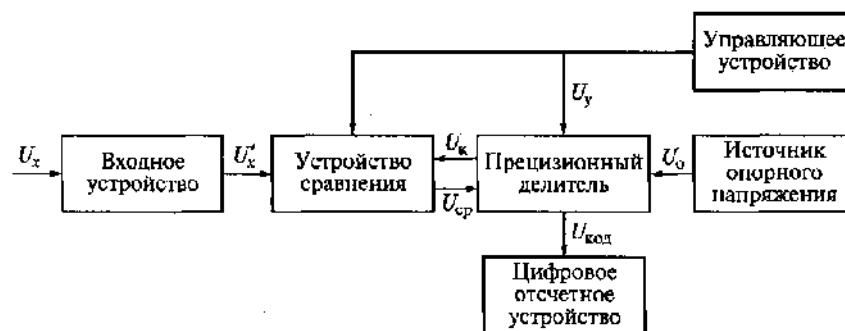


Рис. 14.17. Упрощенная структурная схема кодово-импульсного вольтметра



Рис. 14.18. Графики, показывающие работу кодово-импульсного вольтметра

ния сравнивающего устройства. Для создания нормальной помехозащищенности на входе приборов ставится фильтр. В целом такой цифровой прибор обладает хорошими техническими характеристиками и используется как лабораторный. Первые цифровые приборы создавались по методу взвешивания, но сейчас более широкое распространение получили приборы времяимпульсного типа.

Времяимпульсные вольтметры. В цифровых вольтметрах времяимпульсного (временного) типа содержатся АЦП с промежуточным преобразованием измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, который заполняется импульсами, следующими с известной частотой. В результате такого преобразования дискретный сигнал измерительной информации на выходе преобразователя имеет вид пачки счетных импульсов, число которых пропорционально измеряемому напряжению.

Погрешность измерений времяимпульсных вольтметров определяется следующими факторами: погрешность дискретизации измеряемого сигнала; нестабильность частоты счетных импульсов; наличие порога чувствительности у схемы сравнения и нелинейность пилообразного напряжения, поступающего на схему сравнения.

Времяимпульсный вольтметр с генератором линейно изменяющегося напряжения. Структурная схема цифрового вольтметра и временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рис. 14.19. Данный тип цифрового вольтметра времяимпульсного преобразования включает в себя: АЦП с промежуточным преобразованием измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, расположенный во входном устройстве; генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН); два устройства сравнения; триггер Т; схему

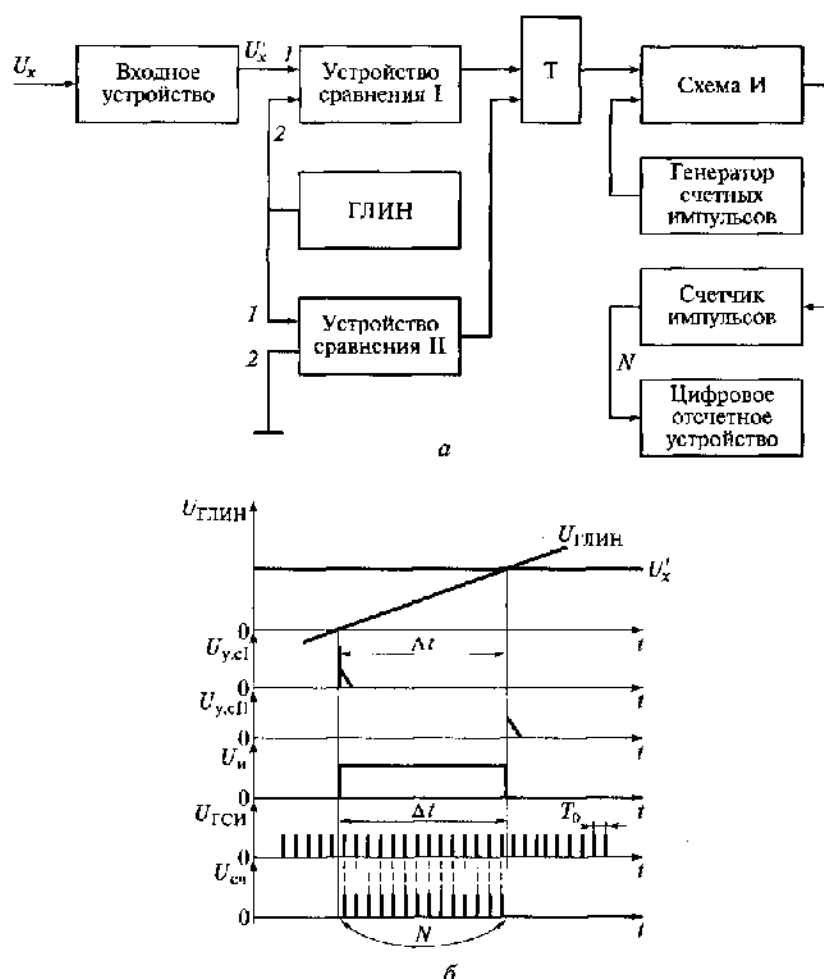


Рис. 14.19. Цифровой вольтметр постоянного тока с ГЛИН:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

И; генератор счетных импульсов; счетчик импульсов; цифровое отсчетное устройство.

Дискретный сигнал измерительной информации на выходе преобразователя U'_x имеет вид пакки счетных импульсов, число которых N пропорционально величине входного напряжения, т. е. U_x . Линейно изменяющееся во времени напряжение $U_{\text{глин}}$ с ГЛИН поступает на вход I обоих сравнивающих устройств. Другой вход устройства сравнения II соединен с корпусом.

В момент равенства напряжения $U_{\text{глин}} = 0$ на входах устройства сравнения I на его выходе возникает импульс (так фиксируется нулевой уровень входного сигнала). Этот импульс, подаваемый на единичный вход триггера Т, вызывает появление сигнала на его выходе. Возвращается триггер в исходное состояние импульсом, поступающим с выхода устройства сравнения II. Этот сигнал возникает в момент равенства измеряемого U'_x и линейно изменяющегося напряжения $U_{\text{глин}}$. Сформированный таким образом сигнал U_T длительностью $\Delta t = U'_x S$ (S — коэффициент преобразования) подается на вход схемы И, на второй вход которой поступает сигнал $U_{\text{гси}}$ с генератора счетных импульсов, следующих с частотой $f_0 = 1/T_0$. На выходе схемы И импульсный сигнал $U_{\text{сч}}$ появляется только тогда, когда есть импульсы на обоих входах, т. е. счетные импульсы проходят тогда, когда присутствует сигнал на выходе триггера.

Число прошедших импульсов $N \approx \Delta t/T_0$ (с учетом коэффициента преобразования S) подсчитывается счетчиком и отображается на индикаторе цифрового отсчетного устройства прибора. Полученная формула $U'_x = N/(f_0 S)$ не учитывает погрешности дискретности из-за несовпадения появления счетных импульсов с началом и концом интервала Δt . Однако еще большую погрешность вносит фактор нелинейности коэффициента преобразования S . Поэтому вольтметры, построенные по данной схеме, являются наименее точными в ряду цифровых. Иногда вольтметры такого типа выполняются как щитовые. К недостаткам вольтметров с ГЛИН относится также необходимость применения фильтров для подавления помех, так как приборы не являются интегрирующими.

Времяимпульсные вольтметры с двойным интегрированием. Структурная схема вольтметра и временные диаграммы, поясняющие ее работу, представлены на рис. 14.20.

Цикл измерения входного напряжения U_x состоит из двух отрезков времени: $T = T_1 + T_2$. В начале цикла измерения при $t = t_0$ управляющее устройство вырабатывает калиброванный импульс U_y^1 длительности $T_1 = T_0 K$, где T_0 — период следования счетных импульсов; K — емкость счетчика. В момент появления фронта

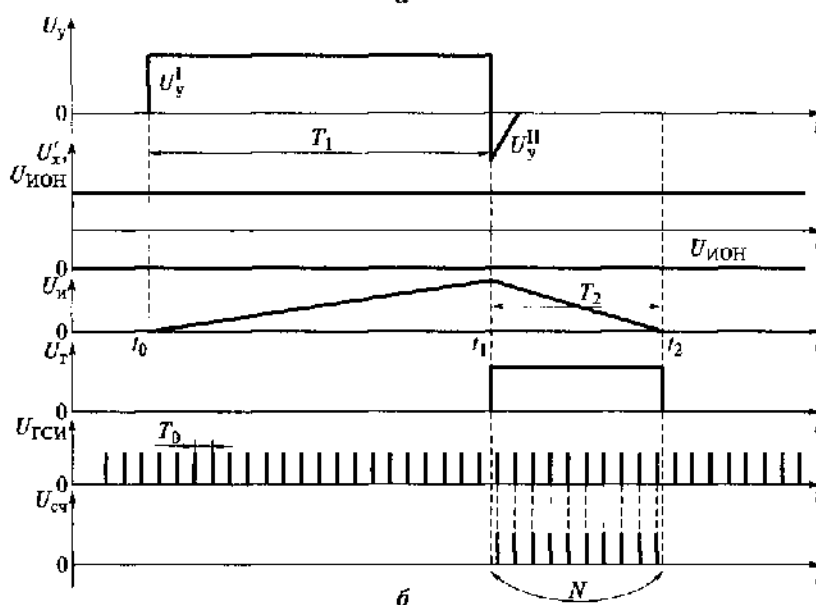
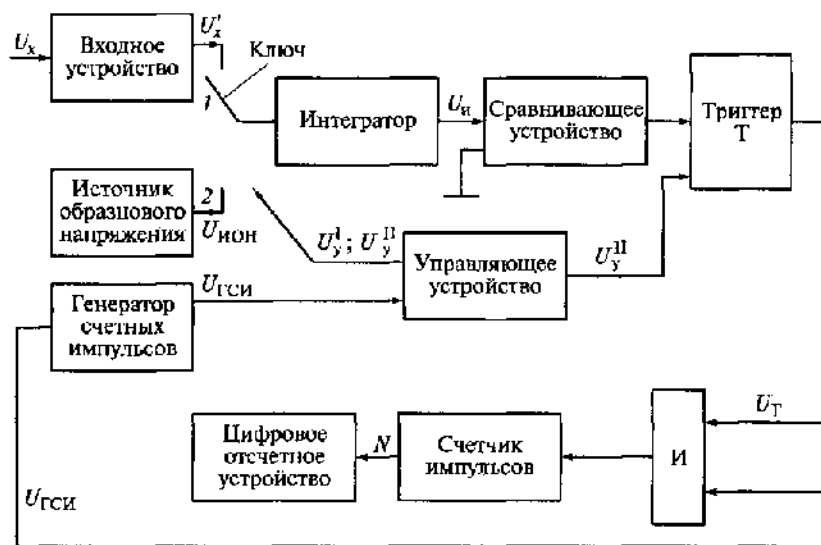


Рис. 14.20. Цифровой вольтметр с двойным интегрированием:
а — структурная схема; б — временные диаграммы

управляющего импульса U_y^I ключ замыкается в положение 1, и с входного устройства на интегратор поступает напряжения U'_x , пропорциональное измеряемому напряжению U_x .

Интегрирование напряжения U'_x продолжается в течение интервала T_1 (на выходе интегратора формируется нарастающее напряжение U_n), по окончании которого при $t = t_0$ управляющий сигнал U_y^{II} переводит ключ в положение 2 и на интегратор с источника образцового напряжения (ИОН) подается образцовое отрицательное напряжение $U_{\text{ИОН}}$. Одновременно с этим управляющий сигнал U_y^{II} опрокидывает триггер. Интегрирование напряжения $U_{\text{ИОН}}$ происходит быстрее, так как в схеме установлено $|U_{\text{ИОН}}| > U'_x$. На выходе интегратора формируется спадающее напряжение U_n , причем длительность интервала интегрирования T_2 тем больше, чем выше амплитуда измеряемого напряжения U'_x .

В момент времени $t = t_2$ напряжение U_n на выходе интегратора становится равным нулю и сравнивающее устройство (второй его вход соединен с корпусом) выдает сигнал на триггер, возвращая его в исходное состояние. На его выходе формируется импульс U_r длительностью T_2 , поступающий на вход схемы И. На другой ее вход подается сигнал $U_{\text{ГСИ}}$ от генератора счетных импульсов (ГСИ). По окончании импульса, поступающего с триггера, процесс измерения прекращается. На счетчике, а значит, и на цифровом отсчетном устройстве, оказывается записанным число импульсов $N(U_{\text{сч}})$, пропорциональное уровню измеряемого напряжения U'_x :

$$\int_{t_0}^{t_1} U'_x dt - \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{ИОН}} dt = 0.$$

Это выражение приводит к следующим формулам:

$$T_1 = T_0 K; \quad T_2 \approx T_0 N; \quad U'_x T_1 = U_{\text{ИОН}} T_2.$$

Из двух последних формул получим

$$U'_x T_1 = U_{\text{ИОН}} N / K.$$

Как видно из предварительных соотношений, погрешность результата измерения зависит от одного уровня образцового напряжения (а не от нескольких, как в кодово-импульсном приборе). Однако здесь также имеет место погрешность дискретности. Достоинством прибора является хорошая помехозащищенность, так как прибор интегрирующий. На основе приборов с двойным интегрированием выпускаются приборы с более высоким классом точности, чем приборы с ГЛИН.

Цифровые вольтметры наивысшего класса точности создаются комбинированными: в схемах сочетаются методы поразрядного

уравновешивания и время импульсного интегрирующего преобразования.

Большинство серийных цифровых вольтметров переменного тока строятся с применением преобразователей переменного тока в постоянный (детекторов) средневывпрямленного и действующего значения. И, как было отмечено ранее, свойства этих приборов будут во многом определяться детекторами.

Цифровые мультиметры. Включение в структурную схему цифрового вольтметра микропроцессора и дополнительных преобразователей позволяет превратить его в универсальный измерительный прибор — мультиметр.

Цифровые мультиметры измеряют постоянное и переменное напряжение, силу тока, сопротивления резисторов, частоту электрических колебаний и т. д. При совместном использовании с осциллографом мультиметры позволяют измерять временные интервалы (период, длительность импульсов и т. д.). Наличие в схеме вольтметра микропроцессора позволяет осуществлять автоматическую коррекцию погрешностей, автокалибровку и диагностику отказов.

На рис. 14.21 в качестве примера показан современный цифровой вольтметр с микропроцессором. Основными устройствами вольтметра являются микропроцессор, АЦП, блоки нормализации сигналов и управления.

Блок нормализации сигналов с помощью соответствующих преобразователей приводит входные измеряемые параметры (напряжения переменного и постоянного токов, сопротивления постоянному току и пр.) к унифицированному сигналу (u), который подается на вход АЦП. Последний действует обычно по методу двойного интегрирования. Блок управления обеспечивает выбор режима работы для заданного вида измерений, управление АЦП, дисплеем. Кроме того, он создает нужную конфигурацию системы измерений.

Основой блока управления является микропроцессор, который связан с другими через сдвигающие регистры. Управление микропроцессором осуществляется с помощью клавиатуры, расположенной на панели управления, или через стандартный интерфейс (блок сопряжения, стык) подключаемого канала связи. Программа работы микропроцессора хранится в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) и обеспечивается с помощью оперативного запоминающего устройства (ОЗУ).

Для измерений используются встроенные высокостабильные и прецизионные резистивные делители опорного напряжения, дифференциальный усилитель (ДУ) и ряд элементов (аттенюатор и устройство выбора режима, блок опорного напряжения ($U_{оп}$)). Все импульсные и цифровые устройства синхронизируются сигналами генератора тактовых импульсов.

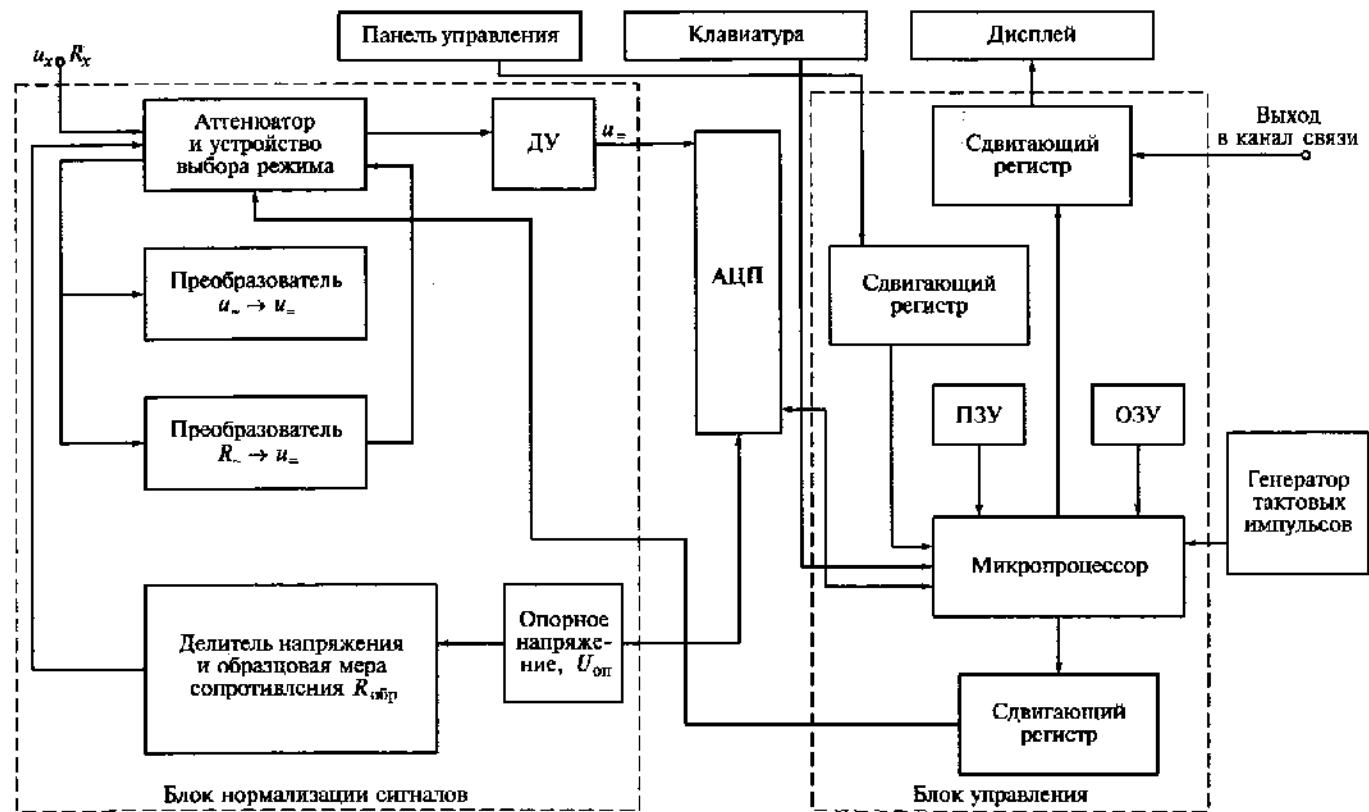


Рис. 14.21. Современный цифровой вольтметр с микропроцессором

14.5. Цифровые частотомеры

Цифровые частотомеры (ЦЧ) — довольно распространенные измерительные приборы, используемые в самых различных отраслях науки, техники, промышленности для оценки частотно-временных параметров электрических сигналов. Они работают в очень широком диапазоне значений измеряемых частот периодических сигналов (или их периода).

Современные ЦЧ обеспечивают самые высокие метрологические характеристики (точность и разрешающую способность) среди всех прочих ЦИП, отличаются достаточно высоким быстродействием, широкими функциональными возможностями, простотой эксплуатации, высокой надежностью.

Помимо измерения частотно-временных параметров периодических сигналов современные ЦЧ применяются и для измерения различных физических величин. Для этого необходимо подключать к ЦЧ вспомогательные первичные измерительные преобразователи (датчики), имеющие выходные сигналы, частота или период (длительность) которых пропорциональны измеряемой величине. Например, ЦЧ можно использовать для измерения скорости вращения вала двигателя, или расхода жидкости в трубопроводе, или скорости потока воздуха. Цифровые частотомеры находят также применение в качестве генераторов стабильных частот и таймеров постоянных или программируемых интервалов времени. Кроме того, с помощью ЦЧ легко можно организовать подсчет числа импульсов (числа событий).

Практически все ЦЧ обеспечивают два основных режима работы: измерения частоты и измерения периода (длительности интервала времени). Рассмотрим структуры, принципы действия и погрешности ЦЧ в этих режимах.

14.5.1. Режим измерения частоты

Упрощенная структура ЦЧ, реализующая режим измерения частоты, показана на рис. 14.22, *а*, а временные диаграммы работы в этом режиме приведены на рис. 14.22, *б*.

Исследуемый периодический сигнал *1* (соответственно диаграмма *1*) подается на вход усилителя-ограничителя (УО), где преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов *2* (диаграмма *2*) фиксированной амплитуды, частота которых равна частоте f_x входного сигнала. Далее этот сигнал поступает на вход электронного ключа, которым управляет таймер, периодически замыкающий его на постоянный стабильный интервал времени *3* (диаграмма *3*), например $T_0 = 1$ с. Сформированная таким образом серия импульсов *4* (диаграмма *4*) поступает на вход счетчика (СЧ), содержимое которого *5* в начале интервала T_0 равно нулю, а в

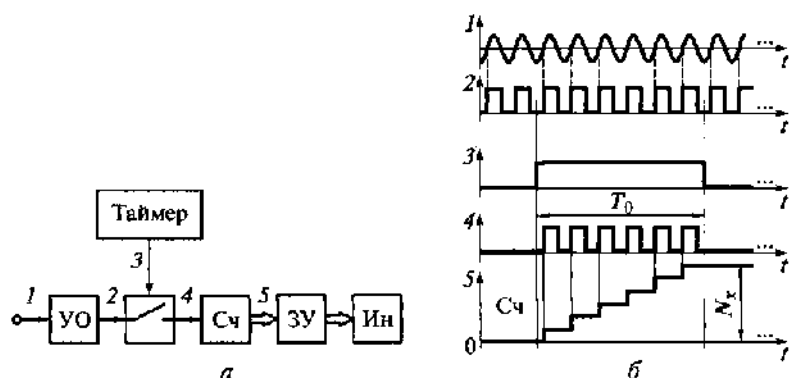


Рис. 14.22. Режим измерения частоты:

a — упрощенная структура ЦЧ; *б* — временные диаграммы работы

конце интервала счета равно числу поступивших импульсов N_x . Это число прямо пропорционально измеряемой частоте f_x входного сигнала:

$$N_x = \text{Ent} [T_0/T_x] = \text{Ent} [T_0 f_x],$$

где $\text{Ent} [\dots]$ — оператор определения целой части выражения $[\dots]$; T_x — период входного сигнала $T_x = 1/f_x$; f_x — частота входного сигнала.

Содержимое счетчика 5 запоминается в буферном запоминающем устройстве (ЗУ) и хранится там до окончания следующего цикла измерения и переписи нового результата. Одновременно результат поступает на цифровое отсчетное устройство — индикатор (Ин). Если, например, в течение интервала $T_0 = 1$ с на вход счетчика поступило 254 импульса, то, следовательно, частота входного сигнала $f_x = 254$ Гц. Прибор работает циклически, т. е. в начале каждого нового цикла счетчик «обнуляется». Таким образом, результат измерения периодически обновляется. Отметим, что форма периодического сигнала значения не имеет.

В реальных ЦЧ имеется несколько диапазонов измерения частоты, т. е. формируется несколько различных по длительности стабильных интервалов T_0 (например, $T_{01} = 0,1$ с; $T_{02} = 1,0$ с; $T_{03} = 10$ с). При работе с ЦЧ в режиме измерения частоты важным является правильный выбор диапазона, т. е. выбор интервала T_0 , в течение которого происходит подсчет импульсов. Чем больше импульсов N_x поступит в счетчик (в пределах, конечно, максимально возможного) на интервале T_0 , тем больше будет значащих цифр результата измерения на индикаторе, тем, следовательно, лучше.

Общая погрешность. Погрешность Δ_f результата измерения частоты f_x складывается из двух составляющих: погрешности

дискретности Δ_{F1} и погрешности Δ_{F2} , вызванной неидеальностью задания интервала времени T_0 .

Погрешность дискретности. Погрешность Δ_{F1} неизбежно присутствует в любом аналого-цифровом преобразовании. Рассмотрим природу возникновения этой погрешности. Отношение T_0/T_x может быть любым, так как частота входного сигнала может иметь бесконечное множество различных значений. Понятно, что в общем случае отношение T_0/T_x — дробное число. А поскольку число импульсов N_x , подсчитываемых счетчиком, может быть только целым, то в процессе такого автоматического округления естественно и неизбежно возникает погрешность (погрешность дискретности).

Оценим возможное значение этой погрешности. При одном и том же постоянном значении интервала T_0 , в зависимости от расположения случайного во времени входного сигнала и интервала T_0 , число импульсов, приходящихся на интервал T_0 , может отличаться в ту или другую сторону на единицу. На рис. 14.23, а показаны две разные ситуации при совершенно одинаковых исходных условиях (одна и та же входная частота f_x , один и тот же интервал T_0): в первом случае (диаграмма 1) число импульсов, поступивших в счетчик, равно пяти, а во втором случае (диаграмма 2) число импульсов равно шести.

Погрешность Δ_{F1} — случайная величина, поскольку входной сигнал и сигнал таймера в общем случае никак не связаны между собой. Максимально возможное значение этой погрешности неизменно и составляет одну единицу младшего разряда — 1 квант:

$$\Delta_{F1} = \pm 1 \text{ импульс} = \pm 1/T_0.$$

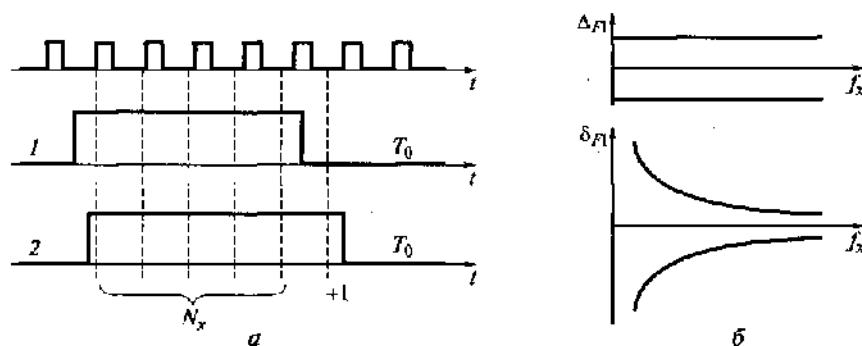


Рис. 14.23. Аддитивная погрешность в режиме измерения частоты:
а — возникновение; б — абсолютная и относительная погрешности

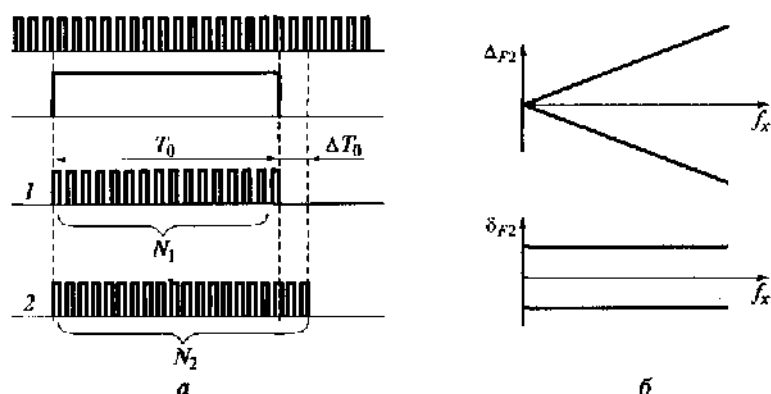


Рис. 14.24. Мультипликативная погрешность в режиме измерения частоты:
 а — возникновение; б — абсолютная и относительная погрешности

Таким образом, Δ_{F1} — это *аддитивная* погрешность, т.е. не зависящая от значения измеряемой величины — частоты f_x (рис. 14.23, б).

Погрешность Δ_{F2} , вызванная неточностью (неидеальностью) задания интервала T_0 , показана на рис. 14.24, а.

Если бы длительность интервала T_0 имела строго номинальное значение, то число импульсов, поступивших в счетчик, было бы равно N_1 (см. рис. 14.24, а). Если же интервал T_0 будет, например, несколько больше номинального и составит $T_0 + \Delta T_0$, то при той же измеряемой частоте f_x в счетчик поступит больше импульсов $N_2 > N_1$ (см. рис. 14.24, а).

Неточность ΔT_0 задания этого интервала приводит к появлению *мультипликативной*, т.е. линейно зависящей от значения измеряемой частоты f_x , составляющей:

$$\Delta_{F2} = \pm (f_x \Delta T_0 / T_0).$$

Суммарная абсолютная погрешность Δ_F результата измерения частоты f_x и суммарная относительная погрешность δ_F , %, соответственно:

$$\Delta_F = \Delta_{F1} + \Delta_{F2} = \pm [(1/T_0) + f_x(\Delta T_0/T_0)];$$

$$\delta_F = \delta_{F1} + \delta_{F2} = \pm [(1/T_0 f_x) + (\Delta T_0/T_0)].$$

Графическая иллюстрация поведения составляющих и суммарных абсолютной и относительной погрешностей результата измерения частоты f_x приведена на рис. 14.25.

Видно, что чем меньше значение измеряемой частоты в этом режиме, тем (при постоянном интервале T_0) больше относитель-

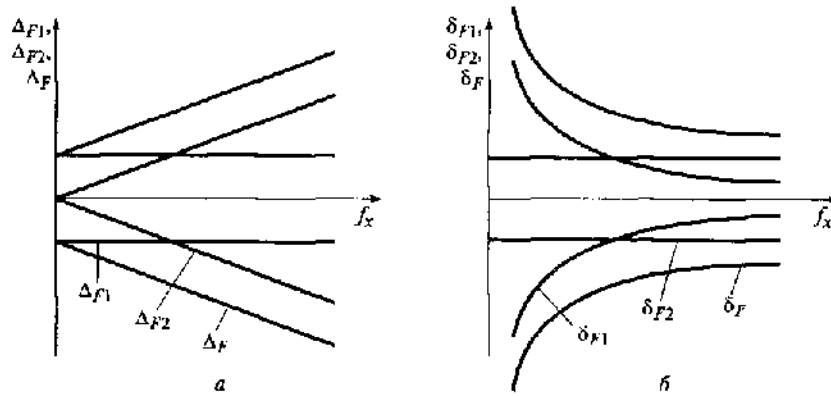


Рис. 14.25. Суммарная абсолютная (а) и относительная (б) погрешности

ная погрешность δ_F . Для уменьшения этой погрешности необходимо увеличивать интервал T_0 , но нецелесообразно его делать слишком большим. Так, например, длительность интервала $T_0 = 10$ с уже неудобна для работы, так как значительное время ожидания появления каждого нового результата (10 с) может вызвать у оператора раздражение. Для измерения сравнительно низких частот удобнее использовать второй режим ЦЧ: режим измерения периода исследуемого входного сигнала $T_x = 1/f_x$.

Рассмотрим пример определения погрешностей результата измерения частоты. Зададим значения интервала $T_0 = 1$ с и возможную погрешность его задания $\Delta T_0 = \pm 2$ мс. Получен результат измерения частоты $f_x = 1$ кГц. Оценим значения составляющих и суммарной погрешности результата.

Значения абсолютных аддитивной Δ_{F1} и мультипликативной Δ_{F2} погрешностей соответственно:

$$\Delta_{F1} = \pm(1/T_0) = \pm 1 \text{ Гц};$$

$$f_x \Delta T_0 / T_0 = \pm(1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / 1) = \pm 2 \text{ Гц}.$$

Значения относительных аддитивной δ_{F1} и мультипликативной δ_{F2} погрешностей определим обычным образом:

$$\delta_{F1} = (\Delta_{F1}/f_x)100 = \pm (1/1000)100 = \pm 0,1 \%;$$

$$\delta_{F2} = (\Delta_{F2}/f_x)100 = \pm (2/1000)100 = \pm 0,2 \%.$$

Суммарные абсолютная Δ_F и относительная δ_F погрешности результата измерения частоты f_x соответственно равны:

$$\Delta_F = \Delta_{F1} + \Delta_{F2} = \pm 3 \text{ Гц};$$

$$\delta_F = \delta_{F1} + \delta_{F2} = \pm 3 \%.$$

14.5.2. Режим измерения периода

Упрощенная структура ЦЧ в режиме измерения периода приведена на рис. 14.26, а, а временные диаграммы — на рис. 14.26, б. В этом режиме входной периодический сигнал 1 (соответственно диаграмма 1) любой формы подается на вход формирователя периода (ФП), где преобразуется в прямоугольный сигнал 2 (диаграмма 2) фиксированной амплитуды, длительность которого T_x равна периоду входного сигнала.

Далее сигнал поступает на управляющий вход электронного ключа и замыкает его на время T_x . На входе электронного ключа — прямоугольные импульсы 3 (диаграмма 3) стабильной неизвестной частоты F_0 , постоянно поступающие с выхода генератора тактовых импульсов (ГТИ). Таким образом, на выходе ключа формируется серия прямоугольных импульсов 4 (диаграмма 4), в которой число импульсов N_x пропорционально длительности T_x :

$$N_x = \text{Ent} [T_x / T_0] = \text{Ent} [T_x F_0],$$

где $\text{Ent} [\dots]$ — оператор определения целой части выражения $[\dots]$; T_0 — период тактовых импульсов.

Индикатор (Ин) позволяет считывать результат измерения. Если, например, частота импульсов ГТИ была установлена $F_0 = 1$ кГц, а содержимое счетчика (СЧ) в конце интервала счета оказалось равным $N_x = 1520$, то период входного сигнала, следовательно, равен $T_x = 1,52$ с.

И в этом режиме ЦЧ работает циклически, т. е. в начале каждого нового цикла преобразования счетчик обнуляется. Таким образом, результат измерения периодически обновляется.

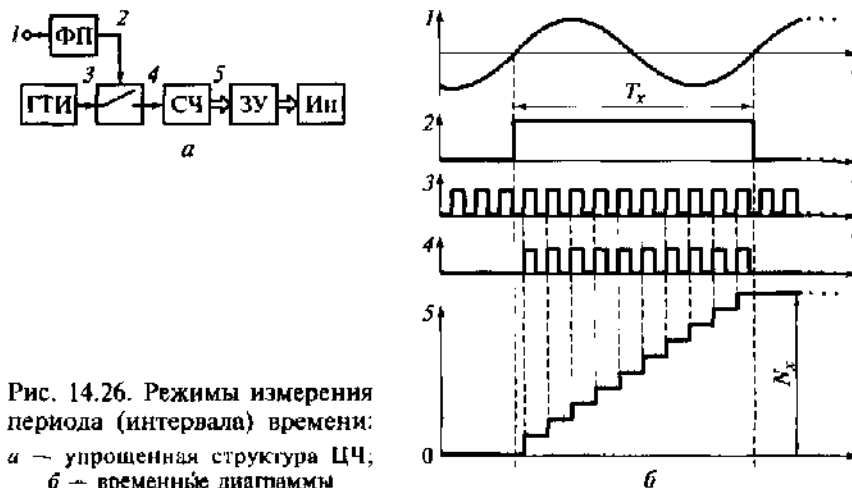


Рис. 14.26. Режимы измерения периода (интервала) времени:
а — упрощенная структура ЦЧ;
б — временные диаграммы

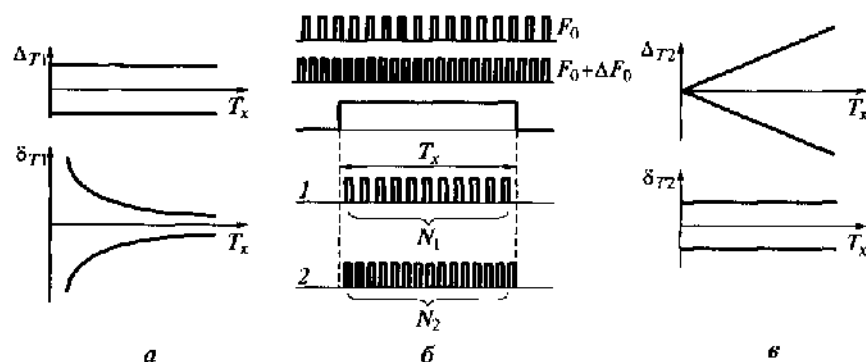


Рис. 14.27. Составляющие погрешности в режиме измерения периода:
 а — аддитивная составляющая; б — появления второй составляющей; в — мульти-
 пликативная составляющая

Обычный ЦЧ имеет высокочастотный стабильный ГТИ и цифровой делитель частоты, с помощью которого формируется несколько разных тактовых частот F_0 (например, $F_{01} = 1,0$ кГц; $F_{02} = 10$ кГц; $F_{03} = 100$ кГц; $F_{04} = 1,0$ МГц), что означает наличие нескольких возможных диапазонов измерения периода. Важным поэтому является вопрос правильного выбора диапазона измерения, в котором обеспечивается минимальная погрешность.

Погрешность Δ_T результата измерения периода. Погрешность Δ_T интервала времени T_x , как и в режиме измерения частоты, содержит две составляющие: погрешность дискретности Δ_{T1} и погрешность Δ_{T2} , вызванную неточностью (неидеальностью) значения F_0 частоты ГТИ. Погрешность дискретности Δ_{T1} по природе аналогична рассмотренной в первом режиме и представляет

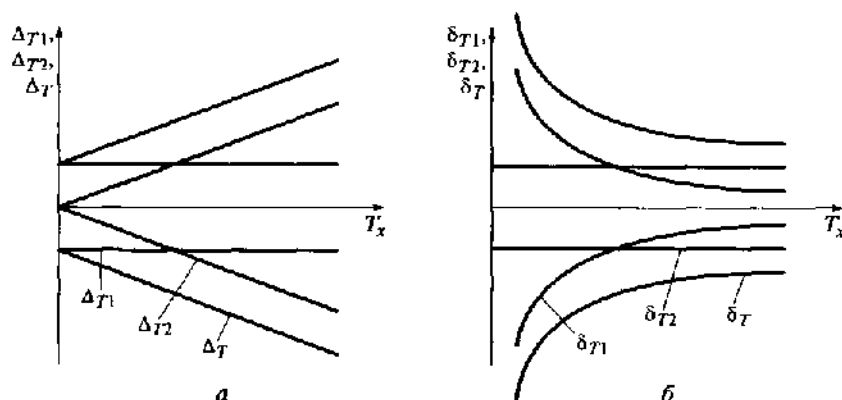


Рис. 14.28. Суммарная абсолютная (а) и относительная (б) погрешности

собой аддитивную погрешность (рис. 14.27, а). Появление второй составляющей — погрешности Δ_{T2} — иллюстрирует рис. 14.27, б.

Если бы частота сигнала ГТИ была строго равна номинальной F_0 , то число импульсов, поступивших в счетчик в течение интервала T_x , было бы равно N_1 . Если же частота сигнала ГТИ будет, например, несколько больше номинальной и составит $F_0 + \Delta F_0$, то на том же интервале T_x в счетчик поступит больше импульсов $N_2 > N_1$. Эта составляющая погрешности мультипликативна, т.е. ее значение тем больше, чем больше длительность измеряемого периода (интервала) T (рис. 14.27, в).

Суммарная абсолютная погрешность Δ_T результата измерения периода T_x и суммарная относительная погрешность δ_T , %, (рис. 14.28) соответственно:

$$\Delta_T = \Delta_{T1} + \Delta_{T2} = \pm [(1/F_0) + T_x(\Delta F_0/F_0)];$$

$$\delta_T = \delta_{T1} + \delta_{T2} = \pm [(1/F_0 T_x) + (\Delta F_0/F_0)].$$

Контрольные вопросы

1. Какой измерительный прибор называется цифровым? Какие разновидности ЦИП существуют?
2. Каковы основные классификационные признаки ЦИП?
3. Какие технические характеристики ЦИП определяют их возможности?
4. Какова структурная схема ЦИП? Как выглядит векторная диаграмма ЦИП развертывающего и следящего типов?
5. Что такое операционный усилитель? Каковы его схема включения и передаточные характеристики?
6. Каковы назначение компаратора и его передаточные характеристики?
7. Приведите схему цифроаналогового преобразователя и поясните его работу.
8. Каково назначение аналого-цифрового преобразователя? Как выглядят структурные схемы параллельного, последовательного и параллельно-последовательного АЦП?
9. Как выглядят структурные схемы аналоговых электронных вольтметров? Каковы назначение и преимущества этих приборов?
10. Каково назначение амплитудных детекторов? Какие имеются схемы детекторов и их характеристики?
11. Как производится аппроксимация квадратичной вольт-амперной характеристики детектора?
12. Как реализуется схема амплитудного детектора на операционных усилителях?
13. Какие существуют разновидности цифровых вольтметров по типу АЦП? Как выглядит структурная схема цифрового вольтметра?
14. За счет чего возникают и какими способами уменьшаются помехи на выходе цифрового вольтметра?

15. Объясните схему и графики, показывающие работу кодово-импульсного вольтметра.

16. Объясните структурную схему и временные диаграммы цифрового вольтметра с генератором линейно изменяющегося напряжения.

17. Объясните схему и временные диаграммы цифрового вольтметра с двойным интегрированием.

18. Как функционирует цифровой вольтметр с микропроцессором?

19. Как работает цифровой частотомер в режимах измерения частоты и периода?

20. Какие погрешности возникают при работе цифровых частотомеров?

ГЛАВА 15

СРЕДСТВА ВИЗУАЛЬНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ, ВЫВОДА И РЕГИСТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

15.1. Отображение результатов измерений медленно изменяющихся величин

Традиционным средством отображения измеренных значений медленно изменяющихся аналоговых величин является отсчетная шкала с указателем. Примеры видов шкал и указателей измерительных приборов с непосредственным отсчетом (показывающих приборов) приведены в табл. 15.1.

Снижение погрешности отсчета от параллакса обеспечивает зеркальная шкала. Хорошую обзорность показаний создают профильные вертикальные (рис. 15.1) и горизонтальные (рис. 15.2) шкалы. Метка на указателе позволяет отслеживать дрейф значений измеряемой величины. На шкалах могут быть метки, указыва-

Таблица 15.1

Некоторые виды шкал и указателей показывающих приборов

Указатель	Шкала	Пример прибора
Стрелка	Шкала с метками линейчатая, дугообразная и др.	Магнитоэлектрический прибор
Световая точка или световое пятно	Шкала с метками из матового стекла	Зеркальный гальванометр; светолучевой осциллограф
Неподвижные штрихи и перемещающееся «окно»	Подвижная шкала, в том числе с проецированием меток	Прибор с подвижной шкалой
Граничная метка шкалы	Поворотная шкала с метками	Микрометрический винт
Подвижный мениск жидкости	Капиллярная трубка с метками	Ртутный термометр, манометрическая трубка
Поверхность жидкости	Подвижная шкала	Ареометр

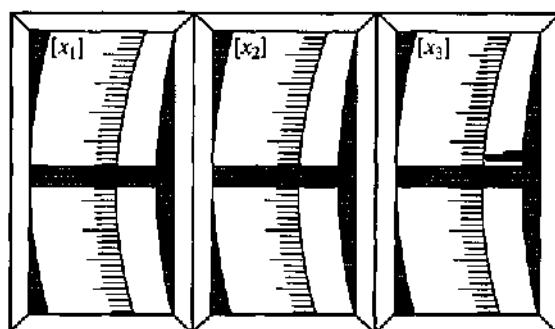


Рис. 15.1. Профильные вертикальные шкалы

ющие допустимый предел измерений, например разработаны новые шкалы с использованием светоизлучающих диодов, имеющих форму штриха (см. рис. 15.2); их разрешение достигает 1 %. Наряду с маркированными шкалами существуют также их аналоги с сигнальными лампами, указывающими измеренные значения. Хорошую наглядность создают мнемонические панели, отображающие состояния объекта измерения, как это видно на примере измерения уровня жидкости в резервуаре (рис. 15.3). Резервуар отображается подсвечиваемым профилем в виде окна из матового стекла (5), а уровень жидкости указывается положением подвижного экрана (3).

Визуальное отображение результатов измерений может сопровождаться акустическими или световыми сигналами, формируемыми в определенных точках шкалы, соответствующих заданным (например, граничным) значениям измеряемых величин.

Современная измерительная техника зачастую связана с дистанционными измерениями параметров и характеристик пространственно распределенных объектов. Это требует решения специфических проблем, в том числе уменьшения погрешностей из-

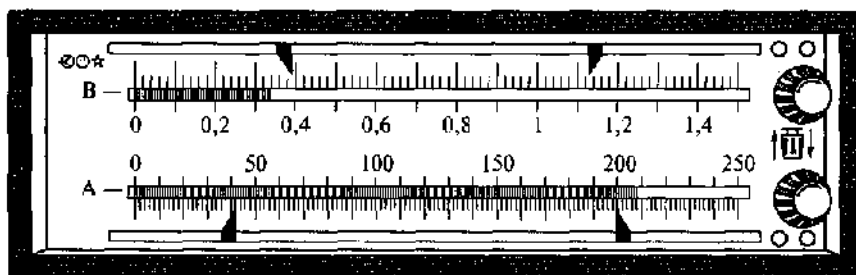


Рис. 15.2. Шкала с использованием светоизлучающих диодов в качестве указателя

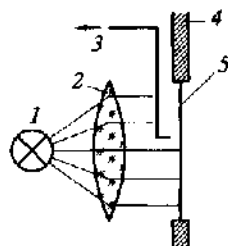
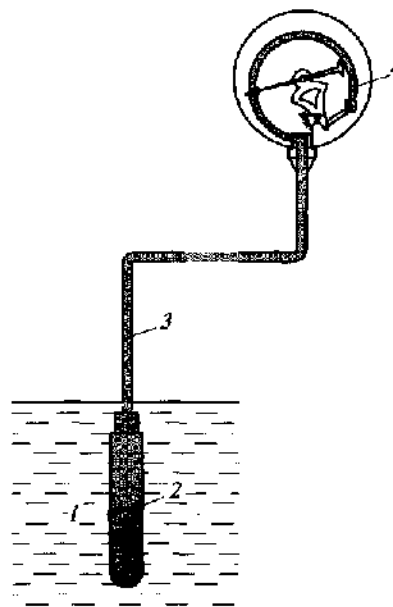


Рис. 15.3. Устройство неконтактной палетки контроля за уровнем жидкости в резервуаре:

1 — источник света; 2 — конденсор;
3 — подвижный экран; 4 — стена; 5 —
окно

Рис. 15.4. Устройство для дистанционного измерения температуры посредством пружинного трубчатого манометра:

1 — измеряемая среда; 2 — ртутный
термометр; 3 — капиллярная трубка;
4 — пружинный трубчатый манометр



мерений, обусловленных влиянием среды передачи результатов измерений и их преобразованиями. Для этих целей используют электрические, оптические и значительно реже пневматические сигналы, обеспечивающие последующую обработку данных, их регистрацию и отображение.

В некоторых случаях для дистанционной передачи результатов измерений используются механическая и гидравлическая энергии; это характерно в основном для традиционного измерительного оборудования соответствующих принципов действия, в частности уровнемеров, тахометров, манометров и др. Примером гидравлической передачи сигналов может служить дистанционное измерение температуры с помощью пружинного трубчатого манометра, в котором датчиком является ртутный термометр (рис. 15.4). Изменения высоты столбика ртути, пропорциональные колебаниям измеряемой температуры, вызывают соответствующие изменения давления в капиллярной трубке, подведенной к манометру.

Устройством отображения пневматических сигналов является манометр.

Для передачи данных на сравнительно небольшие расстояния используются сигналы постоянного тока; для их отображения в принципе пригодны известные электроизмерительные приборы.

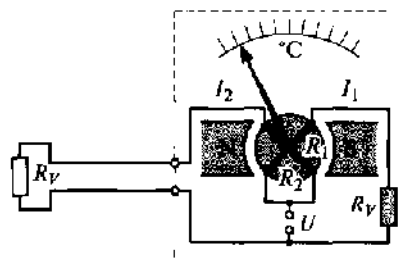


Рис. 15.5. Схема дистанционного измерения температуры посредством логометра

Однако на практике для этих целей применяются дополнительные преобразователи (усилители, выпрямители) и измерительные устройства, объединяемые с показывающим прибором для конкретных применений.

На рис. 15.5 показана упрощенная схема дистанционного измерения температуры при помощи логометра, датчиком в которой служит термометр сопротивления. Шкалу логометра

для таких измерений градуируют под определенный тип датчика.

При дистанционной передаче результатов измерений оптические сигналы на приемной стороне преобразуются в электрические сигналы.

15.2. Визуальное отображение величин, быстро изменяющихся во времени

Важнейшим средством визуального отображения переменных величин является универсальный электроно-лучевой осциллограф, основу которого составляет электроно-лучевая трубка (ЭЛТ), схематично изображенная на рис. 15.6. Электроны, излучаемые подогревным катодом 8, проходят через управляющий электрод 7 (предназначен для регулировки яркости; его действие аналогично сетке лампы) и трубчатые аноды 6 (служат для ускорения электронов и фокусировки потока) и попадают на люминесцирующий экран 1, покрытый изнутри стеклянной колбы веще-

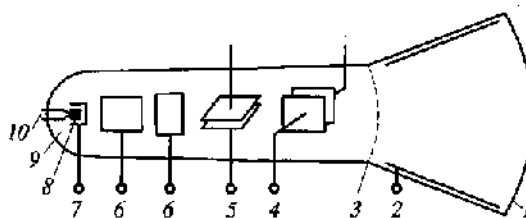


Рис. 15.6. Схематическое изображение электроно-лучевой трубки:

1 — люминесцирующий экран; 2 — второй анод; 3 — сетка; 4, 5 — пары управляющих пластин (вертикального и горизонтального отклонения луча соответственно); 6 — трубчатый анод; 7 — управляющий электрод; 8 — подогревный катод; 9 — стеклянная колба; 10 — нить накала

ством, вызывающим его свечение. В трубке имеются две пары управляющих пластин 4 и 5, между которыми пролетает поток электронов. Пластины 5 расположены горизонтально. Подведенное к ним измеряемое переменное напряжение создает электрическое поле вертикального отклонения потока электронов, который вызывает на экране свечение в виде прямой вертикальной линии. Чтобы получить изображение измеряемого сигнала в функции времени, на вторую пару пластин 4 горизонтального отклонения луча подают пилообразное напряжение развертки, периодически изменяющееся с постоянной скоростью (по линейному закону).

В отсутствие напряжения на пластинах вертикального отклонения при наличии горизонтальной развертки луч «прочерчивает» на экране горизонтальную прямую. В отсутствие напряжений на обеих парах отклоняющих пластин луч остается неподвижным и высвечивает точку в центре экрана. Изменение полярности сигнала вызывает перемещение луча относительно горизонтальной (срединной) линии экрана ЭЛТ. Дополнительное ускорение электронов после отклоняющих пластин обеспечивает второй анод 2, обратное воздействие которого на пластины уменьшается с током.

Чувствительность отклонения по обеим координатным осям зависит от конструктивного исполнения ЭЛТ и ее электрических параметров. При этом должен быть соблюден компромисс между достаточной яркостью изображения, с одной стороны, и требуемыми чувствительностью, широкополосностью и точностью, с другой. Так, например, расширение полосы частот приводит к снижению чувствительности ЭЛТ. Поскольку от полосы частот ЭЛТ зависит и время T_n нарастания характеристики осциллографа, то эта полоса определяет и погрешность измерения осциллографом импульсных сигналов. График зависимости указанной систематической погрешности e_c от нормированной длительности $T_{имп}/T_n$ измеряемого импульса изображен на рис. 15.7.

Упрощенная схема электронно-лучевого осциллографа представлена на рис. 15.8. Измеряемое напряжение (вход 3) подается на пластины вертикального отклонения после усиления, а при весьма малых уровнях (вход 2) — с дополнительным предварительным усилением. Блок II осуществляет синхронизацию генератора 14 горизонтальной развертки с началом периода измеряемого напряжения. В указанном на схе-

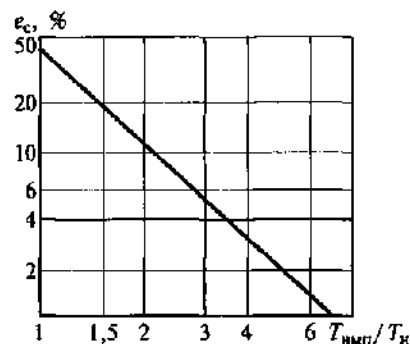


Рис. 15.7. График зависимости систематической погрешности измерения импульсов от их нормированной длительности

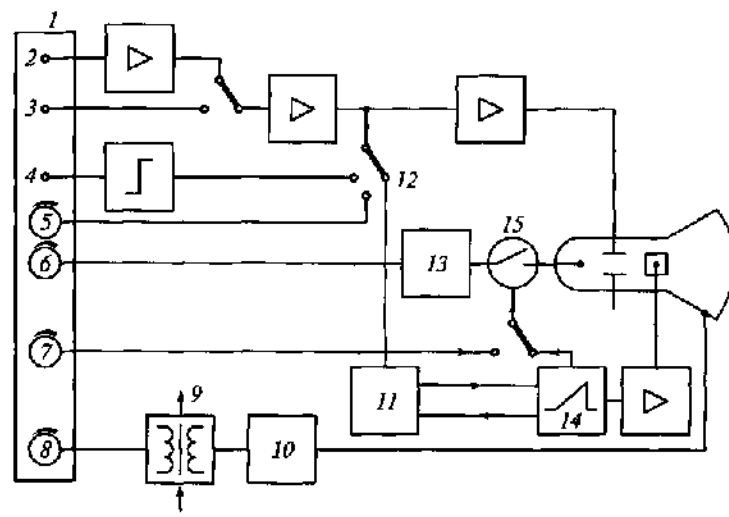


Рис. 15.8. Упрощенная схема универсального электронно-лучевого осциллографа:

1 — элементы управления; 2, 3 — входы измерительного сигнала; 4 — вход сигнала внешней синхронизации; 5 — кнопка ручного пуска; 6 — регулятор сигнала модуляции яркости; 7 — кнопка гашения луча; 8 — регулятор напряжения; 9 — напряжение питания; 10 — блок высокого напряжения; 11 — блок сигналов внутренней синхронизации; 12 — переключатель режима синхронизации; 13 — модулятор яркости; 14 — генератор горизонтальной (пилообразной) развертки; 15 — ключ гашения луча

ме (см. рис. 15.8) положении переключателя 12 синхронизация является внутренней (по сигналам собственного блока 11). Синхронизация может быть и внешней — с частотой внешнего генератора, подключаемого к входу 4, либо по нажатию кнопки 5 (ручной запуск обычно используют при фотографировании изображения)¹.

Для того чтобы на экране измеряемый сигнал не «прочерчивался» в обратном направлении при спаде пилообразного напряжения развертки, на управляющий электрод ЭЛТ подается отрицательный импульс, гасящий поток электронов. Этот импульс гашения вырабатывается генератором 14 развертки. Гасить луч мож-

¹ Синхронизация необходима для постоянства кратности отношения частот напряжений — развертки и измеряемого; в противном случае изображение смещается вдоль экрана, что затрудняет наблюдение и измерения. Развертка может быть непрерывной и ждущей. При большой скважности исследуемых импульсов для обеспечения четкости изображения включают режим ждущей развертки, при котором пилообразное напряжение начинает формироваться в момент начала исследуемого импульса.

но и вручную нажатием кнопки 7 (на рис. 15.8 катод и управляющий электрод ЭЛТ объединены и образуют так называемую электронную пушку).

Генерируемое модулятором яркости 13 переменное напряжение поступает на катод и модулирует ток электронного луча и яркость свечения, так что в соответствующих точках наблюдаемой на экране ЭЛТ кривой получаются разрывы. Частота переменного напряжения соответствует определенному интервалу времени. Количество отрезков наблюдаемой на экране кривой измеряемого сигнала, умноженное на упомянутый интервал времени, позволяет определить длительность этого сигнала. Блок 13 называют также генератором меток или масштаба времени.

Если ко входу 3 подключить предварительный усилитель, аналогичный входу 2, и автоматически коммутировать выходы обоих усилителей, то осциллограф превращается в двухканальный и на входы 2 и 3 можно подавать различные исследуемые сигналы. В двухканальном осциллографе может быть использована двухлучевая ЭЛТ с соответствующим числом пар вертикальных отклоняющих пластин и двумя электронными пушками.

Для измерения и отображения однократных быстропротекающих процессов разработаны специализированные осциллографы с запоминающей ЭЛТ (с длительным послесвечением). Разновидностью таких осциллографов являются устройства без визуализации изображения — с регистрацией сигнала в виде потенциального рельефа на мишени ЭЛТ. Этот сигнал затем может быть считан при малой скорости развертки.

Для измерения и отображения повторяющихся быстропротекающих процессов предназначается стробоскопический осциллограф.

15.3. Отображение цифровых данных

Цифровые сигналы в виде конечных числовых значений визуально отображаются разнообразными цифровыми индикаторами. В механических и электромеханических счетчиках индикатором служат сами счетные колеса (диски, барабаны), на которые нанесены цифры; при этом позиция колеса соответствует тому или иному разряду отображаемого числа.

На рис. 15.9 изображен цифровой мозаичный индикатор. Он содержит матрицу ламп, управляемых через дешифратор. Подобным же образом действуют и семисегментные индикаторы, подсвечиваемые обычными лампами (рис. 15.10).

В ламповых цифровых устройствах широко использовались декадные счетные лампы с электронно-лучевой подсветкой анодов, указывающих цифры. Другим типом вакуумных индикаторов яв-

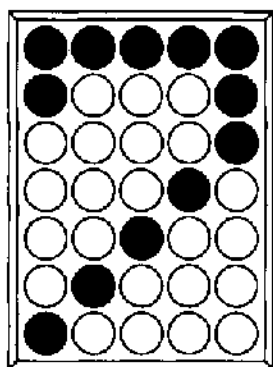


Рис. 15.9. Цифровой мозаичный индикатор

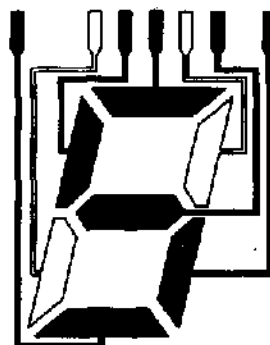


Рис. 15.10. Цифровой семи-
сегментный индикатор

ляются цифровые лампы с тлеющим разрядом, содержащие анод в виде сетки и десять проволочных катодов в виде десяти цифр. Тот катод, к которому приложено напряжение, светится. Напряжение между анодом и катодом должно быть относительно высоким, что является недостатком таких индикаторов. Современные

цифровые индикаторы разрабатываются на основе электрооптических эффектов в твердом теле и жидких кристаллах, катодоллюминесценции и др.

Показанные на рис. 15.9 и 15.10 индикаторы выпускаются в миниатюрном исполнении с использованием светодиодов и жидких кристаллов. Светодиоды могут излучать свет различного цвета в зависимости от используемого материала полупроводника. Их яркость можно регулировать изменением напряжения питания. Удельная потребляемая мощность составляет примерно 10 мВт/см^2 .

Несколько меньше потребляют индикаторы на жидких кри-

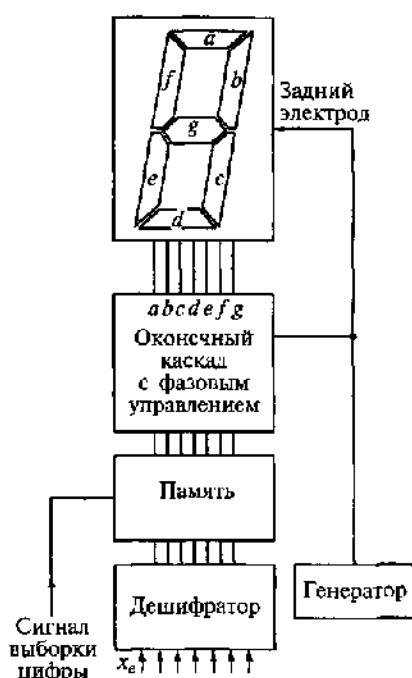


Рис. 15.11. Схема управления сегментным индикатором на жидких кристаллах

сталлах, принцип действия которых основан на изменении оптических свойств некоторых органических соединений под воздействием электрического поля. Такие индикаторы являются пассивными, т.е. работают в отраженном свете и сами свет не излучают.

Жидкий кристалл представляет собой вещество, находящееся в промежуточной фазе между твердым телом (обладая при этом оптическими свойствами твердого кристалла) и изотропной жидкостью. Существует несколько тысяч разновидностей жидких кристаллов.

Жидкий кристалл в индикаторе размещается между двумя стеклянными пластинками в зазоре 10 мкм. Пластины покрыты электропроводящей пленкой, образующей электроды. При подаче на электроды переменного напряжения изменяются (в зависимости от вещества) либо показатель преломления, либо коэффициент поляризации. Так как индикаторы на жидких кристаллах потребляют мало мощности при низком напряжении, они широко используются в интегральных схемах.

Схема управления сегментным индикатором на жидких кристаллах показана на рис. 15.11. Недостатками таких индикаторов являются ограниченный диапазон рабочих температур, малые яркость и контрастность.

15.4. Отображение дискретных сигналов, представленных в цифровой форме, при помощи осциллографа

Во-первых, их можно отображать на экране осциллографа в виде соответствующих чисел. Для этого используются дополнительные технические средства, содержащие генератор символов, управляющий отклонением луча по обеим координатам в соответствии с поступающим на его вход цифровыми данными.

Во-вторых, цифровые сигналы можно подавать на измерительный вход осциллографа после их предварительного цифроаналогового преобразования при условии, что дискретные значения этих сигналов были получены с соблюдением требований теоремы отсчетов. На выходе ЦАП для сглаживания ступенек необходимо установить фильтр нижних частот.

В последние годы были созданы так называемые цифровые осциллографы — универсальные осциллографы, содержащие микроЭВМ, быстродействующий АЦП, память и ЦАП (рис. 15.12). Измеряемые сигналы кодируются АЦП, накапливаются в памяти и обрабатываются. Обработанные данные запоминаются и после цифроаналогового преобразования отображаются на экране ЭЛТ. Такой принцип позволяет увеличивать масштаб времени измеренных сигналов при их отображении и использовать более де-

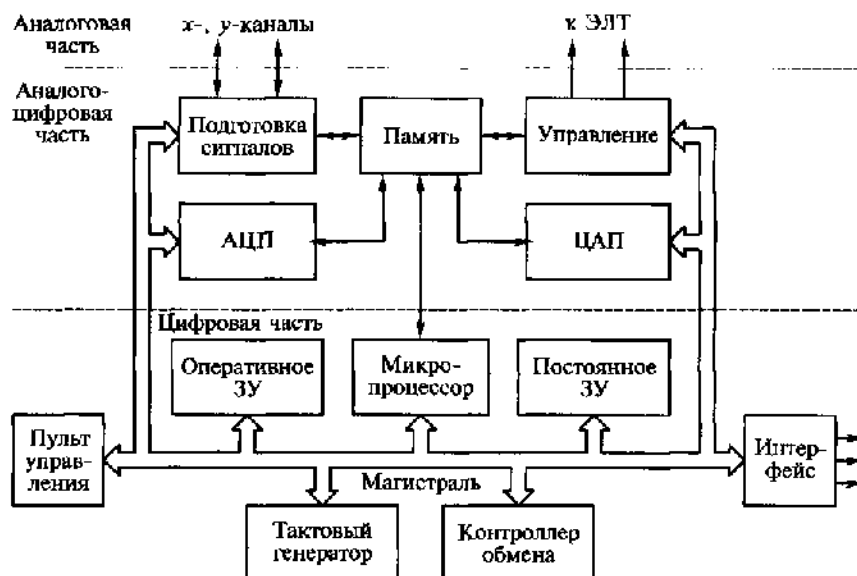


Рис. 15.12. Функциональная схема цифрового осциллографа (обрабатывающая часть)

шевые ЭЛТ. Так, при частоте дискретизации входных сигналов 20 МГц и 8-разрядном АЦП частоту выборки данных из памяти можно ограничить 2 МГц.

Цифровые осциллографы позволяют запоминать и воспроизводить не только процессы, непрерывно изменяющиеся во времени, но и однократные процессы, периодически «извлекая» их из памяти либо выделяя в ней транзитную область.

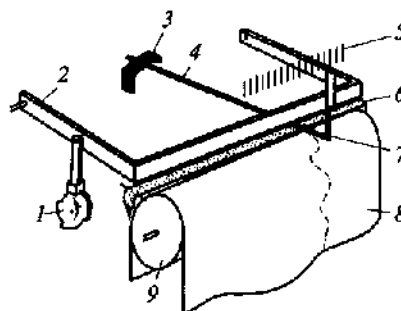
15.5. Технические средства для графической регистрации аналоговых электрических величин

Для этой цели используются самопишущие устройства и осциллографы.

Существуют самописцы с непрерывной (линейной) и точечной записью. Конструкция самописца точечной записи (с падающей дужкой) для измерительного механизма изображена на рис. 15.13. Стрелка 4 магнитоэлектрического измерительного механизма 3 под действием падающей дужки 2 периодически (на короткое время) прижимается своим точечным выступом 7 к красящей ленте 6, расположенной над автоматически перемещающейся с постоянной скоростью диаграммной бумагой 8. При этом на бумаге точками фиксируются отклонения стрелки, соответствующие

Рис. 15.13. Схема конструкции самописца с падающей дужкой:

1 — вращающийся кулачок; 2 — падающая дужка; 3 — магнитоэлектрический измерительный механизм; 4 — стрелка; 5 — шкала; 6 — красящая лента; 7 — точеный выступ; 8 — диаграммная бумага; 9 — вращающийся валик



изменениям во времени измеряемой величины. Периодичность падения дужки и прижатия стрелки задается вращающимся кулачком 1. Интервал между точками записи определяется установкой скорости подачи диаграммной бумаги, он может быть различным, например от 1 до 60 с. Принцип регистрации позволяет использовать высокочувствительные измерительные механизмы. Такие регистраторы созданы и для многоканальной записи, в которых с переключением точки (канала) измерений автоматически смещается многоцветная красящая лента и каждая кривая записывается своим цветом.

В регистраторах с измерительным механизмом и непрерывной записью стрелка снабжена пером с капилляром, которое постоянно прижато к диаграммной бумаге. В перо подаются чернила из баллончика. Длина записи линии может достигать 4 500 м, а скорость перемещения бумаги — от 20 до 3 600 мм/ч¹.

Помимо бумажных диаграммных лент, наматываемых на барабан регистрирующего механизма, запись осуществляется также на круговых диаграммных лентах (рис. 15.14). На диаграммной ленте нанесена прямоугольная координатная сетка, линии которой, перпендикулярные направлению перемещения бумаги, соответствуют делениям шкалы прибора, а линии, параллельные этому направлению, образуют шкалу времени. На круговых диаграммных лентах сетка наносится в полярных координатах. Естественно, что самописец приспособляется под ту или иную форму регистрации диаграмм. Протягивание бумаги осуществляется при помощи электромотора с постоянной скоростью. Скорости можно переключать ступенями. Быстродействующими считают самописцы со скоростью перемещения бумаги от 1 до 50 м/с, медленными — со скоростью менее 1 м/с. Так, лист круговой диаграммы, изображенный на рис. 15.14, б предназначен для скорости вращения $360^\circ/24$ ч, и это не предел минимума скорости.

¹ В такие регистраторы иногда встраивают измерительные усилители, что повышает чувствительность регистратора.

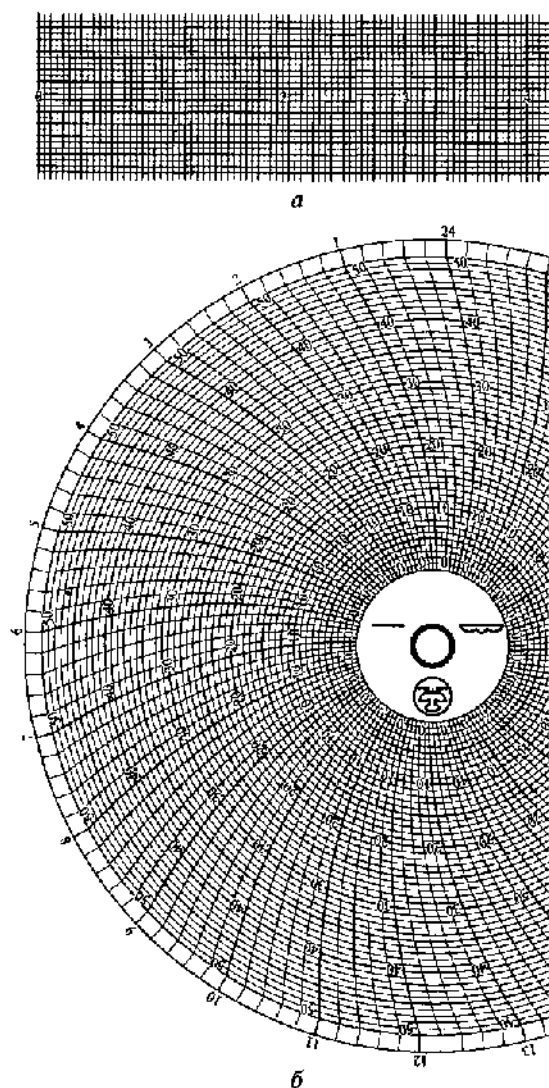


Рис. 15.14. Образцы диаграммной бумаги, используемой в самопишущих регистраторах:

a — диаграммная лента; *б* — круговая диаграммная лента

Для автоматической регистрации зависимостей вида $x_e = f(y)$, где y является функцией другой величины, используются координатные самописцы. Такой самописец снабжен двумя компенсационными измерительными системами, которые управляют пицци-щим органом и перемещают его по поверхности неподвижной

бумаги согласно входным сигналам x и y . Скорость перемещения пишущего органа достигает 0,2 м/с. Если $y = f(t)$ и в самописце предусмотрена возможность перемещения бумажной ленты, то можно регистрировать и третью координату — время, т.е. функцию $y = f(t)$.

Наряду с регистрацией графиков функциональных величин на обычной бумаге с помощью упомянутых выше самописцев запись можно осуществлять на светочувствительной бумаге посредством осциллографов — электронно-лучевых и светолучевых.

Многие типы электронно-лучевых осциллографов снабжены приставками для фотографирования изображений непосредственно с экрана ЭЛТ. Основу светолучевого осциллографа составляет рамочный гальванометр (в случае измерения тока или напряжения — это магнитоэлектрический механизм, а при измерениях мощности — электродинамический механизм). Если рамочный гальванометр выполнен в виде магнитоэлектрического механизма с одновитковой рамкой, то такой осциллограф называют шлейфовым. Он характеризуется относительно низкой чувствительностью и соответственно большим входным током (до 50 мА на полное отклонение рамки) и позволяет регистрировать сравнительно быстрые процессы (собственная частота колебаний достигает 15 кГц). Подвижная часть (рамка) механизма снабжена зеркальцем, отражающим свет миниатюрного источника на светочувствительную бумагу.

15.6. Регистрация цифровых данных измерений

Для визуальной регистрации цифровых данных используются различные печатающие и перфорирующие устройства.

Печать может выполняться последовательно на электрифицированных пишущих машинках, подключаемых к средствам измерений с цифровым выходом. Их быстродействие невелико (2...3 знак/с). Быстродействие специализированных пишущих машинок, разработанных в качестве средств вывода информации из ЭВМ, достигает 30 знак/с. Более быстродействующими являются устройства строчной печати с печатающим барабаном, образуемым набором цифровых колес (скорость до 25 строк или до $3 \cdot 10^3$ знак/с).

Для регистрации данных, передаваемых по каналам связи, используют телетайпы. Их быстродействие составляет примерно 10 знак/с.

В настоящие годы получили распространение мозаичные печатающие устройства последовательного действия. Знаки в них набираются по принципу формирования знаков в мозаичном индикаторе (см. рис. 15.9), но в виде раstra печатающих иголок, управляемых электромагнитами по сигналам электронного блока управления.

18. Хоффман Д. Техника измерений и обеспечение качества : справочная книга / Д.Хоффман ; пер. с нем. ; под ред. Л.М. Закса, С.С. Кивилиса. — М. : Энергоатомиздат, 1983.
19. Шишмарев В. Ю. Технический контроль в приборостроении : учеб. пособие / В. Ю. Шишмарев. — М. : МГАТУ, 1996.
20. Шишмарев В. Ю. Электрорадионизмерения : учебник / В. Ю. Шишмарев, В. И. Шанин. — М. : Издательский центр «Академия», 2004.
21. Метрология. Основные термины и определения РМГ 29—99. — М. : Изд-во стандартов, 2000.
22. Государственная система стандартизации. Сборник стандартов ГОСТ Р 1.0—92, ГОСТ Р 1.4—93, ГОСТ Р 1.5—92, ПР 50.1.001—93. — М. : Изд-во стандартов, 1994.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации	8
1.1. Назначение и принципы построения	8
1.2. Структура	11
1.3. Информационные связи	13
1.4. Измерительные преобразователи	14
1.5. Управляющие и корректирующие элементы	16
1.6. Исполнительные механизмы и регулирующие органы	17
1.7. Агрегатирование — основа систематического подхода к созданию современной электроизмерительной аппаратуры	18
1.8. Структура и состав агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники	20
Глава 2. Физические величины и их единицы	32
2.1. Виды физических величин и единиц	32
2.2. Системы единиц физических величин	33
2.2.1. Система СГС	34
2.2.2. Система МКГСС	35
2.2.3. Система МТС	36
2.2.4. Абсолютная практическая система электрических единиц	36
2.2.5. Система МКСА	37
2.2.6. Внесистемные единицы	38
2.2.7. Относительные и логарифмические величины и единицы	38
2.3. Международная система единиц физических величин	39
2.4. Определение содержания основных единиц СИ	41
Глава 3. Общие сведения о средствах измерения	47
3.1. Классификация средств измерений	47
3.2. Система воспроизведения единиц физических величин	53
3.3. Эталонная база России	54
3.4. Государственная система обеспечения единства измерений	58
Глава 4. Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование	62
4.1. Принципы выбора и нормирования метрологических характеристик средств измерений	62

4.2. Метрологические характеристики, предназначенные для определения результатов измерений	65
4.3. Метрологические характеристики погрешностей средств измерений	66
4.4. Нормирование динамических характеристик средств измерений	68
4.5. Классы точности средств измерений	70
4.6. Метрологическая надежность средств измерений	73
Глава 5. Общие характеристики аналоговых измерительных приборов	79
5.1. Классификация аналоговых измерительных приборов	79
5.2. Аналоговые первичные измерительные преобразователи	82
5.2.1. Механические первичные преобразователи	82
5.2.2. Пневматические первичные преобразователи	85
5.2.3. Оптические первичные преобразователи	86
5.2.4. Электрические первичные преобразователи	87
5.2.5. Аналоговые показывающие приборы	96
5.2.6. Аналоговые регистрирующие приборы	96
Глава 6. Средства измерений неэлектрических величин	99
6.1. Общие вопросы измерений неэлектрических величин	99
6.2. Общие свойства и классификация измерительных преобразователей	101
6.3. Электромагнитные измерительные преобразователи	103
6.4. Тепловые измерительные преобразователи	110
Глава 7. Средства измерений времени	116
7.1. Области измерения времени	116
7.2. Величины, единицы и эталоны времени	117
7.3. Системы измерения времени	118
7.3.1. Меры времени, основанные на принципе колебаний	118
7.3.2. Меры времени с колебательной системой	119
7.3.3. Меры времени без колебательной системы	121
7.4. Приборы для измерения времени	122
7.4.1. Механические приборы для измерения времени	122
7.4.2. Механические часы с собственной механической мерой	123
7.4.3. Электрические приборы для измерения времени	125
Глава 8. Средства измерений геометрических величин	127
8.1. Общие сведения	127
8.2. Механические средства измерения длин	128
8.3. Оптико-механические средства измерения длин	133
8.4. Средства и методы измерения углов	135
8.5. Приборы активного контроля	136
8.6. Пневматические приборы для линейных измерений	142
8.7. Индуктивные приборы	144
8.8. Емкостные приборы	147

8.9. Применение технического зрения для контроля геометрических характеристик	149
8.9.1. Особенности информационно-измерительных систем, оснащенных системой технического зрения	150
8.9.2. Рабочий и отладочный комплексы информационно-измерительных систем	153
Глава 9. Средства измерений механических величин	156
9.1. Общие положения	156
9.2. Механические величины, единицы и эталоны	157
9.3. Принципы измерения механических величин	158
9.4. Системы измерения массы, силы и давления	159
9.4.1. Преобразователи масс	159
9.4.2. Преобразователи силы	162
9.4.3. Преобразователи давления	163
9.5. Приборы для измерения массы, силы и давления	166
9.5.1. Рычажные весы	166
9.5.2. Радионуклидные весы	168
9.5.3. Пружинные и поршневые весы	168
9.5.4. Электронные весы	169
9.5.5. Торговые весы	171
9.5.6. Измерение крутящих моментов	173
9.6. Измерение угловых скоростей	177
9.7. Измерение расхода и уровня	178
9.7.1. Расход жидкостей и газов	178
9.7.2. Измерение уровней жидкости	179
9.7.3. Измерение уровней сыпучих материалов	181
Глава 10. Средства измерений тепловых величин	183
10.1. Общие сведения	183
10.2. Тепловые величины, их единицы и способы воспроизведения	184
10.3. Измерение температуры	187
10.3.1. Общие сведения	187
10.3.2. Принципы действия средств измерений температуры	189
Глава 11. Средства измерений температуры	191
11.1. Международная температурная шкала	191
11.2. Схемы приборов для измерения температуры	194
11.2.1. Механические контактные термометры	194
11.2.2. Металлические термометры расширения	195
11.2.3. Жидкостные стеклянные термометры	196
11.3. Контактные методы и средства измерений температуры	197
11.3.1. Термометры сопротивления	199
11.3.2. Термопары	203
11.3.3. Термисторы	207
11.3.4. Интегральные полупроводниковые датчики	208
11.3.5. Сравнение различных датчиков температуры	209
11.3.6. Цифровой термометр	210

11.3.7. Особенности контактных измерений температуры	211
11.4. Бесконтактные методы и средства измерений температур	213
11.4.1. Оптическое излучение	214
11.4.2. Устройство ИК-термометра	215
Глава 12. Средства измерений электрических величин	218
12.1. Общие сведения	218
12.2. Электрические измерительные приборы и системы	220
12.2.1. Электромеханические измерительные приборы	220
12.2.2. Термоэлектрические измерительные приборы	225
Глава 13. Электромеханические измерительные приборы прямого действия	229
13.1. Основы теории и конструкции приборов прямого действия	229
13.2. Магнитоэлектрические приборы	234
13.3. Магнитоэлектрические гальванометры	238
13.4. Магнитоэлектрические приборы с преобразователями	241
13.5. Электромагнитные приборы	245
13.6. Электродинамические и ферродинамические приборы	248
13.7. Электростатические приборы	256
13.8. Индукционные приборы	258
Глава 14. Цифровые и электронные измерительные приборы и преобразователи	264
14.1. Классификация цифровых приборов	264
14.2. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи	267
14.3. Аналоговые электронные вольтметры	274
14.4. Цифровые вольтметры	281
14.5. Цифровые частотомеры	292
14.5.1. Режим измерения частоты	292
14.5.2. Режим измерения периода	297
Глава 15. Средства визуального отображения, вывода и регистрация результатов измерений	301
15.1. Отображение результатов измерений медленно изменяющихся величин	301
15.2. Визуальное отображение величин, быстро изменяющихся во времени	304
15.3. Отображение цифровых данных	307
15.4. Отображение дискретных сигналов, представленных в цифровой форме, при помощи осциллографа	309
15.5. Технические средства для графической регистрации аналоговых электрических величин	310
15.6. Регистрация цифровых данных измерений	313
Список литературы	315

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ



Издательский центр
«Академия»
www.academia-moscow.ru