

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активно развивается парадигма киберфизических систем (CPS, Cyber-Physical System) [47]. CPS состоят из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, обеспечивающих интеграцию вычислительных и физических ресурсов в единое целое и координацию их взаимодействия. Такие системы осуществляют мониторинг физических процессов с использованием петь обратной связи, где происходящее в физических системах оказывает влияние на вычисления и наоборот [26, 27].

Характеристики киберфизических систем определяются особенностями чувствительных элементов, вычислительно-преобразовательными и коммуникационными возможностями первичных преобразователей и процессорных ядер, принципами работы исполнительных механизмов.

Структурно киберфизическая система, как правило, представляет собой распределенную иерархическую систему, имеющую многоуровневую архитектуру, причем на каждом уровне системы проявляются новые свойства, обеспеченные сверхсуммарным эффектом свойств нижних уровней.

Развитие киберфизических систем стало возможным благодаря следующим технологическим факторам:

- повысилась доступность и снизилась стоимость вычислительных ресурсов (процессоров, памяти, систем хранения данных);
- появились возможности высокоскоростной передачи больших объемов данных;
- благодаря развитию облачных технологий и способов обработки больших объемов данных развиваются гибкие системы хранения и анализа данных, допускающие увеличение объема получаемой и обрабатываемой информации;
- постоянно увеличивается номенклатура «легко подключаемых» к интегрированной среде устройств получения первичной информации.

Развитие киберфизических систем обусловлено не только новыми технологиями, но и появившимися возможностями по созданию интегрированных элементов. В них сочетаются функции:

- первичного преобразования информации о физическом объекте или явлении различной природы в электрический сигнал;

– промежуточного преобразования для получения необходимой формы представления данных;

– вычислительных преобразований, обеспечивающих формирование выходного сигнала, передаваемого в ядро киберфизической системы, расположенной на следующем уровне.

Иными словами, часть вычислительной обработки смещается от вычислительного ядра ближе к чувствительному элементу, реализуя «вычисления около сенсора» [53, 55, 57].

В связи с этим материал в книге представлен в соответствии с концепцией модульной организации информационно-измерительных преобразователей, в составе которых выделены чувствительные элементы, промежуточные преобразователи, а также датчики, являющиеся комбинацией этих модулей. Отдельно рассмотрены узлы и устройства, выполняющие вычислительные преобразования сигналов от датчиков в базисе цифровых элементов и с использованием процессорных средств. Такая концепция позволяет легко комбинировать элементы различных уровней в единую иерархическую систему.

В предлагаемой книге авторы постарались отразить основные тенденции в развитии информационно-измерительных преобразователей, связанные с особенностями построения киберфизических систем, в том числе рассматривая варианты реализаций преобразователей на микросистемном и интегральном уровнях.

В 2019 году исполнилось 100 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, Заслуженного профессора Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» Владимира Борисовича Смолова – основоположника теории проектирования аналоговых, цифровых и гибридных электронно-вычислительных преобразователей. Подходы и методы, предложенные В. Б. Смоловым, и сегодня используются при первичной обработке аналоговых, цифровых и квази-цифровых сигналов, представляющих входную информацию для киберфизических систем.

Авторы – ученики Владимира Борисовича – посвящают эту книгу его памяти.

1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ БАЗИС ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1.1. *Общие вопросы, термины и определения*

Физическая величина – это свойство общее для ряда физических объектов в качественном отношении, но особое для каждого – в количественном. Распространенные физические величины: сила тока, напряжение, сопротивление, время, температура и т. д.

Значение физической величины – это ее оценка в виде некоторого числа в принятых для нее единицах. Например: 2 А – сила электрического тока; 100 В – значение напряжения; 20 Ом – сопротивление. Число, входящее в значение физической величины (в приведенных примерах 2; 100; 20) – *числовое значение физической величины*.

Применительно к значению физической величины существуют два понятия: истинное и действительное значения.

Истинное значение физической величины – это значение величины в качественном и количественном отношениях идеальным образом отражающее свойство объекта; истинные значения физических величин неизвестны.

Действительное значение физической величины – это значение, найденное экспериментально и приближенное к истинному значению настолько, что в конкретном случае может быть использовано вместо него.

Совокупность операций для определения действительного значения физической величины опытным путем с использованием специальных технических средств называется *измерением*.

Качество применяемых измерительных технических средств определяет степень приближения действительных значений физических величин к истинным значениям.

1.2. *Модульный принцип построения измерительных средств*

Модульность – свойство объекта, отражающее его приспособленность к последовательной декомпозиции (и/или синтезу) на (из) функциональные единицы, характеризующееся определенными видами вертикальной (межуровневой) и горизонтальной (внутриуровневой) совместимости. В качестве объектов могут быть рассмотр-

рены любые технические объекты, в том числе измерительные средства.

Типизация – разработка типовых объектов на основе общих для ряда объектов характеристик.

Унификация – выбор рационального числа (в основном за счет сокращения) объектов одинакового функционального назначения.

Стандартизация – процесс установления и применения стандартов.

Модульный принцип построения измерительных средств – принцип, характеризующийся определенным количеством уровней иерархии модулей и согласованностью функций, выполняемых модулями.

Модуль – функционально законченный объект измерительных средств.

Совместимость модулей – свойство, определяющее возможность организации между модулями непосредственного взаимодействия при построении измерительных средств. При построении измерительных средств целевой функцией является достижение метрологической и информационной совместимости. Кроме того, обеспечиваются программная, электромагнитная, параметрическая, конструкторско-технологическая и эксплуатационная совместимости.

К техническим средствам измерения по модульному принципу относятся разноуровневые объекты: меры (уровень 0), сенсоры (уровень 1), датчики (уровень 2), измерительные преобразователи (уровень 3), приборы (уровень 4), установки (уровень 5) и системы (уровень 6).

Мера – средство измерений, обеспечивающее воспроизведение значения физической величины заданного размера.

Сенсор – это чувствительный элемент, реагирующий на внешнее воздействие для получения измерительной информации.

Датчик – конструктивно обособленный преобразователь с сенсором, формирующий измерительный сигнал.

Измерительный преобразователь – метрологически нормированное техническое средство для преобразования измеряемой величины в форму, удобную для дальнейшего использования.

Измерительный прибор – это средство измерений, представляющее измерительную информацию в требуемой окончательной форме.

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, сенсоров, датчиков, измерительных преобразователей, измерительных приборов и других технических средств, размещен-

ных в разных точках контролируемого объекта с целью измерений одной или нескольких физических величин, характеризующих этот объект, и выработки соответствующих измерительных сигналов.

Средства измерений могут строиться на основе интеграции модулей различных уровней.

1.3. Характеристики измерений

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины определяется непосредственно из опытных данных. Примерами прямых измерений являются: измерение массы на весах, измерение температуры термометром, измерение длины линейкой.

Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины определяется на основании известной зависимости между ней и величинами, измеряемыми прямым измерением. Примером косвенного измерения является измерение скорости движения объекта на основе информации о пройденном пути и времени, потраченном на его прохождение.

Чувствительность средства измерения или метода определяется как отношение изменения выходного сигнала к вызвавшему его изменению измеряемой величины. Различают абсолютную S и относительную S_0 чувствительности, которые определяются по формулам:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta X},$$

$$S_0 = \frac{\Delta L}{\frac{\Delta X}{X}},$$

где ΔL – изменение сигнала на выходе;

ΔX – изменение измеряемой величины;

X – измеряемая величина.

Точность получения результатов измерений зависит от чувствительности.

Порог чувствительности – это характеристика измерительного средства, определяющая наименьшее изменение измеряемой величины, которое приведет к заметному устойчивому изменению выходного сигнала.

Диапазон измерений – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

1.4. Системы единиц физических величин

Для измерения физических величин используются соответствующие единицы.

Единица физической величины – физическая величина фиксированного размера, имеющая числовое значение, равное 1.

Основная единица физической величины – это единица физической величины в определенной системе единиц.

Производная физическая величина – это физическая величина, полученная на базе основных или уже определенных производных единиц выбранной системы в соответствии с уравнением, связывающим их между собой.

Система единиц физических величин – это совокупность основных и производных единиц, образованная в соответствии с принятыми принципами.

Наиболее распространенной системой физических величин является «Международная система единиц» (СИ), основанная на метрической системе мер. В Российской Федерации действует государственный стандарт ГОСТ 8.417-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений [38, 45]. Единицы величин», устанавливающий используемые единицы измерения (табл. 1.1).

ГОСТ 8.417-2002 также дает официальные определения основных величин. При этом за основу взяты резолюции Генеральной Конференции по Мерам и Весам (ГКМВ). ГКМВ проводятся раз в четыре года и решают вопросы, связанные с применением международной системы единиц.

Например, в соответствии с резолюцией 1 XVII ГКМВ (1983 г.) метр определен как длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ с, а секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция 1].

Использовавшееся ранее понятие дополнительных величин в 1995 г. ХХ ГКМВ было исключено, а относившиеся ранее к этому классу радиан и стерадиан было решено считать безразмерными производными единицами СИ (имеющими специальные наименования и обозначения), которые могут быть использованы или не использованы в выражениях для других производных единиц СИ [4].

Таблица 1.1. Единицы измерения

| Величина | | Единица | | |
|---------------------|--------------|--------------|----------------|---------|
| Наименование | Размер-ность | Наименование | Обозначение | |
| | | | междуна-родное | русское |
| Длина | L | метр | m | м |
| Масса | M | килограмм | kg | кг |
| Время | T | секунда | s | с |
| Сила тока | I | Ампер | A | А |
| Температура | Θ | Кельвин | K | К |
| Количество вещества | N | моль | mol | моль |
| Сила света | J | кандела | cd | кд |

Кроме того, в ГОСТ 8.417-2002 определены производные физические величины. Для них единицы СИ образуют по правилам формирования когерентных производных единиц при помощи простейших уравнений связи между величинами, с единичными числовыми коэффициентами.

Наиболее употребляемые производные единицы, принятые в системе СИ, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Производные единицы, принятые в системе СИ

| Величина | Определяющее уравнение | Наименование, обозначение |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Площадь (S) | $S = l^2$, l – длина стороны квадрата | квадратный метр, m^2 |
| Объем, вместимость. (V) | $V = l^3$, l – длина ребра куба | кубический метр, m^3 |
| Скорость равномерного движения (U) | $U = \frac{\Delta S}{\Delta t}$, ΔS – путь, Δt – время | метр в секунду, m/s |
| Ускорение (a) | $a = \frac{\Delta U}{\Delta t}$, ΔU – изменение скорости равномерного движения за время Δt | метр на секунду в квадрате, m/s^2 |

| <i>Величина</i> | <i>Определяющее уравнение</i> | <i>Наименование, обозначение</i> |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Плотность однородного тела (ρ) | $\rho = \frac{m}{V}$, m – масса тела, V – объем тела | килограмм на кубический метр, $\text{кг}/\text{м}^3$ |
| Удельный объем | $\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta V}{\Delta m}$ | кубический метр на килограмм, $\text{м}^3/\text{кг}$ |
| Плотность электрического тока | $j = \frac{I}{S}$, где I – сила тока, S – площадь поперечного сечения проводника | ампер на квадратный метр, $\text{А}/\text{м}^2$ |

Ряд производных единиц СИ имеет специальные наименования и обозначения (табл. 1.3), которые также могут быть использованы для образования других производных единиц СИ (табл. 1.4).

Таблица 1.3. Производные единицы со специальными наименованиями и обозначениями

| <i>Величина</i> | <i>Определяющее уравнение</i> | <i>Наименование, обозначение</i> |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Сила (F) | $F = m \cdot a$, m – масса тела; a – ускорение, сообщаемое телу силой F | ньютон ($\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$), Н |
| Частота (F) | $F = 1/T$, T – период времени, в течение которого совершается один цикл периодического процесса | герц (с^{-1}), Гц |
| Работа, энергия (J) | $dJ = F \cdot \cos\alpha \cdot dr$, F – сила, действующая на тело; α – угол между направлением действия силы и движением тела; dr – бесконечно малое перемещение тела под воздействием силы | дюйм (Н·м), Дж |
| Мощность (W) | $W = dA/dt$, dA – работа; dt – промежуток времени, в течение которого эта работа совершается | ватт (Дж/с), Вт |

Продолжение табл. 1.3.

| <i>Величина</i> | <i>Определяющее уравнение</i> | <i>Наименование, обозначение</i> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Давление (P) | $P = F/S$, F – сила; S – площадь | паскаль ($\text{Н}/\text{м}^2$), Па |
| Электрический заряд, количество электричества | | кулон ($\text{А}\cdot\text{с}$), Кл |
| Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвигущая сила | $V = W/A$, W – выделяемая мощность; A – сила тока 1 А | вольт ($\text{А}^2\cdot\text{с}^4/\text{кг}\cdot\text{м}^2$), В |
| Электрическая емкость | $C = Q/\phi$, Q – заряд; ϕ – потенциал проводника | фарад ($\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^3\cdot\text{А}$), Ф |
| Электрическое сопротивление | $R = U/I$, U – напряжение на концах проводника; I – сила тока | ом ($\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^3\cdot\text{А}^2$), Ом |
| Электрическая проводимость | | сименс ($\text{с}^3\cdot\text{А}^2/\text{кг}\cdot\text{м}^2$), См |
| Температура Цельсия | $t = T - T_0$, где T – температура Кельвина, $T_0 = 273,15^\circ\text{K}$ | градус Цельсия, $^\circ\text{C}$ |

Таблица 1.4. Производные на базе единиц со специальными наименованиями и обозначениями

| <i>Величина</i> | <i>Определяющее уравнение</i> | <i>Наименование, обозначение</i> |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Поверхностное напряжение (коэффициент поверхностного натяжения) (α) | $\alpha = \Delta F/\Delta l$, ΔF – сила, действующая на участок контура поверхности жидкости; Δl – длина участка | ньютон на метр, $\text{Н}/\text{м}$ |

| <i>Величина</i> | <i>Определяющее уравнение</i> | <i>Наименование, обозначение</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Динамическая вязкость (коэффициент вязкости, коэффициент внутреннего трения) (η) | $\eta = \frac{F}{\left(\frac{dU}{dl}\right)\Delta S}, F - \text{сила внутреннего трения; } \Delta S - \text{площадь поверхности слоя, на которую действует сила } F; \left(\frac{dU}{dl}\right) - \text{градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости при переходе от одного слоя жидкости к другому}$ | паскаль-секунда, Па·с |

1.5. Внесистемные единицы физических величин

К *внесистемным единицам* относят единицы, не входящие ни в одну из систем. При этом многие из них дополняют систему СИ и удобны для практического применения. Наиболее используемые внесистемные единицы приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Внесистемные единицы, допускаемые к применению

| <i>Наименование величины</i> | <i>Единица</i> | | |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| | <i>Наименование</i> | <i>Обозначение</i> | <i>Соотношение с единицей СИ</i> |
| Время | минута час сутки | мин ч сут | 60 с 3600 с 84 400 с |
| Объем | литр | л | 10^{-3} м^3 |
| Плоский угол | градус минута' секунда'' |" | $(\pi/180) \text{ рад}$ $(\pi/18 000) \text{ рад}$ $(\pi/648 000) \text{ рад}$ |
| Энергия | электрон-вольт | эВ | $1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ |
| Полная мощность | вольт-ампер | В·А | |
| Реактивная мощность | вар | вар | |
| Электрический заряд, количество электричества | ампер-час | А·ч | $3,6 \cdot 10^3 \text{ C}$ |

Кратная единица – единица, в целое число раз превышающая системную или внесистемную единицу, образуется со множителем 10 в степени n . Например, кратная единица длины – киловольт – в 1000 раз больше исходной единицы вольта ($1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$).

Дольная единица – это единица, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы. Например, дольная единица длины – сантиметр – в 100 раз меньше исходной единицы метра ($1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$).

ГОСТ 8.417-2002 предусматривает применение десятичных кратных и дольных единиц, приведенных в табл. 1.6.

В устройствах цифровой обработки и передачи информации для определения объема запоминающих устройств (объема памяти) применяют понятие «количество информации».

В соответствии с международным стандартом МЭК 60027-2 единицы «бит» (бит) и «байт» (Б), $1 \text{ Б} = 8 \text{ бит}$. Единицы количества информации применяют с приставками СИ (табл. 1.6). При этом исторически сформировалось следующее использование приставок СИ: $1 \text{ Кбайт} = 1024 \text{ байт}$ (2^{10} вместо 10^3), $1 \text{ Мбайт} = 1024 \text{ Кбайт}$, $1 \text{ Гбайт} = 1024 \text{ Мбайт}$ и т. д. В отличие от строчной буквы «к», обозначающей множитель 10^3 , обозначение Кбайт начинают с прописной буквы.

Таблица 1.6. **Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц**

| Мно- жи- тель | Наиме- нование (при- ставка) | Обозначение | |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| | | ру- с- ское | меж- дуна- родное |
| 10^{18} | экса | Э | Е |
| 10^{15} | пэта | П | Р |
| 10^{12} | тера | Т | Т |
| 10^9 | гига | Г | Г |
| 10^6 | мега | М | М |
| 10^3 | кило | к | К |
| 10^2 | гекто | г | h |
| 10^1 | дека | да | da |

| Мно- жи- тель | Наимено- вание (пристав- ка) | Обозначение | |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| | | ру- с- ское | между- народ- ное |
| 10^{-1} | дэци | д | d |
| 10^{-2} | санти | с | c |
| 10^{-3} | милли | м | m |
| 10^{-6} | микро | мк | μ |
| 10^{-9} | нано | н | n |
| 10^{-12} | пико | п | p |
| 10^{-15} | фемто | Ф | f |
| 10^{-18} | атто | а | a |

1.6. Относительные и логарифмические величины

Все системные *относительные величины* выражаются в безразмерных единицах, которые равны относительной величине, равной 1.

Кроме того, относительные величины могут выражаться во внесистемных относительных единицах: процентах, промилле и миллионных долях.

Процент (%) – единица относительной величины, равная одной сотой безразмерной единицы, $1\% = 10^{-2}$.

Промилле (‰) – единица относительной величины, равная одной тысячной безразмерной единицы, $1\‰ = 10^{-3}$.

Миллионная доля (ppm, млн⁻¹) – единица относительной величины, равная одной миллионной безразмерной единицы, $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$.

Иногда целесообразно использовать логарифмические величины.

Логарифмической величиной называют величину, равную логарифму безразмерного отношения физической величины к однородной величине, принятой за исходную.

Логарифмические величины выражаются во внесистемных логарифмических единицах – белах, децибелях и неперах. *Бел (Б)* – единица десятичной логарифмической величины.

Для *энергетических величин* (мощности, энергии, плотности энергии, абсорбции и т. д.) бел – это логарифм безразмерного отношения измеряемой величины P_2 к однородной величине P_1 , принятой за исходную:

$$1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1), \text{ при } P_2 = 10P_1.$$

При $P_2 > P_1$ логарифм отношения мощности положителен, что соответствует усилению, а при $P_2 < P_1$ логарифм отрицателен, что соответствует ослаблению.

Для *силовых величин* (напряжения, силы света, силы тока и т. д.) бел – это удвоенный логарифм отношения измеряемой величины F_2 к однородной величине F_1 , принятой за исходную:

$$1 \text{ Б} = 2\lg(F_2/F_1) \text{ при } F_2 = \sqrt{10}F_1.$$

Например, абсорбция – потеря (ослабление) мощности светового потока на 1 Б соответствует уменьшению мощности его в 10 раз, а ослабление силы света на 1 Б соответствует уменьшению этой величины в 3,162 раза.

Децибел 1 дБ = 0,1 Б.

Для энергетических величин $1 \text{ дБ} = 10\lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = \sqrt[10]{10}P_1$.

Для силовых величин $1 \text{ дБ} = 20\lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt[20]{10}F_1$.

Непер (Нп) – единица натуральной логарифмической величины. Для энергетических величин $1 \text{ Нп} = 0,5 \ln(P_2/P_1)$, при $P_2 = \sqrt[0.5]{e} P_1$. Для силовых величин $1 \text{ Нп} = 20 \ln(F_2/F_1)$ при $F_2 = eF_1$.

Таким образом, один непер для энергетической величины соответствует ослаблению (увеличению) энергии в 7,39 раза, а для силовых величин – соответственно в 2,718 раз.

Логарифмические единиц связаны следующим образом:

$$1 \text{ Нп} = 8,68 \text{ дБ} = 0,868 \text{ Б.}$$

Ряд соотношений между относительным изменением энергетических и силовых величин волях, белах и децибелах приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7. Соотношения между относительным изменением энергетических и силовых величин волях

| Б | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 1 | 1,3 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|
| дБ | 1 | 2 | 3 | 10 | 13 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| P_2/P_1 | 1,26 | 1,59 | 2 | 10 | 20 | 100 | 1000 | 104 | 105 |
| F_2/F_1 | 1,12 | 1,26 | 1,41 | 3,16 | 4,47 | 10 | 31,6 | 100 | 316 |

1.7. Общие правила наименования и обозначения единиц

1. Обозначение единиц, наименования которых образованы по фамилиям ученых, пишутся с прописной буквы. Например, единица мощности – ватт (Вт), единица температуры – кельвин (К), единица давления – паскаль (Па).

2. Наименование единицы, образованной как произведение единиц, записывается через дефис. Например, единица динамической вязкости в СИ – паскаль-секунда (Па·с).

3. Если единица представляет собой частное от деления, то ее наименование образуется так: сначала записываются в именительном падеже наименования единиц, стоящих в числителе, а затем наименования единиц, стоящих в знаменателе, с предлогом «на». Например, единица удельного объема в СИ – кубический метр на килограмм ($\text{м}^3/\text{кг}$).

Исключение составляют величины, характеризующие скорость протекания процесса. В наименованиях таких единиц предлог «на»

заменяется предлогом «в». Например, единица скорости в СИ – метр в секунду (м/с).

4. При склонении наименований единиц, содержащих знаменатель, изменяется только числитель. Например, поток излучения равен пяти тысячам джоулей в секунду.

Если единица есть результат произведения единиц, то в наименованиях таких единиц склоняются только последнее наименование и относящееся к нему прилагательное «квадратный» или «кубический».

5. Когда единица площади или объема входит в производную единицу другой величины, то применяются прилагательные «квадратный» или «кубический». Например, единица плотности – килограмм на кубический метр (кг/м³).

Если же вторая или третья степень длины по физическому смыслу не представляет собой площади или объем, то должно применяться выражение «в квадрате» или «во второй степени», «в кубе» или «в третьей степени». Например, единица момента импульса в СИ – килограмм-метр в квадрате в секунду (кг·м²/с).

6. В обозначениях сложных единиц следует ставить точку как знак умножения и косую черту как знак деления. Например: Па·с, м/с (но не $\frac{м}{с}$). При наличии произведения единиц в знаменателе произведение следует заключать в скобки. Например, Вт/(м·ср) – единица спектральной плотности энергетической силы света в СИ.

7. При указании интервала, предельных значений или перечислений нескольких величин следует приводить обозначение единицы не после каждого значения, а один раз без применения скобок. Например, «37 ± 0,1°C», «от 15 до 30 кг», «2, 8 и 10 кг».

8. Кратные и дольные приставки пишутся слитно. Например, микрометр, килограмм.

9. Присоединение двух и более приставок подряд к одной единице не допускается.

1.8. Погрешности измерений физических величин

Выше были даны определения истинного значения и действительного значения физической величины, а также измерения.

Отклонение результата измерения X от действительного значения измеряемой величины X_D называют погрешностью результата измерения ΔX :

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru