

М. Ю. Рачков

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СПО

2-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендовано Учебно–методическим отделом
среднего профессионального образования в качестве
учебного пособия для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 53.08(075.32)
ББК 30я723
Р27

Автор:

Рачков Михаил Юрьевич — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах факультета информатики и систем управления Московского политехнического университета.

Рецензенты:

Семенов Е. И. — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственной премии;

Шатерников В. Е. — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

Рачков, М. Ю.

Р27 Физические основы измерений : учеб. пособие для СПО / М. Ю. Рачков. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 146 с. — (Серия : Профессиональное образование).

ISBN 978-5-534-10162-1

В учебном пособии рассмотрены общие аспекты измерения, основные понятия о метрологическом обеспечении измерений, а также в области наноизмерений. Представлена информация о принципах измерения различных физических величин на примерах измерения параметров автомобильных систем. Отдельная глава содержит практические работы по составлению измерительных схем на базе резистивных, емкостных, электромагнитных, пьезоэлектрических и термометрических преобразователей.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.

УДК 53.08(075.32)
ББК 30я723



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-10162-1

© Рачков М. Ю., 2014
© Рачков М. Ю., 2017, с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

Содержание

Предисловие	5
Введение.....	7
1. Теория измерений	12
1.1. Аспекты измерения	12
1.2. Информация и ее связь с измерением	14
1.3. Виды технических измерений	15
1.4. Измерение нефизических величин.....	20
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>21</i>
2. Основные принципы измерений.....	22
2.1. Объекты измерений	22
2.2. Единицы измерений.....	23
2.3. Эталоны	28
2.4. Методы измерений.....	29
2.5. Стратегии измерений	33
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>37</i>
3. Метрологическое обеспечение измерений	38
3.1. Основные понятия.....	38
3.2. Погрешности измерений	44
3.3. Согласование объекта измерения и измерительной системы	51
3.4. Физические основы измерения времени.....	57
3.5. Государственная система приборов и средств автоматизации	67
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>73</i>
4. Принципы измерения параметров автомобильных систем	74
4.1. Измерение скорости и длины пути движения автомобиля	74
4.2. Измерение уровня топлива и эксплуатационных жидкостей	77
4.3. Контроль зарядного режима и давления	78
4.4. Контроль параметров коленчатого вала и дроссельной заслонки	83
4.5. Системы контроля руля и шин.....	87
4.6. Навигационные системы	90
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>92</i>
5. Наноизмерения.....	93
5.1. Основные понятия.....	93
5.2. Оптическая и электросиловая микроскопия.....	96
5.3. Наномеры длины и измерение перемещений.....	103

5.4. Измерение массы и параметров вещества	107
5.5. Измерение силовых напряжений	115
5.6. Контроль температуры и толщины нанослоев.....	117
<i>Контрольные вопросы</i>	122
6. Практические работы по составлению измерительных	
схем	124
6.1. Подготовка к работе	124
6.2. Резистивные измерительные преобразователи	127
6.3. Емкостные измерительные преобразователи	128
6.4. Электромагнитные измерительные преобразователи	130
6.5. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи	131
6.6. Термометрические измерительные преобразователи	133
6.7. Корректор нелинейности датчика	134
Заключение	135
Рекомендуемая литература	140
Предметный указатель	141

Предисловие

Учебное пособие написано в соответствии с программой дисциплины «Физические основы измерений» для специалистов, которая предшествует изучению дисциплин по техническим измерениям и приборам.

Книга состоит из введения, шести глав и заключения. Во введении изложены вопросы истории развития измерений и их место в науке и технике.

В первой главе рассмотрены общие аспекты измерения, понятие информации и ее связь с измерением, виды технических измерений и особенности измерения нефизических величин.

Во второй главе дана информация об основных принципах измерений, объектах и единицах измерений, эталонах, а также о методах и стратегиях измерений.

Основные понятия о метрологическом обеспечении измерений, погрешностях измерений, согласовании объекта измерения и измерительной системы, а также о физических основах повышения точности измерения времени изложены в третьей главе.

В четвертой главе рассмотрены принципы измерения различных физических величин на примерах измерения параметров автомобильных систем.

Пятая глава содержит основные понятия в области наноизмерений, в частности, их реализации на основе оптической и электросиловой микроскопии, наномер длины, измерения массы и параметров вещества, силовых напряжений, а также контроля температуры и толщины нанослоев материалов.

В заключительной главе приведены практические работы по составлению измерительных схем на базе резистивных, емкостных, электромагнитных, пьезоэлектрических и термометрических преобразователей, а также по использованию корректора нелинейности датчика.

Анализ перспектив развития измерительных процессов на базе современной вычислительной техники представлен в заключении учебного пособия.

В конце учебного пособия приведены приложения, в которых даны национальные и межгосударственные стандарты в нанометрологии.

Освоение теоретического и практического материала учебника дает возможность перейти к изучению конкретных средств измерения в различных областях науки и техники.

В результате изучения дисциплины студент должен освоить:

трудовые действия

- владения навыками использования различных стратегий измерения;
- навыками моделирования измерительных преобразователей;
- способами определения и учета погрешностей измерений;

необходимые умения

- применять различные методы измерений;
- согласовывать объект измерения и измерительную систему;
- составлять схемы измерения параметров автомобильных систем;

необходимые знания

- теоретических основ измерений;
- принципов и видов измерений;
- метрологических аспектов измерений;
- особенностей наноизмерений.

Введение

Возможность выполнять измерения лежит в основе развития науки и техники. Только измерение позволяет оценить правильность теоретической гипотезы и создать современную техническую систему. К этому принципиальному выводу приходили ученые, занимавшиеся различными областями науки и техники, такие как Дмитрий Менделеев, утверждавший, что наука начинается с тех пор, как начинают измерять, и Макс Планк, который заявлял, что в физике существует только то, что можно измерить.

Возникновение и совершенствование измерительной техники диктовалось практическими нуждами людей за много тысячелетий до н.э. Наиболее ранняя из известных попыток создания узаконенных мер имела место в Греции в VI в. до н.э. Строительство таких сооружений, как пирамиды в Египте, было возможным только при наличии развитой техники линейных, поверхностных, объемных и других измерений, а также соответствующих измерительных приборов.

Вавилоняне впервые в истории народов установили единицы времени: год, месяц, час, минуты, секунды. Им же принадлежит идея построения кратных и дробных производных однородных единиц измерения.

Введение мер, обязательных для всех измерений и одинаковых во всей стране, имело место в Англии в 1001 г. Во Франции эталон длины туаз появился в 1735 г. В России эталон единицы массы фунт появился в 1747 г.

В России также издавна стало понятно огромное значение единства мер для развития торговли, в том числе международной. Надзор за правильностью торговых мер и весов в древней Руси был поручен духовенству, о чем свидетельствуют записи в церковном уставе князя Владимира, датируемом X в. Монастыри и церкви являлись первыми хранителями государственных мер и весов.

В XV в. с образованием Московского государства значительно увеличился оборот государства за счет торговли с присоединенными городами. В этот период вырос доход от таможенных пошлин и торговых сборов, что вызывало необходимость сосредоточения всех дел по мерам и весам в органах государственной власти. В это время делаются попытки установить единообразие мер и весов на территории всего государства. По посадам и уездам были разосланы медные меры, копии с которых должны были клеймиться.

В годы царствования Ивана Грозного в XVI в., царя Алексея Михайловича XVII в., и особенно в период правления Петра I в начале XVIII в., меры и веса являлись предметами пристального внимания. Это выражалось в издании ряда, указов и других законодательных актов, направленных на установление точных единых мер и весов. В 1736 г. была создана специальная комиссия о мерах и весах. Комиссия занялась созданием образцов русских мер и организацией поверочного дела. Ею была установлена точная величина аршина по величине полуаршина длиной в 14 английских дюймов, сохранившегося в кабинете Петра I. Комиссия наметила организацию сети поверочных учреждений в провинции.

В 1802 г. в связи с учреждением министерств все дела, относящиеся к мерам и весам, были переданы в ведение Министерства внутренних дел. Были изготовлены образцовые четырехгранные аршины для Петербурга из хрусталя, стали и меди, а также более 50 образцовых аршинов для губерний.

В 1810 г. Министерству внутренних дел было предписано организовать фабрику аршинов, а на Министерство финансов было возложено их клеймение.

В 1827 г. была создана правительственная Комиссия образцовых мер и весов, в которую вошли академики А. И. Ламберта, В. К. Вишнеvский, Э. А. Коллинс, А. Я. Купфер. Комиссия разработала систему основных российских мер и весов путем сравнения с английскими мерами, определила меру единицы длины сажени, равной 7 английским футам, а затем значение единицы меры веса фунта, единицы емкости жидких тел ведро и сыпучих тел четверик.

В 1842 г. на территории Петропавловской крепости в Петербурге было построено здание для центрального хранения российских мер и весов. Дальнейшим развитием вопросов хранения мер и весов явилась постройка в 1879 г. нового здания для Депо образцовых мер и весов с изолированными помещениями, в которых поддерживалась постоянная температура. В 1892 г. ученым хранителем Депо образцовых мер и весов стал Д. И. Менделеев, который преобразовал его в Главную палату мер и весов, ставшую центральным поверочным и метрологическим учреждением России. Здесь был создан специальный эталон, содержащий единицы длины трех систем мер — русской (аршин), английской (ярд) и международной метрической (метр), который позволил с большой точностью установить соотношения между единицами длины разных стран. Эталоны метра и килограмма были переданы России в 1889 г. после их утверждения на I Генеральной конференции по мерам и весам. Введение метрической системы мер в России относится к 1918 г.

Параллельно с повышением точности систем эталонов измерений совершенствовались и методы измерений. Первый в мире электроизмерительный прибор был создан в 1745 г. русским академиком Г. В. Рихманом. Это был прибор для измерения разности потенциалов. Элек-

троизмерительные приборы обязаны своим развитием Вольту, Амперу и Фарадею. Много сделал для развития электроизмерительной техники во второй половине XIX и в начале XX в. выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский. Им разработаны амперметр и вольтметр электромагнитной системы, изготовлен индукционный измерительный механизм с вращающимся магнитным полем, который был затем положен в основу ваттметра и фазометра. К тому же периоду относятся работы известного русского физика А. Г. Столетова, открывшего закон изменения магнитной проницаемости в зависимости от напряженности поля и предложившего метод определения характеристик магнитных материалов с помощью баллистического гальванометра. Академик Б. С. Якоби разработал ряд приборов для измерения сопротивления электрической цепи, сделаны первые шаги в области обеспечения единства в измерении электрических величин.

Международный договор, служащий для обеспечения единства метрологических стандартов в разных странах, называется Метрической конвенцией. Этот договор впервые был подписан в 1875 г. в Париже 17 странами, в том числе Россией от имени императора Александра II. В 1921 г. в договор были внесены небольшие изменения. В настоящее время к конвенции присоединилось 51 государство, в том числе все промышленно развитые страны. В соответствии с метрической конвенцией учреждены Международное бюро мер и весов и Международный комитет мер и весов, и созываются Генеральные конференции по мерам и весам. Эти международные организации призваны решать вопросы стандартизации в области метрологии.

Международное бюро мер и весов — постоянно действующая организация со штаб-квартирой, расположенной недалеко от Парижа (Франция). Основная задача Бюро заключается в обеспечении существования единой системы измерений во всех странах — участницах метрической конвенции. Для этого осуществляется сравнение национальных эталонов единиц измерения и проводятся исследования в области метрологии, направленные на увеличение точности измерений.

Международный комитет мер и весов состоит из 18 человек, каждый из которых представляет одну страну-участницу. Комитет собирается ежегодно в штаб-квартире Международного бюро мер и весов. Комитет наблюдает за работой Международного бюро мер и весов, координирует метрологические исследования в странах-участницах и вырабатывает рекомендации для Генеральных конференций по мерам и весам.

Генеральные конференции по мерам и весам созываются раз в четыре года. В них участвуют представители всех стран — участниц метрической конвенции и наблюдатели от ассоциированных членов. Конференция заслушивает доклад Международного комитета мер и весов, принимает решения, направленные на улучшение и распространение международной системы единиц СИ, утверждает бюджет Международного бюро мер и весов на следующие четыре года.

В целом история развития международных единиц измерения включает в себя следующие основные этапы:

1799 г. — во Франции изготовлены два эталона: для единицы длины (метр) и для единицы массы (килограмм);

1874 г. — представлена система СГС, основанная на трех единицах: сантиметр, грамм, секунда и десятичных приставках от микро до мега;

1875 г. — подписана Метрическая конвенция, начаты работы по разработке международных эталонов метра и килограмма;

1889 г. — I Генеральная конференция по мерам и весам приняла систему мер, сходную с СГС, но основанную на метре, килограмме и секунде, так как эти единицы были признаны более удобными для практического использования;

1960 г. — XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла стандарт, который впервые получил название «Международная система единиц (СИ)»;

1971 г. — XIV Генеральная конференция по мерам и весам внесла изменения в СИ, добавив, в частности, единицу количества вещества (моль);

1979 г. — XVI Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое, действующее поныне, определение канделы;

1983 г. — XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое, действующее поныне, определение метра: «Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени, равный $1/299792458$ секунды»;

1997 год — на 9-й Сессии консультативного комитета по длине были приняты рекомендованные частота и длина волны излучения в вакууме He-Ne/I2 лазера: $\nu = 473612214705$ кГц, $\lambda = 632,99139822$ нм. Наивысшая точность воспроизведения метра составила 10^{-11} м.

Измерения проводятся для получения информации об окружающем нас мире. Причиной появления измерений было желание больше знать об окружающем мире и о взаимосвязях, существующих между параметрами, состояниями и явлениями этого мира. Таким образом, мы имеем возможность сформировать в нашем сознании более объективную картину мира, основанную на информации, полученной в результате измерений. Эта информация позволяет строить модели мира и его частей, формулировать законы и теоремы. Затем мы снова с помощью измерений определяем, дают ли эти модели верное представление о мире.

Отсюда видно, что измерения образуют существенное звено между эмпирическим миром с одной стороны и нашим отвлеченным представлением о нем с другой. Без измерений мы обладали бы лишь философским видением, как это было у древних греков. Кроме того, перед лицом различных представлений мы были бы не способны проверить, какое из них справедливо. В результате без измерений невозможно достичь единого общепринятого на данный период развития науки понимания вещей.

Степень развития цивилизации отражается в сложности используемых ею единиц измерения. Потребности древнего мира удовлетворялись несколькими единицами, а современная международная система единиц измерений содержит сотни единиц, используемых в самых различных областях науки и техники.

Разработка новых принципов измерений, в частности, на базе нанотехнологий, позволит расширить диапазон измеряемых величин и точность измерений.

Наступление XXI в. характеризуется решающим влиянием информационных технологий на развитие науки, техники и социальных областей мирового сообщества. Большую роль в этом играют информационно-измерительная техника, которая появилась в результате принципиального усовершенствования измерительных средств на базе современных компьютерных технологий и развития автоматизированных систем.

Ключевые слова: измерение, информация, мера, эталон, метрология, погрешность, чувствительность, энтропия, преобразователь, нанотехнология.

1

ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Аспекты измерения

Под *техническим измерением* понимается последовательность операций, выполняемых над объектом измерения, согласно установленному правилу с применением технических средств с целью определения физических свойств объекта измерения.

Объектом измерения может быть любая физическая величина, система, процесс или явление. Установленным правилом является метод или стратегия измерений. Техническим средством при измерении выступает измерительная система.

Физической величиной называют свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам, физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Все многообразие величин сводится в системы физических величин, связанных между собой зависимостями.

Одним из наиболее существенных аспектов измерения является *сбор информации*. Измерения производятся для того, чтобы что-то узнать об объекте измерения. Это означает, что результат измерения должен описывать то состояние или то явление в окружающем нас мире, которое мы измеряем. Между этим состоянием или явлением и результатом измерения должно существовать то или иное соотношение. Получение информации является необходимым, но не достаточным для определения измерения. Если студент читает учебник, он накапливает информацию, но не выполняет измерения.

Второй аспект измерения состоит в том, что оно должно быть *избирательным*. Измерение может снабдить нас сведениями только о том, что мы хотим, но ничего не говорит ни об одном из многих других состояний или явлений вокруг нас.

Третьим аспектом является то, что измерение должно быть *объективным*. Исход измерения не должен зависеть от наблюдателя. Любой наблюдатель должен извлекать из измерения одну и ту же информацию и приходить к одним и тем же выводам. Но наблюдения, выполненные с помощью органов чувств, в очень большой степени субъективны.

Например, если зайти в комнату с нормальной температурой с мороза, то температуру в ней покажется сравнительно высокой, а если выйти в ту же комнату из разогретой сауны, то воздух в ней покажется относительно холодным. Таким образом, чтобы гарантировать объективность измерения, мы должны воспользоваться теми или иными техническими средствами или приборами. Прибор преобразует исходное наблюдение к такому виду, в котором оно доступно любому наблюдателю и относительно которого между наблюдателями не может быть разногласия. Поэтому желательно, чтобы результат измерения на выходе прибора можно было воспринимать объективно, например, в виде числа, а не в виде таких характеристик, как цвет, который может воспринимается субъективно. Измерительная техника как раз и занимается созданием таких приборов, называемых *измерительными системами*.

Таким образом, измерение можно определить, как получение информации с помощью измерительных систем в форме результата измерения, отражающего характеристику объекта измерения или явление в окружающем нас мире. В этом контексте измерительная система должна гарантировать требуемые наглядность описания, избирательность и объективность измерения.

Цель измерений, по большому счету, состоит в том, чтобы увеличить знания об окружающем мире и о взаимосвязях, существующих между характеристиками, состояниями и явлениями этого мира.

Роль измерений в теоретических и прикладных науках различна. Эти различия поясняются схемой, приведенной на рис. 1.1.

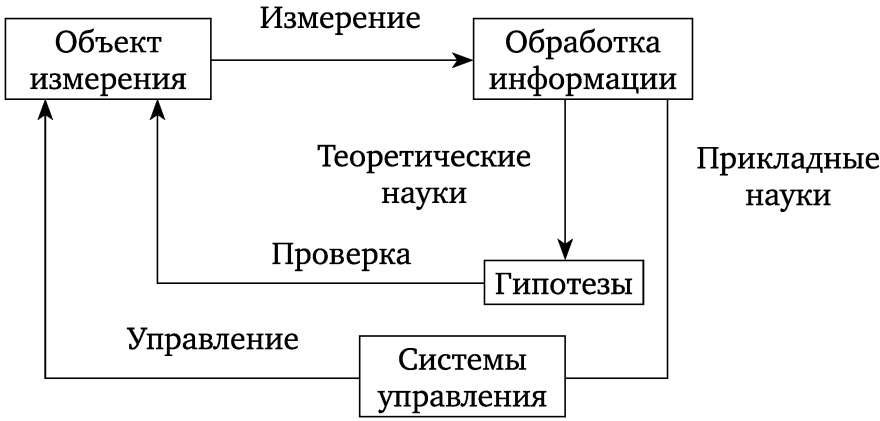


Рис. 1.1. Роль измерений в теоретических и прикладных науках

В теоретических науках целью является описание окружающего нас мира. Собранная информация позволяет свести сложные характеристики, состояния, явления и соотношения к более простым законам и взаимозависимостям. Таким образом, появляется возможность сформировать в нашем сознании более ясную и объективную картину мира, основанную на информации, полученной в результате измерений. Другими словами, эта информация позволяет нам строить модели мира или его частей и формулировать законы и теоремы. Затем мы должны снова с помощью измерений определить, дают ли эти модели,

гипотезы, теоремы и законы верное представление о мире. Это и есть процедура измерений в теоретических науках.

Под прикладной наукой подразумевается область знаний, предназначенных для изменения мира. В прикладной науке модели, законы и теоремы теоретических наук используются для того, чтобы видоизменить окружающий мир. В этом контексте цель измерений состоит в том, чтобы прямо или косвенно осуществлять регулирование определенных процессов в окружающем мире, контролировать или вносить в них изменения на основе результатов измерений и существующих моделей, законов и теорем. Затем можно проверить результаты такого регулирующего воздействия, сравнить их с желаемыми результатами и в дальнейшем сделать необходимые поправки.

В приведенных терминах можно описать даже сравнительно простое измерение, такое как проверка давления в шинах автомобиля. В начале у нас появляется сомнение, что давление в шинах слишком мало или велико. Если бы не было этого сомнения или гипотезы, нам не надо было бы проверять давление. Далее, выполнив измерение, мы узнаем, лежит ли на самом деле давление в требуемых пределах. Если это не так, то мы изменяем давление и затем снова измеряем его, пока оно не достигнет желаемой величины.

1.2. Информация и ее связь с измерением

Информацию можно определить как совокупность сведений об окружающем мире, которые получены в результате взаимодействия с ним. Процесс измерения неразрывно связан с понятием информации, так как результат измерений является одним из видов информации.

Основным понятием в теории информации является понятие *энтропии*. Энтропией системы называется сумма произведений априорных вероятностей различных состояний p_i системы на логарифмы этих вероятностей, взятых с обратным знаком. В математической записи это определение можно записать как

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_a p_i,$$

где n — количество состояний. Числа p_i меньше единицы, и их логарифмы отрицательны, поэтому знак «минус» перед суммой поставлен для того, чтобы энтропия была положительной. Логарифм в формуле энтропии может быть взят при любом основании $a > 1$.

Энтропия обладает рядом свойств, оправдывающих ее выбор в качестве характеристики степени неопределенности. Во-первых, она обращается в нуль, когда одно из состояний системы достоверно, а другие — невозможны. Во-вторых, при заданном числе состояний она достигает максимума, когда эти состояния равновероятны, а при увеличении

числа состояний — увеличивается. Наконец, она обладает свойством аддитивности, то есть когда несколько независимых систем объединяются в одну, их энтропии складываются.

Перемена основания логарифма равносильна простому умножению энтропии на постоянное число, а выбор основания равносильно выбору определенной единицы измерения энтропии. Если за основание выбрано число 10, то говорят о десятичных единицах энтропии, если 2, то — о двоичных единицах. На практике удобнее всего пользоваться логарифмами при основании 2 и измерять энтропию в двоичных единицах. Это хорошо согласуется с применяемой в компьютерах двоичной системой счисления. При этом единица измерения называется *бит*.

В теории измерений увеличению информации соответствует уменьшение энтропии.

Можно провести различие между двумя типами измерительной информации: структурной и метрической. *Структурная информация* — это информация о состоянии, структуре или природе определенной характеристики. *Метрическая информация* — это информация о величине, амплитуде или интенсивности определенной характеристики.

Приобретение структурной информации происходит в результате *качественного измерения*, а приобретение метрической информации — в результате *количественного измерения*. Если природа характеристики, которая должна быть измерена, еще не известна, необходимо сначала определить ее путем проведения качественного измерения, и только затем можно выполнить количественное измерение величины соответствующей характеристики.

С помощью качественного измерения устанавливают природу того, что должно быть измерено. Качественное измерение обеспечивает информацией, необходимой для того, чтобы выбрать приборы для проведения количественного измерения. Однако на практике часто эта структурная информация имеется, и требуется выполнить только количественные измерения.

1.3. Виды технических измерений

Измерения образуют существенное звено между эмпирическим миром и нашим теоретическим, отвлеченным представлением о нем. Этот принцип лежит в основе теории измерений. Согласно этой теории считается, что результат измерения должен давать представление о действительной эмпирической величине. Измерение в теории измерений трактуется как отображение элементов исходного множества, относящегося к эмпирическому пространству, на элементы множества образов или результатов, которое является частью пространства абстрактных представлений или изображений. Графическая иллюстрация такого преобразования представлена на рис. 1.2.

То, что должно быть измерено, то есть измеряемая величина, является элементом исходного множества.

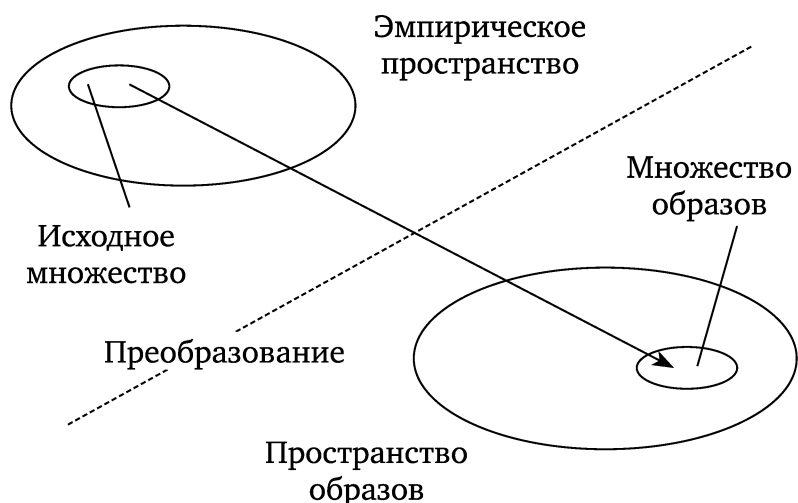


Рис. 1.2. Отображение элементов исходного множества на элементы множества образов

Например, при проведении электрических измерений мы определяем величину тока (исходное множество), но только в определенном диапазоне значений, служащих элементами множества. Результат процедуры измерения носит отвлеченный характер. Он является элементом множества образов в пространстве абстрактных представлений. Например, величине электрического тока в приведенном примере приписывается путем измерения определенное число (элемент) из множества действительных чисел (множества образов). Другими словами, элементы исходного множества представляют собой эмпирические характеристики состояний или явлений в окружающем нас мире, тогда как элементы множества образов являются символами из воображаемого абстрактного множества символов. Символы могут быть числами при количественных измерениях, или, например, названиями при качественных измерениях.

Преобразование осуществляется согласно соответствующим алгоритмам, которыми и задается представление эмпирических количеств абстрактными символами. На практике соответствующий алгоритм и само представление реализуются используемой измерительной системой. Представление должно носить характер описания и быть объективным. Таким образом, множество образов должно состоять из элементов (результатов измерений), которые являются абстрактными символами, значение каждого из которых единственно и, по определению, трактуется одинаково всеми наблюдателями.

Различают несколько видов измерений. Самой элементарной формой измерения является *номинальное измерение*. При таком измерении все величины, которые должны быть измерены, делятся на несколько классов или групп таким образом, что измеряемая величина попадает в один и только в один класс или группу. С помощью такого измере-

ния осуществляют классификацию. Например, с помощью диагностических средств классифицируют неисправность автомобиля. Результатом номинального измерения может быть то или иное значение, но им также может быть название или символ. Здесь численное значение не имеет той важности, какая придается ему при измерениях более высокого уровня. Это просто метка. В этом случае никакие арифметические соотношения между числами не выполняются. Единственный существенный процесс при номинальных измерениях состоит в том, что одинаковым характеристикам, состояниям и явлениям присваиваются одни и те же метки, а различным характеристикам — разные метки. Любое качественное измерение является номинальным измерением так же, как и все те случаи, когда мы определяем, имеет ли наблюдаемое явление ту же природу, что и известное нам явление, или нет.

Примером номинального измерения в технических науках служит целый класс измерений, осуществляемых *системами обнаружения*. Эти системы конструируются так, чтобы результат их действия был двоичным. Системы обнаружения автономных транспортных роботов вырабатывают сигнал «препятствия нет», когда расстояние до препятствия выше определенного значения, и сигнал «препятствие», когда расстояние до препятствия ниже этого значения, и пора менять траекторию движения. Конечно, расстояние выражается определенной величиной и его можно измерить количественно.

Номинальное измерение выбрано из соображений экономии: оно проще и дешевле. Результаты измерений при этом представляют собой образы взаимоисключающих событий. Номинальное измерение не может указать, какое из событий или явлений больше или меньше.

Другие измерения, то есть измерения более высокого уровня, допускают большую детализацию при присваивании тех или иных значений, нежели простая классификация. Нижнюю ступень в количественных измерениях занимает *порядковое измерение*. Выполнив порядковое измерение, можно определить относительную величину двух характеристик и располагать характеристики в определенном порядке согласно размеру, величине или интенсивности. Примерами порядковых измерений могут служить экзамены в университете или тесты по расходу топлива разными двигателями машин.

Значения, приписываемые порядковым измерением, выражают собой относительный порядок по величине, однако никаких других соотношений между ними не существует. Например, разница в знаниях между студентами, получившими на экзамене оценки «отлично» и «хорошо», не обязательно такая же, как разница между получившими оценки «удовлетворительно» и «неудовлетворительно». Легко видеть, что соотношения «меньше», «равно» и «больше» остаются верными, если от результата порядкового измерения берется монотонно возрастающая функция. Очевидно, что такое монотонное преобразование является допустимым. Отсюда мы можем сделать вывод, что вычисление среднего результата экзамена бессмысленно, так как допустимо

преобразование результатов того или иного экзамена с помощью произвольной монотонно возрастающей функции. Если снова найти среднее после такого преобразования, то в данном случае то, что мы получим, будет совсем другим. Поэтому среднее от результатов порядкового измерения не содержит сколько-нибудь значимой информации.

Измерение более высокого уровня носит название *интервального измерения*. С помощью интервального измерения мы можем не только установить тот факт, что одна величина больше другой, равна ей или меньше, но также определить, справедливо ли это в пределах определенного интервала. Однако начало интервала измерения или нулевая точка отсчета не фиксируется. Примерами интервального измерения является измерение времени движения транспортного средства. Информация, полученная при интервальном измерении, не теряется, если результаты измерений умножить на одно и то же действительное положительное число или ко всем результатам прибавить одно и то же действительное число. Допустимыми преобразованиями являются все линейно-возрастающие функции.

Следующий тип — измерение более высокого уровня — обладает всеми свойствами предыдущих типов, но в этом случае добавляется фиксированное начало отсчета. Этот тип называется *пропорциональным измерением*. Выполняя такое измерение, можно определить отношение двух величин. Результаты пропорционального измерения можно лишь умножать на действительное положительное число. Для большинства физических величин можно сконструировать измерительные приборы для пропорциональных измерений.

Измерениями наивысшего уровня являются *кардинальные измерения*. С помощью таких измерений устанавливают соотношение между значением той или иной величины и значением эталонной величины, определенной заранее. Выбор размера, значения или интенсивности эталона произволен при условии, что в точности один и тот же эталон применяют во всех кардинальных измерениях данной величины. Примером международной системы эталонов является система СИ. Результат кардинального измерения, например, при измерении скорости автомобиля, выглядит таким, как если бы он уже не был отношением измеряемой величины к мере. При кардинальном измерении результаты фиксированы и допустимым является лишь тождественное их преобразование.

Строго говоря, единственное, из чего можно извлечь информацию при измерении, — это *наблюдение*. Из-за практических и фундаментальных ограничений результат измерения или наблюдения всегда в определенной степени не точен. В образе

$$i = f(s)$$

измеряемой величины s , который мы получаем от прибора как результат его действия, имеется некоторая неопределенность. Одной из при-

чин этой неопределенности является тепловой шум, который всегда есть в каждом приборе. В случае номинального измерения неопределенность может появиться в том случае, когда s_1 , близко к s_2 , если разрешающая способность нашей измерительной системы и воспроизводимость результата недостаточно высоки.

Согласно аксиоме корректности случаи

$$s_1 = s_2 \quad \text{и} \quad s_1 \neq s_2$$

являются взаимно исключающими, и если имеется такая неопределенность, то никакого утверждения о результате измерения сделать нельзя.

В случае порядковых измерений существует несколько практических затруднений, которые могут приводить к некорректным утверждениям, если основываться исключительно на наблюдении. Чтобы предотвратить это, постулируются следующие три аксиомы:

1. Если $s_1 < s_2$, то существует такое конечное действительное число n , что $ns_1 \geq s_2$. Это означает, что s_1 не может быть бесконечно малой величиной. Иначе в подобном случае нельзя сделать никакого выбора.

2. Случаи $s_1 \geq s_2$ и $s_1 > s_2$ являются взаимно исключающими.

3. Если $s_1 \geq s_2$ и $s_2 \geq s_3$, то $s_1 \geq s_3$ (аксиома транзитивности).

В случае интервального измерения нам нужны две дополнительные аксиомы: аксиома корректности и аксиома транзитивности применительно к интервалам. Вторая из этих аксиом утверждает, что из-за неопределенности, имеющей место на практике, нельзя измерять бесконечно малые интервалы. Таким образом, мы проводим различие между чистой арифметикой, в которой числа и алгебраические выражения точны, и прикладной арифметикой, в рамках которой мы имеем дело с приближенными измеренными значениями.

Алгоритм измерения может быть представлен *словесно, аналитически, графически, программно* или сочетанием этих методов. Последовательность действий при этом не произвольна, а реализует определенный метод решения задачи. Во всех случаях задача должна быть настолько точно сформулирована, чтобы не осталось места для различных двусмысленностей.

Математическую запись процесса измерения можно представить выражением

$$Y = R[P(X), M],$$

где X — измеряемая величина; Y — результат измерения; P — оператор, представляющий алгоритм измерений; $P(X)$ — сигнал, несущий информацию о значении измеряемой величины; M — мера или образцовая величина, лежащая в основе операции сравнения; R — оператор сравнения значения измеряемой величины с мерой.

Процесс измерения в общем виде представлен блок-схемой на рис. 1.3.

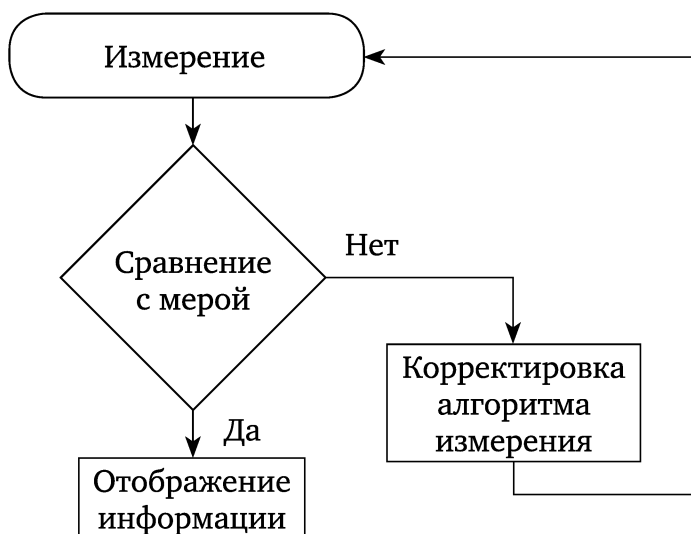


Рис. 1.3. Блок-схема алгоритма измерения

По результатам сравнения значения измеряемой величины с мерой выполняется условный переход на отображение этого результата в случае соответствия с мерой или на корректировку алгоритма измерения в случае несоответствия с ней. В последнем случае может быть скорректировано значение самой меры.

1.4. Измерение нефизических величин

В отличие от физических величин, нефизические величины, встречающиеся в нетехнических областях, измерить очень трудно, а иногда и невозможно, главным образом из-за того, что они являются характеристиками биологических и социальных *сложных систем*, к которым относятся, например, люди, организации и общества. Поэтому в случае, когда имеешь дело с нефизическими характеристиками, состояниями или явлениями в таких системах, кардинальные измерения выполняются очень редко.

При измерениях, относящихся к сложным системам или объектам, измеряемая величина часто зависит от множества различных обстоятельств. Обычно природа и количественные характеристики этих зависимостей неизвестны. Кроме того, обстоятельства, влияющие на результат измерения, не остаются постоянными во время проведения измерения, так что становится невозможным скорректировать ту или иную ошибку измерения. Это означает, что измерение более не является избирательным, а результат измерения содержит в себе и другие факторы. Обычно нефизические величины служат характеристикой живого организма или формирования из живых существ. А природа живого организма такова, что он пребывает в постоянном социальном, культурном или политическом взаимодействии со своим окружением. По этой причине обычно невозможно выполнить *изолированное измерение*. Объект измерения продолжает взаимодействовать со

своим окружением, причем интенсивность и характер взаимодействия остаются неизвестными. Это взаимодействие искажает результаты измерения и делает их неадекватными, причем степень неадекватности зависит от чувствительности к этому искажающему взаимодействию.

Кроме того, при измерениях с такими объектами часто невозможно повторить эксперимент. При физических измерениях мы часто повторяем наблюдения, чтобы убедиться в воспроизводимости результата, а также для определения величины случайных ошибок. Однако при нефизических измерениях объект часто ведет себя во второй раз иначе. Например, студент, дважды сдающий один и тот же экзамен, может сдать его по-разному.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под техническим измерением?
2. Что понимается под объектом измерения?
3. Что такое физическая величина?
4. Как определяется энтропия в теории информации?
5. Какие существуют виды технических измерений?

2

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Объекты измерений

Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте измерения в двух формах — пассивной или активной.

Пассивной информацией называют совокупность сведений, заключенных в том, как устроен объект. Примером такой информации является информация, содержащаяся в фотографии или перфокарте, а также значение сопротивления резистора.

Активная информация имеет форму энергетической характеристики того или иного явления. Такие информационные энергетические явления называются *сигналами*. Примерами сигналов служат электрические, оптические и акустические явления, используемые для передачи информации.

Доступа к пассивной информации нет, пока она не преобразована в активную форму. Для того чтобы сделать это, необходим какой-то источник энергии, например, освещение фотографии или пропускание электрического тока через измеряемый резистор. С помощью энергии этого источника пассивная информация, имеющаяся в объекте измерения, отображается в электрические явления. Пассивная информация становится активной, например, в виде света, отраженного от фотографии. После этого активную информацию можно регистрировать имеющимися техническими средствами, то есть с помощью измерительной системы.

Для проведения измерений с *пассивными объектами*, то есть в случае, когда измерительная информация, которую предстоит получить, содержится в объекте в пассивной форме, необходим внешний источник энергии, чтобы активизировать соответствующие пассивные свойства данного объекта. Этот внешний источник энергии оказывает воздействие на объект измерения, который, в свою очередь, так или иначе откликается на него. Если известно воздействие, то для того чтобы узнать свойства объекта, нужно лишь измерить отклик. Фактически отклик содержит активную информацию как об измеряемом объекте, так и о воздействии. Если воздействие не известно, то для извлечения той части пассивной информации, которая активизирована данным

воздействием, необходимо осуществить измерение, как отклика, так и самого воздействия. Эта схема показана на рис. 2.1.

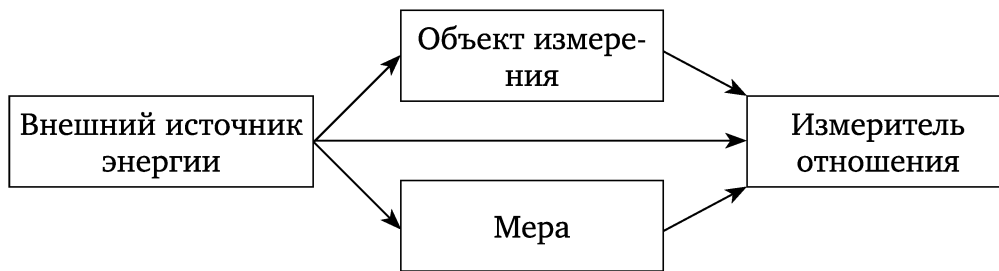


Рис. 2.1. Схема измерения пассивного объекта

Предположим, что с помощью используемых для измерения технических средств, то есть с помощью измерительной системы, мы можем определять отношение двух физических величин при условии, что они имеют одну и ту же физическую размерность. Однако не всегда воздействие и отклик обязательно должны иметь одинаковую физическую размерность. Поэтому нам необходим эталон, который характеризуется точно известным соотношением между воздействием и откликом.

Для *активного объекта*, то есть в случае, когда информация, которую предстоит получить об измеряемом объекте, активна, не требуется возбудитель. Однако снова нам нужен эталон, чтобы для данного объекта измерить то или иное отношение. Такой эталон должен давать известный сигнал той же размерности, что и измеряемый сигнал. Примером пассивных эталонов являются калибровочные резисторы, а примером активных эталонов могут служить источники опорного напряжения.

2.2. Единицы измерений

При измерении сигнала мы имеем возможность сопоставить характеристику неизвестной физической величины с характеристикой известной физической величины той же размерности.

Известная характеристика той величины, к которой мы обращаемся при измерении, называется мерой. Применительно к кардинальным измерениям имеется принятый в международном масштабе стандарт меры, которая, ради простоты, принята равной единице. Поэтому в случае кардинальных измерений мера задает единичное значение измеряемой величины. Таким образом, результат кардинального измерения скалярной физической величины можно выразить как

$$x = \{x\}[x],$$

что эквивалентно записи

$$\text{величина} = \{\text{значение}\}x[\text{единица}].$$

В прошлом достаточно широко применялось сразу несколько систем единиц, в частности система СГС — сантиметр, грамм, секунда, а также английская система FPS — фут, фунт, секунда. В настоящее время стандартизированной в международном масштабе системой единиц является система СИ.

До введения метрической системы единицы выбирались независимо друг от друга. Поэтому пересчет из одной единицы в другую был сложным. К тому же в разных местах применялись разные единицы, иногда с одинаковыми названиями. Метрическая система должна была стать удобной и единой системой мер и весов. СИ (*SI*, фр. *Le Système International d'Unités*, что переводится как Международная система единиц) — это система единиц физических величин, являющаяся современным вариантом метрической системы.

Система СИ является наиболее широко используемой системой единиц в мире как в повседневной жизни, так и в науке и технике. Тем не менее в большинстве научных работ по электродинамике используется Гауссова система единиц, из-за ряда недостатков системы СИ. В частности, в СИ напряженность и смещение имеют разную размерность, и возникает диэлектрическая проницаемость вакуума, что лишено физического смысла. В настоящее время система СИ принята в качестве основной системы единиц большинством стран мира и почти всегда используется в области техники, даже в тех странах, в которых в повседневной жизни используются традиционные единицы (например, в США).

Официальным международным документом по системе СИ является Брошюра СИ (фр. *Brochure SI*, англ. *SI Brochure*), издающаяся с 1970 г. С 1985 г. этот документ выходит на французском и английском языках.

Согласно международным документам (Брошюра СИ, ISO 80000, Международный метрологический словарь), единицы СИ имеют названия и обозначения. Названия единиц могут записываться и произноситься по-разному на разных языках. Обозначения единиц, согласно Брошюре СИ, являются не сокращениями, а математическими объектами (англ. *mathematical entities*). Они входят в международную научную символику ISO 80000 и от языка не зависят, например: *kg*. В международных обозначениях единиц используются буквы латинского алфавита, в отдельных случаях греческие буквы или специальные символы.

В России действует ГОСТ 8.417-2002, предписывающий обязательное использование единиц СИ. В нем перечислены единицы физических величин, разрешенные к применению, приведены их международные и русские обозначения и установлены правила их использования. По этим правилам при договорно-правовых отношениях в области сотрудничества с зарубежными странами, а также в поставляемых за границу вместе с экспортной продукцией технических и других документах разрешается применять только международные обозначения единиц. Применение международных обозначений обязательно

также на шкалах и табличках измерительных приборов. В остальных случаях, например во внутренних документах и обычных публикациях, можно использовать либо международные, либо русские обозначения. Не допускается одновременно применять международные и русские обозначения, за исключением публикаций по единицам величин.

Основными единицами Международной системы единиц СИ являются:

1. Метр (м) — единица длины.
2. Килограмм (кг) — единица массы.
3. Секунда (с) — единица времени.
4. Ампер (А) — единица силы электрического тока.
5. Кельвин (К) — единица температуры.
6. Кандела (кд) — единица силы света.
7. Моль (моль) — единица количества вещества.

В рамках СИ считается, что эти единицы имеют независимую размерность, то есть ни одна из основных единиц не может быть получена из других. Эти единицы позволяют проводить измерения всех физических величин, как электрических, так и неэлектрических, на которые условно подразделяются измерения. Шкалы Кельвина и Цельсия связаны между собой следующим образом: $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$.

Все основные единицы имеют свое определение:

- метр — длина пути, которую проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды;

- килограмм — масса, равная массе международного прототипа килограмма. Эта эталонная гиря в виде прямого цилиндра из сплава платины и иридия, высота и диаметр которого равны 39 мм (хранится в Международном бюро мер и весов в Севре под Парижем);

- секунда — продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, которое соответствует переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей;

- 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, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины;

- кельвин — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Допускается также применение шкалы Цельсия;

- моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода-12 массой 0,012 кг;

- кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Кроме основных единиц установлены производные единицы. Производные единицы получают из основных с помощью алгебраических

действий, таких как умножение и деление. Некоторым из производных единиц в СИ присвоены собственные названия, например, радиану истерадиану, которые ранее относились к дополнительным единицам. Для них установлены следующие определения.

РадIAN (рад) — это угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми равна радиусу.

СтерАдиан (ср) — это телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Математическое выражение для производной единицы измерения вытекает из физического закона, с помощью которого эта единица измерения определяется, или определения физической величины, для которой она вводится. Например, скорость — это расстояние, которое тело проходит в единицу времени; соответственно, единица измерения скорости — м/с (метр в секунду).

Наиболее употребительные производные единицы следующие:

1. Квадратный метр (м^2) — единица площади.
2. Кубический метр (м^3) — единица объема.
3. Килограмм на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$) — единица плотности.
4. Метр в секунду ($\text{м}/\text{с}$) — единица скорости.
5. Метр на секунду в квадрате ($\text{м}/\text{с}^2$) — единица ускорения.
6. Ньютон ($\text{Н} = \text{кг} \times \text{м}/\text{с}^2$) — единица силы.
7. Паскаль ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$) — единица давления.
8. Джоуль ($\text{Дж} = \text{Н} \times \text{м}$) — единица работы, энергии, количества теплоты.
9. Ватт ($\text{Вт} = \text{Дж}/\text{с}$) — единица мощности.
10. Кулон ($\text{Кл} = \text{А} \times \text{с}$) — единица количества электричества.
11. Вольт ($\text{В} = \text{Вт}/\text{А}$) — единица электрического напряжения и ЭДС.
12. Вольт на метр ($\text{В}/\text{м}$) — единица напряженности электрического поля.
13. Ом ($\text{Ом} = \text{В}/\text{А}$) — единица электрического сопротивления.
14. Фарада ($\text{Ф} = \text{Кл}/\text{В}$) — единица электрической емкости.
15. Вебер ($\text{Вб} = \text{В} \times \text{с}$) — единица потока магнитной индукции.
16. Генри ($\text{Гн} = \text{Вб}/\text{А}$) — единица индуктивности.
17. Тесла ($\text{Тл} = \text{Вб}/\text{м}^2$) — единица магнитной индукции.
18. Ампер на метр ($\text{А}/\text{м}$) — единица магнитодвижущей силы.
19. Сименс ($\text{См} = \text{Ом}^{-1}$) — единица проводимости.
20. Герц ($\text{Гц} = \text{с}^{-1}$) — единица частоты.
21. Люмен ($\text{лм} = \text{кд} \times \text{ср}$) — единица светового потока.
22. Кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$) — единица яркости.
23. Люкс ($\text{лк} = \text{лм}/\text{м}^2$) — единица освещенности.

Кроме того, ГОСТ 8.417-2002 разрешает применение следующих единиц: град, световой год, парсек, диоптрия, киловатт-час, вольт-ампер, вар, ампер-час, карат, текс, гал, оборот в секунду, оборот в минуту. Разрешается применять единицы относительных и логарифмических величин, такие как процент, промилле, миллионная доля, фон, октава,

декада. Допускается также применять единицы времени, получившие широкое распространение, например, неделя, месяц, год, век, тысячелетие.

На XXIV Генеральной конференции по мерам и весам в 2011 г. была принята резолюция, в которой, в частности, предложено в будущей ревизии Международной системы единиц переопределить единицы измерений таким образом, чтобы некоторые физические константы, выраженные через эти единицы, стали точно определенными числами. Некоторые из этих определений уже введены ранее. В своем окончательном виде СИ будет системой единиц, в которой частота излучения, соответствующая переходу между двумя уровнями сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133, в точности равна 9 192 631 770 Гц, а скорость света в вакууме в точности равна 299 792 458 м/с.

Обозначения единиц печатают прямым шрифтом, точку как знак сокращения после обозначения не ставят. Обозначения помещают за числовыми значениями величин через пробел, перенос на другую строку не допускается. Исключения составляют обозначения в виде знака над строкой, перед ними пробел не ставится, например 10°.

Если числовое значение представляет собой дробь с косой чертой, его заключают в скобки, например: (1/60) с. При указании значений величин с предельными отклонениями их заключают в скобки или проставляют обозначение единицы за числовым значением величины и за ее предельным отклонением: (100,0±0,1) кг, 50 г ± 1 г.

Обозначения единиц, произошедшие от фамилий, пишутся с заглавной буквы, в том числе с приставками СИ, например: ампер — А, мегапаскаль — МПа, килоньютон — кН, гигагерц — ГГц.

Кратные и дольные единицы образуются путем использования приставок, приведенных в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Приставки к единицам

Наименование	Размерность	Русское обозначение	Международное обозначение
Йокто	10 ⁻²⁴	й	y
Зепто	10 ⁻²¹	з	z
Атто	10 ⁻¹⁸	а	a
Фемто	10 ⁻¹⁵	ф	f
Пико	10 ⁻¹²	п	p
Нано	10 ⁻⁹	н	n
Микро	10 ⁻⁶	мк	μ
Милли	10 ⁻³	м	m
Санти	10 ⁻²	с	c

Наименование	Размерность	Русское обозначение	Международное обозначение
Деци	10^{-1}	д	d
Дека	10	да	da
Гекто	10^2	г	h
Кило	10^3	к	k
Мега	10^6	М	M
Гига	10^9	Г	G
Тера	10^{12}	Т	T
Пента	10^{15}	П	P
Экза	10^{18}	Э	E
Зета	10^{21}	З	Z
Йотта	10^{24}	Й	Y

Выражение, отражающее связь производной величины с основными величинами системы, называется *размерностью* величины. Оно представляет собой произведение основных величин, возведенных в соответствующую степень, называемую *показателем размерности* величины. Система величин может состоять как из размерных, так и безразмерных величин. Размерной называется величина, в размерности которой хотя бы одна из основных величин возведена в степень, не равную нулю. Безразмерной называется величина, в размерность которой основные величины входят в степени, равной нулю. Безразмерная величина одной системы величин может быть размерной величиной в другой системе.

2.3. Эталоны

Чтобы воспользоваться единицей, необходимо иметь ее физический эталон (от фр. *etalon* — образец, мерило). *Эталон* — это средство измерения, обеспечивающее воспроизведение и хранение узаконенных единиц физических величин, а также передачу их размера другим средствам измерения. Эталон может быть физическим телом, как, например, в случае стандартной меры массы, которым является килограмм.

Эталон может быть определен также посредством стандартизованной измерительной процедуры, в которой применяются эталонные методы измерений и калиброванное оборудование. Именно такой является эталонная мера электрического тока, основанная на измерениях по принципу баланса токов. Третья возможность заключается в том, чтобы в качестве физического эталона воспользоваться явлением при-

роды. Например, эталоны длины, времени и электрического потенциала основаны на процессах, происходящих в атомах.

Эталон определенной физической величины называют первичным, если его можно считать эталоном наивысшей метрологической значимости. В каждой стране есть несколько таких первичных эталонов. Эти национальные первичные эталоны, как правило, бывают реализованы, поддерживаются, сохраняются и совершенствуются в государственных лабораториях мер и весов. Международные эталоны, созданные в рамках Метрической конвенции, хранит Международное бюро мер и весов в Париже.

Термины «эталон» и «мера» часто используются в одном широком значении. Однако под эталоном следует понимать меру наивысшей точности в отличие от образцовых мер и рабочих мер.

Образцовые меры предназначены для поверки и градуировки рабочих мер и измерительных приборов. Они могут быть также непосредственно использованы для точных измерений. В зависимости от точности образцовые меры подразделяются на три разряда. Образцовые меры первого разряда наиболее точные.

Рабочие меры изготавливаются для широкого диапазона номинальных значений величин и используются для поверки измерительных приборов и для практических измерений.

Таким образом, отличие эталона от меры состоит в том, что он имеет наивысшую точность, непосредственно не используется для практических измерений и имеет только единичное значение.

2.4. Методы измерений

Измерение выполняется оптимально, если результат и желаемая точность достигнуты самыми простыми средствами и в соответствии с простейшей стратегией. Часто какой-то метод измерения позволяет воспользоваться более простым и потому менее дорогим оборудованием.

Метод измерения — это совокупность приемов использования принципов и средств измерений для определения значения величин. Под принципом измерения понимают совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, а под средствами измерений — технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные свойства.

В зависимости от способа получения результата измерения делятся на прямые и косвенные, совокупные и совместные измерения.

Прямыми измерениями называются измерения, результат которых получается непосредственно из опытных данных. Примером прямого измерения может служить измерение массы на весах.

Косвенными измерениями называются измерения, при которых искомая величина непосредственно не измеряется, а ее значение находится на основании известной зависимости между этой величиной

и величинами, полученными в результате прямых измерений. Например, мощность в цепях постоянного тока вычисляют как произведение напряжения и тока. Напряжение в этом случае измеряют вольтметром, а ток — амперметром.

Совокупные измерения — это измерения, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений из нескольких одноименных величин, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. К совокупным измерениям относится нахождение сопротивлений двух резисторов по результатам измерения их сопротивления при последовательном и параллельном их включении или нахождение массы отдельных гирь набора по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний этих гирь.

Совместными измерениями называются производимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для нахождения зависимости между ними. Числовые значения искомых величин, как и в случае совокупных измерений, определяются из системы уравнений, связывающих значения искомых величин со значениями величин, измеренных прямым или косвенным способом. Число уравнений при этом соответствует числу искомых величин. Так, при определении зависимости сопротивления резистора от температуры используют известное выражение:

$$R_t = R_{20}[1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2],$$

где R_t — сопротивление резистора при некоторой температуре t ; R_{20} — сопротивление резистора при температуре 20°C ; α и β — температурные коэффициенты. Искомые значения R_{20} , α и β находят решением системы из трех уравнений, составленной для трех различных значений температуры.

В зависимости от совокупности приемов использования принципов и средств измерений все методы делятся на методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Под *методом непосредственной оценки* понимают метод, по которому измеряемая величина определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Прибор прямого действия осуществляет преобразование измерительного сигнала в одном направлении, то есть без применения обратной связи. Этим методом, например, измеряется давление пружинным манометром. Метод непосредственной оценки прост, но отличается относительно низкой точностью.

Методом сравнения называют метод, по которому измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Отличительной чертой метода сравнения является непосредственное участие меры в процессе измерения, например, измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями. Методы сравнения обеспечивают

большую точность измерения, чем методы непосредственной оценки, но это достигается за счет усложнения процесса измерения.

Методы сравнения, в свою очередь, подразделяются на нулевые методы, дифференциальные методы и методы замещения.

Нулевой метод — это метод сравнения измеряемой величины с мерой, в котором действие измеряемой величины на индикатор сводится к нулю встречным действием известной величины. Примером может служить измерение электрического сопротивления при помощи уравновешенного моста.

Дифференциальным методом называют метод сравнения с мерой, по которому прибором измеряется разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. По дифференциальному методу происходит неполное уравновешивание измеряемой величины. В этом заключается отличие дифференциального метода от нулевого. Примером этого метода может служить измерение электрического сопротивления при помощи неуравновешенного моста. В этом случае измеряемое сопротивление будет определяться не только известными сопротивлениями плеч моста, но и показанием индикатора.

Метод замещения — это метод сравнения с мерой, по которому измеряемая величина заменяется в измерительной установке известной величиной, воспроизводимой мерой, причем путем изменения известной величины измерительная установка приводится в прежнее состояние, то есть достигаются те же показания приборов, что и при действии измеряемой величины. В результате известная величина становится равной измеряемой величине.

Из всех разновидностей методов сравнения метод замещения наиболее точен, так как при замене измеряемой величины известной величиной никаких изменений в состоянии и действии измерительной установки не происходит, вследствие этого погрешность в показаниях измерительных приборов не влияет на результат измерения. Примером метода замещения может служить измерение сопротивления с поочередным включением измеряемого сопротивления и регулируемого образцового сопротивления в одно и то же плечо моста.

Метод аналогий использует модель объекта, от которой мы хотим получить измерительную информацию. Измерения, выполненные на модели, обеспечивают нас сведениями о неизвестном объекте в той мере, в какой модель соответствует объекту в наиболее существенных моментах. Методом аналогий пользуются чаще всего в тех случаях, когда измерения на самом объекте невозможны, трудны или дороги.

Один класс используемых моделей — это *математические модели*. В этом случае модель описывается теми же самыми математическими соотношениями, что и действительный объект. Например, механические весы с плечами разной длины можно рассматривать как модель электрической мостовой схемы из резисторов.

Другой класс моделей образуют *масштабные модели*, представляющие собой линейно увеличенные или уменьшенные копии измеряемого объекта. Этот тип моделей часто используется, например, при изучении акустики больших залов.

Третий класс состоит из моделей, являющихся результатом *нелинейного масштабирования*. Увеличение или уменьшение производятся таким образом, что в модель переносятся без искажения только определенные свойства объекта. Примерами таких моделей, строящихся на основе критерия качества, являются модели для испытаний в аэродинамической трубе.

Важным случаем применения метода аналогий является аналоговая ЭВМ, где условия физической задачи моделируются с помощью электронных схем, процессы в которых подчиняются тем же самым математическим соотношениям. Подобные процессы, взятые из разных разделов физики, можно преобразовывать друг в друга таким образом, что математическое описание их поведения оказывается идентичным.

Физические аналогии тесно связаны с теорией измерений. Аналогии основаны на описании физической системы в терминах V -величин и I -величин. V -величина — это такая величина (сигнал), которую измеряют, подключая измерительную систему параллельно соответствующему элементу, то есть к двум выводам или контактам этого элемента. I -величина измеряется путем включения измерительной системы последовательно с элементом, по которому проходит измеряемая величина. В каждом отдельно взятом разделе физики V -величины и I -величины выбираются таким образом, чтобы произведение соответствующих величин равнялось мгновенной мощности, переносимой этими величинами. Если предположить, что V -величины и I -величины комплексны, как это имеет место в теории электрических цепей, то для линейных систем отношение соответствующих величин представляет собой импеданс элемента, к которому приложена величина V и по которому течет величина I . Примерами V -величин являются разность электрических потенциалов, скорость, угловая скорость, разность температур и разность давлений, а примерами I -величин — электрический ток, сила, момент, поток тепла и объемный расход.

Достоинство метода обобщения физических систем путем введения V -величин и I -величин заключается в том, что конфигурация самой системы, применительно к самым различным системам, остается неизменной. В связи с этим элементы таких систем могут быть взаимозаменяемыми. Например, электрическая емкость соответствует массе в механической системе с поступательным движением, или моменту инерции в механической системе с вращательным движением. Эту аналогию между физическими системами иногда называют аналогией «масса — емкость».

Метод повторений заключается в проведении несколько измерений одной и той же неизвестной величины, причем процедура измерений каждый раз выбирается другой. Например, самые фундаментальные

физические константы измерены несколькими различными способами, что позволяет предотвратить возможность проявления одних и тех же ошибок, характерных для того или иного типа измерений. Другие методы измерений будут приводить к сходным результатам, но ошибки измерений окажутся независимыми, и это станет свидетельством надежности измерения.

Метод перечисления заключается в определении отношения двух величин (известной и неизвестной) путем подсчета. Подсчитывать можно только объекты, структуры и события. Физические величины заданной физической размерности должны быть измерены. При измерении допускаются ошибки, а при подсчете их нет (в предположении, что вы не сбиваетесь со счета). Метод перечисления применяется, например, для измерения частоты. Частота периодического сигнала измеряется путем простого подсчета числа периодов, попадающих в точно отмеренный интервал времени.

2.5. Стратегии измерений

На практике не всегда представляется возможным измерить желаемую физическую величину непосредственно. Это происходит, например, в том случае, когда интересующая нас величина флуктуирует быстрее, нежели может отслеживать имеющаяся измерительная система, и надлежащую информацию получить не удастся, так как частотный спектр измеряемого сигнала в этом случае шире полосы пропускания измерительной системы.

Любой сложный сигнал может быть представлен в виде своего спектра. *Спектром* колебаний называется совокупность гармонических колебаний, на которые может быть разложено данное сложное колебательное движение. Математически такое движение представляется в виде ряда

$$f(t) = \sum A_n \cos n\omega t,$$

где A_n — амплитуды гармонических функций; $n\omega$ — частоты, кратные основной частоте; n — номер гармоники; t — время.

Чем сильнее исходное колебание отличается от гармонического колебания, тем сложнее его спектр и тем больше составляющих (гармоник) содержится в разложении. *Ширина спектра* сигнала — это частота самой высокой гармоники в спектре сигнала. В общем случае спектр содержит бесконечный ряд гармоник, амплитуды которых быстро убывают с увеличением их номера, так что практически принимают во внимание только некоторое конечное число гармоник. За практическую ширину спектра принимают диапазон частот, в пределах которого находится наиболее существенная часть спектра сигнала.

Возможен также и обратный случай, когда полоса пропускания измерительной системы значительно превосходит ширину спектра сигнала, и тогда измерительная система используется не оптимально. Выбор нужной стратегии измерений дает возможность решить эти проблемы.

Стратегия когерентных выборок позволяет обрабатывать измерительный сигнал с шириной спектра, значительно большей, чем ширина полосы измерительной системы, при условии, что сигнал является периодическим. Беря отсчеты значений измеряемого сигнала с интервалом, превосходящим n периодов сигнала, где n — целое число, можно запомнить форму сигнала и получить верное представление о нем. Если интервал между выборками обозначить

$$nT + \delta,$$

где T — период измеряемого сигнала, то период восстановленного по этим отсчетам сигнала будет равен

$$(nT + \delta)T / \delta.$$

Это означает уменьшение частоты в раз.

$$\delta / (nT + \delta)$$

Иллюстрация этого принципа дана на рис. 2.2.

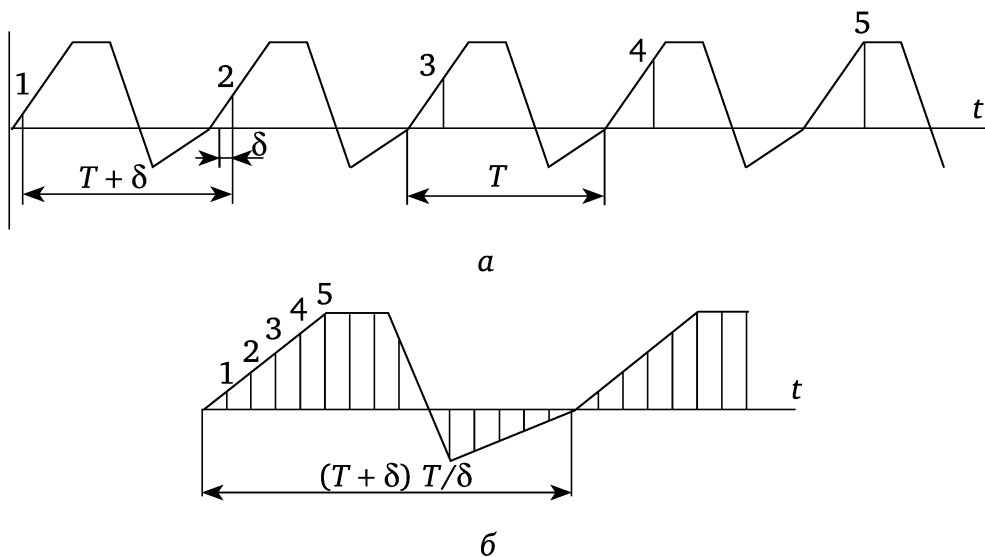


Рис. 2.2. Стратегия когерентных выборок:
а) исходный сигнал; б) восстановленный сигнал

Число пропускаемых периодов n и отношение T / δ (число выборок на период восстановленного сигнала) выбираются таким образом, чтобы частотный спектр восстановленного сигнала, представляющего собой огибающую пиковых значений, был уже полосы пропускания измерительной системы, применяемой для обработки исходного сигнала, из которого берутся выборки. Такого рода взятие выборок

осуществляется при стробоскопических измерениях и в стробоскопических осциллографах. Например, на экране стробоскопического осциллографа с полосой пропускания 20 кГц можно воспроизводить периодические электрические сигналы с частотой до 15 ГГц.

Стратегия случайных выборок применяется в случае, когда нас интересует только информация о величине, а не форма сигнала. Выборки можно брать в произвольные моменты времени, то есть достаточными являются случайные выборки. Так можно определить, например, среднеквадратическое значение сигнала с широкополосным спектром, при этом сигнал не обязан быть периодическим.

Иногда случайную стратегию выборок осуществляют, беря выборки с определенной частотой, никак не связанной с наблюдаемым сигналом. Однако при этом может наступить корреляция между сигналом и процедурой взятия выборок и поэтому сведения о величине сигнала, получаемые из выборок, могут содержать ошибки. Чтобы избежать этих ошибок, частоту выборок изменяют в определенных пределах. При случайном взятии выборок полоса пропускания измерительной системы также может быть меньше ширины спектра измеряемого сигнала.

Применение *стратегии мультиплексирования* при измерениях позволяет одновременно (при частотном мультиплексировании) или последовательно (при временном мультиплексировании) обрабатывать несколько сигналов. Этим методом можно воспользоваться, когда полоса измерительной системы много больше ширины частотного спектра измеряемых сигналов.

На рис. 2.3 в качестве иллюстрации показано, как можно воспользоваться *временным мультиплексированием*, например, при очистке нефти.

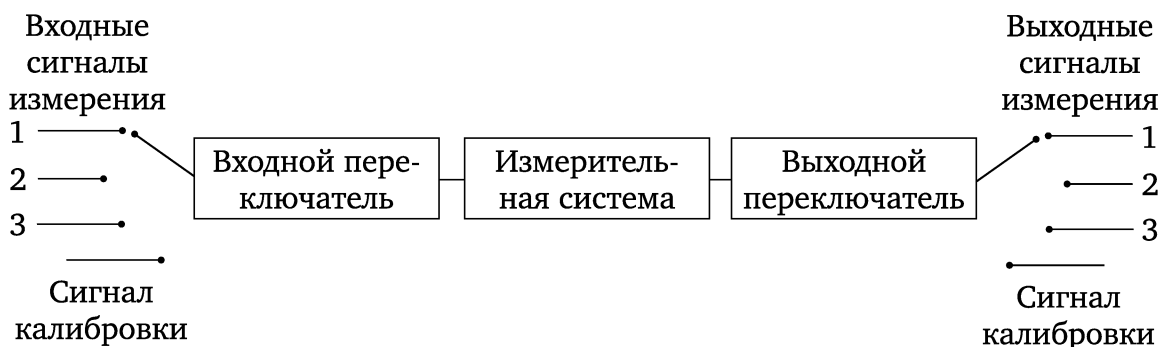


Рис. 2.3. Схема временного мультиплексирования

Аналоговые входные сигналы поступают из различных точек очистительной установки, где, скажем, измеряются температура, давление и расход нефти. Эти сигналы меняются столь медленно, что быстрая система измерений и управления может поочередно обрабатывать много таких сигналов и выдавать результат их обработки. Такой способ реализуется с помощью переключателя, который поочередно коммутирует входные сигналы с измерительной системой через интервалы, задаваемые сигналом калибровки. Выходной переключатель выполняет функцию, обратную функции входного переключателя.

Пример входных сигналов измерения и сигнала, полученного после прохождения входного переключателя, показан на рис. 2.4.

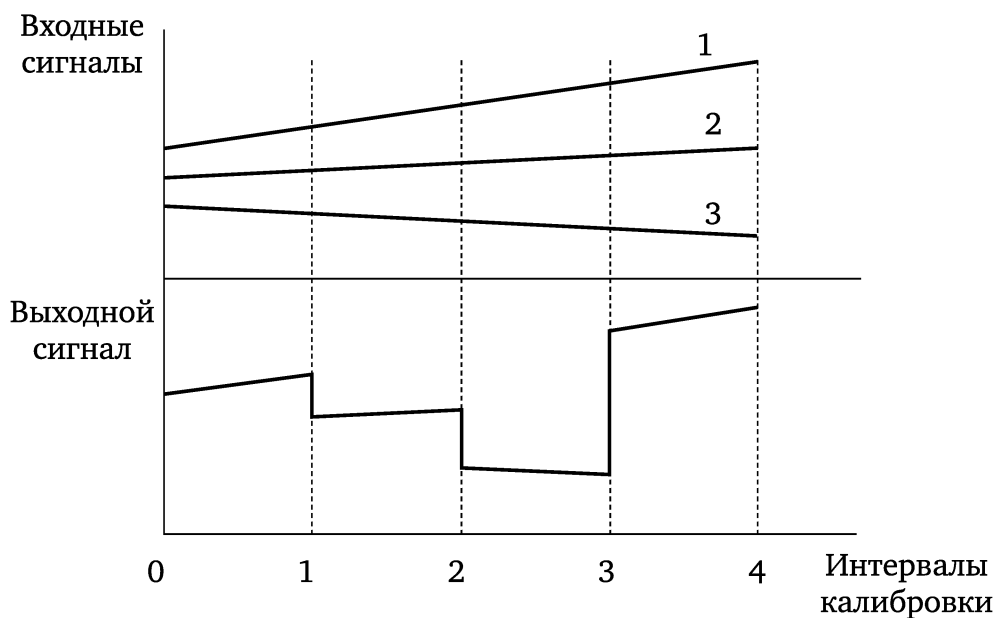


Рис. 2.4. Процесс преобразования сигналов при временном мультиплексировании

При частотном мультиплексировании узкополосный измеряемый сигнал посредством модуляции сдвигается в другой диапазон частот. Это осуществляется таким образом, чтобы спектры нескольких преобразуемых измеряемых сигналов занимали соседние интервалы частот без перекрытия. Пример применения этого метода изображен на рис. 2.5.

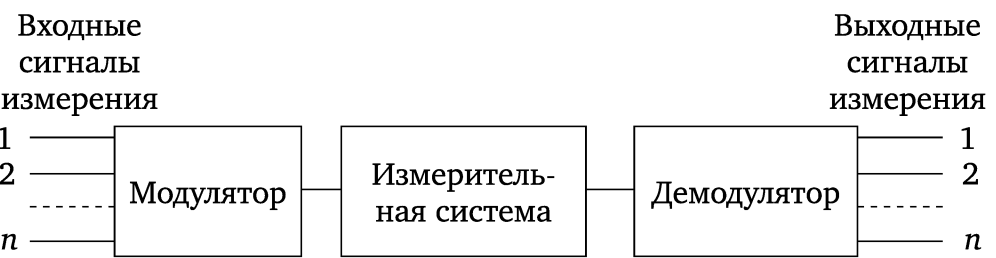


Рис. 2.5. Схема частотного мультиплексирования

Пример сигнала, полученного на выходе модулятора, показан на рис. 2.6.

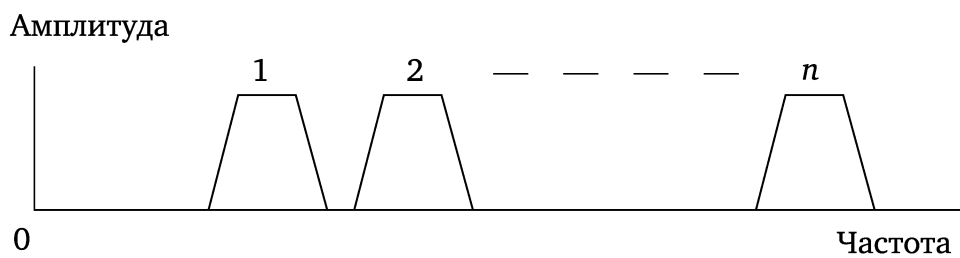


Рис. 2.6. Сигнал на выходе модулятора

Очевидно, что при отсутствии модулятора полосы частот всех сигналов перемешались бы в области низких частот.

На выходе измерительной системы необходим демодулятор, чтобы восстановить каждый сигнал в его исходной полосе частот. Этот принцип часто используют в *телеметрии*, то есть при передаче результатов измерений на расстояние.

Контрольные вопросы

1. Что должна содержать схема измерения пассивного объекта?
2. В чем отличие эталона от меры?
3. Как проводятся совокупные измерения?
4. Что понимают под шириной спектра сигнала?
5. В чем заключается стратегия когерентных выборок?

3

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Основные понятия

Метрология — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Слово «метрология» происходит от греческих слов «метрон» — мера и «логос» — учение.

Метрологическое обеспечение (МО) — это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Научной основой МО является метрология. Организационной основой МО выступает метрологическая служба РФ, состоящая из государственной и ведомственных метрологических служб, базирующихся на основных положениях законодательной метрологии. Нормативно-правовую основу МО составляет комплекс правил, требований и норм, установленных в стандартах и нормативных документах по стандартизации в РФ.

Основой технической базы МО являются средства измерений и контроля. Техническая база МО строится на эталонной базе РФ, которая состоит из 150 государственных первичных и специальных эталонов, 60 вторичных (рабочих) эталонов, обеспечивающих хранение и воспроизведение 70 физических величин в линейно-угловых, механических, температурных, теплофизических, электрических, магнитных, радиотехнических, оптических и других видах измерений, в различных амплитудных, частотных и динамических диапазонах. Конечной целью МО является сведение к рациональному минимуму возможность принятия ошибочных решений по результатам измерений, испытаний и контроля.

Процедура измерения состоит в общем случае из следующих этапов: принятие модели объекта измерения, выбор метода измерения, выбор средства измерения и проведение эксперимента для получения результата. Все эти составляющие приводят к тому, что результат измерения отличается от истинного значения измеряемой величины.

Характеристики, влияющие на результаты и погрешности измерений, называют *метрологическими характеристиками*. От того, насколько точно они будут выдержаны при изготовлении, насколько они будут стабильны при эксплуатации, зависит точность результатов. К метрологическим характеристикам относятся следующие характеристики.

Функция преобразования (статическая характеристика преобразования) — функциональная зависимость между информативными параметрами выходного и входного сигналов средства измерений. Функцию преобразования, принимаемую для средства измерения и устанавливаемую в научно-технической документации на данное средство, называют *номинальной функцией преобразования средства*. Номинальная статическая характеристика преобразования позволяет рассчитать значение входной величины по значению выходной. Она может задаваться аналитически, таблично или графически.

Рассмотрим некоторые общие характеристики измерительных приборов.

Вариация показаний прибора — это наибольшая разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Она определяется при плавном подходе стрелки к испытываемой отметке шкалы при движении ее один раз от начальной, а второй раз от конечной отметок шкалы. Вариация показаний характеризует степень устойчивости показаний прибора при одних и тех же условиях измерения одной и той же величины. Она приближенно равна удвоенной погрешности от трения, так как причиной вариации в основном является трение в опорах подвижной части.

Чувствительностью измерительного прибора к измеряемой величине x называется производная от перемещения указателя a по измеряемой величине:

$$S = da / dx.$$

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от x , а при линейной характеристике чувствительность постоянна. У измерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, то есть расстояние между делениями шкалы одинаковое.

Цена деления шкалы — разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Приборы с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления. В приборах с неравномерной шкалой цена деления может быть разной на разных участках шкалы, и в этом случае нормируется минимальная цена деления. Цена деления шкалы прибора может быть определена через его абсолютную чувствительность и равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы прибора.

После включения прибора до момента установления показаний прибора, когда можно произвести отсчет, проходит некоторый промежуток времени, называемый *временем успокоения*.

Под *временем установления* показаний понимают тот промежуток времени, который проходит с момента изменения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, соответствующее новому значению измеряемой величины. Цифровые приборы характеризуются *временем измерения*, под которым понимают время с момента изменения измеряемой величины или начала цикла измерения до момента получения нового результата на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

Порог чувствительности — это наименьшее изменение входной величины, обнаруживаемое с помощью данного средства измерений. Порог чувствительности выражают в единицах входной величины. Помимо принципиально неизбежных тепловых искажений в измерительной системе существуют и другие источники возмущений, которые могут затемнять полезный сигнал. Например, механические вибрации или электрические наводки могут давать настолько большой сигнал на выходе, что слабые сигналы, действующие на входе, уже нельзя обнаружить. Такие механические дефекты как трение, люфт или наличие мертвой зоны могут приводить к тому, что входной сигнал ниже определенного порога чувствительности не будет приводить к появлению сигнала на выходе. Часто простым изменением конструкции измерительной системы эти нефундаментальные ограничения можно устранить.

Разрешающая способность, или *разрешение*, измерительной системы — это размер шага, на который может быть настроена система, или шага, с которым на индикатор выводится результат действия системы. Другими словами, разрешающая способность — это наименьший интервал значения измеряемой величины, который все еще вызывает изменение результата измерения. Максимальное значение разрешения достигается при максимальной величине значения измеряемой величины, которая может быть измерена с помощью этой системы без насыщения, искажений и перегрузки.

Разрешающая способность имеет конечное значение для всех систем, в которых результат измерения не увеличивается непрерывно с ростом измеряемой величины. Примером таких систем является механическая измерительная система с люфтом и трением покоя, где выходная величина не растет непрерывно с увеличением входного воздействия, а меняется малыми скачками.

Разрешение системы ограничено, следовательно, результат измерений оказывается квантованным. При этом возникает *ошибка квантования*. Ошибки, являющиеся следствием квантованности результата измерения, можно разделить на ошибки усечения и ошибки округления. *Ошибка усечения* происходит в том случае, когда в системе не принимаются во внимание десятичные знаки справа от младшего указываемого десятичного разряда. Обычно это имеет место в алфавитно-цифровых индикаторах, например, в цифровом вольтметре. Величина допускаемой при этом ошибки равна отношению наименьшего возможного

шага к воспроизводимой на индикаторе величине. *Ошибка округления* происходит в том случае, когда в наименьшем указываемом десятичном разряде учитывается остаток путем округления до ближайшего значения в этом разряде. При этом ошибка равна половине наименьшего шага, деленной на индицируемое значение. Если при проведении измерения нулевым методом мы применим меру, которую можно подстраивать только в ступенчатом режиме, и будем изменять задаваемую мерой величину до тех пор, пока индикатор не покажет наименьший отсчет, то будет иметь место ошибка округления.

Степень нелинейности измерительной системы характеризуется нелинейными или гармоническими искажениями. Никакая измерительная система не является идеально линейной. Она может считаться линейной лишь приближенно, например, в малом интервале значений входного сигнала. Существует несколько следующих видов нелинейности, которые могут иметь место в практических измерительных системах.

Нелинейность типа *насыщение и ограничение* характеризуется уменьшением дифференциальной чувствительности с ростом входного сигнала. В случае ограничения такое ослабление наступает резко, а в случае насыщения — постепенно. Чтобы предотвратить выход измерительной системы из строя, когда она оказывается перегруженной слишком большим входным сигналом, часто намеренно ограничивают размах выходного сигнала безопасными значениями.

Нелинейность типа *гистерезис* вызывается различной связью между входной и выходной величинами при увеличении и при уменьшении входной величины. К гистерезису может привести, например, люфт в механической зубчатой передаче.

Нелинейность типа *мертвая зона* обычно возникает в том случае, когда существуют одна или большее число областей, в пределах которых величина выходного сигнала не зависит от входного сигнала. Такая нелинейность может быть вызвана трением покоя. Объект, например стрелка, не будет двигаться до тех пор, пока действующая сила не превысит трения покоя.

Помимо рассмотренных видов нелинейности может встретиться также какая-либо их комбинация. Кроме того, существуют динамические частотно-зависимые виды нелинейности. Проявлением такой нелинейности являются эффекты, связанные с существованием максимальной скорости нарастания напряжения.

Пределы измерения определяются интервалом, внутри которого с помощью данной системы можно измерить нужную величину с требуемой точностью.

Динамический диапазон измерительной системы равен отношению максимального и минимального возможных значений измеряемых величин. Максимальная величина обычно определяется предельным значением допустимой нелинейности, которая проявляется при больших входных сигналах. Минимальная величина, как правило, опреде-

ляется ошибками из-за смещения нуля и шумом, который становится тем более значительным, чем меньше сигнал.

Реакция измерительной системы на приложенное ко входу воздействие называется *откликом* системы. Отклик измерительной системы должен давать верное представление о воздействии. Когда значения измеряемых физических величин меняются со временем, важно точно знать, как измерительная система будет отслеживать эти изменения.

Под *надежностью* электроизмерительных приборов понимают способность их сохранить заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Если значение одной или нескольких характеристик прибора выходит из заданных предельных значений, то говорят, что имеет место *отказ*. Количественной мерой надежности является минимальная вероятность безотказной работы прибора в заданном промежутке времени и условиях работы.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в течение определенного времени непрерывной работы не произойдет ни одного отказа. Время безотказной работы указывается в описаниях приборов.

К метрологическим характеристикам относятся *динамические характеристики*, то есть характеристики инерционных свойств элементов измерительного устройства, определяющие зависимость выходного сигнала средства измерений от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, внешних влияющих величин, нагрузки. К таким характеристикам относят, например, переходную характеристику, амплитудно-фазовую характеристику и передаточную функцию.

Динамические свойства средства измерений определяют динамическую погрешность. *Динамической погрешностью* называют разность между погрешностью прибора в динамическом режиме и его статической погрешностью.

Динамические свойства линейной измерительной системы целиком определяются ее откликом на единичный скачок на входе, то есть ее *переходной характеристикой*. Зная переходную характеристику, можно найти время установления или время считывания измерительной системы. Время установления отсчитывается от момента, когда происходит скачок на входе, до такой точки на оси времени, вслед за которой выходной сигнал, попав в заданный интервал допустимых отклонений от конечного значения, остается в этом интервале. Время установления служит мерой быстродействия измерительной системы.

Динамическое поведение линейной измерительной системы также определяется, если известно, как она реагирует на синусоидальное колебание меняющейся частоты; то есть в том случае, когда известна *частотная характеристика* системы.

Определение частотной характеристики измерительной системы приводит к комплексной зависимости чувствительности от частоты. Чувствительность системы состоит из *амплитудно-частотной характеристики* и *фазо-частотной характеристики*. Характеристикой

частотных свойств служит ширина полосы. Значение ширины полосы f_0 представляет собой частоту, на которой мощность выходного сигнала падает вдвое по сравнению с максимальной мощностью на выходе. Следовательно, на частоте f_0 амплитуда выходного сигнала уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с ее значением на низких частотах.

Бел служат логарифмической мерой отношения мощностей. Мощность P_2 на k бел больше мощности P_1 , когда

$$\log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = k.$$

Таким образом, справедлива запись:

$$P_2 = 10^k \cdot P_1.$$

Децибел (дБ) составляет десятую часть от бела, так что

$$N \text{ бел} = 10N \text{ дБ} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ дБ}.$$

Можно также использовать децибелы в качестве абсолютной меры мощности, установив фиксированное опорное значение, относительно которого рассматриваемая мощность выражается данным числом децибел, и привязав все последующие расчеты мощности к этому опорному значению. Чаще всего опорное значение выбирают равным 1 мВт. В этом случае единицы, с помощью которых выражают мощность, обозначаются Бм или дБм. Таким образом, мощность в 0 дБм равна 1 мВт, мощность в 10 дБм равна 10 мВт, 20 дБм равна 100 мВт и так далее.

Для каждого вида прибора, исходя из его специфики и назначения, нормируется определенный комплекс метрологических характеристик, указываемый в нормативно-технической документации. Общий перечень нормируемых метрологических характеристик, формы их представления и способы нормирования установлены в ГОСТ. В него входят:

- пределы измерений, пределы шкалы;
- цена деления равномерной шкалы аналогового прибора или многозначной меры;
- выходной код, число разрядов кода, номинальная цена единицы наименьшего разряда цифровых приборов;
- номинальное значение однозначной меры, номинальная статическая характеристика преобразования измерительного преобразователя;
- погрешность прибора;
- вариация показаний прибора или выходного сигнала преобразователя;

- полное входное сопротивление измерительного устройства, полное выходное сопротивление измерительного преобразователя или меры;
- неинформативные параметры выходного сигнала измерительного преобразователя или меры;
- динамические характеристики прибора.

3.2. Погрешности измерений

Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется *погрешностью измерения*. В зависимости от способа выражения погрешности измерения делят на абсолютные и относительные.

Абсолютная погрешность измерения — это разность между измеренным значением $X_{\text{изм}}$, физической величины и ее истинным значением $X_{\text{и}}$, выраженная в единицах измеряемой величины

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X_{\text{и}}.$$

Поскольку истинное значение измеряемой физической величины нам недоступно, а доступен только его образ, то за истинное значение измеряемой физической величины при определении абсолютной погрешности измерения принимают результат измерения этой же величины на образцовом приборе.

Относительная погрешность измерения — это отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\gamma_{\text{отн}} = (\Delta / X_{\text{и}}) \cdot 100\%.$$

На практике вместо истинного значения измеряемой величины используют действительное значение $X_{\text{д}}$, полученное с помощью образцового средства измерения, и тогда выражения для абсолютной и относительной погрешности запишутся в виде

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

$$\gamma_{\text{отн}} = (\Delta / X_{\text{д}}) \cdot 100\%.$$

Абсолютная погрешность измерения Δ является суммарной погрешностью для двух составляющих: систематической и случайной, то есть

$$\Delta = \Delta_{\text{с}} + \Delta_{\text{сл}}.$$

Систематическая погрешность — это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся

при повторных измерениях одной и той же величины. По характеру проявления систематические погрешности разделяются на постоянные и переменные. Переменные в свою очередь могут быть прогрессирующими, периодическими и изменяющимися по сложному закону.

Постоянными систематическими погрешностями называются такие, которые остаются неизменными в течение всей серии данных измерений: например, погрешность из-за неточной подгонки образцовой меры или погрешность из-за неточной установки указателя прибора на ноль.

Переменные систематические погрешности изменяются в процессе измерений. Если при измерениях погрешность монотонно убывает или возрастает, то она называется *прогрессирующей*. Так, например, монотонно меняется погрешность из-за разряда источника питания прибора, если результат измерений зависит от напряжения питания.

Периодическая систематическая погрешность — погрешность, значение которой является периодической функцией времени. Ее примером может являться погрешность, вызванная суточными изменениями напряжения питания электрической сети. Систематическая погрешность может изменяться и по некоторому сложному закону. Такова, например, погрешность, вызванная неточностью нанесения шкалы прибора, погрешность электрического счетчика при различном значении нагрузки и погрешность, вызванная изменениями температуры окружающей среды.

Природа и происхождение систематических погрешностей обычно определяются спецификой конкретного эксперимента. По причине возникновения систематические погрешности можно разделить на четыре основные группы: инструментальные, методические, установки и субъективные.

Приведенная погрешность γ есть выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению x_N :

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} 100.$$

Для приборов с нулевой отметкой на краю или вне шкалы нормирующее значение равно конечному значению диапазона измерений. Для приборов с двусторонней шкалой, то есть с отметками шкалы, расположенными по обе стороны от нуля, оно равно арифметической сумме конечных значений диапазона измерений.

У реальных приборов зависимость абсолютной погрешности от измеряемой величины x может быть представлена некоторой полосой неопределенности, обусловленной случайной погрешностью и изменением характеристик приборов в результате действия влияющих величин и вследствие старения. Поэтому значение абсолютной погрешности, как правило, ограничено двумя прямыми, симметрич-

ными относительно оси абсцисс, расстояние между которыми увеличивается с ростом измеряемой величины (рис. 3.1).

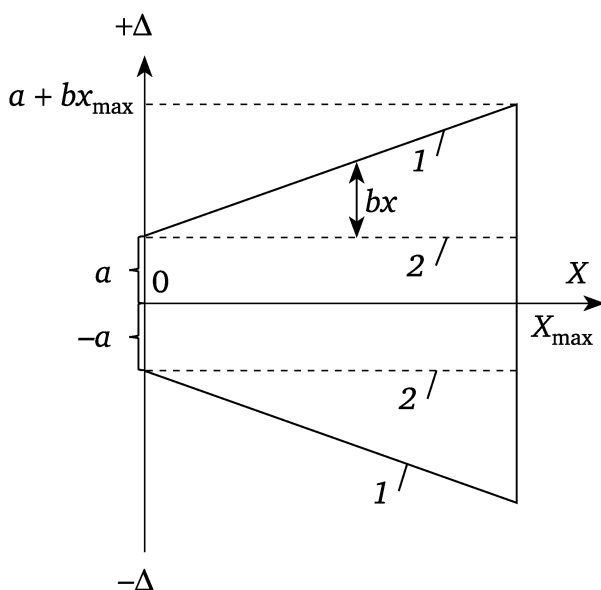


Рис. 3.1. Зависимость абсолютной погрешности прибора от измеряемой величины

Предельные значения абсолютных погрешностей могут быть как положительными, так и отрицательными, но одинаковыми по модулю. Их зависимость от измеряемой величины характеризуется прямыми 1.

Уравнение прямой, не проходящей через начало координат, может быть выражено при помощи двух постоянных коэффициентов a и b . Таким образом,

$$\Delta_{\max} = |a| + |bx|,$$

где a называют предельным значением *аддитивной погрешности*, а bx — предельным значением *мультипликативной погрешности*.

Абсолютные аддитивные погрешности не зависят от значения измеряемой величины, а мультипликативные — прямо пропорциональны ее значению.

Источники аддитивной погрешности — трение в опорах, неточность отсчета, шум, наводки и вибрации. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, которое может быть измерено прибором. Причины мультипликативной погрешности — влияние внешних факторов и старение элементов и узлов приборов.

Согласно ГОСТу приборам присваивается определенный класс точности. *Класс точности* — это обобщенная характеристика прибора, определяемая пределами допускаемых погрешностей. Пределы допускаемых изменений показаний от влияния внешних факторов для любого прибора устанавливаются в зависимости от класса его точности согласно стандартам на отдельные виды приборов. Класс точности может выражаться одним числом или дробью.

У приборов, аддитивная погрешность которых резко преобладает над мультипликативной, все значения погрешностей оказываются в пределах прямых 2, параллельных оси ОХ (рис. 3.1). В результате допускаемые абсолютная и приведенная погрешности прибора оказываются постоянными в любой точке его шкалы. У таких приборов класс точности выражается одним числом, выбираемым из ряда следующих чисел: 1×10^n ; $1,5 \times 10^n$; 2×10^n ; $2,5 \times 10^n$; 4×10^n ; 5×10^n ; 6×10^n , где $n = 1; 0; -1; -2$ и т.д.

У приборов, класс точности которых выражается одним числом, основная приведенная погрешность в рабочем диапазоне шкалы, выраженная в процентах, не превышает значения, соответствующего классу точности. К таким приборам относится большинство стрелочных и самопишущих приборов.

Класс точности приборов, у которых аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности соизмеримы, обозначается в виде двух чисел, разделенных косой чертой, например класс точности 0,1/0,05.

При нормировании по относительной погрешности обозначение класса точности заключают в кружок.

Для гирь, мер длины и приборов, в которых предел погрешности выражен в единицах измеряемой величины, класс точности принято обозначать номером, а именно: 1-й, 2-й и т.д. в порядке снижения точности. Ряды классов точности, их обозначения и соответствующие требования к средствам измерений включаются в государственные стандарты на отдельные виды средств измерений.

Инструментальные погрешности зависят от погрешностей применяемых средств измерений. Неточность градуировки, конструктивные несовершенства и изменения характеристик прибора в процессе эксплуатации являются причинами инструментальных погрешностей. Эта погрешность в свою очередь подразделяется на основную и дополнительную.

Основная погрешность средства измерений — это погрешность в условиях, принятых за нормальные, то есть при нормальных значениях всех величин, влияющих на результат измерения.

Дополнительная погрешность средства измерений — погрешность, дополнительно возникающая при отклонении значений влияющих величин от нормальных значений. Обычно различают отдельные составляющие дополнительной погрешности, например температурную погрешность или погрешность из-за изменения напряжения питания.

Методические погрешности происходят от несовершенства метода измерения, использования упрощающих предположений и допущений при выводе применяемых формул, а также от влияния измерительного прибора на объект измерения. Например, измерение температуры с помощью термопары может содержать методическую погрешность,

вызванную нарушением температурного режима исследуемого объекта вследствие внесения термопары в зону измерений.

Погрешности установки вызываются неправильностью применения меры, прибора или отклонением внешних условий от нормальных. Например, установка прибора с наклоном, наличие внешнего магнитного поля, отклонение температуры от нормальной и др.

Субъективные погрешности появляются как результат особенностей самого наблюдателя. Это может случиться, например, из-за неправильного направления взгляда при наблюдении за показаниями стрелочного прибора (погрешность от *параллакса*), из-за склонности наблюдателя к завышению или занижению результатов и др. Использование цифровых приборов и автоматических методов измерения позволяет исключить такого рода погрешности.

Систематические погрешности в принципе могут быть выявлены и исключены из результатов измерения введением поправок, устранением самих источников погрешности, методом двукратного измерения и методом замещения.

Приступая к выполнению измерения, следует, по возможности, устранить причины, вызывающие появление систематических погрешностей. Учет инструментальных погрешностей мер и приборов осуществляют введением поправок. *Поправкой* называется значение величины, одноименной с измеряемой, которое нужно прибавить к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности. Введение поправок — наиболее широко используемый способ исключения систематических инструментальных погрешностей. Поправка определяется при помощи поверки технических средств, составления и использования соответствующих таблиц и графиков. Применяются также расчетные способы нахождения поправочных значений.

Погрешность установки устраняют соблюдением требований эксплуатации средства измерения. Субъективную погрешность уменьшают и по возможности устраняют, используя для выполнения измерений квалифицированных специалистов и различные методы проверки результатов этих измерений.

Метод компенсации погрешности по знаку применяется для исключения систематических погрешностей, которые в зависимости от условий измерения могут входить в результат измерения с тем или иным знаком, например, погрешность от термо-ЭДС, от влияния напряженности постоянного электрического или магнитного поля. В этом случае следует провести измерения дважды так, чтобы погрешность входила в результаты измерений один раз с одним знаком, а другой раз — с обратным знаком. Среднее из результатов двух таких измерений будет свободно от систематической погрешности. При проведении автоматических измерений широко используются схемные методы коррекции систематических погрешностей, например компенсационное включе-

ние преобразователей, различные цепи температурной и частотной коррекции.

Использование микропроцессорных устройств в измерительных приборах позволяет исключить или производить коррекцию многих видов систематических погрешностей. Особенно это относится к инструментальным погрешностям. Автоматическое введение поправок, связанных с неточностями градуировки, расчет и исключение дополнительных погрешностей, исключение погрешностей, обусловленных смещением нуля, позволяют существенно повысить точность измерений.

Случайная составляющая погрешности при повторных измерениях одной и той же величины изменяется случайным образом. Обычно она является следствием одновременного действия многих независимых причин, каждая из которых в отдельности мало влияет на результат измерения. Случайные погрешности могут быть оценены с помощью методов теории вероятности и математической статистики.

Влияние воздействия окружающей среды на измерительную систему может быть сведено к минимуму путем применения наименее чувствительной измерительной системы. Кроме того, можно предпринять также следующие меры для еще большего ослабления нежелательного влияния окружающей среды:

- изолировать измерительную систему или ее часть от внешних воздействий, например, путем электрического экранирования, стабилизации температуры окружающей среды, поддержания постоянной влажности и т.д.;

- применить метод измерения с малой собственной чувствительностью к помехам. Например, можно сначала измерить выходной сигнал, обусловленный только аддитивной помехой, затем измерить сигнал, появляющийся на выходе в результате совместного действия входного сигнала и помехи, а после этого соответственно внести коррекцию в окончательный результат измерения, вычитая помеху;

- построить измерительную систему из компонентов с малыми значениями коэффициентов помех, используя, например, элементы с малыми температурными коэффициентами;

- спроектировать измерительную систему таким образом, чтобы неизбежные в других случаях помехи здесь компенсировали друг друга посредством параллельной или последовательной компенсации, или в результате компенсации путем вычисления отношения.

Параллельная компенсация в измерительной системе или в ее критической части заключается в разбиении ее на две параллельные части, каждая из которых подвергается действию одной и той же внешней помехи. Чувствительность системы оказывается равной сумме чувствительностей ее частей, и действие помехи на выходном сумматоре будет компенсироваться, если соответствующие чувствительности будут противоположны по знаку.

Метод *последовательной компенсации* состоит в том, что измерительная система разбивается на две части, включенные последова-

тельно, и подверженные действию одной и той же внешней помехи. Если чувствительности частей будут противоположны по знаку, то помехи последовательно компенсируются.

Метод компенсации путем вычисления отношения эффективен только при борьбе с мультипликативными помехами. Чувствительность системы, в которой берется отношение, равна

$$S = S_1 / S_2 x_0,$$

где x_0 — постоянная опорная величина. Внешняя мультипликативная помеха воздействует как на S_1 , так и на S_2 . Эта мультипликативная помеха подавляется в выходном сигнале, если значения коэффициентов помех по составляющим отношение сигналам равны. Коэффициент помехи определяется как

$$C = \frac{1}{S} \frac{dS}{dD},$$

где dD — приращение помехи.

Примером параллельной компенсации является дифференциальный усилитель с резистором в общей цепи эмиттеров. Последовательная компенсация часто применяется для борьбы с помехами в измерительных преобразователях. Помеха компенсируется в схеме, включенной последовательно с источником измеряемого сигнала.

Можно изменить форму входного сигнала или его частотный спектр так, чтобы помеху можно было легко отделить от полезного сигнала. Например, в усилителе постоянного тока с преобразованием от постоянного напряжения, поступающего на вход, переходят к переменному сигналу. Это позволяет избежать влияния смещения по постоянному току и дрейфа внутри самого усилителя.

Для борьбы с мультипликативными помехами можно воспользоваться обратной связью. На рис. 3.2 представлена схема, в которой за счет обратной связи из сигнала x на входе измерительной системы с чувствительностью S вычитается k -я часть выходного сигнала y .

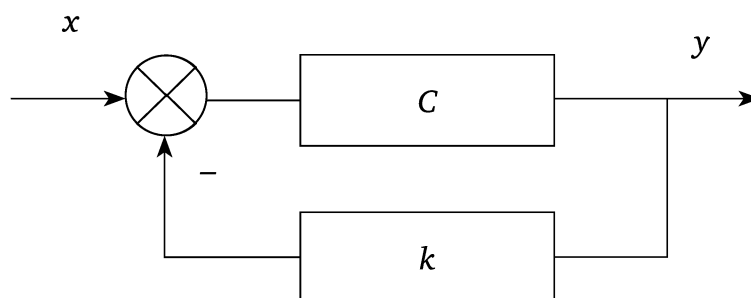


Рис. 3.2. Измерительная система с обратной связью

Чувствительность системы с учетом обратной связи определяется соотношением:

$$S_o = \frac{S}{1 + kS}.$$

Можно показать, что коэффициент помехи системы с обратной связью C_o относится к коэффициенту помехи системы без обратной связи C как

$$C_o = \frac{C}{1 + kC}.$$

Когда отрицательная обратная связь является глубокой, то есть при больших значениях k , коэффициент помехи значительно уменьшается. Однако за ослабление действия помех приходится расплачиваться уменьшением чувствительности системы от исходного значения S до величины $1/k$.

3.3. Согласование объекта измерения и измерительной системы

Источники возможных ошибок при измерении могут быть рассмотрены на основе общей структурной схемы измерения, изображенной на рис. 3.3.

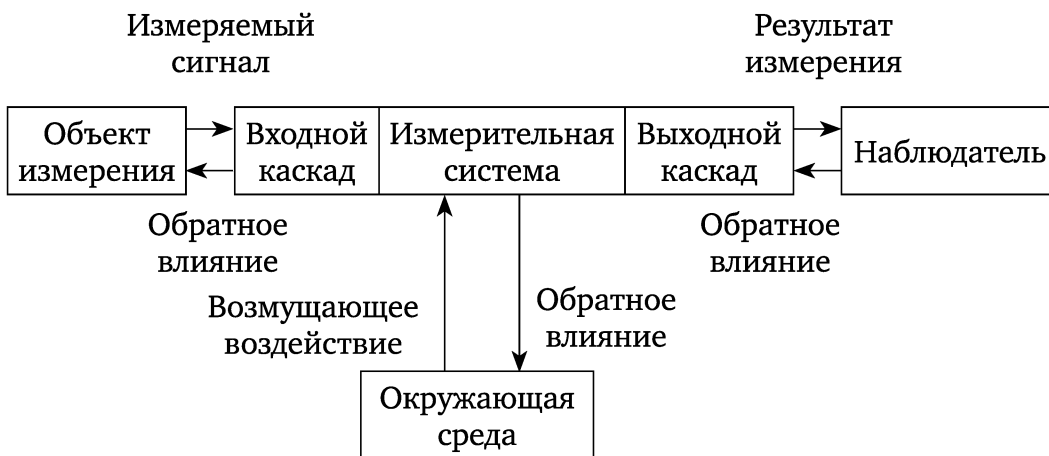


Рис. 3.3. Общая структурная схема измерения

Согласно этой схеме, состоящей из объекта измерения, измерительной системы и наблюдателя, которые находятся в определенной окружающей среде, объект и система взаимодействуют друг с другом. Объект влияет на измерительную систему и наоборот, система оказывает воздействие на объект. Влияние объекта на систему желательно, так как посредством этого осуществляется передача измерительной информации. Вторая из указанных составляющих взаимодействия нежелательна. Влияние на объект может исказить измеряемую величину. В этом состоит ошибка обратного влияния. Необходимо согласовывать входной каскад измерительной системы с объектом измерения таким образом, чтобы свести ошибку обратного влияния к минимуму.

На рис. 3.3 показано также взаимодействие между выходом измерительной системы и наблюдателем. Понятие «наблюдатель» включает не только регистрацию результатов измерения человеком. Наблюдателем может быть как человек, так и техническая система, которая использует результат измерения для управления объектом или процессом. Здесь взаимодействие измерительной системы и наблюдателя складывается из желательной и нежелательной составляющих. Воздействие измерительной системы на наблюдателя, то есть передача наблюдателю результата работы измерительной системы, очевидно, является положительным фактом. Обратное влияние может приводить к ошибкам, если характер воздействия наблюдателя на измерительную систему и степень этого воздействия оказываются такими, что результат измерения меняется. Например, считывание показаний стрелочного прибора не по направлению, перпендикулярному к шкале прибора, приводит к ошибке параллакса.

Помимо двух рассмотренных взаимодействий измерительная система находится в двусторонней связи с окружающей средой. Когда характер и степень данного взаимодействия таковы, что окружающая среда существенно влияет на результат работы измерительной системы, это взаимодействие вызывает помехи. Об этом источнике ошибок измерения говорят как о возмущающем воздействии.

Наконец, четвертым источником ошибок измерения является несовершенство характеристик самой измерительной системы. Если характеристики системы не соответствуют требованиям данного измерения, то они приводят к тому, что измерения оказываются неправильными. К числу таких характеристик, например, относятся полоса пропускания и время отклика.

Воздействие на объект измерения в определенной степени оказывается всегда. Чтобы уменьшить это воздействие до приемлемой величины, необходимо согласовать измерительную систему с измеряемым объектом. Обычно бывает достаточно подстроить только входной каскад измерительной системы. Можно выделить аэнергетическое согласование, энергетическое согласование и согласование по шуму.

Целью *анэнергетического согласования* является сведение к минимуму передачи энергии или мощности между объектом измерения и измерительной системой.

Рис. 3.4 иллюстрирует принцип аэнергетического согласования при измерении V -величины.

Результат измерения равен

$$V_i = V_o \frac{R_i}{R_i + R_o},$$

где V_o — измеряемая величина; R_i — входное сопротивление измерительной системы; R_o — сопротивление объекта измерения.

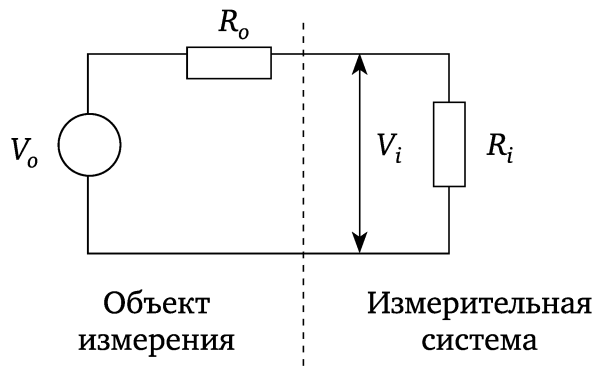


Рис. 3.4. Анэнергетическое согласование при измерении V -величины

Для точного измерения V -величины необходимо, чтобы V_i было близко к V_o . Это достигается, когда $\frac{R_i}{R_i + R_o}$ близко к 1, то есть когда

входное сопротивление измерительной системы много больше, чем внутреннее сопротивление объекта измерений. В этом случае мощность, потребляемая от объекта, будет малой. Кроме того, эта мощность будет почти полностью рассеиваться на сопротивлении измерительной системы, а не на сопротивлении объекта.

Потребление энергии системой зависит от ее *импеданса* (от лат. *impedio* — препятствую), то есть от комплексного сопротивления в цепях переменного тока с активной частью, определяемой резисторами, и реактивной частью, определяемой емкостью и индуктивностью. Если комплексный входной импеданс измерительной системы имеет ненулевую положительную действительную часть, то измерительная система всегда будет потреблять некоторую энергию. Если входной импеданс чисто мнимый, то в среднем система не потребляет энергии, но в отдельные моменты времени будет иметь место передача энергии в ту или иную сторону между объектом и измерительной системой.

Иллюстрация анэнергетического согласования при измерении I -величины приведена на рис. 3.5.

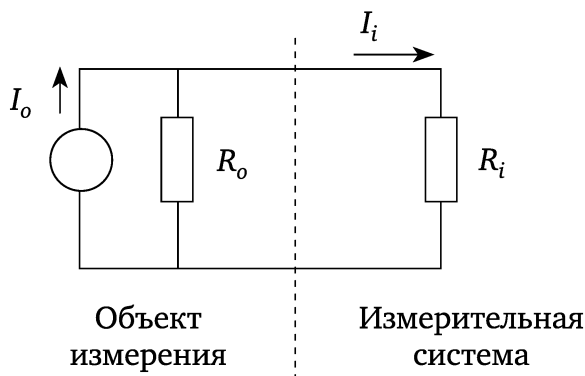


Рис. 3.5. Анэнергетическое согласование при измерении I -величины

Показания индикатора измерительной системы равны:

$$I_i = I_o \frac{R_o}{R_i + R_o},$$

где I_o — измеряемая величина.

Отсюда следует, что для точного измерения I -величины необходимо, чтобы входное сопротивление измерительной системы было значительно меньше, чем внутреннее сопротивление измеряемого объекта. Тогда мощность от объекта почти не потребляется, а то небольшое рассеяние мощности, которое имеется, происходит фактически полностью внутри измерительной системы.

Целью *энергетического согласования* является извлечение максимально доступной мощности из измеряемого объекта, чтобы усиление мощности в измерительной системе могло быть возможно меньшим. Такое согласование особенно важно для пассивных измерительных систем, то есть для таких систем, внутри которых не происходит усиления мощности.

Нетрудно получить условия, которым должен удовлетворять входной импеданс Z_i такой системы, чтобы максимизировать среднюю мощность P , поступающую в измерительную систему от данного объекта измерений. Поскольку мнимой частью входного импеданса

$$Z_i = R_i + jX_i$$

в среднем не потребляется никакой мощности, справедливо следующее равенство

$$P = I^2 R_i.$$

Если импеданс измеряемого объекта равен

$$Z_o = R_o + jX_o,$$

то действующее значение тока равно

$$I = \frac{V_o}{\sqrt{(R_o + R_i)^2 + (X_o + X_i)^2}}.$$

Подставляя это значение в формулу мощности, получим

$$P = \frac{V_o^2 R_i}{\sqrt{(R_o + R_i)^2 + (X_o + X_i)^2}}.$$

Эта мощность будет максимальна для объекта с заданными V_o и Z_o , когда

$$R_i = R_o.$$

$$X_i = -X_o.$$

Эта система носит название *условия резонанса*. Данный объект измерения с обобщенным внутренним сопротивлением Z_o отдает наибольшую мощность, если входной импеданс измерительной системы равен

$$Z_i = Z_o^*,$$

где Z_o^* — величина, комплексно сопряженная с Z_i . Отсюда максимальная мощность, которую объект измерения может отдать измерительной системе, равна

$$P_{\max} = \frac{V_o^2}{4R_o}.$$

В этом выражении V_o — действующее значение обобщенного напряжения холостого хода на выходе измеряемого объекта. Мощность, отдаваемую в случае полного энергетического согласования, называют *доступной мощностью*.

Для передачи высокочастотных измерительных сигналов по соединительным линиям от объекта измерения к измерительной системе осуществляется согласование с характеристическим импедансом сигнальной линии или согласование по отсутствию отражения. Характеристический импеданс кабеля равен входному сопротивлению кабеля бесконечной длины. Схема такой системы показана на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Энергетическое согласование передачи измерительных сигналов по соединительным линиям

Обозначим характеристический импеданс кабеля Z_c . Тогда согласование с характеристическим импедансом достигается при соотношении

$$Z_i = Z_c = Z_o.$$

Если это условие удовлетворяется, то отражений от концов кабеля нет.

В каждой физической системе, в которой происходит рассеяние энергии при преобразовании энергии в тепло, имеются небольшие случайно флуктуирующие сигналы. Эти сигналы называют *шумом* по аналогии с шипящим звуком, который производят эти сигналы при их прослушивании. Работа любой физической системы при температуре

выше абсолютного нуля подвержена действию шума. Этот тепловой шум вызывается тепловыми колебаниями носителей заряда в проводниках и броуновским движением таких частиц, как атомы и молекулы. В связи с этим при каждом измерении к измеряемому сигналу добавляется шум. Поскольку сигнал извлекается из физической системы, в ней самой уже содержится шум. Целью *согласования по шуму* является достижение таких условий, когда измерительная система добавляет к измеряемой величине возможно меньше шума.

Коэффициент шума, определяющий уровень шума, можно записать как

$$F = 1 + \frac{V_n + I_n^2 R_o^2}{I_o^2},$$

где V_n — спектральная плотность шумового напряжения, а I_n — спектральная плотность шумового тока. Эти значения могут быть измерены во всей полосе частот системы.

Минимальное значение F равно 1 и достигается в том случае, когда система не вносит никакого шума, а V_n и I_n оказываются равными нулю. К сожалению, таких систем не существует. Поэтому необходимо осуществить согласование измерительной системы и объекта измерения так, чтобы коэффициент шума имел как можно более близкое к единице значение. Из этого следует, что необходимо величину $\frac{V_n + I_n^2 R_o^2}{V_o^2}$ сделать

как можно меньшей при заданном V_o .

Один из способов, позволяющих это сделать, состоит в том, чтобы обеспечить большой коэффициент усиления первого каскада измерительной системы, и тогда шум следующих каскадов окажется пренебрежимо малым.

Другой часто используемый способ заключается в правильном выборе для усиления во входной цепи малошумящих приборов и в установке оптимального режима работы этих приборов по постоянному току. Когда исчерпаны все возможности за счет усовершенствования входной цепи измерительной системы, для дальнейшего уменьшения величины F можно воспользоваться следующим методом. Между измеряемым объектом и системой включают трансформатор. Первичная обмотка трансформатора с отношением числа витков $1 : n$ становится новым входом системы. Сам трансформатор не является источником сколько-нибудь заметного шума, так как в нем фактически нет потерь. Новое среднеквадратическое значение шумового напряжения на входе станет равным V_n/n . Наименьшее значение коэффициента шума F , которого можно достичь, изменяя n , наступает при условии

$$\frac{V_n}{I_n} = n^2 R_o.$$

Когда трансформатор экранирован, на нем также не наводятся никакие помехи извне.

3.4. Физические основы измерения времени

Сегодня одной из основных физических величин является время. Время наряду с пространством составляет сущность нашего мира и является одним из важнейших объектов познания. Природа снабдила человека специальным механизмом для интуитивной оценки времени — *биологическими часами*. Несовершенство этих естественных часов заставило человека придумывать и создавать искусственные устройства, более эффективно выполняющие функции измерения времени. Человек жил без часов, пока египтяне примерно 5000 лет до н.э. не начали впервые учитывать время. В результате наблюдения за звездами были определены единицы времени. Первыми измерителями времени считаются пирамиды Хеопса. Они были расположены в соответствии со сторонами света и по ним можно было отслеживать изменение положения звезд по месяцам и годам.

Уже древние астрономы обладали большими знаниями в области движения звезд и умели использовать эти знания для измерения времени с помощью специальных астрономических приборов, называвшихся в то время *звездными часами*. Одним из самых древних приборов для наблюдения за движением звезд была *астролябия*, впервые описанная греческим астрономом и математиком Птолемеем. В своем описании он говорит о двух кольцах, представляющих эклиптику и экватор, и об еще одном кольце с вращающейся световой осью.

Астролябия относилась к весьма распространенным астрономическим приборам, которыми пользовались на суше и при плавании по морям. В средневековые бронзовые астролябии, имевшие основание в виде круглой плиты, разделенной на 360° , обычно вкладывались пакеты с астрономическими таблицами или картами земной поверхности, составленными для различных географических широт. Астролябию дополняла звездная карта со знаками зодиака. Астролябией измерялось положение Солнца, его высота над горизонтом, определялись направление восток — запад, длительность дня и ночи. Подобные данные можно было получить путем наблюдения за движением Луны или звезд. По замеренному с помощью астролябии положению звезды можно определить время, если точно известно положение места измерений. Открытие такого способа определения времени путем измерения высот звезд приписывается греку Гиппарху, жившему во II в. до н.э. От греков этот метод переняли арабы, которые своими астролябиями измеряли время с погрешностью до 1 минуты. Измерение времени методом определения высот звезд применялось до середины XVII в. многими астрономами. С помощью этих приборов достигалась точность измерения времени до нескольких секунд.

Исторические сведения о первых *солнечных часах*, как у римлян, так и у греков, датируются одним и тем же периодом времени. Они основаны на кажущемся суточном, а иногда и годовом движении Солнца. Появление этих часов связано с моментом, когда человек осознал взаимосвязь между длиной и положением солнечной тени от тех или иных предметов и положением Солнца на небе. Некоторые исторические источники считают самым первым упоминанием о солнечных часах является сообщение о них в китайской рукописи периода около 1100 г. до н.э., в которой указывается, что с помощью солнечных часов была установлена летняя и зимняя высота Солнца.

Гномон — вертикальный обелиск со шкалой, нанесенной на земле, был первыми солнечными часами, измерявшими время по длине отбрасываемой тени. Первые обелиски, предназначавшиеся в Египте для измерения времени, были построены, по всей вероятности, уже в XIV в. до н.э. Известны также ступенчатые часы в виде обелиска с двумя наклонными поверхностями, ориентированными по оси восток — запад и разделенными на ступени. При восходе Солнца тень падала на край верхней ступеньки восточной поверхности, а затем постепенно опускалась, пока к полудню полностью не исчезала. Затем, после полудня, тень снова появлялась в нижней части западной поверхности, откуда она поднималась до тех пор, пока при заходе Солнца не касалась грани верхней ступеньки. Египетские гномоны были весьма неточными хронометрическими приборами. Они показывали время правильно лишь дважды в год — в дни весеннего и осеннего равноденствия. Позднее под влиянием греков египтяне стали строить солнечные часы с особыми шкалами для разных месяцев. Острый конец гномона, служивший первоначально египтянам для четкого ограничения тени на шкале, греки позднее заменили небольшим круглым отверстием, так называемым солнечным оком, бросавшим на шкалу небольшую световую точку. Кроме указанных выше горизонтальных часов, греки имели еще и более совершенные вертикальные солнечные часы, так называемые *гемоциклы*, которые они располагали на общественных зданиях.

Кроме вавилонян, египтян и греков изучением движения Солнца занимались и другие народы, например индусы и перуанские инки. Астрономические солнечные часы инков имели различные формы. Некоторые из них были похожи на наклонно установленные каменные диски, а другие — на низкую многогранную каменную колонну. На территории Великобритании до сих пор сохранилось более 200 подобных объектов. Как правило, это круговое скопление камней с расположенным посередине алтарем. Положение этих солнечных часов позволяет помимо определения времени суток узнать и время летнего и зимнего солнцестояния.

В Риме существовали горизонтальные полые полусферические часы — *гемисферы*. Внутренняя поверхность полушария представляла небесную полусферу с линией экватора, двумя линиями солнцестояния и с двенадцатичасовой шкалой времени.

Около 24 г. до н.э. появилось упоминание о дорожных солнечных часах. Правдивость этого сообщения подтвердили раскопки, при которых были обнаружены такие часы в виде бронзовой пластинки диаметром 47 мм с пятимиллиметровым ободом и двумя отверстиями: одним — для подвески, а вторым — для прохождения солнечного луча. Одним из вариантов дорожных солнечных часов являются кольцевые солнечные часы. Главной частью таких часов было латунное кольцо диаметром в несколько сантиметров с другим передвижным кольцом, снабженным отверстием для солнечного луча. На внешней поверхности главного кольца обычно гравировали начальные буквы наименований месяцев, а против них, на внутренней поверхности, находилась часовая шкала. Перед измерением надо было повернуть меньшее, обычно железное, кольцо так, чтобы отверстие для луча лежало у наименования соответствующего месяца. При измерении времени часы держали в положении, позволяющем солнечному лучу проходить через отверстие в шкале. Первое описание часов подобного рода содержится в книге, изданной в Париже в 1500 г. На подобном принципе строились и так называемые экваториальные кольца — аналогичные часы, на главном кольце которых имелись еще два пересекающихся друг с другом круга. Позднее возник новый вариант с поперечиной вместо третьего кольца (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Экваториальные кольцевые солнечные часы

На одной стороне этой поперечины были указаны месяцы, а на другой — знаки зодиака. Посередине имелась перемычка с малым отверстием для прохождения солнечного луча. Правильное положение этих часов при измерении времени было таким, когда солнечный луч, проходящий через отверстие, попадал на центральную линию экваториального круга.

Иногда к этим часам добавляли лунные часы, которые указывали изменения положения Луны. Главной частью лунных часов была поворотная пересчетная шкала, называвшаяся *вольвелой*, которая служила в качестве переводной таблицы для определения среднего солнечного времени.

В 1482 г. во Флоренции был построен гномон высотой 84,5 м, с помощью которого удавалось измерять с секундной точностью местный полдень. С помощью этого гномона удалось уточнить данные астрономических таблиц.

Прогресс, которым ознаменовалась наука в эпоху Возрождения, отразился и на конструкциях солнечных часов. Сравнительно быстро, примерно за 130 лет, прежние несовершенные хронометрические приборы превратились в весьма точные для своего времени приборы, которыми можно было измерять время в любом месте земного шара. Сочетание солнечных часов с компасом привело к тому, что солнечные часы стало возможным использовать повсеместно и появились их портативные, карманные или дорожные модели.

Известны также *аналемматические солнечные часы* (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Аналемматические солнечные часы

Их стрелка направлена перпендикулярно плоскости часовой шкалы, но эта шкала лежит не в плоскости, параллельной экватору, а в горизонтальной плоскости, например, непосредственно на земле. Описание этих часов появилось в астрономических трудах XVI в.

Рефракционные солнечные часы имеют чашу с часовой шкалой и теневую стрелку. Их работа основана на том явлении, что световой луч, падающий наклонно на плоскость раздела двух различных сред, преломляется. Перед измерением надо чашу наполнить до определенной высоты водой. Теневой луч стрелки преломляется на линии разграничения воздуха и воды, и лишь этот преломленный луч указывает на погруженной в воду временной шкале данное время. Рефракционные часы имели формы кубков и различных сосудов.

Солнечные часы с передвижным по высоте «полюсом», компасом и шкалами с минутным делением были простым и надежным указателем солнечного времени, но страдали и некоторыми серьезными недостатками. Их работа была связана с солнечной погодой и с ограниченным периодом работы — между восходом и заходом Солнца. Нет сомнений, что это было одной из причин того, что уже древние культурные народы стали изыскивать иные пути измерения времени, не связанные с наблюдением небесных тел. Подобно солнечным часам, и эта группа простейших часов прошла долгий путь развития, сопровождавшийся возникновением интересных принципов действия и конструктивных элементов. Некоторые из них, например зубчатые передачи, ролики, цепные подвески и гири, нашли применение в последующей эре механических часов.

Простейшими *водяными часами* были китайские и индийские часы этого рода. Они имели форму полусферической чаши с небольшим отверстием в дне, через которое медленно вытекала вода. Эти водяные часы, способные измерять продолжительность интервалов времени между моментом помещения чаши на водную поверхность и ее погружением в воду, были, собственно говоря, аналогией одного типа песочных часов, о которых мы упомянем ниже. В Индии водяные часы были известны по меньшей мере за 300 лет до н.э. Первыми, кто пользовался водяными часами, были египтяне, и у них сохранились, по всей вероятности, самые старые водяные часы в мире. Это были часы, относящиеся к периоду 1400 г. до н.э. Колонна со шкалой, приводимая водяным колесом, вращаясь вокруг своей оси, совершала один оборот в год. Поэтому и камеры водяного колеса в нижней части часов заполнялись водой медленно, причем вода подавалась в небольшом количестве по особому трубопроводу. Статуэтка со стрелкой двигалась с помощью специального поплавкового механизма, управляемого другой статуэткой, находящейся на другой стороне часов. Слезы в виде водяные капли, капающие из глаз статуэтки, накапливались в сборники-подставки, откуда через трубопровод текли в поплавковую камеру стрелочного механизма. Кроме того, эти часы имели еще специальное устройство, которое через определенные интервалы выбрасывало на чашку мелкие камешки для звуковой сигнализации ночью.

Старую традицию водяные часы имели также в Китае. Верхом их совершенства был проект больших пагодных астрономических водяных часов, разработанный в 1090 г. (рис. 3.9).

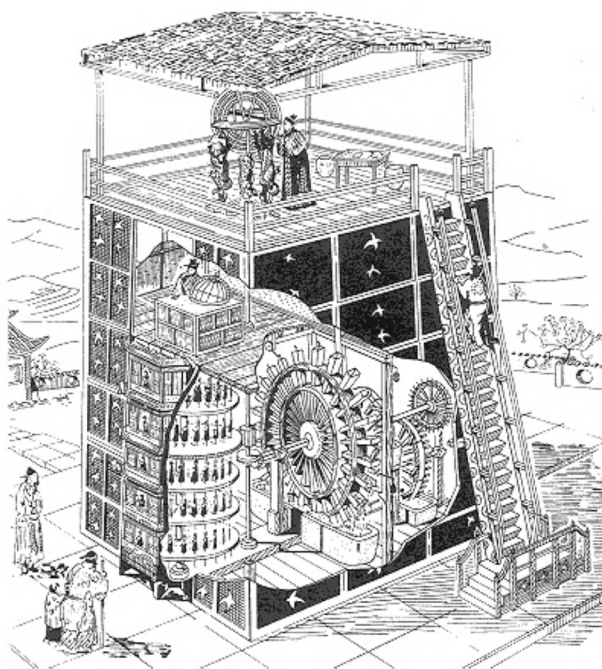


Рис. 3.9. Китайские водяные часы

Эти часы имели сигнальное устройство времени. Астрономическая часть часов имела форму небесного глобуса. Особенностью этих часов

является большое водяное колесо с замкнутым кругооборотом воды, приводящее в движение часы в целом и являющееся некоторой аналогией механического спуска, появившегося позднее в Европе у первых механических часов.

С начала XIII в. появились первые *огневые часы*, к которым относятся *свечные часы*. Они выполнялись в виде длинной тонкой свечи с нанесенной по ее длине шкалой, сравнительно неплохо показывали время, а в ночные часы еще и освещали жилища. Свечи, применявшиеся для этой цели, были длиной около метра. Отсюда происходит и обычай измерять длину ночи количеством сгоревших за ночь свечей. Обычно за ночь выгорали три такие свечи, а зимой — больше. К боковым сторонам свечи иногда прикрепляли металлические штырьки, которые по мере выгорания и таяния воска падали, и их удар по металлической чашке подсвечника был своего рода звуковой сигнализацией времени.

В течение целых столетий растительное масло служило людям не только для питания, но и в качестве светильного материала. На основе установленной экспериментально зависимости высоты уровня масла от продолжительности горения фитиля возникли *масляные часы*. Как правило, это бывали лампы с открытой фитильной горелкой и со стеклянной колбой для масла, снабженной часовой шкалой. Объем колбы подбирали так, чтобы ее содержимого хватило для непрерывного свечения с вечера до утра. Толщиной и длиной горящего фитиля регулировали величину пламени и расход масла так, чтобы понижение уровня масла в колбе соответствовало имевшимся обозначениям времени. Позднее выяснилось, что первоначальные цилиндрические или слегка выпуклые стеклянные сосудики под масло были источником некоторой погрешности в измерении времени. Дело в том, что при более высоком уровне масла его давление вызывало более быстрое выгорание, чем в поздние ночные часы. Поэтому лампадные часы более позднего происхождения имели стеклянную колбу в виде расширенной сверху груши, чтобы таким образом хотя бы частично выравнивать скорость сгорания масла.

Главной частью *фитильных часов* был фитиль в виде длинной металлической палочки, покрытой слоем дегтя с деревянными опилками. Жар тлеющих опилок, подожженных на одном конце палочки, постепенно пережигал тонкие, поперечно натянутые волокна, с подвешенными шариками, которые падали в металлическую чашку. Иногда фитиль сворачивали в спираль, форма которой уже сама по себе заменяла часовую шкалу. Наиболее типичные для Китая фитильные часы имели форму дракона, в хребте которого был специальный держатель для палочки. Скорость сгорания фитиля зависела от многих обстоятельств, поэтому такие часы никогда не относились к приборам, которые по точности можно было бы сравнить с солнечными или водяными часами.

Дата возникновения первых *песочных часов* неизвестна. Однако по сохранившимся данным можно полагать, что принцип песочных

часов был известен в Азии значительно раньше начала нашего летоисчисления. Западноевропейские страны стали иметь дело с песочными часами, по-видимому, лишь в конце средневековья. Одним из самых старых упоминаний о таких часах является сообщение от 1339 г., обнаруженное в Париже, содержащее указание по приготовлению тонкого песка из просеянного порошка черного мрамора, прокипяченного в вине и высушенного на солнце. Недостатком, мешавшим широкому применению этих часов, был сравнительно короткий интервал времени, который можно было измерить, не переворачивая эти часы. Обычно песочные часы рассчитывались на работу в течение получаса или часа. Реже встречались песочные часы, рассчитанные на непрерывное измерение времени в течение 3 ч, и лишь в совершенно редких случаях строили огромные песочные часы, рассчитанные на 12 ч хода.

Точность песочных часов зависела также от формы колб, от гладкости их внутренних стенок, от равномерности прохождения песка через регулируемую диафрагму в горлышке, но прежде всего — от равномерной зернистости и сыпучести данного песка (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Песочные часы

Свинцовый песок отличался также тем, что при долгом использовании он меньше, чем другие виды песка, нарушал гладкость внутренних стенок стеклянной колбы. Как и огневые часы, песочные часы никогда не достигали точности солнечных часов. Кроме того, при длительном пользовании такими часами их точность изменялась, поскольку зерна песка постепенно дробились на более тонкие, а отверстие в середине диафрагмы постепенно истиралось и увеличивалось, так что скорость прохождения песка через них становилась большей.

Самым старым документом о *механических часах*, содержащим описание и чертеж, является сообщение об *астрарии* — астрономических часах, которые в 1364 г. разработал профессор астрономии и медицины Джованни де Донди в Падуе. Любой часовой механизм можно разделить на четыре основные функциональные группы: приводной и передаточный механизм, спусковой механизм, осциллятор и индикаторная часть. Источник энергии привода у механических часов обычно бывает встроен в сам механизм часов и является его составной частью, например барабаны с гирями или же пружинный механизм с пружиной. Тре-

буемое количество энергии отмеривается в механических часах специальным устройством, так называемым спусковым механизмом или спуском, являющимся соединительным элементом между механизмом часов и осциллятором. Этот механизм постоянно соединен с передаточным механизмом часов, от которого он получает энергию привода. С осциллятором, который в современных часах имеет форму маятника или баланса, спуск взаимодействует лишь в определенные моменты, выполняя свою основную задачу, весьма важную для обеспечения хода часов, — разделение постоянной энергии привода на отдельные силовые импульсы, поддерживающие колебания осциллятора. Другой задачей спускового механизма является суммирование колебаний осциллятора. Если предположить, что осциллятор колеблется с постоянной частотой, то спуск работает одновременно в качестве устройства, суммирующего постоянные интервалы времени — полупериоды этих колебаний. Постоянство частоты осциллятора является главной предпосылкой точности хода часов.

В течение столетий индикаторным механизмом был стрелочный индикатор с циферблатом, который имел классический вид неподвижного циферблата с одной, двумя или несколькими вращающимися стрелками, или же с неподвижной стрелкой и с одним или несколькими вращающимися цилиндрическими шаровидными или плоскими циферблатами. В последнее время снова стала преобладать цифровая индикация, ставшая известной уже в конце XIX в. и способствовавшая тогда усилению сбыта коммерческих часовых приборов. Механические часы имеют огромное количество конструктивных вариантов с различными формами осцилляторов — от простых маятников через сложные маятники и до современных самокомпенсирующихся балансов.

На начальной стадии развития *электрических часов* электроэнергия служила сначала лишь для завода механического ведущего устройства — груза или пружины. Пионером в конструировании первых электрических часов был Александр Бэйн из Эдинбурга. В 1840 г. он получил патент на электрические часы, главными деталями которых были, правда, еще механические часы, приводимые пружиной, но индикатор времени был решен на принципе суммирования электрических импульсов, подаваемых маятником часов. Лишь в 1847 г. Бэйн завершил свою работу над первыми действительно электрическими часами, главным механизмом которых был электрический контакт, управляемый движением часового маятника, приводимого в движение импульсами электромагнита. Железное ярмо на линзе маятника проходило через полости катушек соленоидов. Изменение полярности магнитного поля и попеременные притягивания и отталкивания ярма обеспечивали электрический контакт на маятнике. Количество колебаний регистрировал электромагнитный счетчик, связанный колесной передачей со стрелками на циферблате часов.

Главным источником нарушения стабильности частоты является старение кристалла кварца, синхронизирующего частоту осциллятора.

Быстрое развитие микроволновой спектроскопии после второй мировой войны открыло новые возможности в области точного измерения времени посредством частот, соответствующих подходящим спектральным линиям. Эти частоты, которые можно было считать эталонами частоты, привели к идее использовать квантовый генератор в качестве эталона времени.

В первые послевоенные годы удалось построить прибор, работающий на принципе управляемого поглощения микроволновой энергии в жидком аммиаке при весьма низких давлениях. Узкий пучок молекул, вpuщенный через сопло в вакуумное пространство, проходит через неоднородное электростатическое поле, в котором происходит разделение молекул. Молекулы в более высоком квантовом состоянии направлялись на настроенный резонатор, где они выделяют электромагнитную энергию с неизменной частотой 23 870 128 825 Гц. Эта частота затем сравнивается с частотой кварцевого осциллятора, входящего в схему *атомных часов*. На этом принципе был построен первый квантовый генератор — *аммиачный мазер* (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Ученые Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Таунс получили в 1964 г. за эти работы Нобелевскую премию по физике.

Атомные часы, а также *молекулярные часы* и *квантовые часы* являются приборами измерения времени, в которых в качестве постоянного периодического процесса используются собственные колебания атомов или молекул. Периоды этих колебаний при помощи электронных схем сравниваются с измеряемым промежутком времени.

С 1967 г. международная система единиц СИ определяет одну секунду как 9 192 631 770 периодов электромагнитного излучения, возникающего при переходе между двумя уровнями основного состояния атома изотопа цезия-133. Согласно этому определению атом цезия является стандартом для измерений времени и частоты. Точность определения секунды задает точность определения других основных единиц, таких как, например, вольт или метр, содержащих секунду в своем определении.

Точность атомных часов (рис. 3.11) достигает одной секунды в три миллиона лет.

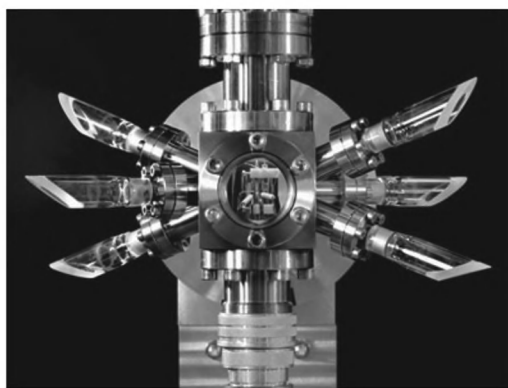


Рис. 3.11. Атомные часы

В настоящее время атомные стандарты частоты и времени используются в основном для измерения времени и для калибровки и контроля основных стандартов частоты. В обоих случаях сравнивают частоту генератора кварцевых часов с частотой атомного стандарта. При измерении времени частота атомного стандарта и частота генератора кристаллических часов регулярно сравниваются. По выявленным отклонениям определяют линейную интерполяцию и среднюю поправку времени. Истинное время получается тогда из суммы показаний кварцевых часов и средней поправки времени.

Астрономические измерения, изучение движения планет в космосе и различные радиоастрономические исследования не обходятся теперь без знания точного времени. Точность, которая в таких случаях требуется от кварцевых или атомных часов, колеблется в пределах миллионных долей секунды.

Исследователи из американского Национального института стандартов и технологий недавно разработали новый вид часов — *ртутные часы*. Они основаны на переходах между энергетическими уровнями иона ртути, удерживаемого в электромагнитной ловушке. При переходах генерируются кванты видимого диапазона спектра, которые позволяют измерять время точнее, чем микроволновое излучение цезия-133. Расчеты показывают, что ртутные часы могут отстать или убежать на 1 с за 400 миллионов лет.

Сегодня измерение времени является самым массовым измерением. Ежедневно на земном шаре производится несколько десятков миллиардов таких измерений. Кроме того, измерение времени является в наши дни и самым точным видом измерений. Даже обычные бытовые часы с погрешностью 20 с в сутки и погрешностью 0,02% сравнимы по точности с образцовыми измерительными приборами в других видах измерений, например в автоматических системах.

Роль часов в истории автоматики и автоматического управления носит основополагающий характер. Сам термин «автомат», заимствованный из греческого языка и означающий дословно «самодвижущееся устройство», был введен впервые в XVIII в. для обозначения движущихся механических игрушек, управляемых по определенной временной программе часовым механизмом. Так, еще в середине прошлого века в энциклопедическом словаре автоматами назывались машины, которые подражают произвольным движениям и действиям одушевленных существ. В частности, называют *андроидом* машину, производящую движения, похожие на человеческие. Слово «андроид» возникло от имени популярных швейцарских часовщиков того времени Пьера-Жака Дро и его сына Анри, прославившихся изготовлением наиболее сложных и эффективных автоматических часовых игрушек такого рода.

В своей совокупности обычные и управляющие часы, измерительные и управляющие приборы времени автоматически или с помощью людей обеспечивают совместную синхронную работу сотен тысяч различных производств, средств транспорта, систем связи и энергоснабже-

ния, обеспечивая согласованную по времени работу народного хозяйства.

3.5. Государственная система приборов и средств автоматизации

Разнообразие технологических процессов различных отраслей промышленного производства обусловило необходимость получения информации о большом числе технологических параметров. Проведенные исследования по оценке размеров области такой информации позволили создать кадастр величин, подлежащих измерению.

Кадастром называется систематизированный свод сведений, составляемый периодически или путем непрерывных наблюдений над соответствующими объектами. Он объединяет физические величины, которые определяют состояние технологических объектов управления различных отраслей. К ним относятся величины пространства и времени, механические, электрические и магнитные, акустические, световые, а также относительные. Кадастр содержит свыше 2000 измеряемых величин, охватывающих отрасли разработки сырьевых ресурсов, энергетику, производство промышленной, сельскохозяйственной и других видов продукции и товаров.

При огромном многообразии измеряемых технологических параметров нельзя рассчитывать на успешную разработку средств измерений в различных отраслях и организациях без их систематизации и унификации. Рациональное сокращение номенклатуры технических средств автоматизации и их конструктивных элементов и узлов достигается на основе последовательного применения агрегатных способов построения снизу доверху, начиная от конструирования простейших функциональных блоков и кончая проектированием сложных автоматизированных систем управления.

Научные основы конструирования системы приборов, базирующиеся на агрегатном или модульном принципе построения, впервые были определены в 50-х годах прошлого века. Тогда же была сформулирована проблема создания единой *Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации* (ГСП), представляющей рационально организованную совокупность приборов и устройств, удовлетворяющих принципам агрегатирования и предназначенных для построения автоматизированных систем измерения, контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

В 1960-е гг. были разработаны научные основы построения ГСП структуры, принципы совместимости приборов и устройств. В это же время были обоснованы и определены значения унифицированных пневматических и электрических аналоговых сигналов связи. Позднее был разработан комплекс стандартов ГСП, в том числе ГОСТ «ГСП. Общие технические требования», закрепивший законодательно структуру и основные принципы построения ГСП.

Модуль обычно определяется как унифицированный или нормализованный узел, который характеризуется структурной, функциональной и конструктивной самостоятельностью и который может стыковаться с другими узлами (модулями) того же комплекта. Функциональная самостоятельность модуля означает, что он самостоятельно выполняет какую-либо задачу, например, задает движение по одной степени подвижности или служит опорой для других модулей. Конструктивная самостоятельность модуля означает, что он может быть изготовлен и собран отдельно и затем собран с другими модулями. Распространено такое простое объяснение: модули — это кубики, из которых можно собирать различные конструкции.

Соединение модулей дает *агрегат*. В государственном стандарте (ГОСТ 23887—79) агрегат определяется как сборочная единица, обладающая полной взаимозаменяемостью, возможностью сборки отдельно от других составных частей изделия и способностью выполнять определенную функцию в изделии или самостоятельно. Определение агрегата имеет много общего с определением модуля. Для нас важно, что агрегат представляет собой более крупную единицу, чем составляющие его модули.

Агрегативно-модульная система может быть многоуровневой. Это означает, что агрегаты можно рассматривать как модули более высокого уровня, более крупные кубики, из которых можно собирать еще более крупные единицы, агрегаты более высокого уровня. По отношению к агрегату на любом уровне его составные части следует рассматривать как модули. Изделие в целом находится на высшем уровне, оно представляет собой агрегат первого уровня. Его составные части по отношению к нему являются модулями первого уровня; но они же представляют собой агрегаты второго уровня по отношению к своим составным частям, модулям второго уровня. Это продолжается далее, до тех пор пока на низшем уровне не окажутся простые элементы. Число уровней зависит от сложности изделий. Иногда число уровней достигает семи.

Модульное оборудование проектируется и выпускается комплектами или наборами. Различным соединением разных или одинаковых модулей получают модификации оборудования. Конечно, не все сочетания модулей имеют смысл и вообще возможны. Число возможных модификаций и практически полезных модификаций модульного оборудования является важным показателем: чем больше модификаций, тем больше приспособляемость оборудования к различным условиям. В зависимости от класса изделий и числа модулей число модификаций может меняться от трех-четырех до многих десятков или даже сотен.

В основу построения и развития ГСП положены следующие системотехнические принципы:

- возможность сведения многообразия функций автоматического контроля, регулирования и управления к ограниченному числу типовых функций;

- минимизация номенклатуры технических средств с учетом максимального удовлетворения потребности народного хозяйства на основе создания агрегатных комплексов технических устройств и параметрических рядов приборов;
- построение приборов и устройств на основе типовых унифицированных блоков и модулей;
- агрегатное построение сложных систем управления на основе типовых унифицированных приборов и устройств;
- совместимость приборов и устройств ГСП при работе за счет унификации сигналов связи, используемых для обмена между изделиями ГСП.

Различают пять видов совместимости изделий агрегатных комплексов: энергетическую, метрологическую, конструктивную, эксплуатационную и информационную.

Энергетическая совместимость: предполагает выбор одного рода энергии носителя сигналов в измерительных устройствах. Для этой цели в ГСП предусмотрено три вида энергии: электрическая, пневматическая и гидравлическая. Последние обычно применяются в особых условиях эксплуатации ИИС, например во взрывоопасных помещениях.

Метрологическая совместимость обеспечивает сопоставимость метрологических характеристик агрегатных средств, их сохранность во времени и под действием влияющих величин, а также возможность расчетного определения метрологических характеристик всего измерительного тракта ИИС по метрологическим характеристикам отдельных функциональных узлов, образующих измерительный тракт. При этом метрологические характеристики агрегатных средств нормируются по единому методу, а параметры входных и выходных цепей согласуются, чтобы сопряжение агрегатных средств не сопровождалось дополнительными погрешностями.

Эксплуатационная совместимость достигается согласованностью характеристик, определяющих действие внешних факторов на агрегатные средства в рабочих условиях, а также характеристик надежности и стабильности функционирования. Для этого все средства делятся на группы по использованию в зависимости от условий окружающей среды, климатических и механических воздействий. Эксплуатационная совместимость создает возможность компоновки системы с заданными значениями параметров надежности и рабочими условиями эксплуатации.

Конструктивная совместимость обеспечивает согласование конструктивных параметров, эстетических требований, а также механическое сопряжение средств. Конструктивная совместимость изделий предусматривает, прежде всего, унификацию присоединительных размеров отдельных деталей и модулей, введение типовых узлов, создание единой элементной базы, разработку общих принципов конструирования приборов. При конструировании устройств ГСП принят блочно-

модульный принцип построения изделий. Применение этого принципа делает приборы более универсальными, позволяет использовать при их создании рациональный минимум конструктивных элементов, так как сокращается количество наименований деталей. Вместе с тем возможность простой и легкой замены отдельных узлов позволяет модернизировать эти приборы в процессе эксплуатации, повышает их ремонтнопригодность и расширяет круг решаемых ими задач путем различных сочетаний функциональных звеньев и введением специализированных деталей. Блочно-модульное построение приборов позволяет широко применять при их изготовлении современную технологию и максимально использовать кооперацию и специализацию предприятий.

Разработан комплекс унифицированных типовых конструкций (УТК), обеспечивающий нормализацию габаритных и присоединительных размеров и введение типовых конструкций. С учетом особенностей приборов различного функционального назначения УТК подразделяются на две части: общепромышленную и приборную.

Общепромышленная часть УТК служит для компоновки аппаратуры промышленной автоматики, технологических устройств, периферийных (для связи с объектом) средств управляющей вычислительной техники и других изделий ГСП, используемых в автоматизированных системах управления.

Приборная часть УТК предназначена для электроизмерительных и аналитических приборов, управляющей и вычислительной техники, испытательных установок и прочей аппаратуры.

При разработке обеих частей комплекса проектировщики руководствуются следующими принципами:

- максимальный учет основных положений ГСП: унификация, агрегатирование, совместимость;
- в номенклатуру УТК включается минимальное количество изделий (их типоразмеров и исполнений), необходимых для решения всех задач, соответствующих назначению комплекса;
- учитываются функциональное назначение каждого изделия, условия его эксплуатации и хранения, взаимосвязь с устройствами других функциональных групп в автоматизированных системах управления;
- предусматривается совместимость УТК с уже существующими изделиями.

Кроме того, учитывается необходимость большой динамичности разрабатываемого комплекса, обеспечивающей постоянное распространение области использования УТК на новые группы приборов.

Одновременно соблюдается требование относительной устойчивости УТК, чтобы внедрение новых изделий не вызвало принципиальных изменений в других частях комплекса и, главное, не нарушало конструктивной совместимости изделий.

Условно типовые конструкции разделяют на категории нулевого, первого, второго и третьего порядков. Отношения, установленные между различными категориями, отражают современные принципы

агрегатирования. Так, составные части изделий, выполненные на базе типовых конструкций низшего порядка, могут последовательно устанавливаться в любую из типовых конструкций более высокого порядка, образуя в конечном итоге конструктивно законченные приборы и устройства. Такая взаимозаменяемость обеспечивается согласованием размеров конструкций разного порядка.

Изделия УТК нулевого и первого порядков предназначены для построения унифицированных элементов (субблоков). Из элементов первого и второго порядков собираются функциональные блоки, из которых в свою очередь комплектуются изделия третьего порядка.

Информационная совместимость средств обеспечивает согласование входных и выходных сигналов по виду, диапазону изменения и порядку обмена сигналами. Информационная совместимость определяется унификацией измерительных сигналов и применением стандартных интерфейсов. Унификация измерительных сигналов означает, что их параметры не могут выбираться произвольно, а должны отвечать требованиям стандарта на эти сигналы. В табл. 3.1 приведены основные виды унифицированных аналоговых сигналов ГСП.

Изделия ГСП можно разделить на пять групп: средства получения информации, средства воздействия на процесс, средства локального контроля и регулирования, средства централизованного контроля и регулирования, вычислительные средства автоматизации управления.

Таблица 3.1

Основные виды унифицированных аналоговых сигналов ГСП

Сигнал		Величина	
1	Электрический на постоянном токе	0...5 мА, 0...20 мА, –5...0...5 мА	
2	Электрический на постоянном напряжении	0...10 мВ 0...20 мВ –10...0...10мВ	0...10В 0...1 В –1...0...1 В
3	Электрический на переменном напряжении	0...10В 0...1 В –1...0...1 В	
4	Электрические сигналы переменного тока на частоте	4...8 кГц 2...4 кГц	
5	Пневматический	20...100 кПа (или 0,2...1,0 кгс/см ²)	
6	Гидравлический	0,1—6,4 МПа	

Средства получения информации и средства воздействия на процесс предназначены для непосредственного взаимодействия с объектом управления — установками, агрегатами, технологическими процес-

сами, цехами, производствами. Они обеспечивают информацией все вышеразположенные в иерархической структуре средства и осуществляют передачу управляющих воздействий на управляемый объект.

Средства локального контроля и регулирования предназначены для построения одноконтурных систем контроля и регулирования простых объектов, а также систем автономного контроля и регулирования отдельных параметров сложных объектов. Эти средства, как правило, выпускаются в составе параметрических рядов, создаваемых на основе базовых моделей.

Средства централизованного контроля и регулирования предназначены в основном для построения технического обеспечения систем автоматизации объектов, имеющих несколько сотен контролируемых и регулируемых параметров.

Вычислительные средства автоматизации управления предназначены для построения управляющих вычислительных комплексов, позволяющих реализовать сложные алгоритмы управления объектом.

Использование конструктивно-технологического признака позволяет построить структурную схему ГСП, состоящую из взаимосвязанных классификационных группировок: типов изделий, типоразмеров изделий, модификаций или исполнений изделий, унифицированных и агрегатных комплексов.

Основной классификационной группировкой изделий ГСП является тип изделия. Понятие «тип изделия» определяет классификационную группировку, включающую совокупность изделий одинакового функционального назначения и принципа действия, сходных по конструктивному исполнению и имеющих одинаковую номенклатуру главных параметров, определяющих основное функциональное назначение изделия. Например, для средств получения информации главными параметрами являются вид измеряемой физической величины и вид выходного сигнала.

В состав типа могут входить несколько типоразмеров, которые имеют определенные числовые значения главного параметра, или модификаций изделий, имеющих определенные конструктивные особенности или определенное значение неглавного параметра. Совокупность типоразмеров, включающая типоразмеры изделий со всеми расположенными в определенном порядке числовыми значениями главного параметра данного типа, образует типоразмерный ряд по этому параметру.

Наряду с понятием модификации применяют понятие *исполнение*, которое определяет совокупность изделий одного типа, обладающих конструктивными особенностями, влияющими на их эксплуатационные характеристики.

Понятие *унифицированного комплекса* определяет объединение в комплекс изделий нескольких типов, которые предназначены для измерения разных величин или выполнения различных функций. Изделия унифицированного комплекса должны быть одного принципа действия и иметь унифицированные конструктивные элементы. Отли-

чительной особенностью изделий унифицированного комплекса является то, что соединение технических средств комплекса между собой в любых сочетаниях не приводит к реализации новых функций этими средствами.

Технические средства ГСП классифицируют по следующим признакам: выполняемым функциям, виду энергии носителя сигналов в канале связи, метрологическим свойствам и защищенности от воздействия окружающей среды.

Номенклатура средств ГСП насчитывает несколько тысяч типов изделий и имеет тенденцию дальнейшего роста за счет создания средств, удовлетворяющих решению непрерывно усложняющихся задач управления объектами, в том числе из-за включения в круг измеряемых величин показателей состава физико-химических свойств сырья, промежуточных и конечных продуктов промышленного производства. В связи с этим актуальной является задача рациональной минимизации номенклатуры средств ГСП.

Контрольные вопросы

1. Что называется чувствительностью измерительного прибора?
2. Как обозначается класс точности приборов?
3. Что является целью энергетического согласования объекта измерения и измерительной системы?
4. Какова точность атомных часов?
5. Как достигается эксплуатационная совместимость модулей измерительных систем?

4

ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ

4.1. Измерение скорости и длины пути движения автомобиля

Измерение скорости движения автомобиля производится *спидометрами*. Принцип работы спидометра показан на рис. 4.1.

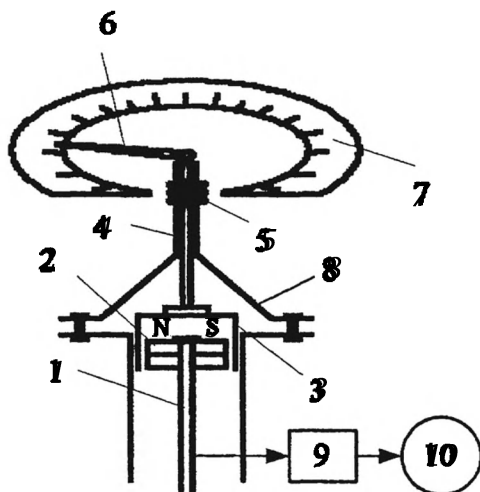


Рис. 4.1. Схема работы спидометра:

1 — входной валик; 2 — магнит; 3 — катушка; 4 — ось; 5 — спиральная пружина; 6 — стрелка; 7 — шкала спидометра; 8 — экран; 9 — червячная передача; 10 — счетный узел

Входной валик соединен с постоянным магнитом. Магнит с некоторым зазором охватывает металлический элемент, который называется катушкой. Катушка находится на оси спидометра, с другой стороны которой закреплена стрелка. Снаружи катушка закрыта экраном из магнитомягкого материала, который концентрирует магнитное поле магнита в зоне катушки. Со стороны стрелки к оси прикреплена спиральная пружина.

При движении автомобиля от гибкого вала приводится во вращение входной валик с магнитом. При этом магнитный поток наводит в катушке вихревые токи, которые вызывают образование магнитного поля катушки. Магнитные поля магнита и катушки взаимодействуют между собой таким образом, что на катушку действует крутящий момент,

направление которого противоположно моменту, создаваемому пружиной. В результате картушка вместе с осью и стрелкой повернется на угол, при котором момент сил упругости пружины равен крутящему моменту магнитных сил, действующему на картушку. Крутящий момент картушки пропорционален скорости вращения магнита, и следовательно, скорости движения автомобиля. Угол поворота картушки и стрелки с увеличением скорости движения автомобиля возрастает.

Спидометры с электроприводом имеют аналогичные спидометрам с механическим приводом магнитоиндукционный и счетный узлы. Электропривод спидометра состоит из датчика, который устанавливается на коробке передач электродвигателя, вращающего приводной вал магнитоиндукционного узла указателя и устройства электронного управления электродвигателем. Целью работы электропривода является дистанционная передача вращения ротора датчика во вращение ротора указателя с помощью электромагнитных взаимодействий.

Ротор датчика в виде постоянного четырехполюсного магнита приводится в движение от ведомого вала коробки передач и генерирует трехфазный переменный ток. При вращении ротора в каждой фазе статора вырабатывается переменная синусоидальная ЭДС, частота которой пропорциональна скорости движения автомобиля. Магнитное поле статора электродвигателя, создаваемое его обмотками, будет вращаться с частотой вращения ротора датчика. Вращающееся магнитное поле статора, воздействуя на постоянный магнит ротора указателя, приводит его во вращение с той же частотой.

В датчиках *электронных спидометров* используется эффект Холла. Этот эффект состоит в том, что если к пластине из металла или полупроводника приложено напряжение питания и ее пронизывает под прямым углом магнитное поле, обладающее индукцией B , то возникает напряжение Холла U , перпендикулярное направлению тока I от источника питания и направлению магнитного поля (рис. 4.2).

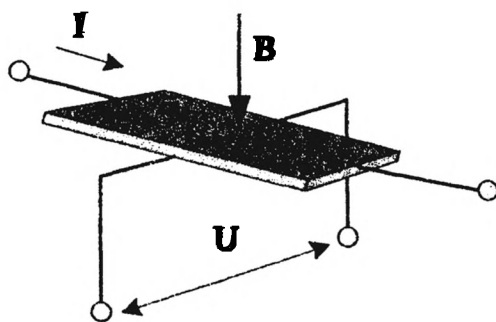


Рис. 4.2. Эффект Холла

Напряжение Холла равно

$$U = kIB / h,$$

где k — постоянная Холла; h — толщина полупроводника.

Из этого выражения следует, что величина напряжения Холла пропорциональна магнитной индукции. Если магнитное поле изменять с частотой, пропорциональной скорости движения автомобиля, то и частота изменения выходного напряжения Холла также будет пропорциональна скорости автомобиля. На практике магнитное поле создается неподвижным магнитом, а его изменение — специальным вращающимся экраном с прорезями (рис. 4.3).

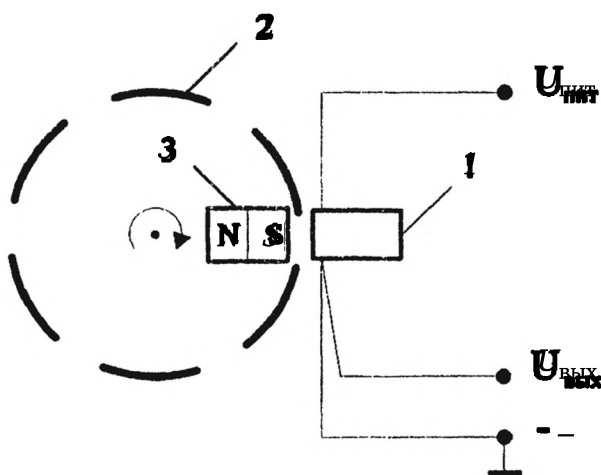


Рис. 4.3. Принцип работы датчика спидометра:
1 — датчик Холла; 2 — экран с прорезями; 3 — магнит

При вращении экрана его сегменты и прорези между ними поочередно проходят между магнитом и датчиком Холла. Когда между магнитом и датчиком Холла проходит сегмент экрана, магнитное поле перекрывается и на выходе датчика минимальное напряжение $U_{\text{мин}}$ (рис. 4.4, а). При прохождении между магнитом и датчиком Холла прорези экрана на датчик поступает максимальный магнитный поток, и на выходе напряжение становится максимальным $U_{\text{макс}}$.

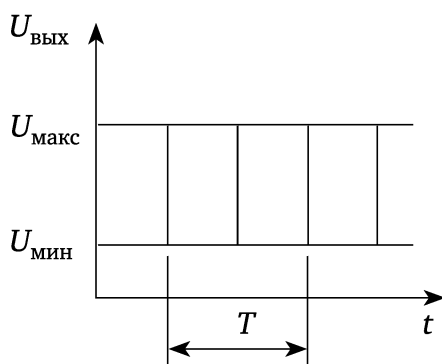


Рис. 4.4, а. Выходной сигнал датчика спидометра

Таким образом, период T следования импульсов датчика Холла обратно пропорционален скорости автомобиля, то есть чем выше скорость автомобиля, тем чаще следуют импульсы.

На рис. 4.4, б приведена конструкция датчика спидометра автомобиля Скорпио.

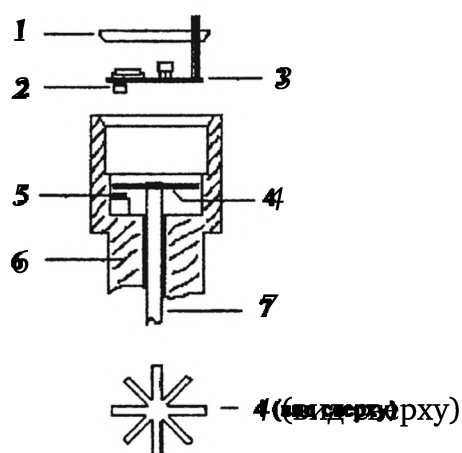


Рис. 4.4, б. **Конструкция датчика спидометра:**

1 — крышка; 2 — датчик Холла; 3 — плата; 4 — крыльчатка; 5 — магнит;
6 — корпус датчика; 7 — ротор

Под крышкой расположена круглая печатная плата, на нижней стороне которой находится датчик Холла, а на верхней — дополнительные электронные элементы. Под платой расположена крыльчатка, закрепленная на роторе. При вращении крыльчатка периодически экранирует датчик Холла от магнита своими лопатками. Магнит закреплен в корпусе датчика скорости напротив датчика Холла.

4.2. Измерение уровня топлива и эксплуатационных жидкостей

Информация о наличии топлива в баке позволяет водителю рассчитать расстояние, которое может проехать автомобиль без дополнительной заправки. На современных автомобилях применяют дистанционные электрические электромагнитные и магнитоэлектрические приборы уровня топлива. В качестве чувствительного элемента в баке используются реостатные датчики с поплавковым устройством.

Работа электромагнитного поплавкового указателя уровня топлива пояснена на рис. 4.5.

При замыкании выключателя зажигания через обмотки электромагнитов протекает ток и образует магнитный поток, который, воздействуя на стальной якорь, соединенный со стрелкой прибора, устанавливает стрелку в определенной части шкалы прибора. При отсутствии топлива в баке поплавков, находясь в нижнем положении, обнуляет сопротивление реостата и укорачивает обмотку электромагнита 4. При этом магнитный поток равен нулю. Магнитный поток обмотки 1 вызовет поворот якоря и стрелки прибора в левую сторону шкалы к нулевой отметке. Стрелка будет удерживаться в этом положении после выключения прибора благодаря наличию противовеса. По мере наполнения бака и поднятия поплавка сопротивление реостата увеличивается. Это увеличивает силу тока и создаваемый им магнитный поток в обмотке электромагнита 4. Вследствие этого якорь со стрелкой повернется

вправо. Наличие специального магнитопровода обеспечивает замыкание магнитного потока через якорь. Использование двух электромагнитов в указателе позволяет измерять уровень топлива независимо от изменений питающего напряжения.

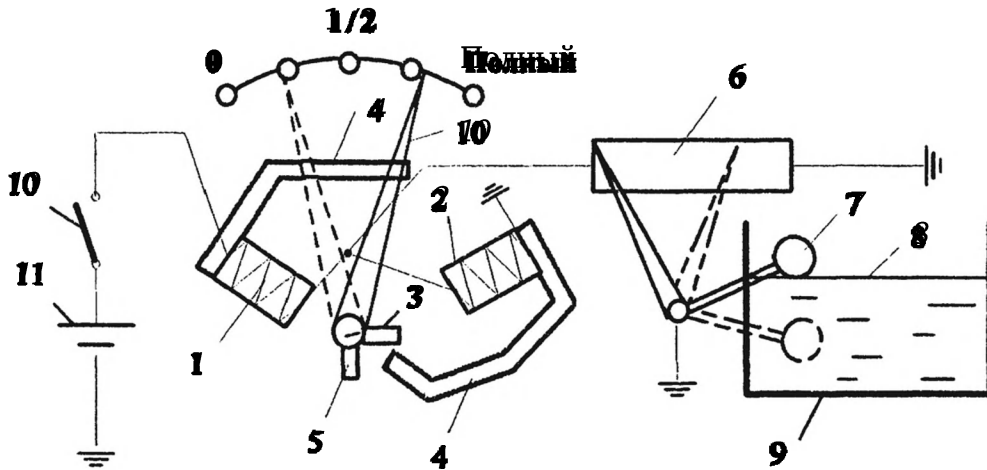


Рис. 4.5. Электромагнитный поплавковый указатель уровня топлива:

- 1, 2 — обмотки электромагнитов; 3 — якорь; 4 — магнитопровод;
5 — противовес; 6 — реостат; 7 — поплавок; 8 — уровень топлива;
9 — топливный бак; 10 — выключатель зажигания; 11 — источник питания

Контроль за уровнем эксплуатационных жидкостей, к которым относятся масла, тормозная, охлаждающая и омывающая жидкости, осуществляется с помощью датчиков на основе геркона и плавающего кольцевого магнита. Геркон помещается в герметичном цилиндре, по которому перемещается пластиковый поплавок с кольцевым постоянным магнитом.

При нормальном уровне эксплуатационной жидкости поплавок фиксируется в верхнем положении стопором, магнит замыкает контакты геркона. При понижении уровня жидкости ниже критического поплавок опускается, контакты геркона размыкаются, и на дисплее появляется соответствующее предупреждение.

Уровень масла в двигателе измеряется до пуска двигателя, так как уровень масла в картере работающего двигателя ниже контрольной метки и колеблется на поворотах и при торможении, что может приводить к генерации ложных сообщений измерительной системой.

4.3. Контроль зарядного режима и давления

Для контроля зарядного режима применяют магнитоэлектрические амперметры с подвижным постоянным магнитом (рис. 4.6).

Подвижная часть прибора включает постоянный магнит и стрелку, которые находятся на одной оси. Постоянный магнит размещен внутри неподвижной катушки индуктивности, подключенной к резистору, по которому протекает измеряемый ток заряда. Угол поворота постоянного магнита зависит от величины и направления тока, протекающего по резистору. Противодействующий момент создается неподвижным

постоянным магнитом. Когда момент от действия тока уравнивается противодействующим моментом, стрелка остановится в положении на шкале, соответствующем измеряемому току заряда.

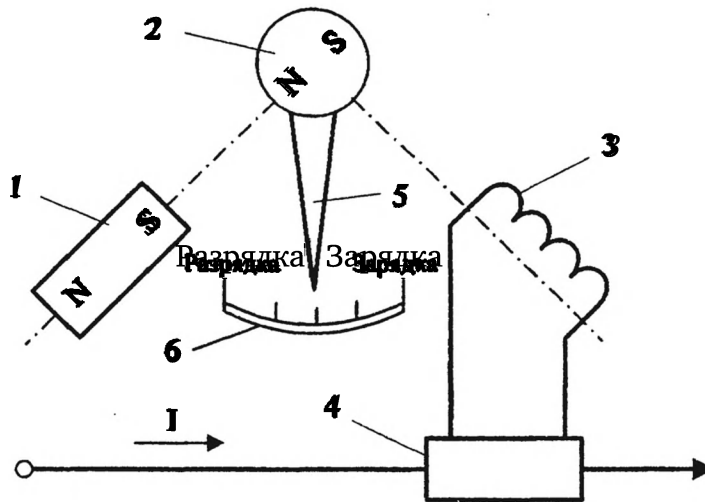


Рис. 4.6. Амперметр магнитоэлектрической системы:

1 — неподвижный магнит; 2 — подвижный магнит; 3 — катушка индуктивности;
4 — резистор; 5 — стрелка; 6 — шкала

Работа системы зажигания связана с выработкой электрического сигнала, который должен быть связан с положением поршня в цилиндре, чтобы своевременно образовался искровой разряд на свече. Кроме этого, форма этого сигнала должна быть такой, чтобы получающая сигнал катушка зажигания или коммутатор вырабатывали требуемый ток.

Распространенным типом *магнитоэлектрического датчика момента искрообразования* является генераторный датчик коммутаторного типа с пульсирующим потоком. Принцип действия такого датчика заключается в изменении магнитного сопротивления магнитной цепи, содержащей магнит и обмотку, при изменении зазора с помощью ротора, выполненного в виде распределителя потока.

На рис 4.7 показано устройство магнитоэлектрического датчика коммутаторного типа.

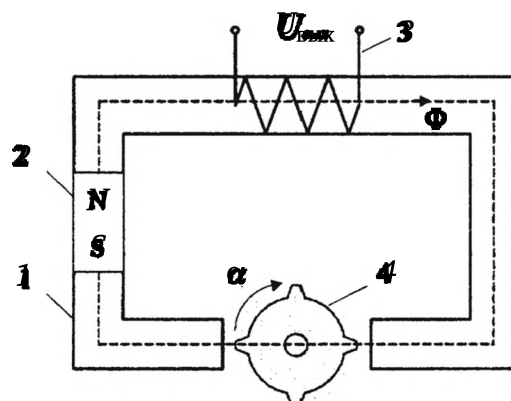


Рис. 4.7. Схема коммутаторного датчика:

1 — статор; 2 — постоянный магнит; 3 — выходная обмотка; 4 — ротор

При вращении зубчатого ротора, который устанавливается на вал распределителя зажигания, в обмотке статора в соответствии с законом индукции возникает переменное напряжение, пропорциональное частоте вращения ротора и изменению магнитного потока Φ в зависимости от угла поворота α . Необходимое магнитное поле создает постоянный магнит. Количество зубцов ротора зависит от числа цилиндров двигателя.

Когда зубец ротора приближается к полюсу статора, в выходной обмотке нарастает напряжение. При совпадении оси зубца ротора с осью полюса статора напряжение на обмотке достигает максимума. Затем напряжение меняет знак и увеличивается в противоположном направлении до максимума при удалении зубца.

На рис. 4.8 показан характер изменения выходного сигнала напряжения $U_{\text{вых}}$ по углу поворота коленчатого вала при разной частоте вращения ротора.

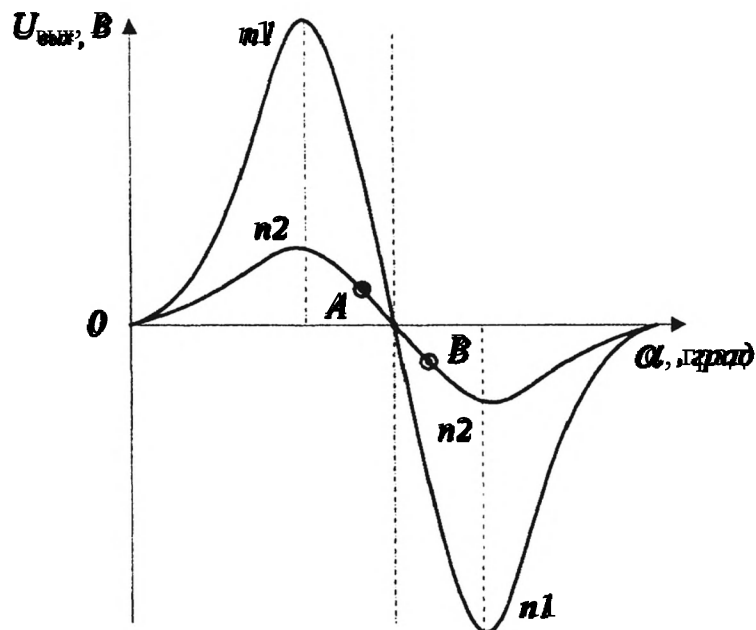


Рис. 4.8. Выходной сигнал датчика при частотах вращения ротора $n1 > n2$

Так как напряжение быстро изменяется от максимального положительного до максимального отрицательного значения, то переход через ноль между двумя максимумами может быть использован для управления системой зажигания при получении точного момента искрообразования. С целью увеличения помехозащищенности для получения момента искрообразования используют точки А или В, которые выбираются на допустимо низких уровнях, превышающих уровень помех по напряжению. При этом обеспечивается надежное срабатывание схемы при пуске двигателя.

В основе работы датчиков давления масла в системе смазки двигателя лежит свойство упругих элементов деформироваться под действием давления жидкости. Приборы, измеряющие давление, называются *манометрами*.

Контроль давления масла в двигателе может реализовываться в виде датчика давления на базе *трубки Бурдона*, которая представляет собой изогнутую металлическую трубку, имеющую эллиптическое сечение и закрытую с одного конца. При поступлении масла под давлением в полость трубки она выпрямляется. При этом угловое отклонение свободного конца трубки будет пропорционально измеряемому давлению. Угловое отклонение обычно измеряется по механическому указателю или потенциометром. Главными преимуществами данного преобразователя являются высокая чувствительность и хорошая повторяемость.

На практике используются различные конфигурации этого преобразователя, в частности полукруглые. Полукруглая конструкция приведена на рис. 4.9.

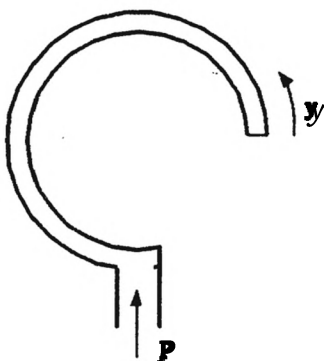


Рис. 4.9. Трубка Бурдона

Угловое отклонение полукруглой трубки Бурдона может быть выражено зависимостью

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{1,16Pr}{sEb},$$

где α — угол перемещения выходного звена трубки; β — начальный угол выходного звена трубки; P — давление; r — радиус трубки; s — толщина трубки; E — модуль Юнга материала трубки; b — величина малой оси сечения трубки.

В качестве упругих элементов используются также гофрированные металлические мембраны. Схема *мембранного датчика давления* масла приведена на рис. 4.10.

В корпусе датчика закреплена мембрана с толкателем. Передаточный рычажок свободно качается на оси и отводится в исходное положение пружиной, воздействующей на ползунки реостата. Установка стрелки указателя в исходное положение производится регулировочным винтом передаточного рычажка. Проволочный стержень служит для очистки штуцера датчика, создавая сопротивление прохождению масла и сглаживая влияние резких изменений давления на показания прибора.

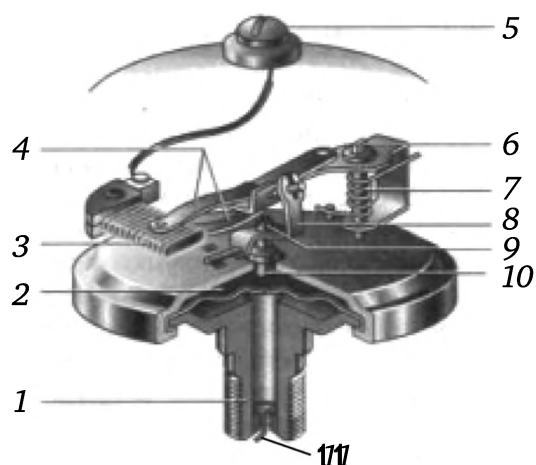


Рис. 4.10. Схема мембранного датчика давления масла:

1 — штуцер; 2 — мембрана; 3 — реостат; 4 — ползунки реостата; 5 — выводной зажим; 6 — ось ползунка; 7 — пружина; 8 — передаточный рычажок; 9 — регулировочный винт; 10 — толкатель; 11 — проволочный стержень

В зависимости от величины давления масла в штуцере изменяется прогиб мембраны, и соответственно изменяется положение ползунков на обмотке реостата датчика.

Зависимость сопротивления реостата датчика от давления масла дана на рис. 4.11.

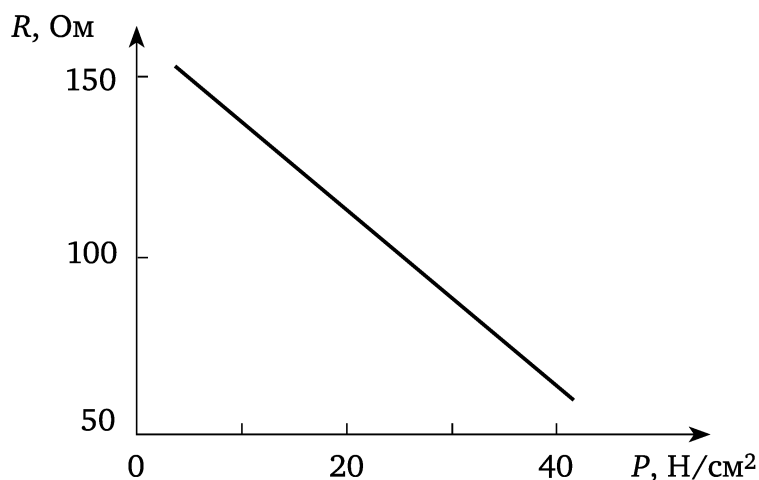


Рис. 4.11. Характеристика реостата датчика

Необходимо учитывать, что мембрана может вносить в характеристику гистерезис из-за разницы своего прогиба в противоположных направлениях при одинаковой разнице перепада давлений на ней.

Разряжение во впускном коллекторе измеряется прибором, который называется *эконометром*. Он также может работать на базе трубки Бурдона. Манометрическая трубчатая пружина в данном случае реагирует не на увеличение давления, а на его уменьшение. Трубка сжимается при попадании в нее разреженного газа, то есть вакуума, и перемещение выходного звена трубки происходит в противоположную сторону. По положению стрелки в одной из трех зон шкалы эконометра води-

тель может оценивать экономичность выбранного режима движения, а также получать информацию о неисправности двигателя. Если стрелка прибора находится слева, двигатель работает с увеличенной нагрузкой или с излишним расходом горючего. Этого можно избежать, перейдя на другую передачу или изменив режим движения. Если стрелка находится справа, это означает, что режим работы двигателя оптимальный. Колебания стрелки в левой зоне указывают на неисправные клапаны или неправильную установку системы зажигания. Если колебания стрелки происходят в левой зоне и частично захватывают правую зону, то это означает, что происходит потеря компрессии в двигателе.

4.4. Контроль параметров коленчатого вала и дроссельной заслонки

В качестве датчиков частоты вращения коленчатого вала и колес используются *индуктивные датчики*. Принцип работы этих датчиков показан на рис. 4.12, а.

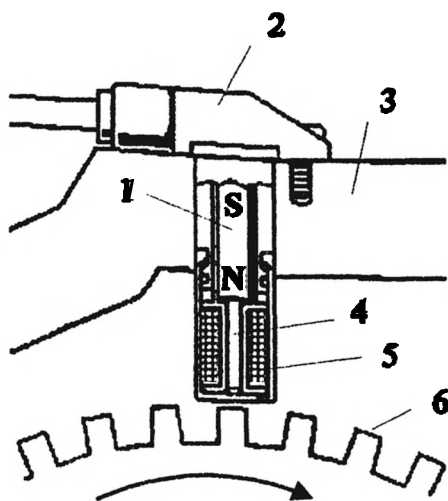


Рис. 4.12, а. Индуктивный датчик частоты вращения:

1 — магнит; 2 — корпус; 3 — картер двигателя; 4 — сердечник; 5 — обмотка;
6 — зубчатое колесо

Датчик содержит статор (постоянный магнит и катушку индуктивности с выводами), а также зубчатое колесо, связанное с объектом измерения. Когда зуб ферромагнитного зубчатого колеса проходит около сердечника датчика, наводимые им изменения магнитного потока создают в катушке переменное напряжение.

Воздушный зазор и размеры зубца оказывают существенное влияние на амплитуду сигнала, что позволяет определить положение вала по интервалам между зубцами в пределах половины или трети. Точка отсчета задается пропуском зубца. При этом результирующее увеличение расстояния между нулевыми переходными состояниями сигнала

или значительное повышение напряжения сигнала определяется как нулевая точка.

В датчике частоты вращения коленчатого вала двигателя статор датчика укреплен на кожухе маховика или на заглушке смотрового лючка — в непосредственной близости от зубчатого венца маховика. Прибор обеспечивает наиболее точное определение частоты вращения без вторжения в цепи системы зажигания.

На рис. 4.12, б приведен внешний вид датчика фирмы *Turbo City*, имеющий возможность регулировки угла опережения зажигания.



Рис. 4.12, б. Датчик оборотов коленчатого вала

Индуктивные датчики используются также для измерения скорости движения автомобиля, измерения пройденного пути, в стеклоочистителях и системах зажигания.

Основой системы зажигания фирмы *BOSH* является генераторный датчик. В системе зажигания с цифровым управлением *Импульс-Техник* используется зубчатый венец маховика двигателя с дополнительным зубом для получения эталонного сигнала (рис. 4.12, в).

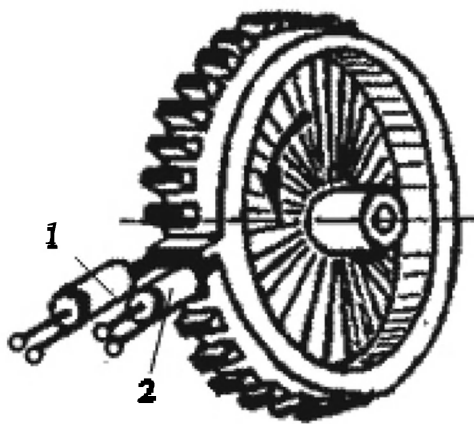


Рис. 4.12, в. Индуктивный датчик в системе зажигания:

1 — блок счета импульсов; 2 — блок эталонного импульса

Данная система позволяет достаточно точно регулировать момент зажигания.

Данные о положении дроссельной заслонки необходимы для расчета длительности импульсов управления форсунками. Датчик устанавливается на корпусе узла дроссельной заслонки. Он механически связан

с осью дроссельной заслонки и подключен к электрическому жгуту системы управления.

Датчики положения дроссельной заслонки выполняются на базе потенциометрического преобразователя, схема которого приведена на рис. 4.13.

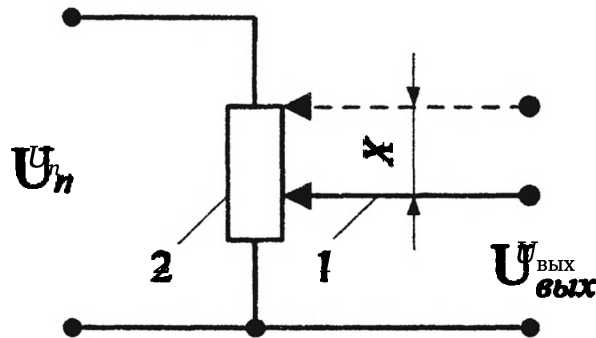


Рис. 4.13. Схема потенциометрического преобразователя:

1 — токосъемный контакт; 2 — резистор

На резистор подается напряжение питания U_n . Сопротивление резистора меняется при перемещении токосъемного контакта из начального положения, показанного на рисунке пунктирной линией. Выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ представляет собой напряжение, пропорциональное перемещению X , которое зависит от положения дроссельной заслонки.

Схема датчика положения дроссельной заслонки дана на рис. 4.14.

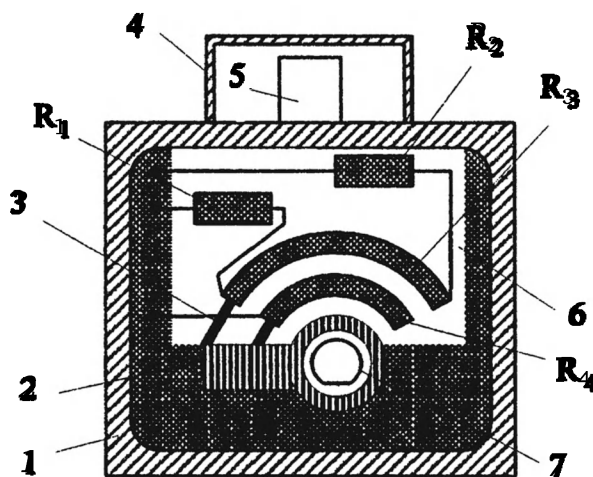


Рис. 4.14. Датчик положения дроссельной заслонки:

1 — корпус; 2 — поворотная втулка; 3 — подвижный контакт; 4 — штекерная колодка; 5 — штекер; 6 — печатная плата; 7 — ось дроссельной заслонки

Датчик состоит из корпуса, печатной платы с резисторами R_1 , R_2 , R_3 , R_4 и подвижных контактов, установленных на поворотной втулке. Поворотная втулка закреплена на оси дроссельной заслонки.

Электрическое соединение резисторов потенциометрического преобразователя представлено на рис. 4.15, а.

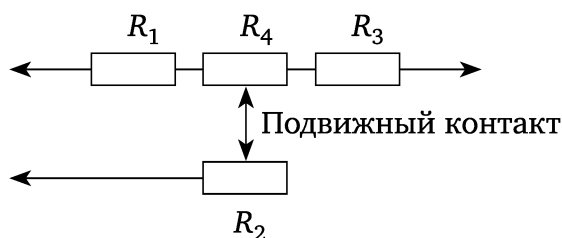


Рис. 4.15, а. **Электрическое соединение резисторов**

При изменении положения дроссельной заслонки меняется положение подвижного контакта и, соответственно, изменяется величина падения напряжения на переменном сопротивлении. Это напряжение подается в блок управления, который учитывает его при расчете длительности импульсов управления форсунками и угла опережения зажигания. На рис 4.15, б показано место крепления датчика положения дроссельной заслонки.

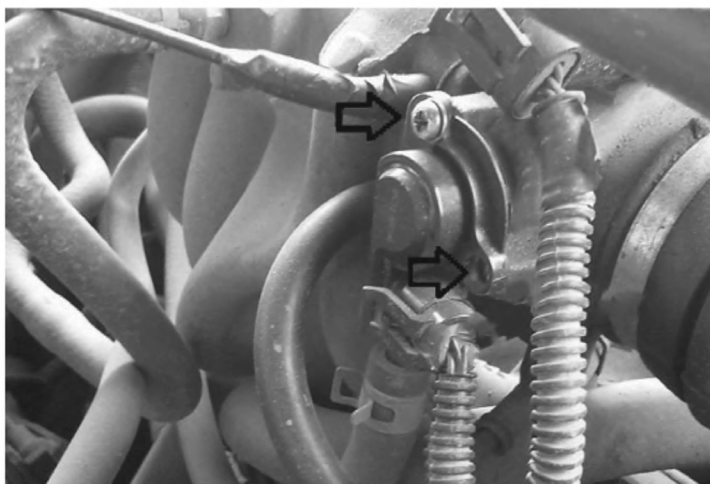


Рис. 4.15, б. **Крепление датчика положения дроссельной заслонки**

Датчик расположен на корпусе дроссельной заслонки и вырабатывает сигнал о положении дроссельной заслонки величиной до 4,8 В. При минимальном открытии дроссельной заслонки на холостом ходе величина сигнала составляет около 1 В.

Датчики массового расхода воздуха служат для определения количества воздуха, идущего на заполнение цилиндров при работе двигателя. Они работают по принципу тепловых расходомеров, к которым относятся *термоанемометры*.

Эти датчики позволяют измерять расход по охлаждению нагретого тела, помещенного в поток, либо по переносу тепловой энергии между двумя точками, расположенными вдоль потока.

При помещении в движущуюся воздушную среду нагретого током терморезистора снос тепла потоком воздуха является основным фактором, влияющим на теплоотдачу терморезистора.

На рис. 4.16 показана схема термоанемометра в канале измерения расхода.

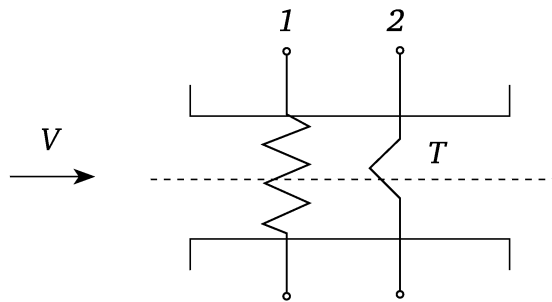


Рис. 4.16. **Схема термоанемометра:**

1 — нагреватель с терморезистором; 2 — измеритель температуры

Ток нагревает терморезистор до температуры выше температуры окружающей среды. При этом теплоотвод осуществляется потоком воздуха. Расход воздуха V и температура T связаны между собой определенной зависимостью, в результате чего схема работает как датчик расхода.

Терморезисторы обычно включаются в мостовую измерительную цепь. При нулевой скорости потока воздуха через терморезистор проходит некоторый начальный ток, который нагревает его до номинальной температуры, при которой мост находится в равновесии. При движении потока воздуха происходит охлаждение терморезистора, сопротивление его изменяется, равновесие моста нарушается и на выходе усилителя появляется дополнительный ток, часть которого проходит через терморезистор. Выделяемое тепло компенсирует потери тепла, уносимого движущимся потоком воздуха. При этом температура и сопротивление терморезистора восстанавливаются до их номинальных значений. Расход воздуха определяется по значению тока, питающего мост.

4.5. Системы контроля руля и шин

В датчике угла поворота рулевого колеса используется оптико-электронный преобразователь, выполненный с применением светодиодов, фототранзисторов и кодирующего диска. Принцип работы такого преобразователя проиллюстрирован на рис. 4.17.

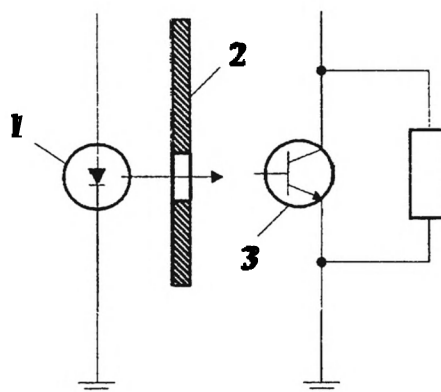


Рис. 4.17. **Оптико-электронный преобразователь:**

1 — светодиод; 2 — фототранзистор; 3 — кодирующий диск с прорезью

Кодирующий диск освещается светодиодами с одной стороны, а с другой располагаются фотоприемники в виде фототранзисторов.

На рис. 4.18 показана схема датчика положения рулевого колеса.

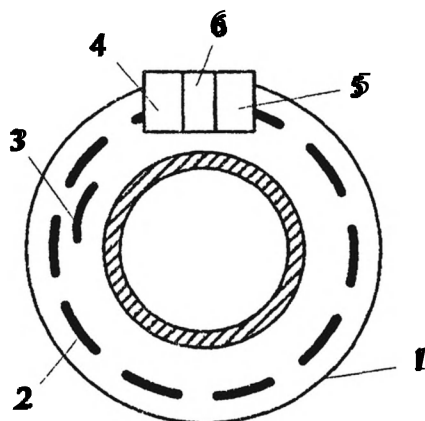


Рис. 4.18. Схема датчика положения рулевого колеса:

1 — диск; 2 — прорези; 3 — нейтральная прорезь; 4, 5 — фотопрерыватели определения направления поворота; 6 — фотопрерыватель определения центрального положения рулевого колеса

Датчик содержит кодирующий диск с прорезями, жестко связанный с рулем, и три неподвижных оптоэлектронных пары. Сектора часто располагают на двух радиусах, смещая их на половину длины отверстия, что в четыре раза увеличивает разрешающую способность. Для размещения маркера используется третья дорожка.

При повороте руля диск вращается между светодиодами и фототранзисторами. В результате на фототранзисторах вырабатываются последовательности электрических импульсов, по которым электронный блок управления определяет угол и скорость поворота. Два фотопрерывателя необходимы для определения направления поворота. Третий прерыватель фиксирует центральное положение рулевого колеса.

Система контроля давления в шинах является новшеством в массовом автомобилестроении и позволяет сделать управление автомобилем более удобным и безопасным. Она следит за давлением в шинах и при его уменьшении ниже определенного уровня вырабатывает сигнал на световом индикаторе панели приборов автомобиля. Каждому колесу соответствует отдельный индикатор.

На рис. 4.19 приведена схема системы контроля давления в шинах.

На ободе колеса установлен мембранный датчик давления, замыкающий контакты за счет перемещения мембраны при снижении давления в шине. Контакты коммутируют вторичную цепь для частотного излучателя, который размещен на узле крепления тормозных колодок (рис. 4.20, а).

При вращении колеса датчик давления постоянно проходит в непосредственной близости от излучателя, что позволяет принять сигнал с датчика. При появлении сигнала на приборном щитке загорается индикатор, соответствующий колесу со сниженным давлением в шине.

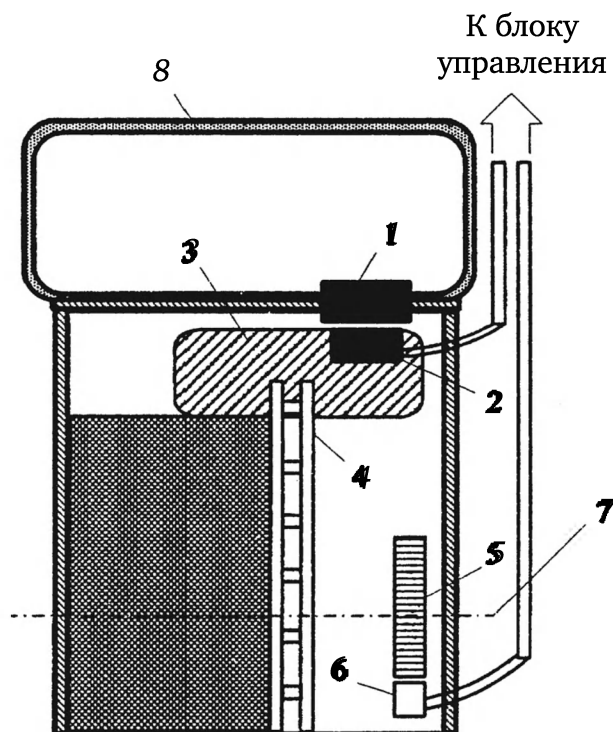
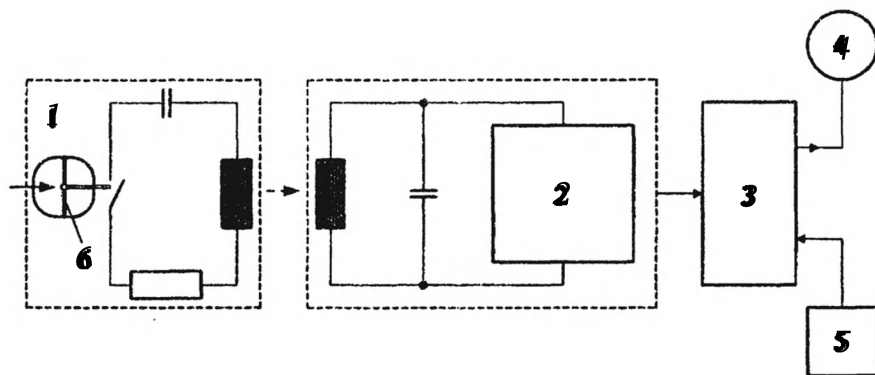


Рис. 4.19. Расположение системы контроля давления в шинах:
 1 — датчик давления; 2 — излучатель; 3 — суппорт; 4 — тормозной диск;
 5 — задающий диск; 6 — датчик скорости; 7 — ось колеса; 8 — шина



**Рис. 4.20, а. Схема прохождения сигнала
 от датчика давления к индикатору:**

1 — датчик давления; 2 — излучатель; 3 — электронный блок управления;
 4 — индикатор; 5 — датчик скорости; 6 — мембрана

Существуют также датчики давления в шинах, которые передают информацию бесконтактным способом о давлении, даже если автомобиль неподвижен. Они функционируют на принципе изменения емкости. В емкостных датчиках одна из обкладок конденсатора выполняется в виде диафрагмы. Диафрагма прогибается при изменении давления, меняя значение емкости и, соответственно, выходного электрического сигнала. В емкостных элементах используется ток в микроамперном диапазоне.

На рис. 4.20, б показана система контроля давления в шинах, фирмы *ParkMaster*, в которой максимальная функциональность сочетается с легкостью эксплуатации.



Рис. 4.20, б. Система контроля давления воздуха в шинах *ParkMaster*

Четыре датчика, устанавливаемые в колеса, отслеживают не только давление внутри шины, но и температуру. Повышенная температура внутри шины может говорить как о недостаточности давления, так и неисправности тормозной системы, такой как перегрев колодок, дисков и, соответственно, всего колеса.

Если показатели всех шин находятся в норме, то жидкокристаллический дисплей (рис. 4.20, в) не подает сигналов.



Рис. 4.20, в. Жидкокристаллический дисплей контроля шин

Как только какой-то из параметров выходит за пределы максимально или минимально допустимого значения, сразу же раздается звуковой сигнал, на панели приборов загорается красная лампочка, а на дисплее обозначается проблемное колесо, и отражается изменение значения того или иного параметра. Информационный дисплей устанавливается на приборной панели в удобном для водителя месте.

4.6. Навигационные системы

Автомобильные навигационные системы предназначены для получения информации о местоположении автомобиля относительно требуемого пункта маршрута. Функциональные возможности навигационных систем включают показ водителю расположения заданного пункта назначения, его удаленность, а также местоположение автомобиля и непрерывное указание водителю направления движения к пункту назначения с учетом изменения дорожной обстановки. Некоторые системы дают информацию о погодных условиях или дорожно-транспортных происшествиях на маршруте движения.

Примером навигационных систем являются системы с двусторонней связью. Их отличает возможность обмена информацией между любым водителем, автомобиль которого оборудован такой системой, и центром управления. Водителю необходимо только сообщить пункт назначения. В дальнейшем при движении по городу он будет получать директивные команды из центра управления о выборе направления движения на всех перекрестках.

Это обеспечивается за счет системы навигационных маяков, устанавливаемых в узлах транспортной сети, как это показано на рис. 4.21.

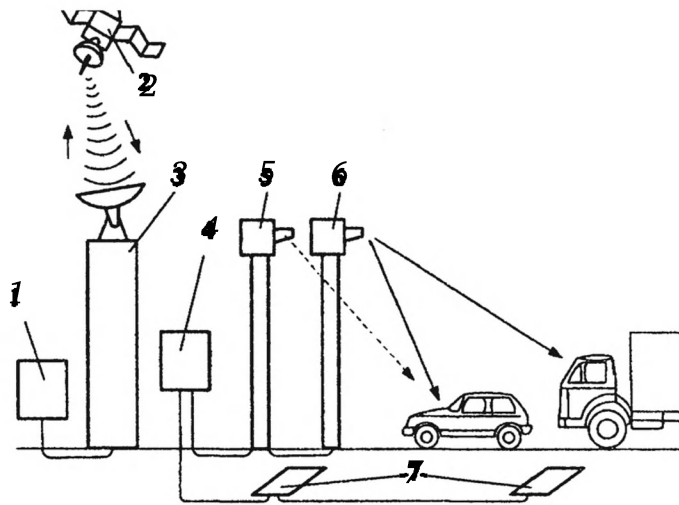


Рис. 4.21. Состав навигационной системы с двусторонней связью:

1 — центральная ЭВМ; 2 — спутник связи; 3 — радиостанция; 4 — блок управления; 5 — радиомаяк; 6 — приемопередатчики инфракрасного излучения; 7 — электромагнитные контуры

Маяки представляют собой либо электромагнитные контуры, либо приемопередатчики инфракрасного излучения, которые постоянно собирают данные о дорожном движении. Затем эта информация через радиостанцию с блоком управления и спутник связи передается на центральную ЭВМ, где обрабатывается по заранее составленным программам. В результате для каждого подключившегося к системе транспортного средства определяется кратчайший маршрут его движения в намеченную точку. Эти данные по той же цепочке, но в обратном направлении, возвращаются к радиомаяку, а от него попадают на дисплей водителя, который следует указаниям дисплея, обновляемым перед каждым перекрестком дорог. Благодаря такой схеме транспортные потоки можно распределить более равномерно, что снижает количество заторов и загазованность городских районов.

Спутниковая навигация позволяет комплексно решать важнейшие вопросы мониторинга подвижных объектов, контроля и управления ими. GPS (*Global Position System*) — навигационная система, состоящая из 24 спутников. Каждый спутник передает сигнал, преобразуемый приемником GPS в конкретные координаты объекта. GPS-технология

позволяет проводить точное определение координат объекта. Эта система может быть установлена в автомобиле (рис. 4.22).



Рис. 4.22. Навигационная система в автомобиле

Она точно покажет время в пути, а также предскажет, когда можно приехать в заданную точку, рассчитает оптимальный маршрут и, в случае необходимости, задаст объезд проблемных участков.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано измерение скорости движения автомобиля?
2. В чем заключается эффект Холла?
3. Как контролируется уровень эксплуатационных жидкостей?
4. Что является входной величиной потенциометрического преобразователя?
5. По какому принципу работают термоанемометры?

5

НАНОИЗМЕРЕНИЯ

5.1. Основные понятия

Для развития нанотехнологии необходимо опережающее развитие метрологии. Уровень точности и достоверности измерений способен стимулировать развитие соответствующих отраслей экономики или сдерживать его. В нанотехнологиях приборная и технологическая составляющие работают на пределе своих возможностей. Это увеличивает вероятность ошибки, связанной, прежде всего, с человеческим фактором. В этой связи метрологии и автоматизации принадлежит особая роль в нанотехнологиях и наноиндустрии.

В Концепции развития в РФ работ в области нанотехнологий используются следующие термины.

Нанотехнология — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба.

Наноматериалы — материалы, содержащие структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Наносистемная техника — полностью или частично созданные на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Наноиндустрия — вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Специфика нанотехнологий привела к необходимости зарождения и быстрого развития уникального направления в метрологии — нанометрологии, с которым связаны теоретические и практические аспекты измерений, включая эталоны единиц величин, стандартные образцы состава, структуры, размера, свойств, а также методы и средства кали-

бровки в нанометровом и субнанометровом диапазонах. В решении главной задачи метрологии — обеспечении единства измерений — нанометрология опирается на меры, стандартные образцы состава и необходимые наборы средств, которые воспроизводят нужную шкалу и позволяют осуществлять калибровку средств измерений, в том числе непосредственно в процессе измерений. Это позволяет контролировать результаты измерений и обеспечивать их прослеживаемость к эталону соответствующей величины (рис. 5.1).

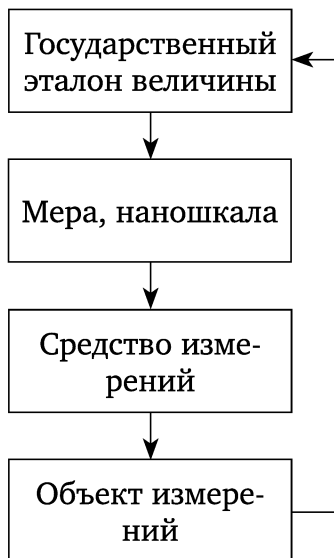


Рис. 5.1. Прослеживаемость передачи размера единицы величины

Междисциплинарный характер нанотехнологий инициировал создание в 2005 г. в рамках Международной организации по стандартизации (ИСО) Технического комитета ИСО/ТК229 «Нанотехнологии». Годом позже в Международной электротехнической комиссии был образован Технический комитет МЭК/ТК113 «Стандартизация в области нанотехнологий для электрических и электронных изделий и систем». Российская сторона представлена в этих комитетах национальным Техническим комитетом ТК441 «Нанотехнологии». В последние годы разработаны Национальные стандарты РФ и Межгосударственные стандарты СНГ в нанометрологии (см. Приложение 1 и Приложение 2).

В части единства измерений наиболее востребованы измерения линейных или геометрических параметров. Это связано с тем, что из самого определения нанотехнологий, оперирующих с объектами нанометровой протяженности, естественным образом следует первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта, что, в свою очередь, обуславливает необходимость обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. В неявном виде нанометрология линейных измерений присутствует также в большинстве методов и средств обеспечения единства измерений физико-химических параметров и свойств объектов нанотехнологий, в том числе механических, оптических, электрических, магнитных и акустических.

Часто необходимо осуществлять высокоточное пространственное позиционирование зонда измерительного устройства в требуемом месте съема информации. При этом диапазон линейного сканирования по каждой координате может быть от единиц нанометров до сотен микрометров, а требуемая точность выставления координаты составлять десятые доли нанометра.

Обеспечение единства измерений физико-химических параметров и свойств объекта требует привязки соответствующего средства измерений к эталону, воспроизводящему единицу величины, например, проводимости — к эталонному сопротивлению, а в нанотехнологиях в большинстве случаев для точности попадания в нужную зону еще и обязательной привязки к базисному эталону единицы длины. Диапазон измерений длины от единиц нанометров до сотен микрометров перекрывает более пяти порядков значений измеряемой величины при точности измерений в диапазоне десятых долей нанометра.

Из концепции обеспечения прослеживаемости результата каждого измерения геометрических параметров объектов и структур нанотехнологий следует необходимость прослеживаемости к эталону длины — государственному эталону метра. Линейка объектов нанотехнологий простирается от ультрадисперсных сред до наноструктурированных многослойных материалов и кристаллов. Она включает квантоворазмерные структуры со следующими размерностями локализации:

- квантовые ямы (сверхтонкие слои);
- квантовые проволоки, или нити;
- квантовые точки.

Особенности физических эффектов и протекающих процессов, в том числе оптических, люминесцентных, электрических, магнитных, механических и многих других, определяются характерным размером. В одном и том же материале связанные с размером эффекты проявляются по-разному. Например, особенность оптических свойств материала в ультрадисперсном виде может проявляться при одних размерах наночастиц, а теплофизических — при других. Чтобы представить себе эффект, связанный с размером, достаточно следующего примера. Возьмем шарик кремния, который является основным материалом полупроводниковой наноэлектроники, и рассмотрим зависимость удельной поверхности от диаметра объекта — площадь в см^2 , деленная на массу в граммах. При размерах объекта порядка единиц сантиметра его удельная поверхность составляет несколько $\text{см}^2/\text{г}$. При размерах порядка десятка нанометров — это уже сотня $\text{м}^2/\text{г}$, то есть наблюдается возрастание почти на шесть порядков. Увеличение удельной поверхности влечет за собой усиление поверхностной активности.

Большинство методов исследований, широко применяемых в нанотехнологии, — просвечивающая и растровая электронная микроскопия (РЭМ), сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), ионно-полевая микроскопия, фотоэмиссионная и рентгеновская спектроскопия, рентгеновская дифрактометрия — требуют калибровки средств измерений

по стандартным образцам состава, структуры и свойств. Например, один из известных способов определения размеров ультрадисперсных частиц заключается в изучении рассеяния на них света, зависящего от соотношения размеров частиц, длины волны падающего излучения и поляризации. При определении размеров частиц, как правило, используется лазерное излучение, однако для калибровки такого средства измерений необходим набор ультрадисперсных частиц с дискретным рядом точно заданных размеров.

При контроле процессов создания многослойных тонкопленочных структур необходимо использование рентгенодиагностических методов контроля скрытых слоев и для калибровки соответствующих средств измерений — наличие многослойных стандартных образцов состава и структуры.

5.2. Оптическая и электросиловая микроскопия

История оптической микроскопии насчитывает не одно столетие. На сегодняшний день создано множество сложных оптических микроскопов. Однако возможности классической оптической микроскопии ограничены дифракционным пределом до, примерно, 1000-кратного увеличения.

Дифракционный предел — это минимальное значение размера пятна рассеяния, которое можно получить, фокусируя электромагнитное излучение. Меньший размер пятна не позволяет получить явление дифракции электромагнитных волн, которое проявляет себя как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн.

Минимальный дифракционный предел определяется формулой

$$d_{\min} = \lambda / 2n,$$

где λ — длина электромагнитной волны в вакууме; n — показатель преломления среды.

Для дальнейшего повышения разрешения необходимо перейти на меньшие длины волн или учитывать фазовые характеристики излучения. Первый путь был реализован в электронных микроскопах, для получения изображений в которых используют электронный пучок с малыми длинами волн. Второй путь получил наибольшее развитие в интерференционной микроскопии, которая берет начало от интерферометров — измерительных приборов, в которых используется интерференция волн, то есть взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн, одновременно распространяющихся в пространстве. В физике *когерентностью* называется скоррелированность (согласованность) нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если разность

их фаз постоянна во времени и при сложении колебаний получается колебание той же частоты.

Интерференционный микроскоп показан на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Интерференционный микроскоп

Любой интерференционный микроскоп представляет собой сочетание оптического микроскопа и интерферометра. Для исследования поверхностных свойств объекта его помещают вместо одного из отражающих зеркал интерферометра. Изменение рельефа поверхности образца создает разность фаз между интерферирующими лучами, и помимо оптического изображения объекта наблюдается интерференционная картина. Обработка серии снимков позволяет восстановить фазовую картину и рельеф поверхности образца.

Основные этапы развития современной микроскопии следующие:

1981 г. — Сканирующая туннельная микроскопия. Дает атомарное разрешение на проводящих образцах.

1982 г. — Сканирующий ближнепольный оптический микроскоп. Дает разрешение 50 нм в оптическом изображении поверхности.

1984 г. — Сканирующий емкостной микроскоп. Реализует разрешение 500 нм в емкостном изображении.

1985 г. — Сканирующий тепловой микроскоп. Дает разрешение 50 нм в тепловом изображении поверхности.

1986 г. — Атомно-силовой микроскоп. Дает атомарное разрешение на непроводящих и проводящих образцах.

1987 г. — Магнитно-силовой микроскоп. Дает разрешение 100 нм в магнитном изображении поверхности.

1988 г. — Микроскоп на основе баллистической эмиссии электронов. Позволяет исследовать эффекты с нанометровым разрешением.

1989 г. — Ближнепольный акустический микроскоп для низкочастотных акустических измерений с разрешением 10 нм.

1990 г. — Микроскоп, регистрирующий изменения химического потенциала.

1991 г. — Сканирующий зондовый микроскоп для измерения поверхностного потенциала с разрешением 10 нм.

1994 г. — Безапертурный ближнепольный оптический микроскоп с разрешением 1 нм.

Прорывом в развитии микроскопии стало изобретение сканирующего туннельного микроскопа и атомно-силового микроскопа (АСМ), являющегося на сегодняшний день одним из самых распространенных инструментов исследования объектов с нанометровым разрешением. Его использование позволяет на атомном уровне анализировать поверхности многих материалов: полимерных пленок, кристаллов и биологических микрообъектов. На рис. 5.3 показано изображение атомарной решетки на графите размером 2×2 нм, полученное с помощью такого микроскопа.

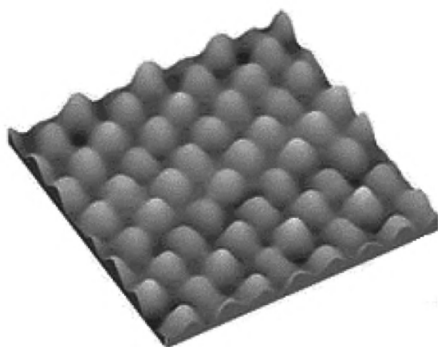


Рис. 5.3. Изображение атомарной решетки на графите

АСМ позволяет получать информацию не только о рельефе поверхности образца, но и о заряде, проводимости и магнитных свойствах исследуемой поверхности, при этом измерения могут проводиться в газах и в жидкости с атомным разрешением. Размер кадра обычно не превышает сотни микрон, а время получения изображения составляет от десятков секунд до нескольких минут.

В то же время интерференционный микроскоп позволяет получать изображения размером в тысячи микрон за доли секунды с нанометровым разрешением по вертикали и дифракционным ограничением в плоскости образца. В результате АСМ (рис. 5.4) и интерференционный микроскоп дополняют друг друга как по временным, так и по пространственным параметрам исследования.

Одним из основных элементов любого АСМ является сканер — система перемещений образца или зонда при сканировании по трем координатам. Точность измерений в АСМ напрямую зависит от точности его перемещений. Обычно сканер представляет собой пьезокерамическую трубку, для калибровки которой используют эталоны сравнения с известными размерными параметрами (рис. 5.5).

В СТМ острая металлическая игла подводится к образцу на расстояние нескольких *ангстрем* ($1\text{\AA} = 10^{-10}$ м — это приблизительный диаметр орбиты электрона в невозбужденном атоме водорода и шаг

атомной решетки в большинстве кристаллов). При подаче на иглу относительно образца небольшого потенциала возникает *туннельный ток*, то есть преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда ее полная энергия меньше высоты барьера. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния от образца до иглы. Типичные значения 1—1000 пА при расстояниях около 1 Å.



Рис. 5.4. Атомно-силовой микроскоп

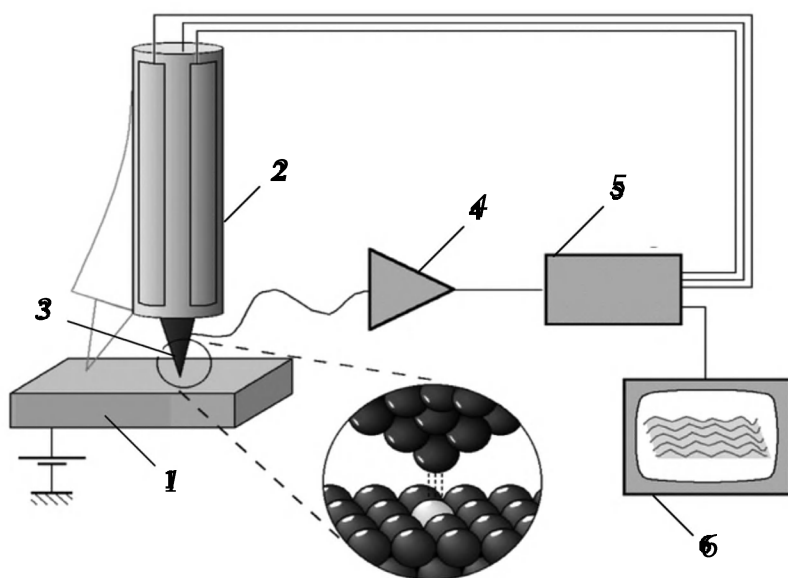


Рис. 5.5. Схема сканирующего туннельного микроскопа (СТМ):

- 1 — объект измерения; 2 — пьезокерамическая трубка; 3 — зонд-игла;
4 — усилитель туннельного тока; 5 — система управления и сканирования;
6 — регистрирующая система

В процессе сканирования игла движется вдоль поверхности образца, туннельный ток поддерживается стабильным за счет действия обратной связи, и показания следящей системы меняются в зависимости от топографии поверхности. Такие изменения фиксируются, и на их основе строится карта высот. Другая методика предполагает движение иглы на фиксированной высоте над поверхностью образца. В этом слу-

чае фиксируется изменение величины туннельного тока и на основе данной информации идет построение топографии поверхности. Регистрирующая система фиксирует значение функции, зависящей от величины тока между иглой и образцом, либо перемещения иглы по оси Z. Обычно регистрируемое значение обрабатывается системой отрицательной обратной связи, которая управляет положением образца или зонда по одной из координат.

Однако даже на откалиброванном микроскопе при сканировании могут проявляться эффекты дрейфа и нелинейности. Таким образом, для высокоточных измерений необходимо проведение контроля перемещений в реальном времени.

Следующим шагом в развитии микроскопии стало изобретение *атомно-силового интерференционного микроскопа* (АСИМ). В отличие от сканирующего туннельного микроскопа, с помощью атомно-силового микроскопа можно исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности.

Технические характеристики АСИМ приведены в табл. 5.1 для двух типов исследований — атомно-силовых и интерференционных.

Таблица 5.1

Технические характеристики АСИМ

Характеристики	Атомно-силовые	Интерференционные
Разрешающая способность по горизонтали, нм	1—10	750
Разрешающая способность по вертикали, нм	0,1	20
Размер кадра, мкм × мкм	10 × 10	800 × 600
Разрешение изображений, пкс × пкс	512 × 512	2048 × 1536
Скорость получения кадров	0,01	0,1

Схема, поясняющая принцип работы АСИМ, представлена на рис. 5.6.

Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации силового взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и зондом. В качестве зонда используется наноразмерное острие, располагающееся на конце упругой консоли, называемой *кантилевером*. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Появление возвышенностей или впадин под острием приводит к изменению силы, действующей на зонд, а значит, и изменению величины изгиба кантилевера. Таким образом, регистрируя величину изгиба с помощью лазера и матрицы фотодиодов, можно сделать вывод о рельефе поверхности. Система лазер-матрица перемещается синхронно с кантилевером (показано пунктиром), при этом луч лазера, отражаясь от поверхности кантилевера, передает измерительный сигнал на фотодиоды для дальнейшей их обработки в системе детектирования.

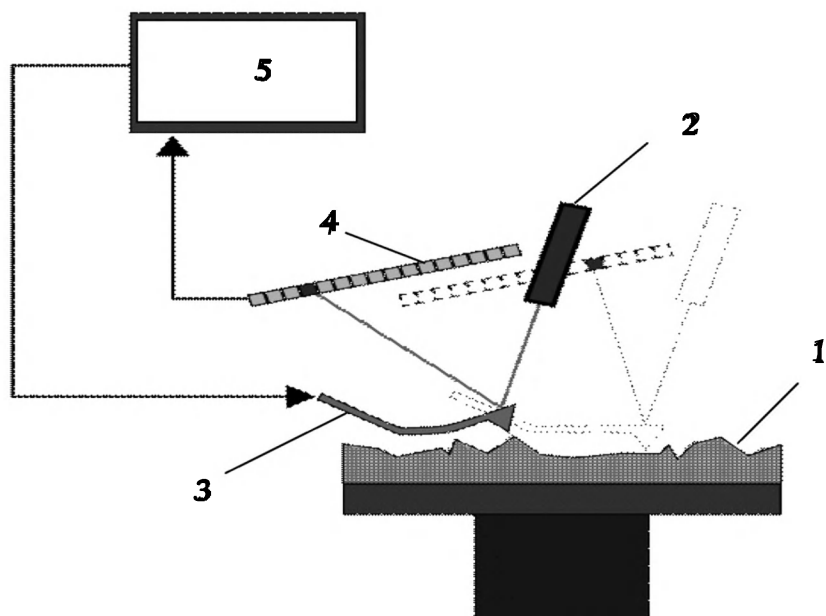


Рис. 5.6. Принцип работы атомно-силового микроскопа:
 1 — объект измерения; 2 — лазер; 3 — кантилевер; 4 — матрица фотодиодов;
 5 — система управления и детектирования

Совмещение в одном приборе принципов интерференционной и атомно-силовой микроскопии дает расширенные возможности для исследования различных материалов на наноуровне.

В *электросиловой микроскопии* (ЭСМ) для получения информации о свойствах поверхности используется электрическое взаимодействие между зондом и образцом, между которыми подается постоянное напряжение, модулированное частотой ω . Система зонд-образец обладает некоторой электрической емкостью. В процессе сканирования локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке поддерживается постоянным, поэтому изменения амплитуды колебаний кантилевера на частоте 2ω связаны с изменением емкости системы зонд-образец вследствие изменения диэлектрических свойств образца. С помощью этого метода можно изучать локальные диэлектрические свойства приповерхностных слоев образцов.

На рис. 5.7 показаны сравнительные результаты получения изображения углеродных трубок на подложке из полиимида с помощью АСМ и ЭСМ.

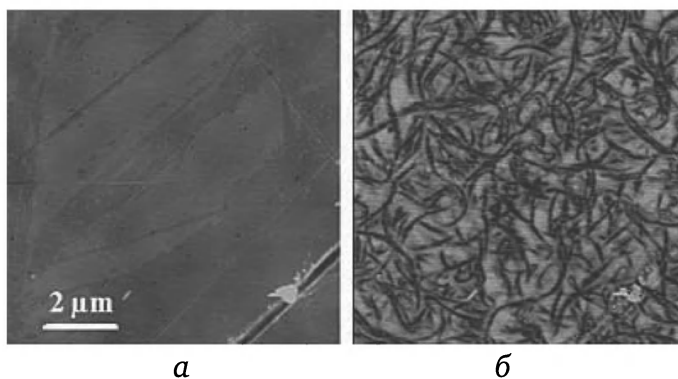


Рис. 5.7. Изображения углеродных трубок с помощью АСМ (а) и ЭСМ (б)

Магнитно-силовая микроскопия (МСМ) является разновидностью электросиловой микроскопии и применяется для исследования локальных магнитных свойств образцов. Для реализации метода на зонд наносится слой ферромагнитного материала. Для МСМ-исследований, как правило, применяется двухпроходная методика. На первом проходе снимается АСМ-изображение рельефа. На втором проходе датчик перемещается на расстоянии z_0 над поверхностью по траектории, повторяющей рельеф образца. Расстояние z_0 выбирается таким образом, чтобы сила Ван-дер-Ваальса, то есть сила межмолекулярного и межатомного взаимодействия, была меньше силы магнитного взаимодействия. Локальное расстояние между зондовым датчиком и поверхностью в каждой точке постоянно, поэтому изменения изгиба кантилевера в процессе сканирования связаны с неоднородностью магнитных сил, действующих на зонд со стороны образца.

На рис. 5.8 приведены изображения поверхности магнитного диска в нанодиапазоне соответственно после первого и второго прохода измерений.

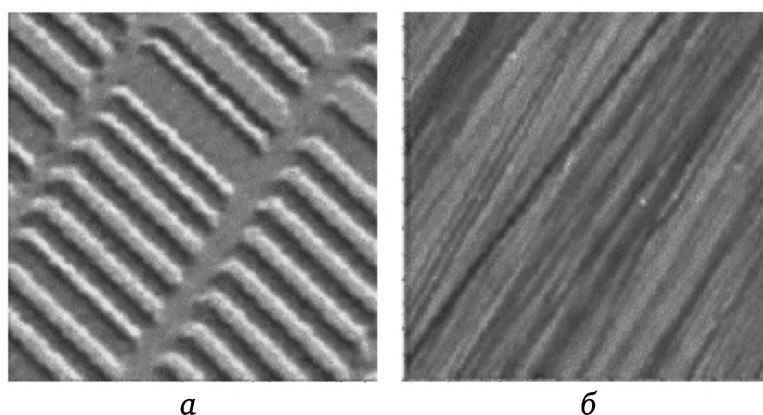


Рис. 5.8. Исследование поверхности магнитного диска:
 а — АСМ-изображение; б — МСМ-изображение

Для большинства таких измерительных систем характерно атомное разрешение, минимальный шаг сканирования от 0,01 до 0,001 нм, максимальный размер кадра не превышает 100×100 мкм. Подавляющее большинство зондовых приборов выпускается с целью решения задач микроскопии высокого разрешения, вплоть до атомного, и является наиболее эффективным методом изучения рельефа поверхности.

Нанооптика занимается изучением нанообъектов с помощью взаимодействия света с веществом. При этом используются два основных подхода: ограничение размеров источника или детектора света и ограничение области взаимодействия излучения с исследуемым образцом.

Источники излучения в обоих случаях помещаются на расстоянии нескольких нанометров от поверхности исследуемого образца. При передвижении такого нанометрового источника вдоль поверхности регистрируется оптическое изображение или картина взаимодействия излучения с веществом с разрешением, ограниченным размерами источника или областью взаимодействия излучения с образцом.

Ближнепольная оптическая микроскопия — это оптическая микроскопия, обеспечивающая разрешение лучшее, чем у обычного оптического микроскопа. Повышение разрешения достигается детектированием рассеяния света от изучаемого объекта на расстояниях меньших, чем длина волны света.

Типичные схемы экспериментальных установок для апертурной микроскопии ближнего поля с использованием волокна в качестве источника излучения и детектора представлены на рис. 5.9.

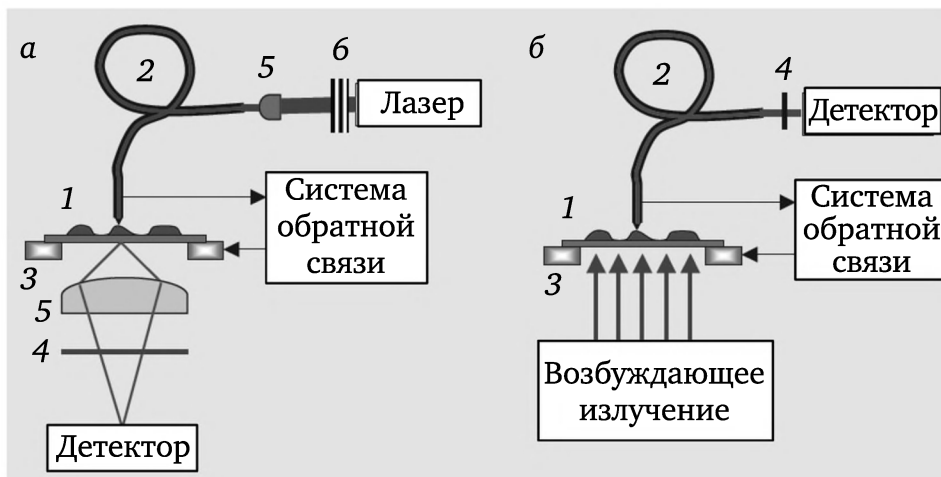


Рис. 5.9. Схемы апертурной микроскопии ближнего поля:

а — ближнее поле используется в качестве возбуждающего поля;

б — регистрируется ближнее поле флуоресцирующего образца

1 — образец; 2 — оптическое волокно; 3 — XYZ-сканер; 4 — система оптических фильтров; 5 — собирающий объектив; 6 — поляризатор

5.3. Наномеры длины и измерение перемещений

Важнейшим этапом в решении задач метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне является создание вещественных носителей размера — мер с программируемым нанорельефом поверхности, которые обеспечивают калибровку средств измерений с наивысшей точностью. Именно такие трехмерные меры малой длины (рис. 5.10) — материальные носители размера — позволяют осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров РЭМ и СЗМ.

Они предназначены для перевода этих сложных устройств из разряда приборов для визуализации исследуемого объекта в средства измерений. Приборы для измерений линейных размеров объектов исследования обеспечивают привязку измеряемых величин в нанометровой области к первичному эталону единицы длины — метру.

Конструктивно мера, получившая название МШПС-2.0К, что расшифровывается как Мера Ширины и Периода, Специальная, номинальный размер 2,0 мкм, Кремниевая, сформирована на поверхности

монокристаллического кремния. Кремниевый чип с мерой имеет размер $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщину 500 мкм. Мера состоит из пяти одинаковых модулей, расположенных по четырем углам квадрата $1 \times 1 \text{ мм}^2$ и в его центре. Общий вид меры, одного из ее модулей и шаговой структуры модуля последовательно на разных увеличениях показан на рис. 5.11.

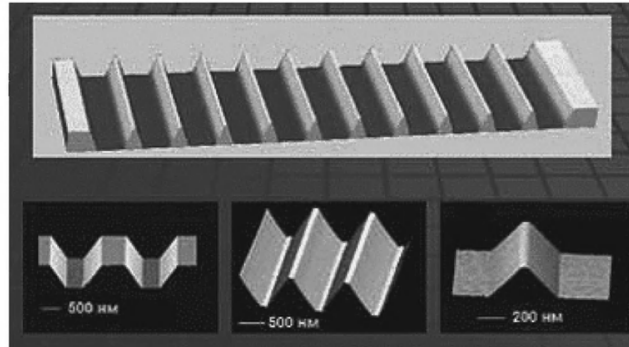


Рис. 5.10. Трехмерные меры малой длины

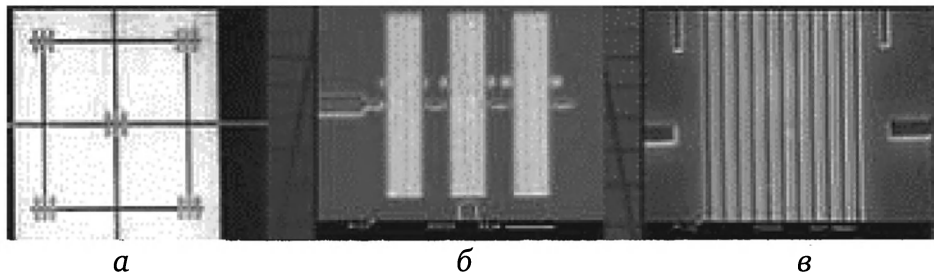


Рис. 5.11. Мера МШПС-2.0К:

а — мера из пяти модулей; *б* — один модуль меры; *в* — структура элемента модуля

Модуль представляет собой три шаговые рельефные структуры на поверхности кремния, состоящие из 11 канавок. Элементы рельефа структуры имеют профиль в форме трапеции с равными боковыми сторонами и заданным углом их наклона. Номинальный размер шага структуры — 2 мкм. Глубина рельефа структуры, ширина линии (выступа/канавки) задаются при изготовлении меры в зависимости от решаемых задач в диапазоне от 100 нм до 1500 нм. Длина элементов рельефа шаговой структуры составляет 100 мкм, а погрешность аттестации 1 нм.

Нанометр может быть вторичным эталоном, который привязан к первичному эталону длины. По аналогии с метром для нанометра можно дать следующую формулировку. Нанометр — это расстояние, которое проходит свет за $1/2997924580000000000$ с. Однако для практики оно ценности не имеет из-за того, что пока невозможно измерять такие малые промежутки времени.

В альтернативном решении для воспроизведения 1 нм можно использовать изменение размеров пьезокерамической пластинки ΔD при приложении к ее электродам электрического напряжения, которое

прямо пропорционально приложенному напряжению ΔU (обратный пьезоэффект):

$$\Delta D = d_{33} \Delta U,$$

где коэффициент пропорциональности d_{33} — пьезоэлектрический модуль. Чтобы размер пластинки изменился на 1 нм, необходимо подобрать материал и источник напряжения таким образом, чтобы пьезомодуль материала и напряжение источника при их перемножении давали точно 1 нм. Например, если взять керамику с пьезоэлектрическим модулем $d_{33} = 200 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н = 200 · 10—12 м/В и приложить напряжение к электродам в 5 В, то изменение размеров пластинки составит 1 нм.

Изменение размеров пьезопластинки не зависит от ее толщины. Это важно, ибо, создавая эталон длины, не следует думать о длине самого эталона. Для достижения высокой точности необходимо, чтобы прикладываемое напряжение было постоянно по амплитуде и направлено строго по направлению поляризации керамики, поскольку известно, что при приложении электрического напряжения по поляризации критических изменений пьезосвойств керамики не происходит. Для минимизации погрешности необходимо также поддерживать постоянной частоту прикладываемого электрического напряжения.

Пьезомодуль кварца d_{33} составляет около $2 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, что примерно на два порядка меньше, чем у пьезокерамики. Поэтому, прикладывая одинаковое напряжение на кварцевую пластинку и пьезопластинку, получим перемещение первой из них соответственно на два порядка меньше. Таким образом, сверхмалые перемещения можно обеспечивать с помощью пластинок из кристаллического кварца. Дополнительные плюсы кварца — высокая твердость и низкий коэффициент температурного расширения.

Для измерения малых перемещений могут быть использованы интерференционные методы. *Интерференция* света заключается в перераспределении интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких световых волн. Это явление сопровождается чередующимися в пространстве максимумами и минимумами интенсивности. Такое распределение интенсивности называется интерференционной картиной.

При создании интерференционных методов и средств измерения перемещений необходимо учитывать ряд существенных особенностей, характерных для большинства технических измерений, например, для контроля отсчетных систем прецизионных станков и координатно-измерительных машин. Первая особенность состоит в невозможности прямого определения перемещений исследуемой точки объекта. Например, невозможно измерить параметры обрабатываемой на станке детали непосредственно в зоне обработки или перемещение рабочей кромки инструмента при резании. Вторая особенность заклю-

чается в необходимости высокой точности измерений в широком диапазоне перемещений.

Схема лазерного интерферометра для измерения перемещений, учитывающая эти особенности, представлена на рис. 5.12.

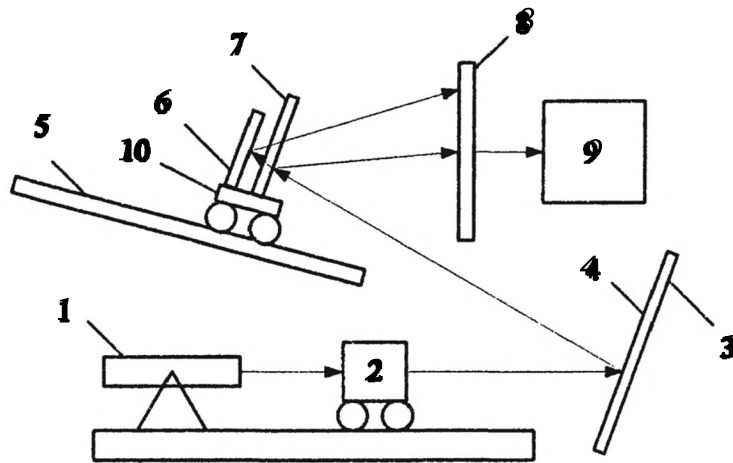


Рис. 5.12. Схема лазерного интерферометра:

- 1 — источник когерентного излучения; 2 — оптическая система; 3 — объект;
4 — отражающая поверхность объекта; 5 — основание интерферометра;
6 — светоделитель; 7 — отражатель; 8 — фотоприемное устройство;
9 — устройство регистрации и обработки информации; 10 — механизм перемещения

Система светоделителя перемещается вдоль оси оптической системы, чем обеспечивается регулировка чувствительности измерителя в заданных пределах за счет изменения расстояния между поверхностью объекта и светоделителем. Перед началом измерений определяется диапазон возможных значений перемещений. Система светоделителя с закрепленными на нем элементами при помощи механизма перемещения размещается на заданном исследуемому диапазону изменения перемещений расстоянии R от поверхности объекта до светоделителя. Изменение расстояния между ними приводит к изменению распределения интенсивности интерференционного поля в плоскости фотоприемного устройства. Для увеличения диапазона измеряемых перемещений R увеличивается, а для уменьшения диапазона — уменьшается изменением положения основания интерферометра.

Оптическая система фокусирует излучение от источника когерентного излучения на поверхность объекта в виде светящейся точки, которая в свою очередь является источником излучения, расположенным на поверхности объекта. Излучение от точки отражения попадает на светоделитель, разделяющий его на два луча: один луч отражается от поверхности светоделителя, а другой — от поверхности отражателя. Пространственное совмещение этих лучей происходит в области размещения фотоприемного устройства, то есть в месте наблюдения интерференционной картины. Фотоприемное устройство регистрирует интенсивность оптического поля в заданной области интерференцион-

ной картины, а устройство регистрации и обработки определяет перемещение поверхности объекта по результатам измерения интенсивности оптического поля с учетом установленного расстояния R .

5.4. Измерение массы и параметров вещества

Ключевая деталь большинства весов — упругий элемент. В весах для определения массы наночастиц размеры такого элемента должны лежать в области нано. В атомных весах с чувствительностью на уровне до 10^{-16} г используются кремниевая микроконсоль, которая называется кантилевер, и оптическая система регистрации ее положения.

Кантилевер и система регистрации для этого прибора заимствованы у атомно-силового микроскопа (АСМ). У атомных весов подобной конструкции существует ограничение на минимальную величину измеряемой массы. Это объясняется тем, что оптическая система регистрации требует, чтобы размеры кантилевера были больше длины источника света — диодного лазера. В реальных экспериментах используют кантилеверы, длина и ширина которых более 5 мкм. Масса такого кантилевера при толщине в 1 мкм около 10^{-10} г, а минимально достижимая погрешность измерений находится на уровне 10^{-16} г.

Для повышения чувствительности весов необходимо использовать кантилеверы субмикронного размера, что требует отказа от использования оптической системы регистрации со свойственным ей дифракционным ограничением. Измерение массы величиной в 10^{-18} г достигнуто с помощью кремниевого кантилевера, на поверхности которого есть проводящая золотая дорожка. В тонкой пленке золота наблюдался пьезорезистивный эффект, заключающийся в том, что при изгибе кантилевера происходит изменение электрического сопротивления пленки золота. Для достижения высокой чувствительности измерений используется углеродная нанотрубка (УНТ) длиной 254 нм и диаметром 2,09 нм. Масса трубки составляет $2,33 \times 10^{-18}$ г. В результате удалось зарегистрировать массу одного атома золота.

Для регистрации положения упругого элемента в измерительную электрическую цепь включены источник тока, УНТ и металлический электрод. Электрод подносят к нанотрубке до появления через зазор тока эмиссии. При колебаниях УНТ меняется зазор нанотрубка-электрод, и соответственно происходит модуляция тока эмиссии. Зазор начинал излучать радиоволны. Их частота, зарегистрированная радиоприемником, совпадает с частотой колебаний УНТ. При попадании атомов золота на поверхность нанотрубки частота ее колебаний меняется дискретно. Минимальный размер дискреты соответствует присоединению одного атома.

Пример массива кантилеверов с пьезоэлектрической системой регистрации приведен на рис. 5.13.

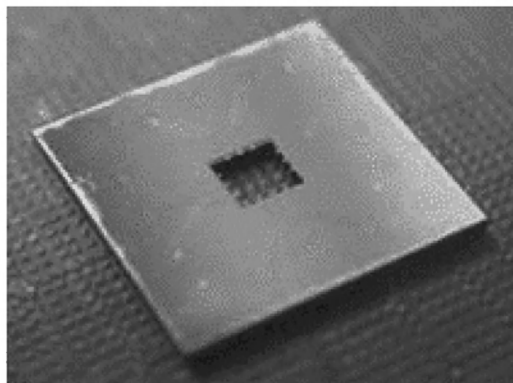


Рис. 5.13. Система микрокантилеверных датчиков

Система микрокантилеверных датчиков расположена внутри квадратного колодца. Такая конструкция может служить основой для создания сверхчувствительных сенсоров на химические и биологические вещества. Сенсор на определенное вещество должен отличать именно это вещество от всех остальных. Эту задачу решает оптимальное формирование на поверхности чувствительного элемента сенсора рецепторного слоя, который должен избирательным образом реагировать только на искомое вещество.

В настоящее время сенсоры работают с кантилеверами микронного размера, что позволяет не только наносить надежным образом рецепторные слои, но и уверенно регистрировать изгиб кантилевера. В зависимости от баланса сил в слое рецептор-вещество кантилевер может изгибаться как в сторону слоя, так и в обратную сторону. Это дает дополнительную информацию о характере межмолекулярных сил в слое.

Апертурой называют характеристику оптического прибора, описывающую его способность собирать свет и противостоять дифракционному размытию деталей изображения. Положение зонда отслеживается с помощью системы обратной связи, измеряющей силу взаимодействия между острием волокна и поверхностью образца. Результатом экспериментов является не только оптическое изображение образца, но и топографическая картина.

Разрешение системы ограничено размерами острия волокна, а также диаметром расположенной на острие апертуры. В отдельных случаях размеры апертуры на острие волокна составляют около 30 нм. Это ограничение размеров отверстия связано не только со сложностями производства, но и с трудностью проникновения света через столь малые апертуры.

Пространственное разрешение может быть улучшено при использовании безапертурной микроскопии ближнего поля. В этом случае в качестве нанометрового зонда используется острие иглы. Для получения высокого пространственного разрешения применяется излучение, рассеянное этим острием. Разрешение метода ограничено лишь радиусом кривизны иглы.

Схема установки для таких измерений представлена на рис. 5.14.

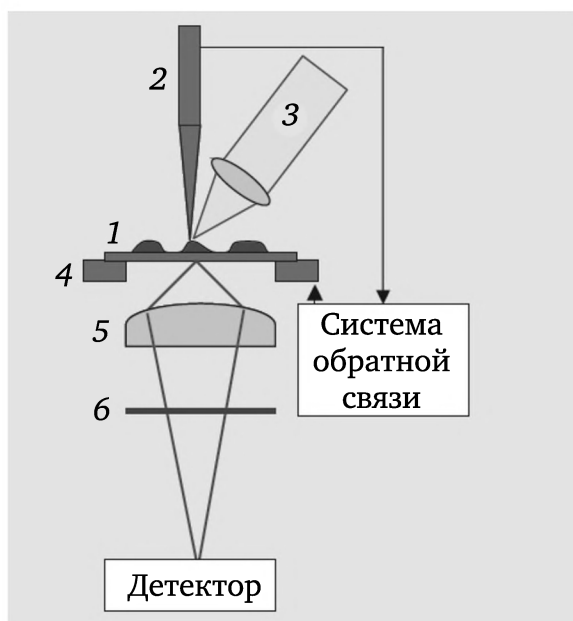


Рис. 5.14. Схема безапертурной микроскопии ближнего поля:

1 — образец; 2 — зонд; 3 — возбуждающее излучение; 4 — сканер;
5 — собирающий объектив; 6 — поляризатор.

При рассеянии внешнего возбуждающего излучения на острие образуются как ближнее, так и дальнее поле. Однако при достаточно близком расположении зонда над образцом основной вклад в регистрируемый сигнал дает именно взаимодействие с ближним полем.

Одной из важнейших механических характеристик наноструктурированных материалов является их твердость. Поскольку измерение твердости не сопровождается разрушением изделия, такие методики широко распространены в промышленности и используются при контроле технологических процессов, определении эксплуатационных характеристик изделий и выборе режимов механической обработки.

Для измерения механических свойств в субмикронном и нанометровом масштабах применяются контактные методы, в основе которых лежит контроль взаимодействия твердого наконечника известной формы, который называется *индентором*, с поверхностью материала. К контактным методам относятся вдавливание в материал, а также нанесение и анализ царапин. Первый метод называется *наноиндентирование*, а второй — *склерометрия*.

При измерении механических свойств в нанометровых масштабах особое внимание необходимо уделять шероховатости поверхности исследуемого образца, так как она влияет на определение площади контакта, поскольку индентор касается поверхности не в одном месте, а имеет несколько пятен контакта. При этом реальная площадь контакта получается меньше, чем определяемая из модели. Как правило, требование по шероховатости образца формулируется в методике измерения и должно соблюдаться при измерениях, а в алгоритмы расчета

вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие неидеальность исследуемой поверхности.

Другая важная задача при измерениях в нанометровом масштабе — корректное определение функции формы наконечника, отражающее зависимость площади контакта от глубины внедрения индентора. Это объясняется тем, что вершина любой, даже хорошо заточенной, иглы всегда имеет небольшой радиус закругления, что приводит к недооценке площади контакта и, следовательно, к неправильному вычислению твердости и модуля упругости. Площадь контакта зависит не только от геометрии индентора и шероховатости в области контакта, но и от упругопластического отклика материалов, многие из которых образуют при индентировании по периметру отпечатка пластически выдавленные навалы. В результате при максимальной нагрузке наконечник входит в контакт с приподнятой частью материала, то есть реальная площадь контакта оказывается больше теоретической.

Возможность визуализации области измерения до и после испытаний позволяет оценить степень влияния на результаты шероховатости и навалов. Измерение методом микротвердости по остаточному отпечатку в микромасштабах регламентируется ГОСТ 9450—76, в соответствии с которым минимальная нагрузка составляет 5 г, а размер отпечатка должен быть не менее 4 мкм, что обусловлено предельными техническими характеристиками оптической системы наблюдения отпечатка.

Исследование остаточного отпечатка методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) дает возможность определить не только проекцию его площади, но и глубину, а также учесть площадь пластических навалов при определении контактной площади отпечатка (рис. 5.15).

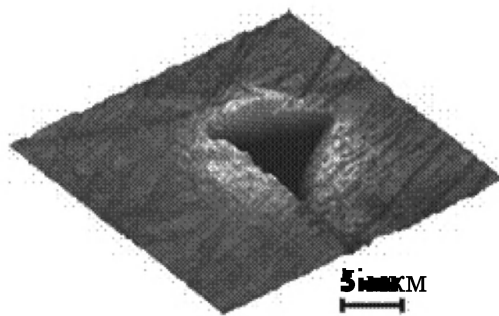


Рис. 5.15. Трехмерное СЗМ-изображение микроотпечатка на стали

При переходе к наномасштабным измерениям и уменьшении глубины внедрения индентора до 50 нм на результаты могут оказывать значительное влияние эффект упругого восстановления и шероховатость поверхности, что накладывает ограничения на возможность применения метода измерения твердости по восстановленному отпечатку.

Наиболее распространенным способом определения механических свойств в наномасштабах является измерительное динамическое индентирование, в основе которого лежит определение и анализ зави-

симостей прикладываемой нагрузки от глубины внедрения индентора (рис. 5.16).

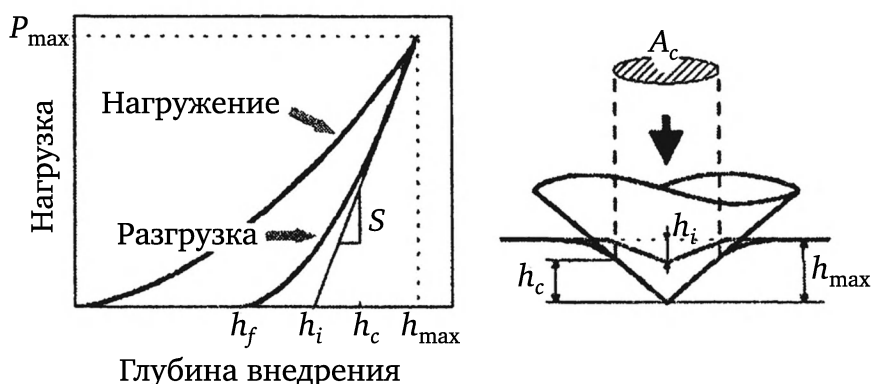


Рис. 5.16. Динамическое индентирование

В этом методе твердость определяется как отношение максимальной приложенной нагрузки $P_{\max}$ к площади S проекции отпечатка, причем его визуализация не предусмотрена. Площадь проекции отпечатка определяется по известной геометрии наконечника с площадью проекции отпечатка A и контактной глубине индентирования, вычисленной по кривой нагружения-разгрузки. Основное достоинство метода наноиндентирования заключается в том, что твердость определяется в момент максимального внедрения наконечника, то есть до начала упругого восстановления материала.

Измерение твердости методом склерометрии заключается в анализе профиля царапин, нанесенных на поверхность материала, причем твердость исследуемого материала определяется относительно известной твердости стандартного образца по соотношению нагрузок и ширин царапин, полученных на исследуемом и стандартном образцах (рис. 5.17).

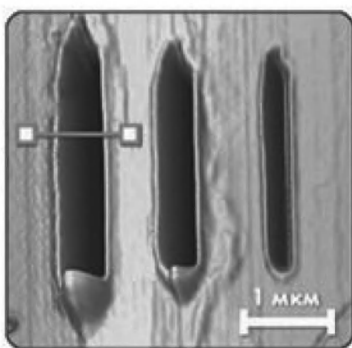


Рис. 5.17. Трехмерное СЗМ-изображение царапин на сапфире

При измерении твердости в наномасштабе метод склерометрии имеет ряд преимуществ перед вдавливанием, а именно: в результате усреднения данных в рамках обработки одной царапины уменьшается влияние шероховатости и поверхностных дефектов; снижается влияние эффекта упругого восстановления ширины царапины по сравнению

с периметром отпечатка при индентировании; появляется возможность выбирать угол атаки индентора при царапании (ребром или гранью). Склерометрия дает возможность анализа навалов по краям царапины, а также изучения *анизотропии* механических свойств материала, то есть неодинаковости его свойств по различным направлениям.

Сканирующий нанотвердомер на базе СЗМ представляет особый класс приборов, совмещающих в себе функции нанотвердомера и СЗМ (рис. 5.18).

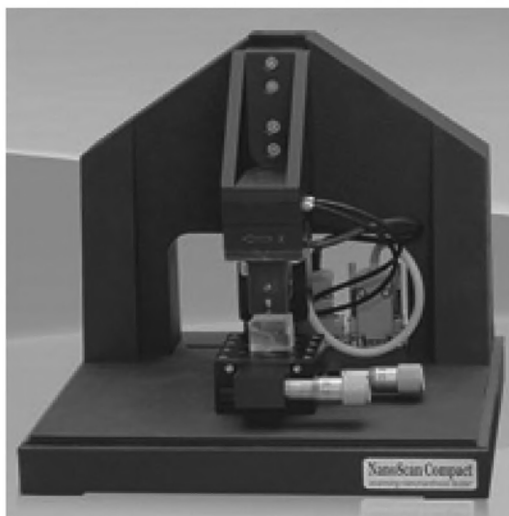


Рис. 5.18. Сканирующий нанотвердомер

В качестве чувствительного элемента в нанотвердомере применяется пьезорезонансный зондовый датчик, позволяющий сканировать рельеф поверхности. В качестве инденторов используются наконечники из синтетического алмаза. Наиболее распространенным индентором является *индентор Берковича*, который представляет собой усеченную трехгранную алмазную пирамиду. В приборе реализованы методы микроиндентирования, измерительного динамического индентирования и склерометрии.

Измерять параметры частиц требуется, в частности, при контроле экологических параметров среды. Основной прибор для контроля чистоты помещений — лазерный счетчик частиц в воздухе — имеет предельную чувствительность 100 нм. Перейти к меньшим частицам мешают чисто физические причины — необходимость увеличения мощности лазера приводит к нагреву и даже сгоранию исследуемых частиц, становится заметным рассеяние на флуктуациях плотности воздуха.

Для измерений в нанодиапазоне в дополнение к оптическому счету частиц применяется их укрупнение. Приборы, в которых используется такой принцип, получили название счетчиков ядер конденсации (*condensation nucleus counters — CNC*), или счетчиков конденсированных частиц (*condensation particle counter — CPC*). Схема такого прибора приведена на рис. 5.19.

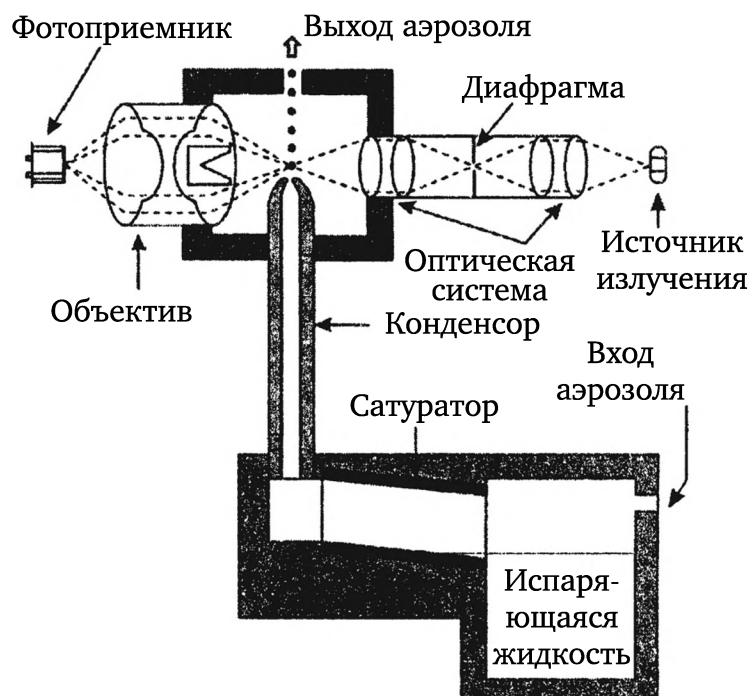


Рис. 5.19. Схема счетчика конденсированных частиц

Поступающие на вход прибора частицы оказываются в среде насыщенного пара специального вещества и затем в конденсоре, где их размер увеличивается вследствие конденсации пара на каждой отдельной частице, в силу особенностей процесса укрупняются до одного и того же размера порядка 30—60 нм. Укрупненные частицы попадают в лазерный счетчик и прокачиваются по отдельности через луч лазера. Концентрация наночастиц после их укрупнения определяется по числу импульсов рассеянного частицами света и с учетом объема прокаченного воздуха. Поскольку такая концентрация часто весьма велика, во многих приборах при превышении некоторой величины предусмотрен переход от счета отдельных частиц к определению их концентрации менее точным, чем счет отдельных частиц, фотометрическим методом.

Дифференциальные анализаторы подвижности (*differential mobility analyzer — DMA*) позволяют получить распределение частиц по размеру, при этом его действие основано на принципе разделения частиц в электрическом поле по их подвижности. Схема такой измерительной системы представлена на рис. 5.20.

Дифференциальный анализатор подвижности (ДАП) представляет собой цилиндрический коаксиальный конденсатор, наружный металлический цилиндр которого заземлен, а на центральный цилиндр-электрод подается высокое напряжение. Поток заряженных аэрозольных частиц проходит между наружным и центральным цилиндрами. Подвижность аэрозольной частицы определяется ее электростатическим зарядом и массой. Таким образом частицы одного размера и заряда будут вести себя в электромагнитном поле одинаково. В зазор между наружным цилиндром внутреннего радиуса r_2 и центральным цилин-

дром наружного радиуса r_1 поступает поток не содержащего загрязнений чистого воздуха.



Рис. 5.20. Схема дифференциального анализатора подвижности частиц

Предварительно заряженный анализируемый аэрозоль поступает через отверстия, сделанные по окружности радиуса r_2 , лежащей на внутренней поверхности наружного цилиндра. Под действием электромагнитного поля частицы движутся к центральному цилиндру, причем, чем больше их заряд и меньше масса, тем быстрее они достигают его. Если на расстоянии L от точки ввода частиц в поток на поверхности внутреннего цилиндра сделано отверстие, в него попадут только частицы с одним и тем же зарядом, и при их равновесной заряженности — частицы одинакового размера. В результате, поток воздуха, выходящий из внутреннего канала в центральном цилиндре, содержит частицы одинакового размера и заряда, то есть, подавая на вход ДАП полидисперсный аэрозоль, на выходе можно получить выделенные из потока монодисперсные частицы.

На выходе ДАП для регистрации отсепарированных монодисперсных заряженных наночастиц могут устанавливаться различные приборы, например коллектор наночастиц (*Nanometer Aerosol Sampler — NAS*). Это устройство, в котором заряженные частицы осаждаются на подложку. На рис. 5.21 представлена схема его действия.

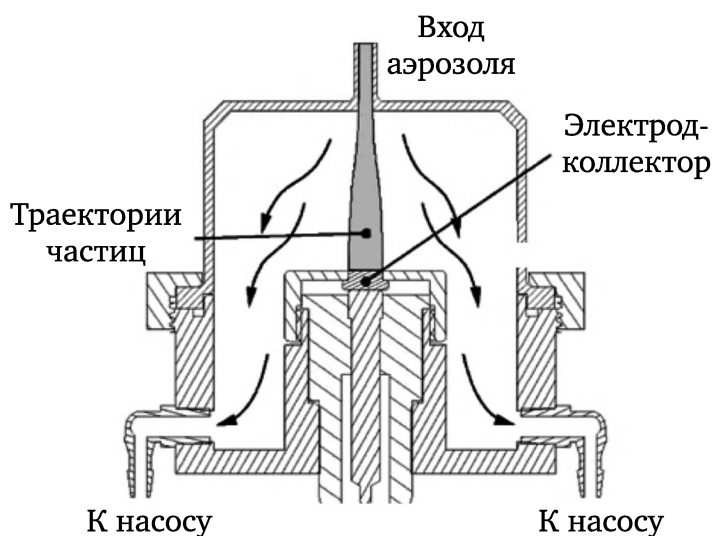


Рис. 5.21. Схема действия коллектора наночастиц

Поток заряженных аэрозольных частиц поступает на вход прибора. Напротив входного патрубка на электроде, подключенном к источнику высокого напряжения, устанавливается подложка, на которую частицы осаждаются под действием электростатических сил. Хотя наночастицы имеют большие коэффициенты диффузии, используемая геометрия аэрозольного потока обеспечивает высокую эффективность их осаждения.

5.5. Измерение силовых напряжений

Измерение силовых напряжений позволяет решить широкий круг практических задач, включая исследования в области создания искусственных измерительных систем, действующих подобно органам человека — «электронного носа» и «электронного языка». Актуальна также задача создания экстренной диагностики пациентов, которую затруднительно реализовать без непрерывного контроля веществ в средах, содержащих посторонние примеси. Эта проблема решается в случае использования микрокантилеверов, появление которых обусловлено интенсивным развитием атомно-силовой микроскопии.

Условием для корректной работы силового микроконсольного датчика является чувствительность одной из его поверхностей к исследуемому сорбированному веществу. Как правило, датчик имеет одну плоскость, специфичную к сорбату, в то время как другая остается к нему инертной.

На рис. 5.22 приведен пример микроконсоли с белковым рецепторным слоем.

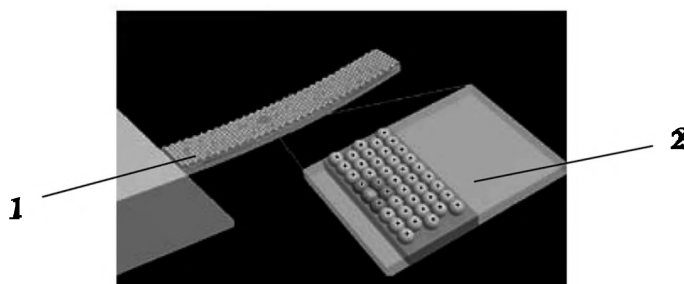


Рис. 5.22. Микроконсоль с белковым рецепторным слоем:

1 — микроконсоль; 2 — белковый рецепторный слой

Используется также микроконсоль с низкомолекулярным рецепторным слоем (рис. 5.23).

Способ использования микрокантилеверов заключается в том, что при связывании определяемого вещества с рецептором на поверхности кантилевера происходит статическая деформация кремниевой консоли, величина изгиба которой прецизионно определяется с помощью лазерно-оптической системы (рис. 5.24).

Как следствие изменения в сенсорном слое поверхностной энергии в нем возникают силы избыточного давления или поверхностного

натяжения. В связи с этим, показатель направления изгиба кантилевера в микромеханических анализаторах является существенным, так как характеризует набор основных факторов, отвечающих за энергетическое состояние системы в целом.

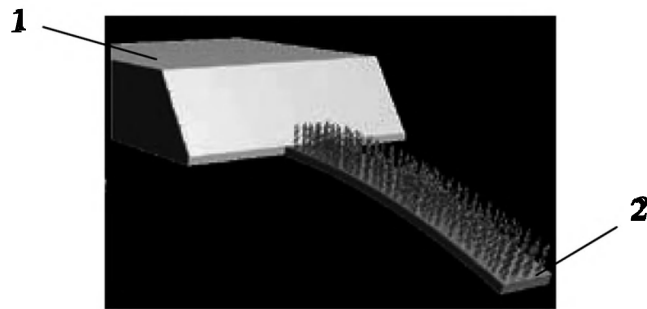


Рис. 5.23. Микроконсоль с низкомолекулярным рецепторным слоем:
 1 — микроконсоль; 2 — низкомолекулярный рецепторный слой

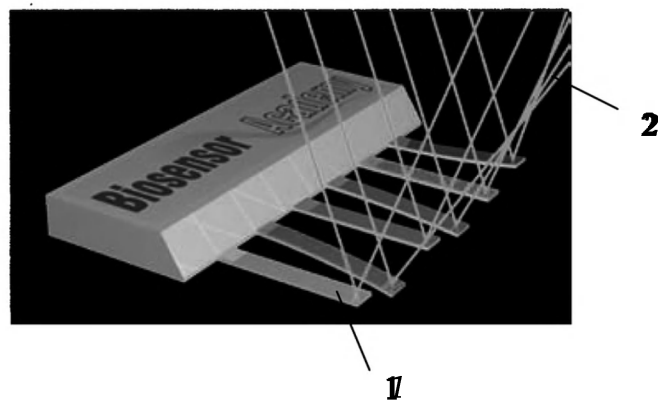


Рис. 5.24. Лазерно-оптическая система:
 1 — кремниевая консоль; 2 — воздействие вещества

Не имеющая альтернативных аналогов особенность кантилевера заключается в способности прямого измерения натяжения в пленках, помещенных на одну из его сторон. В этом случае степень влияния неспецифического связывания на аналитический сигнал вследствие низких энергий этих связей и, следовательно, их незначительного вклада в поверхностное натяжение рецепторной пленки, заметно уменьшается. Уникальность информации состоит в том, что она непосредственно характеризует энергию межмолекулярных взаимодействий внутри пленки, преобразующуюся в статический изгиб кантилевера, то есть в энергию аналитического сигнала. Поверхностные силы в молекулярных пленках на твердых подложках могут быть обусловлены электростатическим взаимодействием отдельных молекул или их комплексов.

На этом принципе создан универсальный прибор — анализатор на основе микрокантилеверов, позволяющий с высокой точностью определять биологические или химические агенты в жидких средах (рис. 5.25).

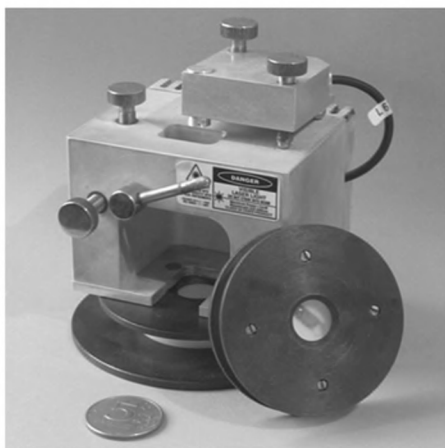


Рис. 5.25. Универсальная микрокантилеверная сенсорная система

Прибор позволяет использовать одновременно четыре микрокантилеверных датчика с чувствительностью определения степени их отклонения до 1 нм. Он может служить основой для создания прямого высокоточного медицинского анализатора, позволяющего осуществлять гормональный контроль, анализ лекарств, детектирование антител, бактерий, вирусов в сыворотке крови в режиме реального времени. Используя массив кантилеверов, модифицированных различными рецепторными слоями, прибор позволяет проводить анализ одной пробы одновременно на содержание в ней нескольких веществ. Управление прибором в принципе можно осуществлять через Интернет или локальную сеть, что позволит удаленно проводить анализ в режиме реального времени.

5.6. Контроль температуры и толщины нанослоев

Для бесконтактного контроля температуры и толщины перспективным является метод низкокогерентной тандемной интерферометрии. Метод основан на том, что зондирующий свет последовательно проходит через исследуемый образец, который выполняет роль первого интерферометра, и через оптический коррелометр, который является вторым интерферометром. Оптическая разность хода второго интерферометра может перестраиваться с высокой точностью. Преимуществами этого метода являются высокая постоянная чувствительность во всем диапазоне измеряемых оптических толщин и универсальность, поскольку измерять можно и толщину, и температуру.

Принципиальная схема тандемного интерферометра изображена на рис. 5.26.

Система содержит низкокогерентный источник света и два интерферометра, которые представляют собой линии задержки, связанные через оптическое волокно. Если оптические разности хода обоих интерферометров больше длины когерентности источника света, ни один из них в отдельности не дает интерференционного сигнала. Однако

в результате последовательного прохождения низкокогерентного света через обе линии задержки интерференция будет наблюдаться, если оптические разности хода L_1 и L_2 совпадут. Первый интерферометр делит импульс когерентности на два неперекрывающихся импульса с задержкой между ними L_1 . Во втором интерферометре каждый из двух импульсов на входе делится еще на два. В результате на выходе второго интерферометра получаем четыре импульса. При условии

$$\Delta L = |L_2 - L_1| < L_{\text{ког}},$$

где $L_{\text{ког}}$ — длина когерентности источника, два из четырех импульсов будут перекрываться и интерферироваться. Подстраивая длину одной опорной линии задержки под положение максимума интерференционной картины на выходе устройства, можно определить оптическую толщину другой линии задержки, которую представляет измеряемый объект, и зафиксировать ее изменения, возникающие при изменении размеров объекта, а также при изменении температуры. Абсолютные точности измерения оптической толщины ограничиваются точностью отсчетного устройства, используемого для определения разности хода, возникающей в опорной линии задержки.

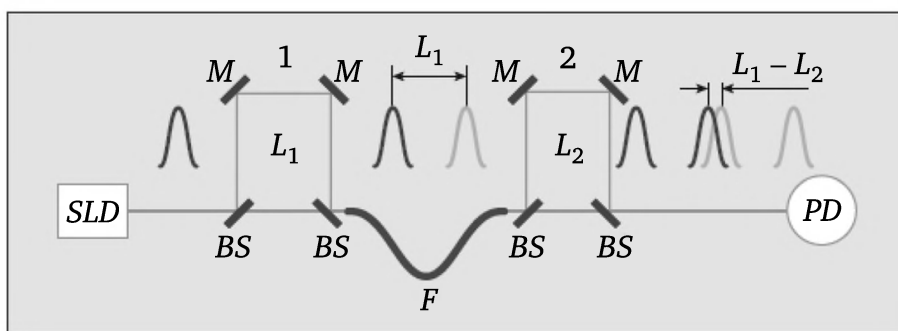


Рис. 5.26. Схема тандемного интерферометра:

SLD — низкокогерентный источник; F — соединяющее оптическое волокно; PD — фотоприемник; $L_{1,2}$ — оптическая разность хода первого и второго интерферометров соответственно; BS — делители света; M — зеркала

Примером нанотермометра является устройство, состоящее из комбинации неорганических и полимерных материалов. Они образуют высокоупорядоченные наноразмерные структуры (рис. 5.27).

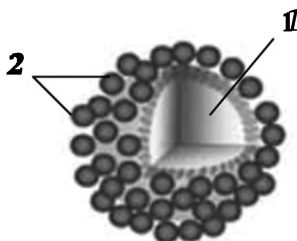


Рис. 5.27. Чувствительный элемент нанотермометра:

1 — ядро из золота; 2 — полимерные наносферы

Нанотермометр имеет около 30 нм в диаметре и реагирует на разницу температур до 60°C в объеме всего в 200 нм. Его структура состоит из частиц золота размером 20 нм с полимерными наносферами на ее поверхности. При изменении температуры размер наносфер меняется, что изменяет расстояние между ними. Это приводит к соответствующему изменению сигнала в измерительной схеме.

Объектом нанотехнологий являются не только малоразмерные объекты, такие как пленки, но и объемные материалы, модифицируемые с помощью нанотехнологий, такого типа, как нанокерамика. В некоторых случаях новые свойства наноматериалов обусловлены глубокими изменениями в самой природе исходных материалов, в частности, на квантовом уровне. Например, уменьшение размеров кристаллитов до масштаба нанометров ведет к появлению квантово-размерных эффектов, таких как уменьшение температуры плавления, спектральному сдвигу полос люминесценции, изменению динамики процессов фотовозбуждения, возникновению релаксации и электрооптических эффектов и т.д., что можно эффективно использовать в приборах.

Иногда применение модифицированных методов необходимо и для контроля свойств объемных материалов, созданных с использованием нанотехнологий. В частности, такая потребность возникает, когда материал формируется непосредственно в процессе изготовления изделия и невозможно получить адекватные контрольные образцы стандартной конфигурации. Подобная ситуация наблюдается при измерении теплового расширения материалов с малыми коэффициентами теплового расширения.

Для измерения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) твердых материалов созданы приборы, в которых реализованы различные методы измерения удлинения исследуемого образца: оптические, рентгеновские и механические. Однако, когда значения ТКЛР исследуемых материалов, включая наноматериалы, меньше $2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, только использование высокочувствительных интерферометрических методов позволяет обеспечить контроль температурного расширения образцов с требуемой точностью.

Метод интерференционной дилатометрии основан на точном интерференционном измерении температурного удлинения, при этом в соответствии с изменением длины образца регистрируются интерферометрические сигналы (картины полос), по изменениям фаз которых определяют удлинение образца, выраженное в длинах волн оптического излучения. Основным ограничением классических интерференционных дилатометров является необходимость изготовления образцов специальной формы. Это особенно существенно, если наноматериал не поддается точной механической обработке или полировке, либо технология создания материала не позволяет получить его в достаточном объеме, в частности, из-за ограничений, вносимых технологическим процессом изготовления, или если наноматериал содержит дорогостоящие компоненты. Кроме того, поскольку в некоторых типах нанотехнологий материал создается в форме изделия, возникает необходимость

измерять ТКЛР непосредственно изделия, так как образцы материала могут просто не существовать.

Одно из решений проблемы контроля образов материалов и изделий с нерегулярной поверхностью состоит в применении разновидности интерференционного метода — спекл-интерферометрии, которая позволяет изучать случайные интерференционные поля, формируемые при диффузном отражении когерентной световой волны от нерегулярных поверхностей. Современный уровень оптики, измерительной техники и компьютерных технологий позволяет обеспечить формирование, регистрацию и обработку спекл-интерференционных полей с извлечением необходимой информации о температурном расширении исследуемого образца.

В высокоточных интерференционных дилатометрах для абсолютных измерений ТКЛР используется схема интерферометра Физо (рис. 5.28), образованного двумя прозрачными пластинами M_1 и M_2 , между которыми размещается образец исследуемого материала.

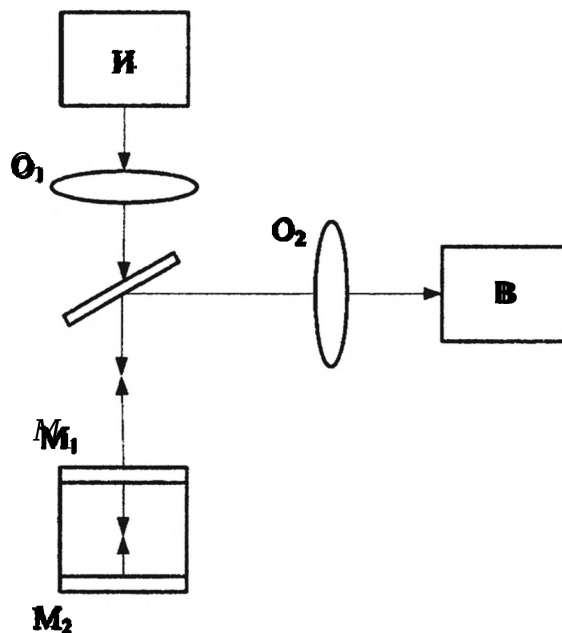


Рис. 5.28. Оптическая схема интерферометра Физо для определения температурного удлинения исследуемых образцов:

И — источник когерентного излучения; В — видеокамера; O_1 — коллиматор; O_2 — объектив; M_1, M_2 — прозрачные пластины

При тепловом расширении образца изменяется оптическая длина пути волны, отраженной от поверхности верхней пластины M_1 по отношению к оптической длине пути волны, отраженной от нижней пластины M_2 . При этом измерение изменения разности фаз интерферирующих волн позволяет определять тепловое расширение образца с высокой точностью.

При контроле ТКЛР наноматериалов схема интерферометра Физо во многих случаях неприменима, поскольку образец или исследуемое изделие из наноматериала может иметь неплоский рельеф, негладкую

поверхность или микроскопические размеры, что делает размещение на нем верхней пластины весьма затруднительным или невозможным. В таких случаях используют схему интерферометра Майкельсона, в которой измерительная волна отражается непосредственно от поверхности образца, а опорная волна — от подставки образца (рис. 5.29).

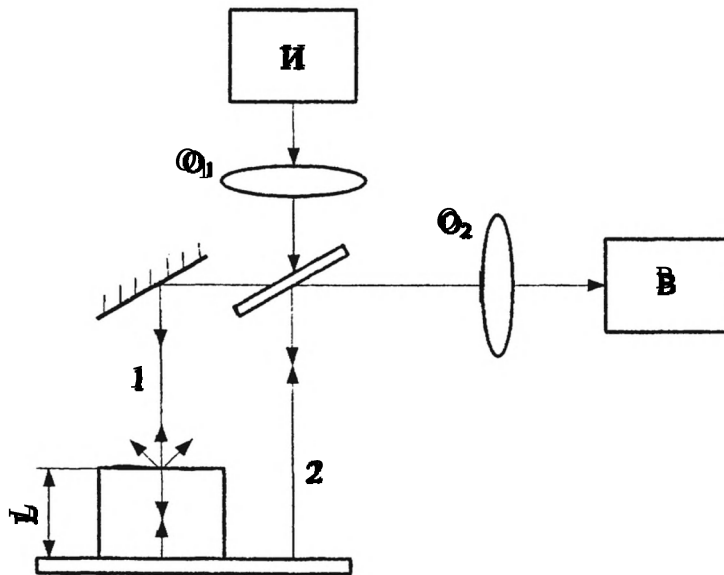


Рис. 5.29. Оптическая схема интерферометра Майкельсона для определения температурного удлинения исследуемых образцов:

И — источник когерентного излучения; В — видеокамера; O_1 — коллиматор; O_2 — объектив; M_1, M_2 — прозрачные пластины; 1 — измерительная волна; 2 — опорная волна

При освещении шероховатой поверхности когерентным излучением происходит диффузное отражение с формированием картины спеклов (от англ. *speckle* — крапинка, пятнышко). При тепловом расширении образца интенсивность и фаза спеклов динамически изменяются, причем изменения фазы характеризуют нормальное смещение поверхности образца. В процессе измерений требуется отслеживать изменения фазы отдельных спеклов. Поскольку контраст спеклов при температурном расширении исследуемого образца изменяется случайным образом во времени и от спекла к спеклу, необходимо разделять спеклы по амплитуде и вычислять изменения фазы по набору спеклов. В отличие от традиционной схемы интерферометра Физо, при помощи которого наблюдают интерференцию плоских волн, использование спекл-интерферометра для контроля образцов ТКЛР с неплоским рельефом и негладкой поверхностью требует фокусировки на поверхности образца при помощи объектива O_2 . Регистрация интенсивности отдельных спеклов, характеризующих нормальные смещения поверхности со сложным рельефом, обеспечивается видеокамерой.

Дефокусировка изображения в плоскости видеокамеры пренебрежимо мала при нормальном смещении поверхности образца вдоль оптической оси на малую величину. Пусть, например, перемещение не достигает половины длины волны $\lambda/2$. Из-за изменения разности

хода в интерферометре распределение интенсивности в пятнах спекл-структуры в плоскости видеокамеры изменится. Но когда перемещение достигнет $\lambda/2$ и изменение оптической разности хода станет равным λ , распределение интенсивности в пятнах восстановится, и спекл-структура окажется идентичной исходной, которая была до смещения поверхности образца. Спекл-структура в плоскости видеокамеры восстанавливается всякий раз, когда разность хода принимает значение, равное целому числу длин волн.

Условие получения необходимой информации о температурном удлинении образца состоит в обеспечении достаточной глубины фокусировки на поверхности образца. Если смещение поверхности превысит определенное значение, дефокусировка изображения в плоскости видеокамеры изменит вид спекл-структуры, и нельзя будет найти положения, при которых она вновь будет идентичной самой себе.

Допустимое смещение поверхности зависит от характеристики оптического прибора, описывающей его способность собирать свет — угловой апертуры α объектива O_g , который формирует изображение. Допустимое нормальное смещение поверхности образца должно быть

$$\Delta L \leq 2\lambda / \alpha^2.$$

При высоте образца $L = 20$ мм, ТКЛР слабо расширяющегося наноматериала при повышении температуры образца в диапазоне до 1000 К изменение длины образца составит 0,2 мкм, то есть менее половины длины волны излучения видимого диапазона длин волн. Влияние дефокусировки вследствие удлинения образца пренебрежимо мало, и поэтому при определении ТКЛР слабо расширяющихся материалов основное внимание следует уделить обеспечению фокусировки в диапазоне отклонений рельефа поверхности образца.

При малых α возникают значительные потери регистрируемой мощности диффузно отраженного излучения, поэтому при контроле образцов материалов с шероховатой поверхностью необходим источник излучения достаточной мощности. Энергетические расчеты показывают, что в дилатометрах с использованием спекл-интерферометра мощность излучения источника должна быть не менее 5 мВт.

При регистрации спекл-интерференционных полей требуется, чтобы средний размер спеклов в плоскости регистрации превышал размер пикселей видеокамеры, так как в противном случае снижается контраст спекл-структуры и наблюдаются значительные потери полезной информации. Изменения спекл-интерференционных полей в спекл-интерферометре контролируются с точностью до 0,5 нм.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под нанотехнологией?
2. Из чего состоит интерференционный микроскоп?

3. Что представляет собой наномера длины?
4. Как определяется масса наночастиц?
5. В чем заключается метод низкокогерентной тандемной интерферометрии?

6

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

6.1. Подготовка к работе

Компьютерное моделирование выполняется на персональном компьютере с применением программ типа Electronic Workbench (EWB). Окно программы EWB содержит поле меню, линейку контрольно-измерительных приборов и линейку библиотек компонентов, одна из которых в развернутом виде показана в левой части окна. В рабочем поле программы располагается моделируемая схема с подключенными к ней иконками контрольно-измерительных приборов и краткое описание схемы. При необходимости каждый из приборов может быть переведен в режим установки его параметров и наблюдения результатов. Линейки прокрутки используются только для перемещения схемы.

Перед созданием чертежа принципиальной схемы средствами программы EWB, необходимо на листе бумаги подготовить ее эскиз с примерным расположением компонентов и с учетом возможности оформления отдельных фрагментов в виде подсхем. Целесообразно также ознакомиться с библиотекой готовых схем программы для выбора аналога или использования имеющихся решений в качестве подсхем.

В общем случае процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле EWB компонентов из библиотек программы в соответствии с подготовленным эскизом. Разделы библиотеки программы EWB поочередно могут быть вызваны с помощью меню *Window* или с помощью иконок, расположенных под линейкой контрольно-измерительных приборов. Каталог выбранной библиотеки располагается в вертикальном окне справа или слева от рабочего поля и устанавливается в любое место перетаскиванием стандартным способом — за шапку заголовка. Для открытия каталога нужной библиотеки необходимо подвести курсор мыши к соответствующей иконке и нажать один раз ее левую кнопку, после чего серый фон иконки меняется на желтый. Необходимый для создания схемы символ компонента переносится из каталога на рабочее поле программы движением мыши при нажатой левой кнопке, после чего кнопка отпускается для фиксирования символа и производится двойной щелчок по значку компонента.

В раскрывающемся диалоговом окне устанавливаются требуемые параметры (сопротивление резистора, тип транзистора и т.д.) и выбор подтверждается нажатием кнопки *Accept* или клавиши *Enter*. На этом этапе необходимо предусмотреть место для размещения контрольных точек и иконок контрольно-измерительных приборов.

Если в схеме используются компоненты одинакового номинала, например, резисторы с одинаковым сопротивлением, то номинал такого компонента рекомендуется задать непосредственно в каталоге библиотеки и затем переносить компоненты в нужном количестве на рабочее поле. Для изменения номинала компонента необходимо два раза щелкнуть мышью по символу его графического изображения и в раскрывающемся после этого окне внести изменения.

После размещения компонентов производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу компонента можно подключить только один проводник. Для выполнения подключения курсор мыши подводится к выводу компонента и после появления прямоугольной площадки синего цвета нажимается левая кнопка и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нем такой же прямоугольной площадки, после чего кнопка мыши отпускается, и соединение готово. При необходимости подключения к этим выводам других проводников в библиотеке *Passive* выбирается точка (символ соединения) и переносится на ранее установленный проводник. Первоначально точка имеет красный цвет. Необходимо щелкнуть мышью по свободному месту рабочего поля, чтобы точка стала черного цвета. Если эта точка действительно имеет электрическое соединение с проводником, то она полностью окрашивается черным цветом. Если на ней виден след от пересекающего проводника, то электрического соединения нет, и точку необходимо установить заново. После удачной установки к точке соединения можно подключить еще два проводника.

Если соединение нужно разорвать, курсор подводится к одному из выводов компонентов или к точке соединения и при появлении площадки нажимается левая кнопка, проводник отводится на свободное место рабочего поля, после чего кнопка отпускается. Если необходимо подключить вывод к имеющемуся на схеме проводнику, то проводник от вывода компонента курсором подводится к указанному проводнику и после появления точки соединения кнопка мыши отпускается. Прокладка соединительных проводников производится автоматически, причем препятствия — компоненты и другие проводники — огибаются по ортогональным направлениям (по горизонтали или вертикали).

Точка соединения может быть использована не только для подключения проводников, но и для введения надписей, например, указания величины тока в проводнике, его функционального назначения и т.п. Для этого необходимо дважды щелкнуть по точке и в раскрывшемся окне ввести необходимую запись (не более 14 символов), причем запись можно смещать вправо путем введения слева нужного количе-

ства пробелов. Это свойство может быть использовано и в том случае, когда позиционное обозначение компонента (например, *C1*, *R10*) накладывается на рядом проходящий проводник или другие элементы схемы.

Если необходимо переместить отдельный сегмент проводника, к нему подводится курсор, нажимается левая кнопка и после появления в вертикальной или горизонтальной плоскости двойного курсора производятся нужные перемещения.

Подключение к схеме контрольно-измерительных приборов производится аналогично. Причем для таких приборов, как осциллограф или логический анализатор, соединения целесообразно проводить цветными проводниками, поскольку их цвет определяет цвет соответствующей осциллограммы. Цветные проводники целесообразны не только для обозначения проводников одинакового функционального назначения, но и для проводников, находящихся в разных частях схемы, например, проводники шины данных до и после буферного элемента. Примеры такого оформления можно найти в каталогах готовых схем.

При обозначении компонентов необходимо придерживаться рекомендаций и правил, предусмотренных Единой Системой Конструкторской Документации (ЕСКД). Трудности могут возникнуть при выборе активных элементов — микросхем, транзисторов и тому подобных, особенно при необходимости использования компонентов отечественного производства, когда требуется установить точное соответствие функциональных обозначений выводов и параметров зарубежных и отечественных компонентов. Для облегчения этой задачи можно воспользоваться таблицами соответствия зарубежных и отечественных компонентов.

При импортировании в создаваемую схему другой схемы или ее фрагментов целесообразно действовать в следующей последовательности:

- командой *File > Save As* записать в файл создаваемую схему, указав его имя в диалоговом окне (расширение имени файла указывать не обязательно, программа сделает это автоматически);
- командой *File > Open* загрузить на рабочее поле импортируемую схему стандартным для *Windows* образом;
- командой *Edit > Select All* выделить схему, если импортируется вся схема, или выделить ее нужную часть;
- командой *Edit > Copy* скопировать выделенную схему в буфер обмена;
- командой *File > Open* загрузить создаваемую схему;
- командой *Edit > Paste* вставить содержимое буфера обмена на рабочее поле. После вставки импортируемая схема будет выделена и отмечена красным цветом (она может оказаться наложенной на создаваемую схему);
- клавишами управления курсором или ухватившись мышью за один из компонентов отбуксируйте импортированную часть в нужное место, после чего можно отменить выделение;

- после подключения импортированной схемы необходимо щелчками мыши пройти по всем ее компонентам, чтобы исключить их смещения, возникающие при буксировке и приводящие к ступенчатым искажениям проводников.

Перемещения отдельных фрагментов схемы при ее компоновке выполняются вышеописанным образом после выделения фрагмента. Если схема состоит из однотипных блоков, то целесообразно скопировать один такой блок, а затем путем копирования и вставки размножить его до нужного количества и выполнить необходимые соединения.

После подготовки схемы составляется ее описание (окно-ярлык вызывается из меню *Window > Description*), в котором указывается ее назначение. После проведения моделирования указываются его результаты.

Ответы на вопросы по пользованию программой даны в меню *Help*. Оно построено стандартным для *Windows* способом и содержит краткие сведения по всем необходимым командам, библиотечным компонентам и измерительным приборам, а также сведения о самой программе. Для получения справки по библиотечному компоненту его необходимо отметить на схеме щелчком мыши (он высветится красным цветом) и затем нажать клавишу *F1*.

При оформлении лабораторных работ удобно использовать следующие команды:

- *Copybits (CTRL + I)* — команда превращает курсор мыши в крестик, которым по правилу прямоугольника можно выделить нужную часть экрана; после отпускания левой кнопки мыши выделенная часть копируется в буфер обмена, затем его содержимое может быть импортировано в любое приложение *Windows*;
- *Print Screen* — производится копирование всего экрана;
- *Alt + Print Screen* — производится копирование активной в данный момент части экрана, например, диалогового окна.

Расчетную часть заданий следует выполнять последовательно по пунктам, данным в пояснениях к решениям задач.

6.2. Резистивные измерительные преобразователи

Задание

Построить модель для исследования потенциметрического измерительного преобразователя с питанием на постоянном токе $V_1 = 1$ В при включении его по схеме делителя с одним постоянным сопротивлением $R_1 = 10$ кОм. Максимальное сопротивление потенциометра $R_2 = 20$ кОм. Определить выходное напряжение M_1 измерительного преобразователя по модели при уменьшении сопротивления потенциометра на 5 кОм и 10 кОм и использовании мультиметра в качестве

нагрузки. Сравнить результаты моделирования с расчетными значениями.

Пояснения к работе

Потенциометрические измерительные преобразователи относятся к резистивным преобразователям. Они выполняются в виде реостата, подвижной контакт которого перемещается под воздействием измеряемой величины. Выходной величиной схемы является напряжение, функционально связанное с положением подвижного контакта при его линейном или вращательном перемещении.

Модель для исследования потенциометрического измерительного преобразователя с питанием на постоянном токе при включении его по схеме делителя с одним постоянным сопротивлением приведена на рис. 6.1.

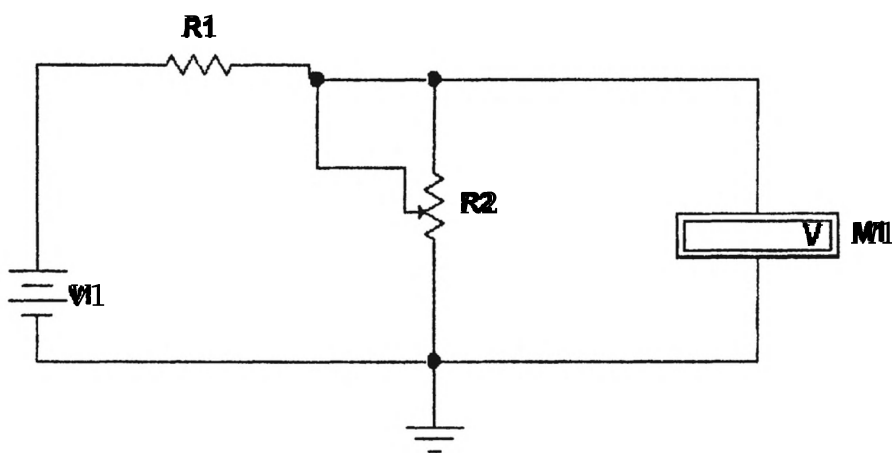


Рис. 6.1. Модель для исследования потенциометрического измерительного преобразователя

После определения выходного напряжения $M1$ измерительного преобразователя по модели при уменьшении сопротивления ΔR потенциометра на 5 кОм и 10 кОм и использования мультиметра в качестве нагрузки вычисляются значения $M1$ для тех же значений изменения сопротивления потенциометра по формуле

$$M1 = \frac{V1R1(R2 - \Delta R)}{R2(R1 + R2 - \Delta R) + R1(R2 - \Delta R)}.$$

и сравниваются с результатами моделирования. По результатам сравнения делается вывод о точности моделирования.

6.3. Емкостные измерительные преобразователи

Задание

Построить модель для исследования емкостного измерительного преобразователя по схеме мостового выпрямителя на диодах с воз-

возможностью заземления электродов преобразователя. В одну диагональ моста включен измерительный преобразователь на емкостях $C1$ и $C2$ соответственно с отклонениями 60 и 50% от номинального значения 200 пФ. Напряжение источника переменного измерительного напряжения 30 В подключается ко второй диагонали через конденсаторы $C3 = C4 = 100$ пФ. Сравнить результаты моделирования с расчетными значениями.

Пояснения к работе

Принцип действия емкостных измерительных преобразователей основан на изменении емкости конденсатора при воздействии измеряемой величины на один из параметров преобразователя в соответствии с формулой

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

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика. ε_0 — электрическая постоянная ($8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м); S — площадь перекрытия пластин (м^2); δ — толщина диэлектрика, или расстояние между пластинами (м).

Для повышения чувствительности и линейности характеристик емкостных измерительных преобразователей используют дифференциальные мостовые схемы с заземлением электродов. Вариант такого включения показан на рис. 6.2.

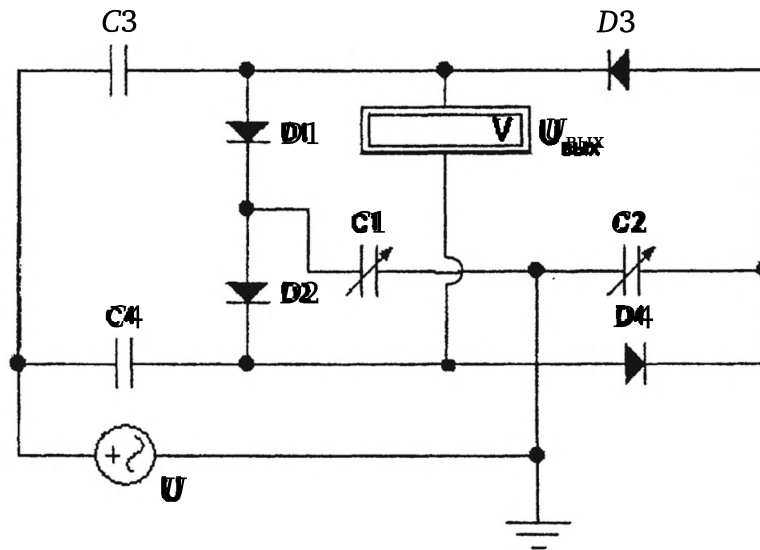


Рис. 6.2. Включение емкостных измерительных преобразователей по мостовой схеме с заземлением

При каждом полупериоде сигнала с источника переменного измерительного напряжения открывается соответствующая пара диодов D . При этом каждый из конденсаторов $C3$, $C4$ соединяется последовательно то с емкостью $C1$, то с емкостью $C2$ преобразователя. При нарушении равенства емкостей $C1$ и $C2$ токи через конденсаторы $C3$, $C4$ текут

щие в положительном и отрицательном направлениях будут не равны между собой.

В результате этого на конденсаторах $C3$, $C4$ формируется постоянное напряжение, величина которого будет пропорциональна разности значений измерительных емкостей и может быть подсчитана по формуле

$$U_{\text{вых}} = \frac{U(C1 - C2)}{C1 + C2 + 2C1C2 / C3}.$$

Сравнение расчетного и измеренного выходных напряжений измерителя позволяет определить процент расхождения этих значений.

6.4. Электромагнитные измерительные преобразователи

Задание

Построить модель для исследования индуктивного измерительного преобразователя по трансформаторной дифференциальной схеме. Определить выходное напряжение схемы U для значения сопротивления нагрузки $R_n = 6$ кОм, выхода источника переменного измерительного напряжения 10 В с частотой 10 кГц и отклонений индуктивностей в двух обмотках преобразователя соответственно на 55 и 45% от номинального значения 0,2 Гн по построенной модели. Определить расчетное значение выходного напряжения схемы для тех же значений ее параметров и сравнить его с результатом моделирования.

Пояснения к работе

Преобразователи перемещения в изменение индуктивности называются индуктивными преобразователями. Если пренебречь потоками рассеяния, то значения индуктивности L и взаимоиנדуктивности M можно рассчитать по формулам

$$L = \frac{w_1^2}{R_m + R_g},$$

$$M = \frac{w_1 w_2}{R_m + R_g},$$

где w_1 , w_2 — число витков первичной и вторичной обмотки; R_m — сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи, включая якорь; R_g — сопротивление воздушного зазора между якорем и основным магнитопроводом.

Дифференциальные индуктивные преобразователи содержат дополнительный магнитопровод, зеркально расположенный относительно основного. Схема включения такого преобразователя приведена на рис. 6.3.

Схема содержит трансформатор T , к вторичной обмотке которого подключены обмотки преобразователя L_1 и L_2 . Нагрузка R_n подключается между средней точкой вторичной обмотки трансформатора и средней точкой обмоток преобразователя.

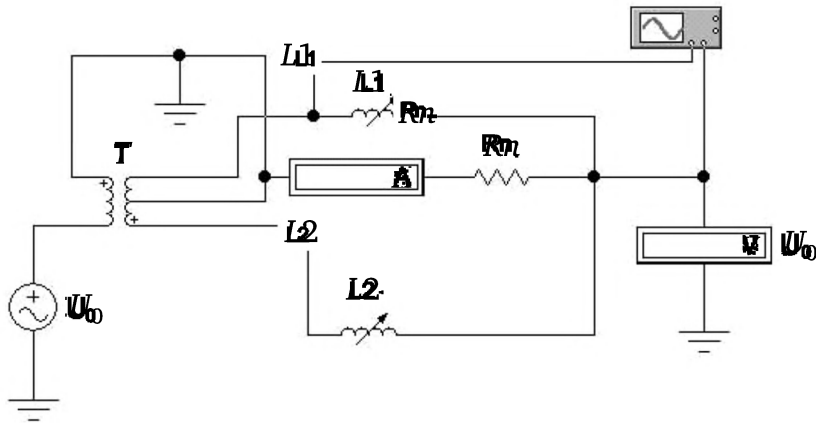


Рис. 6.3. Схема включения дифференциального индуктивного преобразователя

Ток, протекающий по сопротивлению нагрузки, равен разности токов через обмотки преобразователя. Полагая, что на выходе каждой вторичной обмотки напряжение равно U_0 , ток нагрузки можно определить по формуле

$$I = \frac{U_0 \Delta L}{L [R_n^2 + (2\pi f L_1 L_2 / L)^2]^{1/2}},$$

где $\Delta L = L_1 - L_2$, $L = L_1 + L_2$; f — рабочая частота источника измерительного напряжения. После нахождения тока нагрузки выходное напряжение схемы рассчитывается как

$$U = IR_n.$$

Полученное значение сравнивается с показаниями милливольтметра на выходе схемы моделирования.

6.5. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи

Задание

Построить модель для исследования пьезоэлектрического измерительного преобразователя по схеме с усилителем заряда. Измерительный преобразователь имитируется источником постоянного напряжения $U_i = 1\text{ В}$ и конденсатором $C_i = 1\text{ нФ}$, сопротивление утечки $R = 1000\text{ МОм}$, емкость соединительного кабеля $C = 1\text{ нФ}$, запомина-

ющая емкость усилителя $C_a = 1$ нФ, коэффициент усиления усилителя $A = 100$. Определить выходное напряжение схемы по осциллограмме и сравнить его с расчетным значением.

Пояснения к работе

Принцип действия пьезоэлектрического измерительного преобразователя основан на использовании прямого или обратного пьезоэффектов. Прямой пьезоэффект заключается в способности некоторых материалов генерировать электрические заряды при приложении к ним механической нагрузки. Обратный пьезоэффект заключается в изменении механического напряжения или геометрических размеров образца материала под воздействием электрического поля.

Количественно пьезоэффект характеризуется пьезомодулем

$$K = \frac{Q}{F},$$

где Q — генерируемый заряд; F — действующая сила.

Схема подключения пьезоэлектрического измерительного преобразователя с усилителем заряда показана на рис. 6.4.

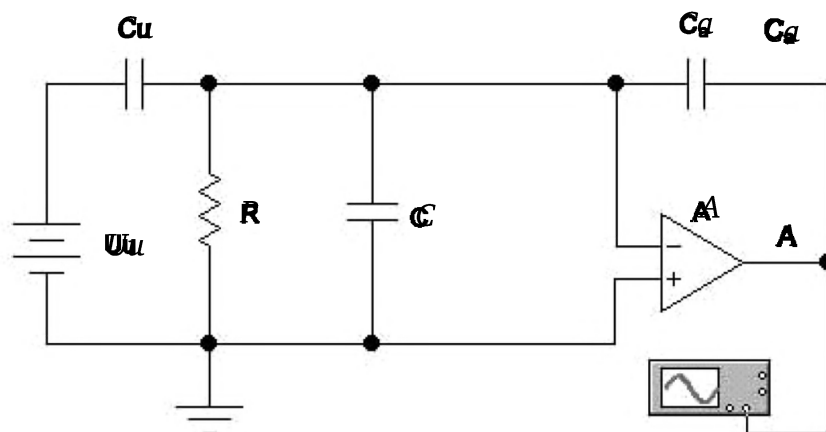


Рис. 6.4. Схема подключения пьезоэлектрического измерительного преобразователя с усилителем заряда

Эта схема позволяет уменьшить влияние емкости соединительного кабеля на выходное напряжение. Расчетное значение выходного напряжения схемы определяется в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_u C_u}{C_a + C / A}.$$

После нахождения расчетного значения оно сравнивается со значением выходного напряжения, полученного по осциллограмме.

6.6. Термометрические измерительные преобразователи

Задание

Построить модель для исследования термометрического измерительного преобразователя по потенциометрической схеме с уравниванием. Сопротивление термопары $R_m = 5$ Ом, а образцовое напряжение потенциометра $U = 1$ В. Подобрать сопротивление делителя и уравновесить напряжение термопары $U_m = 300$ мВ.

Пояснения к работе

Термопара представляет собой конструкцию из двух разнородных проводников, места соединения которых имеют различную температуру. Места соединения проводников называются спаями. При небольшом перепаде температур между спаями термоЭДС можно считать пропорциональной разности температур

$$E = k\Delta T,$$

где k — коэффициент преобразования; ΔT — разность температур между спаями.

Модель для исследования термометрического измерительного преобразователя по потенциометрической схеме с уравниванием приведена на рис. 6.5.

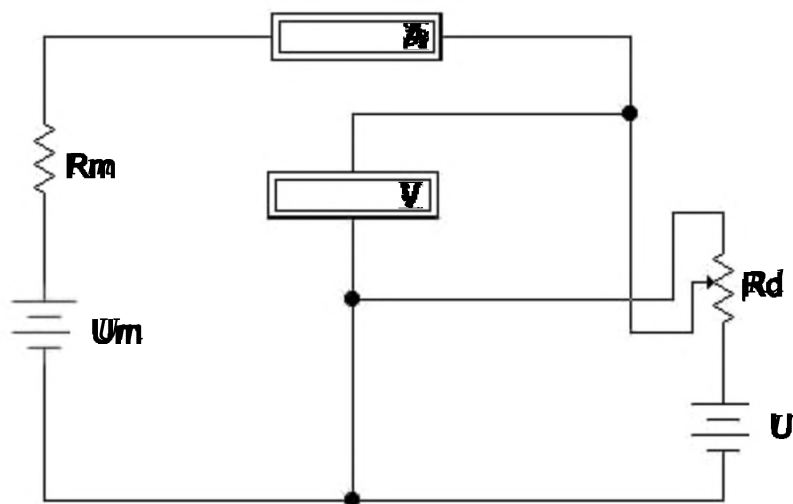


Рис. 6.5. Термометрический измерительный преобразователь с уравниванием

Значение сопротивления делителя R_d подбирается опытным путем так, чтобы можно было уравновесить с его помощью схему при заданных параметрах. После уравнивания схемы на выходе управляемого делителя формируется напряжение, равное и противоположное по знаку напряжению термопары. В результате этого ток через сопротивление термопары должен быть равен нулю, что фиксируется амперметром.

6.7. Корректор нелинейности датчика

Задание

Построить модель для исследования корректора нелинейности датчика влажности. Корректирующее звено выполнить на операционном усилителе, в цепь отрицательной обратной связи которого включить резистор последовательно с диодом. Сравнить выходные сигналы схемы с включенным и выключенным корректирующим звеном для значений резистора обратной связи 1 кОм и резистора датчика 1 кОм.

Пояснения к работе

В измерительной технике используются корректирующие звенья различного назначения, в частности, нелинейные для корректировки характеристик измерительных преобразователей. Нелинейность датчика влажности проявляется в области малых значений влажности, где зависимость сопротивления от содержания влаги носит логарифмический характер.

Модель для исследования корректора нелинейности датчика влажности дана на рис. 6.6.

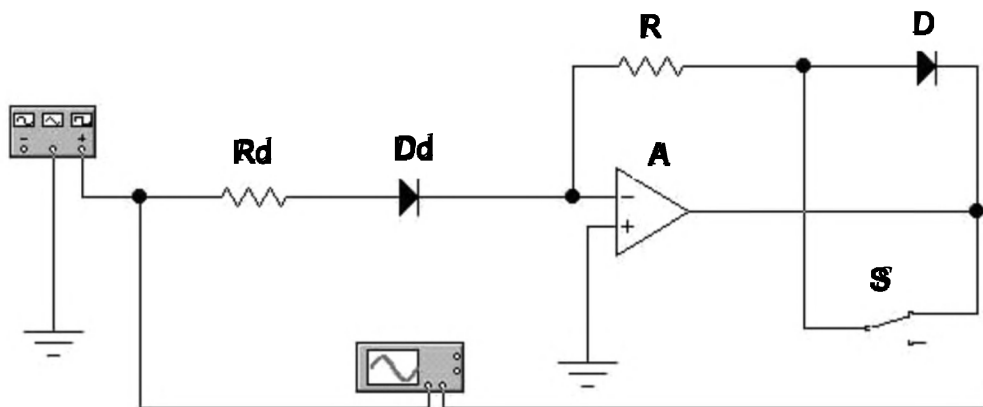


Рис. 6.6. Модель для исследования корректора нелинейности датчика влажности

Датчик представлен в виде последовательно включенных резистора R_d и диода D_d . Корректирующее звено выполнено на операционном усилителе A с диодом D и сопротивлением R в обратной связи. Для включения и выключения корректирующего звена введен переключатель S .

Для получения передаточной характеристики модели датчика используются функциональный генератор и осциллограф в режиме развертки выходного сигнала сигналом с функционального генератора. При выключенном корректирующем звене на осциллограмме будут видны искажения выходного сигнала в области низких значений. При включенном корректирующем звене эти искажения должны устраняться.

Заключение

Современный период развития науки и техники характеризуется решающим влиянием информационных технологий. Большую роль в этом играет информационно-измерительная техника, которая появилась в результате принципиального усовершенствования измерительных средств на базе современных компьютерных технологий и развития автоматизированных систем.

Разработка новых принципов измерений позволяет расширить диапазон измеряемых величин и создать более совершенные информационно-измерительные системы.

Новой прогрессивной формой использования распределенных измерительных ресурсов является Интернет. Некоторые организации располагают уникальным или дорогостоящим измерительным оборудованием, к которым можно отнести, например, оптические анализаторы спектра, часто требующие размещения в специально оборудованных помещениях. Ранее такое оборудование использовалось, как правило, неэффективно из-за низкой загрузки ввиду его доступности для малого количества пользователей. С появлением глобальных сетей открываются новые перспективы для коллективного использования таких измерительных систем, в том числе в рамках международного сотрудничества.

Дальнейшее расширение возможностей информационно-измерительных процессов дает технология видео-конференц-связи. Она позволяет не только получать измерительную информацию, но и наблюдать процесс измерения или контроля, а также в режиме реального времени обсуждать его с коллегами или экспертами, находящимися в различных точках планеты.

Перед наукой и техникой постоянно возникают новые задачи по развитию интеллектуальных измерительных систем и повышению точности измерений в экспериментах с быстротекущими процессами, а также по эффективности обслуживания сложных производственных, транспортных и других систем, требующих измерения и контроля множества параметров, включая наноразмерные величины. В связи с этим современный инженер должен владеть глубокими знаниями в области измерений для использования современных измерительных приборов, проведения измерительных экспериментов и создания высокоточных автоматических систем.

Национальные стандарты РФ в нанометрологии

- ГОСТ Р 8.628—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления»
- ГОСТ Р 8.629—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецевидальным профилем элементов. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.630—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.631—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.635—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки»
- ГОСТ Р 8.636—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки».
- ГОСТ Р 8.644—2008 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецевидальным профилем элементов. Методика калибровки»
- ГОСТ Р 8.696—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах и распределение интенсивностей в дифракционных картинах. Методика выполнения измерений с помощью электронного дифрактометра»
- ГОСТ Р 8.697—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах. Методика выполнения измерений с помощью просвечивающего электронного микроскопа»
- ГОСТ Р 8.698—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Размерные параметры наночастиц и тонких пленок. Методика выполнения измерений с помощью малоуглового рентгеновского дифрактометра»

- ГОСТ Р 8.700—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа»

Межгосударственные стандарты СНГ в нанометрологии

- ГОСТ 8.591—2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецевидальным профилем элементов. Методика поверки»
- ГОСТ 8.592—2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления»
- ГОСТ 8.593—2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика поверки»
- ГОСТ 8.594—2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.628—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления»
- ГОСТ Р 8.629—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецевидальным профилем элементов. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.630—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.631—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки»
- ГОСТ Р 8.635—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки»
- ГОСТ Р 8.636—2007 «Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки»
- ГОСТ Р 8.644—2008 «Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецевидальным профилем элементов. Методика калибровки»

- ГОСТ Р 8.696—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах и распределение интенсивностей в дифракционных картинах. Методика выполнения измерений с помощью электронного дифрактометра»
- ГОСТ Р 8.697—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах. Методика выполнения измерений с помощью просвечивающего электронного микроскопа»
- ГОСТ Р 8.698—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Размерные параметры наночастиц и тонких пленок. Методика выполнения измерений с помощью малоуглового рентгеновского дифрактометра»
- ГОСТ Р 8.700—2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа»

Рекомендуемая литература

1. *Волегов, А. С.* Метрология и измерительная техника: электронные средства измерений электрических величин : учеб. пособие для вузов / А. С. Волегов, Д. С. Незнахин, Е. А. Степанова. — М. : Издательство Юрайт, 2017.
2. *Карлащук, В. И.* Электронная лаборатория на IBM PC / В. И. Карлащук. — М. : Солон-Р, 2001. — 726 с.
3. *Латышенко, К. П.* Технические измерения и приборы : в 2 т. : учебник для академического бакалавриата / К. П. Латышенко. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
4. *Латышенко, К. П.* Метрология и измерительная техника. Лабораторный практикум : учеб. пособие для вузов / К. П. Латышенко, С. А. Гарелина. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
5. *Миронов, В. Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. — Н. Новгород : Российская академия наук, Институт физики микроструктур, 2004. — 114 с.
6. *Рачков, М. Ю.* Физические основы технических измерений : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Рачков. — М. : Изд-во МГИУ, 2014. — 175 с.
7. *Рачков, М. Ю.* Технические измерения и приборы : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Рачков. — М. : Изд-во МГИУ, 2004. — 252 с.
8. *Рачков, М. Ю.* Измерения физических величин в нанометровом диапазоне / М. Ю. Рачков // Машиностроение и инженерное образование. — 2013. — № 2. — С. 59—68.

Предметный указатель

- Агрегат, 68
- Аксиома
 - корректности, 19
 - транзитивности, 19
- Андроид, 66
- Анизотропия, 112
- Апертура, 108
- Астрария, 63
- Астролябия, 57
- Атомно-силовой интерференционный микроскоп, 100
- Бел, 43
- Бит, 15
- Ближнепольная оптическая микроскопия, 103
- Вариация, 39
- Величина
 - физическая, 12
- Вероятность безотказной работы, 42
- Вольвела, 59
- Время
 - успокоения, 39
 - установления, 40
- Гемисфера, 58
- Гемоцикл, 58
- Гистерезис, 41
- Гномон, 58
- Датчик
 - генераторный, 84
 - давления, 80
 - давления мембранный, 81
 - магнитоэлектрический, 79
 - массового расхода воздуха, 86
 - угла поворота рулевого колеса, 87
- Динамический диапазон, 41
- Дифракционный предел, 96
- Зона
 - мертвая, 41
- Измерение

- избирательное, 12
- изолированное, 20
- интервальное, 18
- кардинальное, 15, 18
- косвенное, 30
- номинальное, 16
- объективное, 12
- порядковое, 17
- пропорциональное, 18
- прямое, 29
- совместное, 30
- совокупное, 30
- техническое, 12
- Индентор, 109
- Индентор Берковича, 112
- Интерференция, 105
- Информация, 14
 - активная, 22
 - метрическая, 15
 - пассивная, 22
 - структурная, 15
- Исполнение, 72
- Кадастр, 67
- Кантилевер, 100
- Класс точности, 46
- Когерентность, 96
- Компенсация
 - параллельная, 49
 - последовательная, 49
 - путем вычисления отношения, 50
- Комплекс
 - унифицированный, 72
- Магнитно-силовая микроскопия, 102
- Мазер
 - аммиачный, 65
- Манометр, 80
- Масштабирование
 - нелинейное, 32
- Мера
 - образцовая, 29
 - рабочая, 29
- Метод
 - аналогий, 31
 - дифференциальный, 31
 - замещения, 31
 - измерения, 29

- компенсации погрешности по знаку, 48
- непосредственной нулевой, 31
- оценки, 30
- перечисления, 33
- повторений, 33
- сравнения, 30
- Метрологическое обеспечение, 38
- Метрология, 38
- Модель
 - масштабная, 32
 - математическая, 31
- Модуль, 68
- Мощность
 - доступная, 55
- Мультиплексирование
 - временное, 35
 - частотное, 36
- Наблюдение, 18
- Навигация
 - спутниковая, 91
- Надежность, 42
- Наноиндентирование, 109
- Наноиндустрия, 93
- Наноматериалы, 93
- Нанооптика, 102
- Наносистемная техника, 93
- Нанотехнология, 93
- Насыщение, 41
- Объект
 - активный, 23
 - пассивный, 22
- Объект измерения, 12
- Ограничение, 41
- Отклик, 42
- Ошибка
 - квантования, 40
 - округления, 41
 - усечения, 40
- Погрешность, 44
 - абсолютная, 44
 - аддитивная, 46
 - динамическая, 42
 - дополнительная, 47
 - инструментальная, 47
 - методическая, 47
 - мультипликативная, 46

- основная, 47
- относительная, 44
- переменная систематическая, 45
- периодическая систематическая, 45
- постоянная систематическая, 45
- приведенная, 45
- прогрессирующая, 45
- систематическая, 44
- случайная составляющая, 49
- субъективная, 48
- Поправка, 48
- Порог чувствительности, 40
- Предел измерения, 41
- Прибор
 - уровня топлива, 77
- Размерность, 28
 - показатель, 28
- Разрешающая способность, 40
- Сбор информации, 12
- Сила Ван-дер-Ваальса, 102
- Система
 - государственная, 67
 - измерительная, 13
 - навигационная, 90
 - обнаружения, 17
 - промышленных приборов и средств автоматизации, 67
 - сложная, 20
- Склерометрия, 109
- Совместимость
 - информационная, 71
 - конструктивная, 69
 - метрологическая, 69
 - эксплуатационная, 69
 - энергетическая, 69
- Согласование
 - анэргетическое, 52
 - энергетическое, 54
- Спектр, 33
- Спидометр, 74
 - с электроприводом, 75
 - электронный, 75
- Способность
 - разрешающая, 19
- Средства
 - воздействия на процесс, 71
 - вычислительные, 72

- локального контроля, 72
- получения информации, 71
- централизованного контроля, 72
- Степень
 - нелинейности, 41
- Стратегия
 - когерентных выборок, 34
 - мультиплексирования, 35
 - случайных выборок, 35
- Телеметрия, 37
- Термоанемометр, 86
- Техника
 - измерительная, 13
- Трубка Бурдона, 81
- Туннельный ток, 99
- Условие резонанса, 55
- Функция
 - преобразования, 39
- Характеристика
 - амплитудно-частотная, 42
 - динамическая, 42
 - метрологическая, 39
 - переходная, 42
 - фазо-частотная, 42
 - частотная, 42
- Цена деления шкалы, 39
- Часы
 - аналемматические солнечные, 60
 - атомные, 65
 - биологические, 57
 - водяные, 61
 - звездные, 57
 - квантовые, 65
 - лунные, 59
 - масляные, 62
 - механические, 63
 - молекулярные, 65
 - огневые, 62
 - песочные, 62
 - рефракционные солнечные, 60
 - ртутные, 66
 - свечные, 62
 - солнечные, 58
 - фитильные, 62
 - электрические, 64
- Чувствительность, 39

Ширина
 спектра сигнала, 33
Ширина полосы, 43
Шум, 55
Эконометр, 82
Электросиловая микроскопия, 101
Энтропия, 14
Эталон, 28

Condensation nucleus counters, 112
Condensation particle counter, 112
Differential mobility analyzer, 113
I-величина, 32
Nanometer Aerosol Sampler, 114
Speckle, 121
V-величина, 32