

В. Ю. ШИШМАРЕВ

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

*Рекомендовано  
Учебно-методическим объединением вузов  
по образованию в области приборостроения и оптотехники  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Приборостроение»  
и приборостроительным специальностям*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2010

УДК 628.33/.35(075.8)

ББК 30фя73

Ш657

**Рецензенты:**

зав. кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления Московского государственного университета приборостроения и информатики, д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук высшей школы *О. М. Петров*;  
зав. кафедрой физики МГТУ «Станкин», канд. физ.-мат. наук, профессор *А. А. Колоколов*;  
главный специалист ОАО «Московский институт электромеханики и автоматики», канд. техн. наук *В. И. Галкин*

**Шишмарев В. Ю.**

Ш657 **Физические основы получения информации : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В. Ю. Шишмарев. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 448 с.**

ISBN 978-5-7695-5713-2

Рассмотрены методы и средства получения измерительной информации. Приведены физические основы построения датчиков и преобразователей информации, метрологические характеристики измерений. Рассмотрены физические явления и методы измерений геометрических, механических, тепловых величин; измерения времени, параметров естественных и искусственных полей, акустического шума, электрических и магнитных величин. Изложены вопросы построения информационно-измерительных систем, сбора и переработки информации в них, построения систем телеизмерений, автоматического контроля, технической диагностики и распознавания образов.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 628.33/.35(075.8)

ББК 30фя73

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

© Шишмарев В. Ю., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-5713-2

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

# СОДЕРЖАНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| Список сокращений .....   | 3         |
| Введение .....  | 4         |
| <b>Раздел I. Информация о физических величинах .....</b>                            | <b>8</b>  |
| Глава 1. <b>Физические величины и их единицы .....</b>                              | <b>8</b>  |
| 1.1. Виды физических величин и единиц .....   | 8         |
| 1.2. Системы единиц физических величин .....  | 9         |
| 1.3. Международная система единиц физических величин .....                          | 14        |
| 1.4. Определения единиц системы СИ .....  | 16        |
| 1.5. Эталонная база России .....  | 21        |
| Глава 2. <b>Измерительная техника как основа получения информации .....</b>         | <b>25</b> |
| 2.1. Общие вопросы измерительных информационных систем .....                        | 25        |
| 2.2. Понятие измерительной информации .....   | 26        |
| 2.3. Принцип передачи информации в измерительных информацион-<br>ных системах ..... | 28        |
| 2.4. Основы информационных теорий .....   | 29        |
| 2.5. Преобразователи измерительных и информационных систем .....                    | 41        |
| Глава 3. <b>Измерительные сигналы .....</b>   | <b>46</b> |
| 3.1. Классификация измерительных сигналов .....                                     | 46        |
| 3.2. Классификация помех .....  | 50        |
| 3.3. Математическое описание измерительных сигналов .....                           | 52        |
| 3.4. Математические модели элементарных измерительных сигналов ..                   | 53        |
| 3.5. Математические модели сложных измерительных сигналов .....                     | 55        |
| 3.6. Квантование и дискретизация измерительных сигналов .....                       | 61        |
| Глава 4. <b>Генераторы измерительных сигналов .....</b>                             | <b>71</b> |
| 4.1. Основные сведения .....  | 71        |
| 4.2. Генераторы синусоидальных колебаний .....                                      | 74        |
| 4.3. Цифровые измерительные генераторы низких частот .....                          | 82        |
| 4.4. Генераторы шумовых сигналов .....  | 85        |
| 4.5. Импульсные генераторы .....  | 86        |
| <b>Раздел II. Основы теории измерений .....</b>                                     | <b>89</b> |
| Глава 5. <b>Синтез измерительных приборов и оценка их точности .....</b>            | <b>89</b> |
| 5.1. Основные понятия об измерениях .....   | 89        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.2. Методы измерений .....  | 91         |
| 5.3. Средства измерений и их классификация .....   | 100        |
| 5.4. Государственная система обеспечения единства измерений .....  | 105        |
| 5.5. Калибровка средств измерений .....  | 106        |
| <b>Глава 6. Метрологические показатели измерений .....</b>   | <b>109</b> |
| 6.1. Основные термины и определения .....  | 109        |
| 6.2. Причины возникновения и способы исключения систематических погрешностей .....                           | 112        |
| 6.3. Оценка случайных погрешностей .....   | 115        |
| 6.4. Погрешности средств измерений .....   | 118        |
| 6.5. Классы точности средств измерений .....   | 125        |
| 6.6. Методы поверки и калибровки .....   | 127        |
| 6.7. Основные понятия теории метрологической надежности средств измерений .....                              | 130        |
| <b>Раздел III. Физические явления и эффекты, используемые для получения измерительной информации .....</b>   | <b>136</b> |
| <b>Глава 7. Анализ физических явлений и эффектов и их использование для создания средств измерений .....</b> | <b>136</b> |
| 7.1. Классификация аналоговых измерительных приборов .....   | 136        |
| 7.2. Функции первичных измерительных преобразователей .....  | 139        |
| 7.3. Механические первичные преобразователи .....  | 139        |
| 7.4. Пневматические первичные преобразователи .....  | 143        |
| 7.5. Оптические первичные преобразователи .....  | 145        |
| 7.6. Электрические первичные преобразователи .....   | 146        |
| <b>Глава 8. Методы и средства измерения геометрических величин .....</b>                                     | <b>158</b> |
| 8.1. Общие сведения .....  | 158        |
| 8.2. Плоскопараллельные концевые меры длины .....  | 159        |
| 8.3. Измерительные линейки, штангенинструмент и микрометрический инструмент .....                            | 162        |
| 8.4. Методы и средства измерений с механическим преобразованием .....  | 169        |
| 8.5. Средства измерений с оптико-механическим и оптическим преобразованием .....                             | 174        |
| 8.6. Контроль калибрами .....  | 178        |
| 8.7. Принцип выбора средств измерений .....  | 183        |
| <b>Глава 9. Методы и средства измерения механических величин .....</b>                                       | <b>187</b> |
| 9.1. Общие положения .....   | 187        |
| 9.2. Механические величины, единицы и эталоны .....  | 188        |
| 9.3. Принципы измерения механических величин .....   | 192        |
| 9.4. Системы измерения массы, силы и давления .....  | 192        |
| 9.5. Приборы для измерения массы, силы и давления .....  | 202        |
| 9.6. Измерение крутящих моментов .....   | 210        |
| 9.7. Измерение угловых скоростей .....   | 213        |
| 9.8. Измерение расхода и уровня .....  | 214        |

|   |            |
|---|------------|
| Глава 10. Методы и средства измерения времени .....   | 218        |
| 10.1. Области измерения времени .....   | 218        |
| 10.2. Величины, единицы, эталоны и принципы измерения времени .....   | 220        |
| 10.3. Системы измерения времени .....   | 222        |
| 10.4. Приборы для измерения времени .....   | 228        |
| Глава 11. Методы и средства измерения температуры .....   | 236        |
| 11.1. Международная температурная шкала .....   | 236        |
| 11.2. Схемы приборов для измерения температуры .....  | 240        |
| 11.3. Контактные методы и средства измерения температуры .....  | 243        |
| 11.4. Бесконтактные методы и средства измерения температуры .....   | 258        |
| Глава 12. Измерения акустических величин .....  | 262        |
| 12.1. Основные понятия .....  | 262        |
| 12.2. Средства измерения акустических величин .....   | 264        |
| 12.3. Методики проведения акустических измерений .....  | 267        |
| 12.4. Акустический шум и его измерение .....  | 271        |
| 12.5. Общая характеристика приборов для измерения параметров<br>шума .....  | 274        |
| 12.6. Общая характеристика методов измерений .....  | 276        |
| <b>Раздел IV. Физические явления и эффекты, используемые для<br/>получения информации об электрических и магнитных величинах ..</b> | <b>281</b> |
| Глава 13. Принципы построения измерительных механизмов<br>электрических приборов .....  | 281        |
| 13.1. Общие сведения об измерительных механизмах .....  | 281        |
| 13.2. Магнитоэлектрические измерительные механизмы .....  | 284        |
| 13.3. Ферродинамические измерительные механизмы .....   | 288        |
| 13.4. Электродинамические измерительные механизмы .....   | 291        |
| 13.5. Электромагнитные измерительные механизмы .....  | 293        |
| 13.6. Электростатические измерительные механизмы .....  | 296        |
| 13.7. Индукционные измерительные механизмы .....  | 298        |
| 13.8. Измерительные механизмы логометров .....  | 300        |
| Глава 14. Измерение токов и напряжений .....  | 303        |
| 14.1. Единство и различие амперметров и вольтметров .....   | 303        |
| 14.2. Измерение постоянных токов и напряжений .....   | 304        |
| 14.3. Измерение действующих значений переменных токов<br>и напряжений .....   | 305        |
| 14.4. Измерения средних и амплитудных значений<br>переменных токов .....  | 307        |
| 14.5. Измерение малых токов и напряжений. Нулевые указатели .....   | 309        |
| 14.6. Электронные аналоговые вольтметры .....   | 310        |
| 14.7. Цифровые измерительные приборы .....  | 312        |
| Глава 15. Измерение электрической мощности и энергии .....  | 316        |
| 15.1. Измерение мощности в цепях постоянного и однофазного<br>переменного тока .....  | 316        |

|   |            |
|---|------------|
| 15.2. Измерение энергии в цепях постоянного тока .....  | 319        |
| 15.3. Измерение активной энергии в цепях однофазного<br>переменного тока .....                    | 322        |
| 15.4. Измерение активной мощности и энергии в цепях трехфазного<br>переменного тока .....         | 325        |
| 15.5. Измерение реактивной мощности и энергии .....   | 329        |
| 15.6. Измерение коэффициента мощности .....   | 331        |
| <b>Глава 16. Измерение параметров электрических цепей .....</b>                                   | <b>333</b> |
| 16.1. Измерение сопротивлений<br>методом амперметра — вольтметра .....                            | 333        |
| 16.2. Измерение сопротивлений омметрами .....   | 335        |
| 16.3. Измерение сопротивлений мостовыми методами .....  | 337        |
| 16.4. Измерение сопротивления изоляции. Определение места<br>повреждения изоляции в кабелях ..... | 344        |
| 16.5. Измерение емкости и индуктивности .....   | 348        |
| <b>Глава 17. Масштабные электрические измерительные<br/>преобразователи .....</b>                 | <b>352</b> |
| 17.1. Масштабные преобразователи токов и напряжений .....   | 352        |
| 17.2. Измерительные усилители .....   | 355        |
| 17.3. Измерительные трансформаторы тока и напряжения .....  | 369        |
| 17.4. Измерительные преобразователи параметров<br>переменных токов и напряжений .....             | 372        |
| <b>Глава 18. Методы измерения параметров магнитного поля<br/>и магнитных материалов .....</b>     | <b>379</b> |
| 18.1. Измерение параметров магнитного поля .....  | 379        |
| 18.2. Магнитные материалы и их характеристики .....   | 383        |
| 18.3. Определение характеристик и параметров магнитных<br>материалов .....                        | 386        |
| <b>Глава 19. Лазерные и оптические приборы для измерения скорости,<br/>расхода и длины .....</b>  | <b>399</b> |
| 19.1. Области применения лазерных и оптических приборов .....                                     | 399        |
| 19.2. Измерение расхода .....   | 399        |
| 19.3. Методы обработки доплеровского сигнала .....  | 401        |
| 19.4. Погрешности лазерных преобразователей .....   | 405        |
| 19.5. Измерение скорости и длины длинномерных материалов .....                                    | 407        |
| 19.6. Оптические измерители скорости .....  | 409        |
| 19.7. Измерительная техника с волоконно-оптическими сенсорами ..                                  | 411        |
| <b>Глава 20. Методы и средства обработки измерительной информации ...</b>                         | <b>424</b> |
| 20.1. Структура информационных систем .....   | 424        |
| 20.2. Назначение устройств обработки информации .....   | 425        |
| 20.3. Устройства сравнения и вычитания .....  | 426        |
| 20.4. Централизованные устройства обработки информации .....                                      | 432        |
| Список литературы .....   | 442        |

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АВМ — аналоговая вычислительная машина
- АИМ — амплитудно-импульсная модуляция
- АП — аналоговый преобразователь
- АЦП — аналого-цифровой преобразователь
- АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
- АЭП — аналоговый электроизмерительный прибор
- БИС — большая интегральная схема
- ГКМВ — Генеральная конференция по мерам и весам
- ГПС — Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации
- ГС — генератор сигналов
- ГСС — генератор стандартных сигналов
- ИИС — измерительная информационная система
- ИП — измерительный преобразователь
- ЛДИС — лазерный доплеровский измеритель скорости
- ЛОИ — лазерный оптический измеритель
- ЛПР — лазерный преобразователь расхода
- МОЗМ — Международная организация законодательной метрологии
- МПИ — межповерочный интервал
- МХ — метрологическая характеристика
- НПВ — наибольший предел взвешивания
- ОИС — оптический измеритель скорости
- ППЛ — полупроводниковый лазер
- ППС — пространственная периодическая структура
- ПЭВМ — персональная электронно-вычислительная машина
- РСИ — рабочее средство измерений
- РСК — Российская система калибровки
- СБИС — сверхбольшая интегральная схема
- СО — стандартный образец
- СП — счетный процессор
- ТП — термоэлектрический преобразователь
- ТС — термометр сопротивления
- УВТ — установка высшей точности
- ФИМ — фазоимпульсная модуляция
- ФПУ — фотоприемное устройство
- ФЧХ — фазочастотная характеристика
- ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
- ЦВМ — цифровая вычислительная машина
- ЦИП — цифровой измерительный прибор
- ЦТ — цифровой термометр
- ЧИМ — частотно-импульсная модуляция
- ШИМ — широтно-импульсная модуляция

Современная информационная техника разрабатывается на основе технической кибернетики — дисциплины, изучающей общие закономерности процессов целесообразного управления, получения и преобразования информации в технических устройствах.

Значение информационной техники в жизни человечества непрерывно возрастает. Она решает огромный круг задач, связанных главным образом со сбором, переработкой, передачей, хранением, поиском и выдачей разнообразной информации человеку или машине.

В соответствии с основными функциями информационной техники выделяются следующие ее ветки: вычислительная техника, техника передачи информации (связи), техника хранения и поиска информации и измерительная информационная техника. Каждая из этих основных ветвей информационной техники имеет свои особенности, принципы построения технических устройств. В то же время они объединяются общими теоретическими основами, которые интенсивно формируются и совершенствуются в настоящее время.

Измерительная информационная техника предназначена для получения опытным путем количественно определенной информации о разнообразных объектах материального мира. Основными процессами, позволяющими получить такую информацию, являются процессы счета, измерения, контроля, опознания образов, диагностики. Существует широкое толкование этих терминов. Например, процесс измерения связывается с введением в исследуемое явление единицы измерения. Такое представление об измерении используется в математике, социологии, психологии и др. В измерительной информационной технике применяется узкое толкование этих терминов, вытекающее из того, что эти процессы реализуются экспериментально, служат для получения количественной оценки состояния материального объекта через сравнение параметров объекта с мерой (овеществленной единицей измерения), описанием (через количественные характеристики) заданного состояния.

*Измерение* — это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.



В процессе измерения устанавливают численное отношение между измеряемой величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу времени сравнения.

Под *контролем* понимают установление соответствия между состоянием (свойством) объекта контроля и заданной нормой, определяющей качественно различные области его состояния. В результате контроля выдается суждение о состоянии объекта контроля.

Распознавание образов связано с установлением соответствия между объектом и заданным образом. При опознании образ может быть задан в виде образцового изделия или перечня определенных свойств и значений параметров (признаков) с указанием полей допуска. В целом ряде практических приложений понятия контроля и опознания образов совпадают.

Во многих случаях для восстановления нормальной работы объекта необходимо выявить элементы, послужившие причиной его неправильного функционирования. Такое направление развития методов и средств контроля работы технических устройств называется *технической диагностикой*.

*Счет*, т.е. определение количества каких-либо событий или предметов, в измерительной информационной технике относительно редко имеет самостоятельное значение и чаще входит самостоятельной операцией в процессы измерения, контроля и т.д.

Во всех перечисленных процессах, используемых в измерительной информационной технике, имеются общие черты. Все эти процессы обязательно включают в себя восприятие техническими средствами исследуемых (измеряемых, контролируемых) величин, часто с преобразованием в некоторые промежуточные величины; сравнение их опытным путем с известными величинами, описаниями состояний или свойств объектов; формирование и выдачу результатов в виде именованных чисел, их отношений, суждений, основанных на количественных соотношениях.

В измерительной информационной технике наиболее важную роль играет процесс измерения, являющийся основным путем получения количественной информации. Средства измерений известны со времен глубокой древности (Китай, Вавилон, Индия, Египет, Греция, Рим).

Человечество пришло к необходимости выработать особые приемы количественного выражения существенных для него свойств объектов с помощью именованных чисел, соответствующих определенным долям выбранных мер. Так возник в развитии человеческой культуры процесс измерения, появились средства и методы измерений, которые в дальнейшем стали одним из важнейших орудий познания окружающего мира. Развитие науки и промышленности стимулировало развитие измерительной техники; новые

достижения измерительной техники оказывали влияние на развитие многих отраслей науки и техники.

По существу ни одно экспериментальное научное исследование, ни один процесс производства не может обойтись без измерений в той или иной форме, без получения того, что понимают под измерительной информацией. Развитие современного научного эксперимента, включающего в себя исследование космического пространства и элементарных частиц материи, глубин океанов и поверхности Земли, совершенствование промышленного производства и средств комплексного управления производством, развитие практически всех отраслей народного хозяйства и оборонной техники в значительной степени зависят от своевременного и качественного сбора измерительной информации, от должного уровня и опережающего развития средств измерений.

Необходимо отметить роль метрологии в деле становления методов и средств измерений. Метрология в начале своего развития занималась главным образом сбором справочных данных о мерах и единицах измерений. Современная метрология превратилась в науку о точности измерений, о единстве мер.

Наряду с метрологией возникли теория измерений, теоретические основы измерительной техники. Появились новые способы измерений, например электрические, оптические, механические.

В последние годы, в первую очередь в связи с резкой интенсификацией и автоматизацией процессов производства, усложнением и расширением фронта научных экспериментов, существенно изменились требования к средствам измерений. Новые требования связаны главным образом с переходом к получению и использованию результатов не отдельных измерений, а потоков измерительной информации. Зачастую необходимо получать информацию о сотнях и тысячах однородных или разнородных измеряемых величин, часть из которых может быть недоступной для прямых измерений.

Как правило, получение всего объема измерительной информации и ее обработка (иногда по довольно сложным алгоритмам) должно выполняться за ограниченное время. Если возложить эти функции на человека, вооруженного лишь простейшими измерительными и вычислительными устройствами, то в силу физиологических ограничений он, даже при весьма значительной тренировке, не сможет их выполнять.

Таким образом, перед измерительной техникой была поставлена проблема создания новых средств, способных избавить человека от необходимости сбора и обработки интенсивных потоков измерительной информации. Решение этой проблемы привело к появлению нового класса средств измерений — *измерительных*

*систем*, предназначенных для автоматического сбора и обработки измерительной информации.

Аналогично можно проследить развитие других средств измерительной информационной техники, приведшее к необходимости создания измерительных систем, а также систем автоматического контроля, технической диагностики, распознавания образов.

Перечисленные системы получили название *измерительных информационных систем* (ИИС) (иногда их называют информационно-измерительными, измерительно-вычислительными системами или комплексами, системами сбора и обработки измерительной информации и т. п.).

Под ИИС понимаются системы, предназначенные для автоматического получения количественной информации непосредственно от изучаемого объекта путем измерения и контроля, обработки этой информации и выдачи ее в виде совокупности именованных чисел, высказываний, графиков, отражающих состояние данного объекта.

Для создания ИИС необходимо иметь соответствующую материальную базу, включающую в себя первичные измерительные преобразователи, образцовые меры, измерительные цепи, коммутационные и сканирующие устройства, функциональные преобразователи, устройства кратковременной и долговременной памяти, вычислительные, выходные устройства и т. д.

Поскольку в большинстве ИИС можно выделить типовые функциональные узлы и блоки, то решительное ускорение и улучшение проектирования и изготовления разнообразных ИИС будут достигнуты путем создания унифицированных типовых блоков с соответствующим метрологическим и программным обеспечением ИИС, строящихся из этих блоков.

Подобный подход использован в Государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). В ГСП входят несколько агрегатных комплексов, в основу которых положены блочно-модульный принцип построения систем, унификация сигналов для передачи и переработки измерительной, контрольной или командной информации, унификация параметров питания, конструктивных размеров блоков и условий эксплуатации.

В предлагаемой вниманию читателя книге объединяются теоретические основы получения измерительной информации с их приложением к объяснению принципов действия и проектированию основных разновидностей измерительных приборов. Основное внимание уделяется измерительным и контрольным системам, а также перспективным вопросам их построения на базе агрегатных комплексов ГСП.

## Глава 1

### ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ЕДИНИЦЫ

#### 1.1. Виды физических величин и единиц

В науке, технике и обыденной жизни человек имеет дело с разнообразными свойствами окружающих тел. Эти свойства отражают процессы взаимодействия тел между собой и их воздействие на органы чувств. Для описания свойств вводятся физические величины, каждая из которых является качественно общей для многих объектов (физических тел, их состояния, процессов, в которых они участвуют), но в количественном отношении различной для разных объектов. Для того чтобы дать меру физической величине, устанавливают единицу. *Единица определенной физической величины* представляет собой значение данной величины, которое по определению считается равным 1. Операция, с помощью которой получают числовое значение той или иной величины для определенного объекта, представляет собой *измерение физической величины*. Для того чтобы такое измерение имело однозначный характер, нужно обеспечить следующее условие: отношение двух однородных (одноименных) величин не должно зависеть от того, с помощью какой единицы они измерены. Подавляющее большинство физических величин удовлетворяет этому условию, которое обычно называют *условием абсолютного значения относительного количества*. Оно может быть соблюдено при наличии по крайней мере принципиальной возможности такого количественного сравнения двух однородных величин, в результате которого получается число, выражающее отношение этих величин. Однако иногда требуется измерить свойства, которые не могут быть охарактеризованы величиной, отвечающей данному требованию. В этом случае вводят некоторые условные величины и соответственно шкалы.

Множество разнообразных единиц величин создает серьезные трудности прежде всего в международных торговых отношениях и обмене результатами научных исследований.

Большинство единиц установилось, как правило, совершенно независимо друг от друга. Исключение в ряде случаев составляли лишь единицы длины, площади и объема. Основные величины выбираются из условия независимости между собой и с учетом возможности установить с их помощью связи с другими физическими величинами. Эти связи устанавливаются с помощью известных закономерностей между основными и производными от них величинами. Таким образом, из нескольких условно выбираемых так называемых основных единиц строятся производные единицы.

В метрологии существует два вида уравнений, связывающих между собой различные физические величины: уравнения связи между величинами и уравнения связи между числовыми значениями.

*Уравнения связи между величинами* представляют собой соотношения между величинами в общем виде, независимо от единиц:

$$X = f(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (1.1)$$

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

Если  $X_1, X_2, \dots, X_m$  являются основными величинами, то уравнение (1.1) служит для образования производных величин. Например, сила  $F$  определяется уравнением  $F = ma$ , где  $m$  — масса тела, к которому приложена сила;  $a$  — ускорение, приобретаемое телом при приложении к нему данной силы. Поскольку длина, масса и время во всех системах представляют собой основные величины, то сила является производной величиной.

*Уравнения связи между числовыми значениями* используются для установления единиц измерений. Они могут иметь различный вид, в зависимости от выбранных единиц, входящих в уравнение величин. При этом в них часто имеются коэффициенты пропорциональности. Входящие в уравнение (1.1) величины можно представить в соответствии с основным уравнением измерений как

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

где  $q, q_1, q_2, \dots, q_m$  — числовые значения, а  $[X], [X_1], [X_2], \dots, [X_m]$  — единицы величин [3].

## 1.2. Системы единиц физических величин

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

Исторически первой системой единиц физических величин была принята в 1791 г. Национальным собранием Франции *метриче-*

ская система мер, включающая в себя единицы длин, площадей, объемов, вместимостей и веса. Основными единицами измерений являлись метр и килограмм.

Немецкий математик К. Гаусс в 1832 г. предложил методику построения системы как совокупности основных и производных единиц. За базу в ней были приняты три независимые друг от друга единицы: длина, масса и время. Такую систему единиц, связанных определенным образом с тремя единицами длины, массы и времени, Гаусс назвал *абсолютной системой*. За основные единицы он взял миллиметр, миллиграмм и секунду.

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

**Система СГС.** Основными единицами в системе единиц физических величин СГС являются сантиметр — единица длины, грамм — единица массы и секунда — единица времени. Эта система была установлена в 1881 г. Первым международным конгрессом электриков по принципам, предложенным К. Гауссом. Конгресс ввел наименования двух важнейших производных единиц: дин — единица силы и эрг — единица работы. Для измерения мощности в системе СГС применяется эрг в секунду, для измерения кинетической вязкости — стокс, динамической — пуаз.

Давление в системе СГС измеряют в динах на квадратный сантиметр. Эта единица в прошлом называлась «бар», однако в связи с переименованием в бар единицы давления, равной  $10^5$  Н/м<sup>2</sup>, для единицы давления СГС иногда применяют наименование «барий» и одновременно «микробар» ( $1 \cdot 10^{-6}$  бара).

В области механических измерений система СГС опирается на три основные единицы, из которых остальные образуются как производные. Сложнее обстоит дело с применением системы СГС для электрических и магнитных измерений. Исторически сложилось так, что для них к настоящему времени существует семь видов системы СГС, из которых наиболее распространены:

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

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

- симметричная система СГС, или система Гаусса. В ней электрические единицы совпадают с электрическими единицами СГСЭ, а магнитные — с магнитными единицами СГСМ.

**Система МКГСС.** В период установления метрической системы мер, в конце XVIII в. килограмм был принят как единица веса. Применение килограмма как единицы веса, а в последующем как единицы силы вообще, привело в конце XIX в. к формированию системы единиц физических величин с тремя основными единицами: метр — единица длины, килограмм-сила — единица силы и секунда — единица времени (система МКГС). Килограмм-сила (кгс) — это сила, которая сообщает массе, равной массе международного прототипа килограмма, ускорение  $9,80665 \text{ м/с}^2$  (нормальное ускорение свободного падения).

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

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

Широко применялись в технике единицы работы и энергии МКГСС — килограмм-сила-метр (кгс-м) и единица мощности — килограмм-сила-метр в секунду (кгс · м/с).

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

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

В системе МТС единицей силы служит стен (сн), равный силе, сообщающей массе  $1 \text{ т}$  ускорение  $1 \text{ м/с}^2$ , единицей давления — пеза —  $1 \text{ сн/м}^2$ .

**Абсолютная практическая система электрических единиц.** Эта система была установлена в 1881 г. первым Международным конгрессом электриков в качестве производной от системы СГСМ и предназначалась для практических измерений в связи с тем, что электри-

ческие и магнитные единицы системы СГС оказались неудобными для практики (одни слишком велики, другие слишком малы). В числе первых практических электрических единиц были приняты:

- ом — единица электрического сопротивления, равная  $10^9$  единиц сопротивления в СГСМ;
- вольт — единица электродвижущей силы, равная  $10^8$  единиц электродвижущей силы в СГСМ;
- ампер — единица силы электрического тока, равная  $10^{-1}$  электромагнитной единицы силы тока в СГСМ;
- фарад — единица электрической емкости, равная  $10^{-9}$  единицы электрической емкости в СГСМ.

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

- 1) джоуль — единица энергии, равная  $10^7$  единиц энергии в СГСМ;
- 2) ватт — единица мощности, равная  $10^7$  единиц мощности в СГСМ;
- 3) квадрант (впоследствии это наименование заменено на генри) — единица индуктивности, равная  $10^9$  единиц индуктивности в СГСМ.

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

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

Конгресс установил три основные международные электрические единицы: международный ом, для определения которого использовали ртутный эталон, международный ампер, определяемый с помощью серебряного вольтметра; международный вольт, определяемый по элементу Л. Кларка. Остальные электрические единицы (международный кулон, международная фарада и др.) были определены как производные от них.

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



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

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

**Внесистемные единицы.** Несмотря на некоторые преимущества, которые дает применение единиц, определяемых той или иной системой, до настоящего времени широко распространены различные единицы, не укладывающиеся ни в одну из систем. Число так называемых внесистемных единиц довольно велико, и от многих из них нельзя отказаться ввиду удобства их применения в определенных областях, другие из них сохранились в силу исторических традиций. Так, исторически возникла единица давления — атмосфера, равная давлению, производимому силой 1 кгс на площадь 1 см<sup>2</sup>, так как атмосфера близка по размеру к среднему давлению атмосферного воздуха на уровне моря.

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

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

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

**Относительные и логарифмические величины и единицы.** В науке и технике широко распространены относительные и логарифмические величины и их единицы, которыми характеризуют состав и свойства материалов, отношения энергетических и силовых величин, например относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, усиление и ослабление мощностей и т. п.

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

Относительные величины могут выражаться в безразмерных единицах (когда отношение двух одноименных величин равно 1), в процентах (когда отношение равно  $10^{-2}$ ), промилле (отношение равно  $10^{-3}$ ) или миллионных долях (отношение равно  $10^{-6}$ ).

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

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

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

### 1.3. Международная система единиц физических величин

В 1950—1960-е гг. все чаще проявлялось стремление многих стран к созданию единой универсальной системы единиц, которая могла бы стать международной. В числе общих требований к основным и производным единицам выдвигалось требование когерентности такой системы единиц. Дело в том, что одновременное применение разных систем единиц в отдельных областях привело по сути дела к засорению многих расчетных формул числовыми коэффициентами, не равными 1, что сильно усложнило расчеты.

Например, в технике стало обычным применение для измерения массы единицы системы МКС — килограмма, а для измерения силы — единицы системы МКГСС — килограмм-силы. Это представлялось удобным с той точки зрения, что числовые значения массы (в килограммах) и веса (в килограмм-силах), т. е. силы притяжения к Земле, оказались равными (с точностью достаточной для большинства практических случаев). Однако следствием приравнивания значений разнородных по существу величин было

появление во многих формулах числового коэффициента 9,81 и к смещению понятий массы и веса, которое породило много недо-разумений и ошибок.

Такое многообразие единиц и связанные с этим неудобства породили идею создания универсальной системы физических величин всех отраслей науки и техники, которая могла бы заменить все существующие системы и отдельные внесистемные единицы. Такой системой стала Международная система единиц.

В 1954 г. X ГКМВ установила шесть основных единиц для международных сношений: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча. В 1960 г. XI ГКМВ утвердила Международную систему единиц, обозначаемую сокращенно *SI* (начальные буквы французского наименования *System International d'Unites*), в русской транскрипции — СИ.

В результате некоторых видоизменений, принятых ГКМВ в 1967, 1971, 1979 гг., в настоящее время система включает в себя семь основных единиц (табл. 1.1).

Универсальность системы СИ обеспечивается тем, что семь основных единиц, положенных в ее основу, являются единицами физических величин, отражающих основные свойства материального мира, и дают возможность образовывать производные единицы для любых физических величин во всех отраслях науки и техники.

Этой же цели служат и дополнительные единицы, необходимые для образования производных единиц, зависящих от плоского и телесного углов.

Преимущества системы СИ перед другими системами единиц:

- является универсальной, охватывает все области науки, техники, производства;

Таблица 1.1

**Основные единицы системы СИ**

| Показатель                    | Единица измерений | Обозначение   |         |
|-------------------------------|-------------------|---------------|---------|
|                               |                   | международное | русское |
| Длина                         | метр              | <i>m</i>      | м       |
| Масса                         | килограмм         | <i>kg</i>     | кг      |
| Время                         | секунда           | <i>S</i>      | с       |
| Сила электрического тока      | ампер             | <i>A</i>      | А       |
| Термодинамическая температура | кельвин           | <i>K</i>      | К       |
| Количество вещества           | моль              | <i>mol</i>    | моль    |
| Сила света                    | кандела           | <i>kd</i>     | кд      |

- построена для некоторой системы величин, позволяющих представить явления в форме математических уравнений; некоторые из физических величин приняты основными и через них выражены все остальные — производные физические величины. Для основных величин установлены единицы, размер которых согласован на международном уровне, а для остальных величин образуются производные единицы;

- входящие в нее единицы являются когерентными (связанными, согласованными). Коэффициенты пропорциональности в физических уравнениях, определяющих единицы производных величин, равны безразмерной единице;

- устранена множественность единиц (унификация единиц для всех видов измерений) для выражения величин одного и того же ряда. Например, вместо большого числа единиц давления, применявшихся на практике, единицей давления в системе СИ принята только одна единица — паскаль. В области тепловых измерений произведен переход от раздельного измерения работы и количества теплоты в джоулях и калориях к единому измерению в джоулях;

- разграничены понятия массы (кг) и веса (Н) путем установления для каждой физической величины своей единицы. Понятие массы следует использовать во всех случаях, когда имеется в виду свойство тела или вещества, характеризующее его инертность и способность создавать гравитационные поля, а понятие веса необходимо использовать, когда имеется в виду сила, возникающая вследствие взаимодействия с гравитационным полем;

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

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

#### 1.4. Определения единиц системы СИ

**Основные единицы системы СИ.** В соответствии с решениями ГКМВ, принятыми в разные годы, действуют следующие определения основных единиц системы СИ.

Единица длины — *метр* — длина пути, который проходит свет в вакууме за  $1/299\,792\,458$  долю секунды (решение XVII ГКМВ в 1983 г.).

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

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

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

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

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

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

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

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

Единица плоского угла — *радиан* (рад, *rad*) — угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми по длине равна радиусу. В градусном исчислении угол  $\alpha = 57^{\circ} 1744,8''$ .

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

Как радиан, так и стерадиан размерности не имеют. Безразмерность этих единиц означает то, что при определяющем уравнении  $\alpha = l/r$  принятая, например, единица плоского угла оказывает