

Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет

В.Е.КУПРИЯНОВ

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Часть 1

ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ. СИСТЕМЫ И ЭТАЛОНЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

Владимир 2004

УДК 621.317
К92

Рецензенты:

Начальник отдела Владимирского центра стандартизации и метрологии, кандидат
технических наук, доцент

В.Н. Романов,

Начальник кафедры импульсной техники и электронных приборов
Московского военного института радиоэлектроники космических войск,

Кандидат технических наук

Н.П. Мащенко

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета.

Куприянов В.Е.

К92 Общая теория измерений. Часть 1. Основы общей теории измерений. Системы и эталоны физических величин.: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т; Владимир, 2004. 68 с.

ISBN 5-89368-461-3

В 1-й части рассмотрены формально-логические основания измерения как процесса познания, основные термины и определения общей теории измерений, основное уравнение измерения, типы шкал измерений, общие понятия систем физических величин, основные системы физических величин и их единиц, эталонная база Российской Федерации, государственные эталоны единиц наиболее распространённых физических величин, разновидности и правила оформления поверочных схем, примеры решения задач по получению производных единиц измерения системы СИ и по результатам измерения физических величин в различных системах единиц. Материал базируется на действующей нормативно-технической документации и рекомендациях международных организаций в области метрологии.

Во 2-й части будут рассмотрены методы измерений, математические модели измеряемых величин и средств измерений, основные погрешности измерений и математическая обработка результатов измерений. Материал базируется на действующей нормативно-технической документации и рекомендаций в области метрологии.

Предназначено для студентов специальностей 072000 «Стандартизация и сертификация», 340100 «Управление качеством» и 190800 «Метрология и метрологическое обеспечение». Может быть полезно студентам других специальностей, а также инженерно-техническим работникам специальностей, связанных с измерениями физических величин.

Ил. 4. Табл. 4. Библиогр.: 6 назв.

ISBN 5-89368-461-3

УДК621.317
© Владимирский государственный
университет, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс, происходящий в настоящее время во всех областях науки и техники, во многом базируется на результатах измерений различных физических и нефизических величин, которым предшествует огромная, кропотливая предварительная работа людей различных специальностей. Это объясняется тем, что без опережающего развития теории и практики измерений, как единственного способа получения количественной информации о величинах, характеризующих те или иные явления и процессы, невозможен прогресс практически во всех отраслях науки и техники.

С помощью результатов измерений, как результата процесса познания, человечество познаёт окружающий мир и на основании их стремится создать более благоприятные условия своей жизни. В результате этого человечество несёт значительные людские, материальные, финансовые, временные затраты на планирование, постановку, проведение и обработку результатов измерений. Так, на основании данных приведенных в [1], примерно 15% общественного труда затрачивается на проведение измерений, при этом от 3 до 6 % валового национального продукта передовых индустриальных стран тратится на измерения и связанные с ними операции. Поэтому важность и значимость измерений трудно как переоценить, так и недооценить.

Известно, что важнейшей задачей, возникающей в процессе измерений, является обеспечение единства измерений и достоверности их результатов. Сотрудничество Российской Федерации с зарубежными странами требует взаимного доверия к измерительной информации, полученной с помощью общепринятых способов, методов и средств измерений. При этом первостепенное значение имеет высокая точность и достоверность результатов измерений, единообразие принципов и способов оценки точности этих результатов, а также условий проведения измерений.

Накопленный к настоящему времени человечеством опыт проведения всех этапов проведения измерений позволил выработать ему для теории и практики измерений специальную терминологию; сформулировать основные понятия теории измерений; разработать различные системы физических величин и на их основе выработать единую международную систему единиц (систему СИ); сформулировать постулаты свойств физических величин; классифицировать и описать существующие к настоящему времени шкалы измерений, эталоны единиц физических величин, методы и средства измерений; разработать общие методики по обработке результатов измерений; разработать общие методы моделирования измеряемых величин, измерительных сигналов и средств измерений, а также ряд других положений, которые легли в основу изучения учебной дисциплины «Общая теория измерений» значительного количества учебных заведений нашей страны.

Накопленный автором опыт проведения лекционных, практических и лабораторных занятий по ряду технических и специальных измерительных учебных дисциплин, в том числе и по дисциплине «Общая теория измерений», позволил систематизировать и подготовить материал учебного пособия в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта для специальности 072000 «Стандартизация и сертификация» и специальности 190800 «Метрология и метрологическое обеспечение», утверждённого в 1995 году. Учебное пособие состоит из двух частей и предназначено для студентов специальностей 072000 «Стандартизация и сертификация», 340100 «Управление качеством» и 190800 «Метрология и метрологическое обеспечение». Оно может быть полезно студентам других специальностей, а также инженерно-техническим работникам специальностей, связанных с измерениями физических величин.

Автор весьма признателен и
сделавшим много ценных предложений и замечаний, которые были учтены при подготовке книги к изданию.

ВВЕДЕНИЕ.

Формально логические основания измерения как процесса познания

На протяжении всей истории развития человечества, а вместе с ним развития науки и техники перед человеком возникало и возникает множество проблем, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объектов материального мира (явлении, процессе, теле, веществе, изделии и пр.). Так, из истории известно, что уже более чем за четыре тысячелетия до новой эры в Египте проводились первые высокоточные, на тот период времени, измерения положения небесных светил, то есть астрономические измерения.

В настоящее время перечень и диапазон измеряемых величин постоянно растёт. Например, такие широко используемые человеком величины как длина, температура, электрическое сопротивление, сила электрического тока, величина электрического напряжения, величина электрической мощности, диапазон частот измеряются соответственно в следующих интервалах значений: $10^{-10} - 10^{17}$ м, $0,5 - 10^6$ К, $10^{-6} - 10^{17}$ Ом, $10^{-18} - 10^5$ А, $10^{-10} - 10^6$ В, $10^{-15} - 10^9$ Вт, $0 - 10^{11}$ Гц.

Основным способом получения количественной информации о свойстве объекта исследования являются измерения, при правильном выполнении которых находится результат измерения с большей или меньшей точностью, отражающий интересующие свойства объекта исследования. Поскольку критерием истины всегда служит практика (эксперимент), результаты измерений очень часто выступают в качестве критерия истины. Измерения делают представления о свойствах окружающего нас мира более полными и понятными. Без преувеличения можно сказать, что прогресс науки и техники определяется степенью совершенства измерений и измерительных приборов, а сами измерения служат источником нашего научного и практического познания. Здесь уместно приведение высказывания известного великого физика Макса Планка: «В физике существует только то, что можно измерить».

В соответствии с ГОСТ 16263-70 [2], **измерение** - это нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путём с помощью специальных технических средств. Среди большого количества философских, естественных и технических наук лишь одна из них занимается в полной мере измерениями. Эта наука называется – метрология. ГОСТ 16263-70 даёт следующее общепринятое определение:

«метрология – наука об измерениях, методах, средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности».

Основы отечественной метрологии заложил русский ученый Д. И. Менделеев (1834 — 1907). Роль и значение измерений Д. И. Менделеев определял так: «В природе мера и вес суть главное орудие познания. Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука не мыслима без меры». Зарождение в нашей стране *метрологической службы* следует отнести к 1842 г., в котором был издан закон, о мерах и весах, предусматривающий создание первого в России метрологического учреждения — *Депо образцовых мер*. В 1893 г. Д. И. Менделеев основал *Главную палату мер и весов*, в задачи которой входило не только хранение *эталонов* и обеспечение *поверки* по ним средств измерений, но и проведение научных исследований в области метрологии.

В связи с тем, что в настоящее время наблюдается бурное развитие электроники (особенно микроэлектроники), во многом определяющей прогресс человечества, а в ней, как известно, проводятся электрические измерения, то необходимо знать и помнить следующее. История развития техники *электрических измерений* связана с именами русских ученых М.В. Ломоносова и Г.В. Рихмана, которые в 40-х годах XVIII века сконструировали первый в мире электроизмерительный прибор, названный авторами *указатель электрической силы*. Лишь во второй половине XVIII — первой половине XIX в. выдающиеся ученые других стран (Вольт, Кулон, Ом, Фарадей и др.) продолжили создание иных видов приборов.

Первые электрические измерительные приборы использовались лишь для относительной оценки физической величины. Такое положение сохранялось до тех пор, пока не были определены электрические меры.

В 1875 г. по взаимной договоренности на специальной международной конференции с участием России была подписана метрическая конвенция, по которой страны обязались содержать «Международное бюро мер и весов» как центр, обеспечивающий единство измерений в международном масштабе. На международных конгрессах по электричеству (1881 г, Париж и 1893 г. — Чикаго) была принята, применяющаяся и до нашего времени, практическая система электрических и магнитных единиц, базирующаяся на международных единицах Ампера и Ома.

Чтобы успешно справиться с многочисленными и разнообразными проблемами измерений, необходимо освоить ряд общих принципов их решения, определить единую научную и законодательную базу, обеспечивающую на практике высокое качество измерений независимо от того, где и с какой целью они выполняются. Такой базой и является *метрология*.

Как известно, русский основоположник классификации наук академик Б.М. Кедров предложил понятие треугольника наук, «вершинами»

которого являются философские, естественные и социальные науки. Основной целью метрологии является познание окружающего нас мира. В этом ее связь с философией. Метрология относится к числу точных наук — в этом ее связь с математикой как наукой естественной. Измерения проводятся не только в технике, измерениями занимаются и психологи, и социологи, и представители многих других направлений, не относящихся к «точным» наукам. Так, широко распространенную в психологии оценку умственного развития человека называют измерением интеллекта. В этом связь метрологии с социальными науками. Поэтому метрологию можно поместить на любой стороне упомянутого треугольника.

Метрология включает общую теорию измерений физических величин, устанавливает и регламентирует единицы физических величин и их системы, порядок передачи размеров единиц от эталонов образцовым и рабочим средствам измерений, методы и средства измерений, общие методы обработки результатов измерений и оценки их точности.

Следует обратить внимание на то, что на этапе современной научно-технической революции в метрологии, и в частности в измерительной технике, происходят значительные качественные изменения. Измерения практически полностью переходят на цифровые методы, воплощенные в приборах с цифровым отсчетом и регистрацией; существенно расширяются диапазоны измеряемых величин; в измерительных системах широко применяется аналоговая и цифровая микроэлектроника; возникла необходимость в измерении характеристик случайных процессов. Все это требует нового подхода к состоянию средств измерений, к соответствию их метрологических свойств установленным нормам.

Кроме того, в настоящее время широкое применение в метрологии получила *квалиметрия* — учение о методах и приемах измерения (точнее, оценивания) качества. Методологическая общность классической метрологии и квалиметрии делает обоснованным изложение ряда элементов квалиметрии в рамках учебной дисциплины «Общая теория измерений».

Студентам, аспирантам и специалистам, особенно электрических измерений, необходимо учитывать то, что в последние годы сформировалось новое направление в метрологии и измерительной технике — это *компьютерно-измерительные системы* (КИС) и их разновидность — *виртуальные приборы* (виртуальный — кажущийся).

Виртуальный прибор — это специальная плата, устанавливаемая в персональный компьютер или внешнее устройство, подключаемое через порт в комплексе с соответствующим программным обеспечением. В зависимости от используемой платы и программного обеспечения пользователь получает измерительный прибор под ту или иную метрологическую задачу. Совершенно очевидно, что многие

метрологические и исследовательские задачи в ближайшее время будут решаться с помощью виртуальных приборов.

Материал представленный в учебном пособии базируется на знаниях полученных студентами по таким дисциплинам как: «Высшая математика», «Физика», «Информатика». В тоже время знания, приобретённые студентами по учебной дисциплине «Общая теория измерений», обеспечивают изучение ими в дальнейшем таких дисциплин как «Электрические измерения», «Измерение механических величин», «Методы и средства измерений, испытаний и контроля», «Квалиметрия», «Стандартизация и сертификация», а также ряда других специальных дисциплин.

Следует отметить, что современное состояние измерений и перспектива их развития предъявляют повышенные требования к выпускникам специальностей 072000, 340100, 190800 и в соответствии с общими квалификационными требованиями к студентам, обучающимся по данным специальностям, в результате изучения дисциплины они должны

знать:

- формально-логические основания измерения как процесса познания окружающего мира;
- основные разновидности шкал измерений, используемых в современных средствах измерений;
- основное уравнение измерения;
- системы физических величин и их единиц;
- принципы создания эталонов единиц физических величин и поверочных схем передачи размеров единиц физических величин;
- основы математического моделирования измеряемых физических величин и средств их измерения;
- понятие, классификацию и принципы оценивания погрешностей измерений;
- основы математической обработки результатов измерений основных видов измерений.

уметь:

- применять на практике методы и средства измерений некоторых физических величин;
- проводить необходимые расчеты по получению производных единиц измерения международной системы единиц физических величин, по переводу результата измерения физических величин из одной системы физических величин в другую, по правильной записи результатов измерений при внесистемных результатах измерений;
- применять на практике методики по оценке основных типов погрешностей методов и средств измерений при обработке результатов измерений.

ознакомиться:

- с понятием и классификацией методов и средств измерений;
- с математическими моделями элементарных и сложных измерительных сигналов;
- со структурными схемами моделей наиболее распространенных типов средств измерений;
- с методами уменьшения систематических погрешностей;
- с методами обработки результатов измерений некоторых типов измерений;
- с устройством и принципом действия основных средств измерений электрических величин.

Учебная дисциплина «Общая теория измерений» при подготовке специалистов по специальностям 072000, 340100, 190800 в соответствии с учебными планами является фактически первой дисциплиной по их метрологической подготовке. Именно на это в значительной степени и ориентировано данное учебное пособие, которое спланировано как основная учебная литература по дисциплине «Общая теория измерений» и дополнительная по другим смежным дисциплинам для данных специальностей.

1. ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Основные термины и определения общей теории измерений

Общая теория измерений (ОТИ), являясь фактически составной частью метрологии, как и любая другая наука, использует ряд специфических терминов, произвольное толкование которых недопустимо. Рассмотрим основные термины ОТИ, которые регламентированы Государственной системой обеспечения единства измерений (ГСОЕИ, упрощённое сокращение – ГСИ) в ГОСТ 16263-70.

Любой объект окружающего мира характеризуется своими свойствами. **Свойство** — философская категория, выражающая такую сторону объекта (процесса, явления), которая обуславливает его общность или различие с другими объектами (процессами, явлениями) и обнаруживается в его отношениях к ним. По своей сути свойство — категория качественная. Для количественного описания различных свойств явлений и физических тел вводится понятие величины.

Величина — свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной. Анализ величин позволяет разделить их на два вида: идеальные и реальные.

Идеальные величины относятся, в основном, к области математики и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий. Они могут вычисляться различными способами.

Реальные величины это величины, относящиеся к различным естественным и общественным наукам. Реальные величины подразделяются на физические и нефизические величины.

Физическая величина – свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них. Качественная сторона понятия «физическая величина» определяет, так называемый «род» величины (например, электрическое напряжение как свойство участков электрических цепей при протекании в них электрического тока), а количественная сторона – её «размер» (величина напряжения в вольтах конкретного участка электрической цепи). Физическая величина, свойственна материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия и т.п.) и технических науках. **Физические величины** подразделяются на *измеряемые* и *оцениваемые*. *Измеряемая ФВ* может быть выражена количественно в виде определённого числа установленных единиц измерения. *Оцениваемая*

ФВ – физическая величина, для которой по каким либо причинам не может быть введена единица измерения. *Оценивание* – операция приписывания данной ФВ определённого числа принятых для неё единиц, проведенная по установленным правилам.

Нефизическая величина - величина, присущая философским и социальным наукам (философии, социологии, экономике и т.п.). Нефизические величины, для которых единица измерения в принципе не может быть выделена, могут быть только оценены. Оценивание нефизических величин не является предметом изучения метрологии, а, следовательно, и ОТИ.

Значение физической величины – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для неё единиц измерения. Например, активное сопротивление резистора в результате измерений мультиметром составило значение 27,12 Ом. Следует отметить, что является неправильным применение выражений типа: «величина освещённости», «величина массы тела», «величина сопротивления», «величина напряжения» и т.п., поскольку освещённость, масса, сопротивление, напряжение сами являются величинами. Поэтому правильным будет применение выражений: «значение освещённости», «значение массы тела», «значение сопротивления», «значение напряжения» и т.п. *Значение физической величины можно охарактеризовать истинным, действительным и измеренным значениями.*

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом отражает в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Следует отметить, что истинное значение ФВ существует, однако определить его путем измерения невозможно – это один из постулатов метрологии. Данное обстоятельство обусловлено тем, что экспериментальное определение истинного значения ФВ невозможно из-за неизбежных погрешностей в процессе измерения.

Погрешность – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Действительное значение физической величины - значение физической величины, найденное экспериментальным путём и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Измеренное значение физической величины - значение физической величины, отсчитанное по отсчётному устройству средства измерения.

Влияющая физическая величина — физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это приводит к искажению результата измерения. Так, например, при измерении некоторых

параметров полупроводникового диода, влияющей величиной может быть температура, если эти параметры зависят от температуры.

Постоянная физическая величина — физическая величина, размер которой по условиям измерительной задачи можно считать не изменяющимся за время, превышающее длительность измерения.

Переменная физическая величина — физическая величина, изменяющаяся по размеру в процессе измерения.

Физический параметр — физическая величина, характеризующая частную особенность измеряемой величины. Например, при измерении напряжения переменного тока в качестве параметров напряжения могут выступать его амплитуда, мгновенное, средневыпрямленное (постоянная составляющая) или среднеквадратическое значения и пр.

Объективно метрология, а следовательно и ОТИ, изучает и имеет дело только с измерениями физических величин. Вместе с тем к измерениям иногда неправомерно относят различного рода оценивания таких свойств объектов, которые формально хотя и подпадают под приведенное определение физической величины, но не позволяют реализовать соответствующую единицу. Например, широко распространенную в психологии оценку умственного развития человека называют измерением интеллекта. И хотя при этом частично используются метрологические идеи и методы, они не могут квалифицироваться как измерения в том смысле, как это принято в метрологии. Таким образом, в дополнение к приведенному определению отметим, что возможность физической реализации единицы измерения является определяющим признаком понятия «физическая величина».

Единица физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице и которая применяется для количественного выражения однородных величин. Размер единиц ФВ устанавливается путем их законодательно закрепленного определения метрологическими органами государства.

Измерение - процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Получаемая при этом информация называется измерительной, которая может содержаться в объекте измерения в двух формах: пассивной и активной.

Пассивная информация — это совокупность сведений, заключенных в том, как устроен объект. Такой информацией является, например, информация о величине напряжения источника питания.

Активная информация – это совокупность сведений, имеющих форму энергетической характеристики какого-либо явления. Подобные энерге-

тические явления называются сигналами. Их примерами являются электрические, оптические и акустические сигналы, используемые для передачи информации.

Априорная информация - информация об объекте измерения известная до проведения исследований. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а, следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерений. При наличии априорной информации об объекте в полном объеме, т.е. при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Априорная информация определяет достижимую точность измерений и их эффективность.

На основании выше приведенных терминов и определений можно сказать, что измерение представляет собой специфический информационный процесс, результатом которого является получение количественной информации об измеряемых величинах — измерительной информации.

При определении значения интересующей нас ФВ результат измерения может быть представлен в виде аналитического соотношения, известного как *основное уравнение метрологии*

$$A = k \times A_0, \quad (1.1)$$

где A — значение измеряемой физической величины; A_0 — значение величины, принятой за образец; k — отношение измеряемой величины и образца.

Наиболее удобным видом основного уравнения метрологии (1.1), является вид, при котором выбранная за образец величина A_0 равна 1. При этом параметр k представляет собой числовое значение измеренной величины, зависящий от принятого метода измерения и величины единицы измерения.

Принцип измерений — совокупность физических принципов, на которых основаны измерения. Например, применение эффекта Холла для измерения мощности, или эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения являются частными принципами, используемыми для измерения этих величин.

Метод измерений — совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Это достаточно общее определение на практике часто конкретизируют, относя его только к применяемым средствам измерения, например метод измерения частоты частотомером, напряжения — вольтметром, силы тока — амперметром и т.д.

Методика измерения — намеченный распорядок измерений, определяющий состав применяемых приборов, последовательность и правила проведения операций.

Объект измерения — это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физиче-

скими величинами. Он обладает многими свойствами и находится в сложных и многосторонних связях с другими объектами. Поэтому в теоретической метрологии введено понятие математической модели объекта.

Математическая модель объекта — совокупность математических символов (образов) и отношений между ними, которая адекватно описывает свойства объекта измерения.

В технической литературе и нормативной документации часто встречаются также другие важные термины, используемые в метрологии и ОТИ. К ним можно отнести следующие термины.

Алгоритм измерения - точное предписание о порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение искомого значения физической величины.

Достоверность измерений – степень доверия к результату измерения, характеризуемая вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах. Данную вероятность называют доверительной.

Правильность измерений — это метрологическая характеристика, отражающая близость к нулю, так называемых, систематических погрешностей результатов измерений.

Сходимость результата измерений характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений, в одних и тех же условиях.

Воспроизводимость результатов измерений — характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенных к одним и тем же условиям.

1.2. Простейшие постулаты свойств физических величин и основное уравнение измерения

Физические объекты обладают неограниченным числом свойств, которые проявляются с бесконечным разнообразием. Это затрудняет их отражение совокупностями чисел с ограниченной разрядностью, возникающее при их измерении. Среди множества специфических проявлений свойств есть и несколько общих. Н.Р. Кэмпбелл [1] установил для всего разнообразия свойств X физического объекта наличие трех наиболее общих проявлений в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности. Эти отношения в математической логике аналитически описываются простейшими постулатами.

1. *Отношение эквивалентности* — это отношение, в котором данное свойство X у различных объектов A и B оказывается одинаковым или неодинаковым. Постулаты отношения эквивалентности:

а) дихотомии (сходства и различия): либо $X(A) \approx X(B)$, либо $X(A) \neq X(B)$;

б) симметричности (симметричности отношения эквивалентности):

если $X(A) \approx X(B)$, то $X(B) \approx X(A)$;

в) транзитивности по качеству (перехода отношения эквивалентности):

если $X(A) \approx X(B)$ и $X(B) \approx X(C)$, то $X(A) \approx X(C)$;

2. *Отношение порядка* — это отношение, в котором данное свойство X у различных объектов оказывается больше или меньше. Постулаты отношения порядка:

а) антисимметричности: если $X(A) > X(B)$, то $X(B) < X(A)$;

б) транзитивности по интенсивности свойства (переход отношения порядка): если $X(A) > X(B)$ и $X(B) > X(C)$, то $X(A) > X(C)$.

3. *Отношение аддитивности* — это отношение, когда однородные свойства различных объектов могут суммироваться. Постулаты отношения аддитивности:

а) монотонности (однонаправленности аддитивности): если $X(A) = X(C)$ и $X(B) > 0$, то $X(A) + X(B) > X(C)$;

б) коммутативности (переместимости слагаемых): $X(A) + X(B) = X(B) + X(A)$;

в) дистрибутивности: $X(A) + X(B) = X(A+B)$;

г) ассоциативности: $[X(A) + X(B)] + X(C) = X(A) + [X(B) + X(C)]$.

Кэмпбелл показал, что в зависимости от проявления наиболее общих отношений эквивалентности, порядка и аддитивности следует различать три вида свойств и величин: $X_{\text{экв}}$ — величины и свойства, проявляющие себя только в отношении эквивалентности; $X_{\text{инт}}$ — интенсивные величины, проявляющие себя в отношении эквивалентности и порядка; $X_{\text{экс}}$ — экстенсивные величины и свойства, проявляющие себя в отношении эквивалентности, порядка и аддитивности.

В теории измерений существует, так называемое **основное уравнение измерения**, связывающее между собой значение ФВ Q , числовое значение q физической величины Q и единицу $[Q]$ этой ФВ:

$$Q = q [Q]. \quad (1.2)$$

В приведенном уравнении под *единицей физической величины* $[Q]$ понимается ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице. Она применяется для количественного выражения однородных ФВ. Под *значением физической величины* Q понимается оценка размера ФВ в виде некоторого числа принятых для нее единиц, а под *числовым значением физической величины* q — отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной ФВ. Например, если производится измерение линейного размера некоторой детали при помощи штангенциркуля с единицей $[Q]$, равной 1 мм, а снятое показание со штанги-линейки и нониуса штангенциркуля (числовое значение линейного размера q) составило 12.35, то значение линейного размера этой детали (Q) в соответствии с основным уравнением измерения будет равно 12.35 мм.

Сущность любого простейшего измерения состоит в сравнении размера ФВ Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q [Q]$. В результате сравнения устанавливают, что $q [Q] < (q+1)[Q]$. Отсюда следует, что $q = \text{Int}(Q/[Q])$, где $\text{Int}(X)$ — функция, выделяющая целую часть числа X .

Условием реализации процедуры элементарного прямого измерения является выполнение следующих операций:

воспроизведение ФВ заданного размера $q [Q]$;

сравнение измеряемой ФВ Q с воспроизводимой мерой величиной $q [Q]$;

Таким образом, на основе использования общих постулатов эквивалентности, порядка и аддитивности, а также основного уравнения измерения можно сформулировать понятие прямого измерения. **Прямое измерение** это познавательный процесс, заключающийся в сравнении, данной ФВ с известной ФВ, принятой за единицу измерения, путем физического эксперимента.

1.3. Шкалы измерений физических величин

В практике измерений наиболее часто необходимо проводить измерения таких физических величин, которые характеризуют свойства веществ, тел, явлений и процессов. Некоторые свойства проявляются только количественно, а другие только качественно. Количественные или качественные проявления любого свойства отражаются, как правило, различными множествами. Именно эти множества образуют, так

называемые, *шкалы измерения* этих свойств. Шкалы измерений количественных свойств веществ, тел, явлений и процессов относят к шкалам ФВ. *Шкала физической величины* — это упорядоченная последовательность значений физической величины, принятая на основании результатов точных измерений.

В соответствии с логической структурой проявления свойств, все шкалы измерений принято делить на **пять основных типов шкал**: шкалы наименований, шкалы порядка, шкалы интервалов, шкалы отношений и абсолютные шкалы.

1. Шкала наименований (шкала классификации) это шкала качественных свойств объектов измерений, в которой объекту измерения приписывается цифра (знак), играющая роль простых имен. Приписывание цифр или знаков объектам измерений в данных шкалах фактически выполняет на практике ту же функцию, что и наименование этих объектов. Чаще всего эти шкалы используются для классификации эмпирических объектов измерений, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому *шкалы такого вида не являются шкалами физических величин*. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: «не приписывай одну и ту же цифру разным объектам». Поэтому с цифрами, используемыми только как специфические имена, нельзя проводить никаких арифметических действий. Если, например, один из конденсаторов на электрической схеме обозначен $C1$, а другой $C3$, то из этого нельзя сделать вывод, о том, что значения их ёмкостей отличаются втрое, а можно лишь установить, что оба они относятся к классу конденсаторов.

В этих шкалах отсутствуют понятия «больше нуля» или «меньше нуля», а также понятие единицы измерения.

2. Шкала порядка (шкала рангов) это шкала качественных или количественных свойств объектов измерений, выполняющая упорядочение объектов измерений относительно какого-либо определенного их свойства, т.е. расположение их в порядке убывания или возрастания данного свойства. Полученный при этом упорядоченный ряд называют *ранжированным рядом*, а саму процедуру — *ранжированием*. Ранжированный ряд может дать ответ на вопросы типа «что больше», «что меньше» или «что лучше», «что хуже». Более подробную информацию о том, насколько больше или насколько меньше данное свойство объекта измерения, чем у другого объекта, во сколько раз лучше или хуже данный объект измерения — шкала порядка дать не может.

В шкалах порядка может существовать или не существовать нуль, но для этих шкал нельзя ввести единицы измерения, так как для них не установлено отношение пропорциональности и соответственно нет

возможности судить, во сколько раз больше или меньше конкретные проявления свойства. По шкале порядка сравниваются между собой однородные объекты, у которых значения интересующих нас свойств неизвестны. Результаты оценивания свойств по шкале порядка, также как и по шкале наименований, не могут подвергаться никаким арифметическим действиям.

Шкалы порядка можно подразделить на две, широко используемых на практике, *разновидности этих шкал: условные шкалы и реперные шкалы.* Условные шкалы используются в тех случаях, когда уровень познания явления не позволяет точно установить отношения, имеющиеся между величинами свойств объектов измерений, либо в тех случаях, когда применение условной шкалы удобно и достаточно для практики.

Условная шкала — это шкала физической величины, исходные значения свойств объектов измерений которой выражены в условных единицах. Примерами таких шкал могут служить - шкала вязкости Энглера (для определения вязкости различных веществ) и 12-ти балльная шкала Бофорта (для определения силы морского ветра). В условных шкалах одинаковым интервалам между размерами данной величины не соответствуют одинаковые размерности чисел, отображающих размеры. С помощью этих чисел можно найти вероятности, моды, медианы, квантили, однако их нельзя использовать для суммирования, умножения и других математических операций.

Реперные шкалы используются в тех случаях, когда необходимо объекты измерений расположить в порядке возрастания (убывания) того или иного свойства различных объектов. В этих шкалах используют ранжированный ряд значений свойства объектов измерений, некоторые точки которого фиксируют в качестве опорных (реперных). Совокупность реперных точек образует шкалу возможных проявлений соответствующего свойства. Реперным точкам могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые баллами, и, таким образом, появляется возможность оценивания «измерения» данного свойства в баллах, по натуральной шкале значений свойств объектов. По натуральным шкалам до сих пор оценивают интенсивность землетрясений, морское волнение, твердость минералов и некоторые другие величины.

Таким образом, *реперная шкала* – это шкала одного свойства объектов измерений, в которой объекты расположены в порядке возрастания (убывания) этого свойства и фиксированы в качестве опорных (реперных) точек.

К реперным шкалам, например, можно отнести шкалу Мооса, предназначенную для определения твердости минералов. Эта шкала

содержит 10 опорных (реперных) минералов с различными условными числами твердости: тальк — 1; гипс — 2; кальций — 3; флюорит — 4; апатит — 5; ортоклаз — 6; кварц — 7; топаз — 8; корунд — 9; алмаз — 10. Отнесение минерала к тому или иному уровню твёрдости осуществляется на основании эксперимента, который состоит в том, что испытуемый материал царапается опорным (реперным) минералом. Если, например, после царапанья испытуемого минерала кварцем (7) на нем остается след, а после ортоклаза (6) — не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 6, но менее 7. Более точного ответа в этом случае дать невозможно.

Определение значения величин при помощи шкал порядка нельзя считать измерением, так как на этих шкалах не могут быть введены единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать *оцениванием*. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным, о чем свидетельствует рассмотренный пример для определения твердости минералов.

3. Шкала интервалов (шкала разностей). Эти шкалы являются дальнейшим развитием шкал порядка. На шкале интервалов откладывается разность значений физической величины, сами же значения остаются неизвестными. Данная шкала состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и определённым образом выбранное начало шкалы — нулевую точку.

К таким шкалам, например, можно отнести температурные шкалы (шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра) и шкалы летоисчислений по различным календарям, в которых за нулевую точку принято либо рождество Христово (в христианском календаре), либо новолуние (лунный календарь), либо указ в григорианском календаре (так называемый новый стиль, введённый папой Григорием в 1582 году взамен юлианского календаря – старый стиль, применявшийся до новой эры). На наиболее привычной для нас температурной шкале Цельсия за начало отсчета разности температур принята температура таяния льда. Для удобства пользования шкалой Цельсия интервал между температурой таяния льда и температурой кипения воды разделен на 100 равных интервалов — градусов. Шкала Цельсия распространяется как в сторону отрицательных, так и положительных интервалов. Когда говорят, что температура воздуха равна 20°C, это означает, что она на 20 градусов выше температуры, принятой за нулевую отметку шкалы (выше нуля).

Деление шкалы интервалов на равные части устанавливает единицу физической величины, что позволяет не только выразить результат измерения в числовой мере, но и оценить погрешность измерения.

Таким образом, *шкала интервалов это шкала количественных свойств объектов измерений, которая состоит из одинаковых значений интервалов физической величины, имеет единицу измерения и определённым образом выбранное начало шкалы — нулевую точку.*

На шкале интервалов определены действия сложения и вычитания интервалов. Действительно, по шкале времени интервалы можно суммировать или вычитать и сравнивать, во сколько раз один интервал больше другого, но складывать даты каких-либо событий просто бессмысленно.

Шкала интервалов может быть описана уравнением вида:

$$Q = Q_0 + q[Q] \quad (1.3)$$

где q – числовое значение величины; Q_0 – начало отсчёта шкалы; $[Q]$ – единица рассматриваемой величины. Данная шкала полностью определяется заданием начала отсчёта Q_0 шкалы и единицы данной величины $[Q]$. Шкалу интервалов можно задать практически двумя способами.

Первый способ предусматривает выбор для рассматриваемой величины Q двух её значений Q_0 и Q_1 , которые можно относительно просто физически создать (реализовать). Эти выбранные значения называют либо опорными точками, либо основными реперами, а занимаемый ими интервал возможных значений $[Q_1 - Q_0]$ называют основным интервалом. Затем, опорную точку Q_0 принимают за начало отсчёта, а значение отношения $(Q_1 - Q_0)/n$ принимают за единицу данной ФВ $[Q]$. Число делений шкалы (n), выбирают таким, чтобы $[Q]$ была целой величиной. Данный способ позволяет, используя данные известной шкалы интервалов осуществить перевод в другую шкалу, применив следующую зависимость:

$$q_1 = \left\{ q_2 - \frac{Q_{02} - Q_{01}}{[Q]_1} \right\} \frac{[Q]_1}{[Q]_2} \quad (1.4)$$

При втором способе задания шкалы единица рассматриваемой величины воспроизводится непосредственно как интервал этой величины, либо его

некоторая доля, либо некоторое число интервалов размеров данной величины. Начало отсчета при данном способе выбирают каждый раз по-разному, в зависимости от конкретных подходов к изучаемому явлению. Пример такого подхода — существующая в настоящее время шкала времени, в которой $1 \text{ с} = 9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

4. Шкала отношений. Шкалы отношений являются самыми совершенными шкалами. Они представляют собой интервальные шкалы с естественным началом. Если, например, за начало температурной шкалы принять абсолютный нуль, то по такой шкале уже можно отсчитывать абсолютное значение температуры и определять не только, на сколько температура T_1 одного тела больше (меньше) температуры T_2 другого, но и во сколько раз больше или (меньше) по правилу:

$$T_1/T_2 = n \quad (1.5)$$

В шкалах отношений существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений, установленная по соглашению. С формальной точки зрения шкала отношений является шкалой интервалов с естественным началом отсчета. К значениям, полученным по этой шкале, применимы все арифметические действия.

В общем случае, при сравнении между собой двух физических величин по такому правилу, значения n , расположенные в порядке возрастания или убывания, образуют шкалу отношений. Она охватывает интервал значений n от 0 до ∞ и не содержит отрицательных значений.

Таким образом, *шкала отношений это шкала количественных свойств объектов измерений, которая состоит из одинаковых значений интервалов физической величины, имеет единицу измерения (установленную по соглашению) и с естественным началом отсчёта шкалы.*

Шкалы отношений описываются уравнением вида:

$$Q = q \cdot [Q], \quad (1.6)$$

где Q – ФВ, для которой строится шкала; $[Q]$ – единица измерения ФВ; q – числовое значение ФВ.

Переход от одной шкалы отношений к другой осуществляется с помощью уравнения вида:

$$q_2 = q_1 [Q_1] / [Q_2]. \quad (1.7)$$

5. Абсолютные шкалы. Под абсолютными шкалами понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественное однозначное определение единицы измерения и не зависящие от принятой системы единиц измерения. Такие шкалы

соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, ослабления и т.д.

Таким образом, **абсолютная шкала** это шкала количественных свойств объектов измерений, которая состоит из одинаковых значений интервалов физической величины, имеет естественную единицу измерения и естественное начало отсчёта шкалы.

Следует заметить, что первые из двух рассмотренных шкал (шкала наименований и шкала порядка) принято называть неметрическими (концептуальными), а третью и четвёртую разновидности шкал (шкалы интервалов и шкалы отношений) называют метрическими (материальными) шкалами. Все метрические, а также абсолютные шкалы относят к разряду линейных шкал.

2.СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Общие понятия систем физических величин и их единиц

В повседневной жизни, науке и технике человек постоянно имеет дело с разнообразными свойствами окружающих его веществ, процессов и явлений. Эти свойства являются отражением процессов взаимодействия различных объектов материального мира между собой. Математическое и физическое описание свойств объектов производится при помощи физических величин, понятие и определение которой приведено в п.п.1.1. С целью установления количественного содержания конкретного свойства в объекте измерения, которое отражается определённой физической величиной, в теории измерений используют понятия размера и значения физической величины.

Размер физической величины — это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию "физическая величина". Например, любое материальное тело имеет определённую массу, объём, габаритные размеры и другие свойства, которые можно отнести к физическим величинам. Поэтому все материальные тела можно различать и сравнивать между собой по этим свойствам с использованием соответствующих физических величин, т.е. по размеру этих физических величин.

Значение физической величины — это оценка ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Значение ФВ может быть определено в результате ее измерения с помощью средства измерения, либо вычислено с использованием основного уравнения измерения (1.2),

из которого следует, что в зависимости от размера единицы ФВ $[Q]$ будет меняться значение ФВ Q , в тоже время размер этой ФВ, на основании его определения, останется неизменным.

Важной характеристикой ФВ является также её **размерность** (обозначается $\dim Q$ или $[Q]$), под которой понимается *выражение в форме степенного многочлена, отражающее связь данной величины с основными ФВ*:

$$\dim Q = L^a M^b T^g I^h \quad (2.1)$$

где L, M, T, I – условные обозначения основных ФВ данной системы, а $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ – целые и дробные, положительные или отрицательные вещественные числа. Наименование функции «dim» является сокращением английского слова «dimension», что в переводе на русский язык означает – «размер». Коэффициент пропорциональности в этом выражении принят равным единице. *Показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, называют показателем размерности. Если все показатели размерности равны нулю, то такую величину называют безразмерной.*

Над размерностями можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечение корня. Понятие размерности широко используется:

- для перевода единиц из одной системы в другую;
- для проверки правильности сложных расчетных формул, полученных в результате теоретического вывода;
- при выяснении зависимости между величинами;
- в теории физического подобия.

В связи с тем, что, в результате постоянного развития человечеством различных наук, накопилось значительное количество разнообразных ФВ, то возникала и до сих пор существует необходимость в систематизации всех известных ФВ. Поэтому исторически неоднократно проводилась систематизация известных на текущий временной этап развития науки в целом ФВ, по определённым правилам, отдавая приоритет наиболее фундаментальным (или важным) ФВ. В результате таких систематизаций ФВ возникло понятие системы ФВ.

Системой физических величин называется совокупность ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются их функциями.

В любой системе ФВ выделяют *основные и производные*, то есть вытекающие из основных, ФВ.

Под основными ФВ понимают такие несколько разнородных ФВ, количество которых среди однородных ФВ минимально и обоснованно выбрано. Следует заметить, что обоснование выбора таких ФВ

исторически производилось по разному. Например, в системе электрических величин (так называемая, по начальным буквам применяемых в них единицах измерений, система СГСЭ) основными ФВ являются четыре ФВ: длина (в сантиметрах), масса (в граммах), время (в секундах), электрическая постоянная ϵ_0 (безразмерная величина равная $9 \cdot 10^9 4\pi$).

Под производными ФВ понимают все ФВ, не отнесённые к разряду основных ФВ и выражающиеся через основные ФВ, на основе известных уравнений связи между ними. Примерами производных величин могут служить: плотность вещества, определяемая как масса вещества, заключенного в единице объема; ускорение как изменение скорости за единицу времени и др.

Используемые в настоящее время системы ФВ имеют свои названия, в которых часто применяют символы обозначения величин, принятых за основные. Так, например, **система ФВ механики**, в которой в качестве основных ФВ используют *длину (символ L), массу (символ M) и время (символ T)*, называется **системой LMT**. Действующая в настоящее время **международная система СИ**, в соответствии с данным правилом, должна иметь название **LMTI θ NJ**, соответствующее символам её основных ФВ: *длине (L), массе (M), времени (T), силе электрического тока (I), температуре (θ), количеству вещества (N) и силе света (J).*

*Совокупность основных и производных единиц ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется **системой единиц физических величин**. Единица основной ФВ является **основной единицей данной системы**.*

2.2. Международная система единиц СИ (система СИ)

Единая международная система единиц (система СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам, проведенной в Париже в 1960 г. Сокращённое русскоязычное название данной системы - «СИ», происходит от сокращённого англоязычного её названия – «SI», которое образовано от заглавных букв англоязычного названия этой системы – System International. На территории нашей страны система единиц СИ действует с 1 января 1982 г. в соответствии ГОСТ 8.417-81 "ГСИ. Единицы физических величин". Система СИ возникла не на пустом месте и является логическим развитием предшествовавших ей других систем единиц,: СГС (единицы основных физических величин: сантиметр, грамм-масса, секунда), СГСМ (единицы - сантиметр, грамм-масса, секунда, магнитная

постоянная μ_0 – безразмерная ФВ), СГСЭ (единицы - сантиметр, грамм-масса, секунда, электрическая постоянная ϵ_0 – безразмерная ФВ), МКСА (единицы - метр, килограмм-масса, секунда, ампер), МКГСС (единицы - метр, килограмм-сила, секунда) и других систем. Как видно из сокращённого названия этих систем единиц их названия составлены по начальным буквам единиц основных физических величин применяемых в этих системах.

В настоящее время широко применяются две системы единиц: СИ и СГС (симметричная, или Гауссова). Система СГС существует более 100 лет и до сих пор используется в таких точных науках, как физика, астрономия, а также в других смежных науках и отраслях знаний. Однако эту систему все более теснит система СИ — единственная система единиц ФВ, которая принята и используется в большинстве стран мира. Это обусловлено её достоинствами и преимуществами перед другими системами единиц, к которым относятся:

- универсальность, т.е. охват практически всех областей науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением;
- упрощение записи формул в физике, химии, а также в технических науках в связи с отсутствием переводных коэффициентов;
- уменьшение числа допускаемых единиц;
- единая система образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах, так как отпадает необходимость в изучении множества систем единиц и внесистемных единиц;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.

В качестве *основных единиц ФВ в системе СИ* приняты 7 следующих единиц: **метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и канделла** (табл. 2.1). Наряду с основными единицами ФВ в системе СИ, по количеству производных ФВ, используются производные единицы ФВ. ***Производная единица** — это единица производной ФВ системы единиц, образованная в соответствии с уравнениями, связывающими её с основными единицами или же с основными и уже определенными производными.* Производные единицы системы СИ, имеющие собственное (специальное) название, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.1

**Основные и дополнительные единицы физических величин
системы СИ**

Величина			Единица		
			Обозначение		
Наименование	Размерность	Рекомендуемое обозначение	Наименование	Русское	Международное
Длина	Основные				
	L	l	метр	М	m
Масса	M	m	килограмм	кг	kg
Время	T	t	секунда	с	s
Сила электрического тока	I	I	ампер	А	A
Термодинамическая температура	θ	T	кельвин	К	K
Количества вещества	N	n, ν	моль	Моль	mol
Сила света	J	J	кандела	кд	cd
Плоский угол	Дополнительные				
	-	-	радиан	Рад	rad
Телесный угол	-	-	стерадиан	ср	sr

Следует обратить **внимание** на то, что *при записи размерностей производных ФВ необходимо строго соблюдать последовательность размерностей основных ФВ, представленных в табл.2.1.*

Для установления производной единицы следует:

- выбрать ФВ, единицы которых принимаются в качестве основных;
- установить размер этих единиц;
- выбрать определяющее уравнение, связывающее величины, измеряемые основными единицами, с величиной, для которой устанавливается производная единица. При этом символы всех величин, входящих в определяющее уравнение, должны рассматриваться не как сами величины, а как их именованные числовые значения;
- приравнять единице (или другому постоянному числу) коэффициент пропорциональности K , входящий в определяющее уравнение. Это

уравнение следует записывать в виде явной функциональной зависимости производной величины от основных.

Таблица 2.2

Производные единицы системы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражение через единицы СИ
Частота	T^{-1}	герц	Гц	c^{-1}
Сила, вес	$LM T^{-2}$	ньютон	Н	$m \cdot kg \cdot c^{-2}$
Давление, механическое напряжение	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot c^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2}$
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3}$
Количество электричества	TI	кулон	Кл	$c \cdot A$
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	В	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая ёмкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Вб	$M^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	Тл	$kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Индуктивность	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генри	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм	кд·ср
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	лк	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность радионуклида	T^{-2}	беккерель	Бк	c^{-1}
Поглощенная доза ионизирующего излучения	$L^2 T^{-2}$	грей	Гр	$m^2 \cdot c^{-2}$
Эквивалентная доза излучения	$L^2 T^{-2}$	зиверт	Зв	$m^2 \cdot c^{-2}$

Установленные таким способом производные единицы могут быть использованы для введения новых производных величин. Поэтому в определяющие уравнения наряду с основными единицами могут входить и производные, единицы которых определены ранее.

Производные единицы подразделяются на когерентные и некогерентные. *Когерентной* называется производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице. Например, единицу скорости образуют с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейного и равномерного движения точки: $V = L / t$, где L — длина пройденного пути, t — время движения. Подстановка вместо L и t их единиц в системе СИ дает $V = 1 \text{ м/с}$. Следовательно, единица скорости является когерентной.

Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от единицы, то для образования когерентной единицы системы СИ в правую часть уравнения подставляют величины со значениями в единицах СИ, дающие после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное единице. Например, если для образования когерентной единицы энергии применяют уравнение $E = 0,5mV^2$, где m — масса тела, V — его скорость, то когерентную единицу энергии можно образовать двумя путями:

$$\text{1 путь: } E = 0.5(2mV^2) = 0.5(1\text{м} / \text{с}^2) = 1[(\text{кг}\cdot\text{м}^2)/\text{с}^2] = 1 \text{ Дж};$$

$$\text{2 путь: } E = 0.5m2(V^2) = 0.5(1\text{кг})\cdot 2\cdot(1\text{м/с})^2 = 1[(\text{кг}\cdot\text{м}^2)/\text{с}^2] = 1 \text{ Дж}.$$

Следовательно, когерентной единицей СИ является джоуль, равный ньютону, умноженному на метр. В рассмотренных случаях он равен кинетической энергии тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, или же тела массой 1 кг, движущегося со скоростью $\sqrt{2}$ м/с.

В системе СИ размерность производной физической величины Q в общем виде определяется следующим образом:

$$\dim Q = [Q] = [L]^\alpha [M]^\gamma [T]^\beta [I]^\delta [\theta]^\varepsilon [N]^\lambda [J]^\omega$$

где $[L]$ — единица длины, м; $[M]$ — единица массы, кг; $[T]$ — единица времени, с; $[I]$ — единица силы тока, А; $[\theta]$ — единица термодинамической температуры, К; $[N]$ — единица количества вещества, моль; $[J]$ — единица силы света, кд; $\alpha, \gamma, \beta, \delta, \varepsilon, \lambda, \omega$ — целые положительные или отрицательные числа, включая и 0.

Например, размерность единицы скорости в системе СИ будет выглядеть следующим образом:

$$\dim V = [V] = [L]^1 [M]^0 [T]^{-1} [I]^0 [\theta]^0 [N]^0 [J]^0$$

Так как написанное выражение для размерности производной ФВ в системе СИ совпадает с уравнением связи между производной ФВ и единицами основных ФВ, то удобнее пользоваться выражением для размерностей, т.е.

$$V = LT^{-1}.$$

Аналогично частота периодического процесса определится как

$$f = T^{-1}(\text{Гц});$$

сила $\Rightarrow F = LMT^{-2}$;

плотность $\Rightarrow \rho = L^{-3}M$;

энергия $\Rightarrow E = L^2MT^{-2}$.

Подобным образом можно получить любую производную ФВ системы СИ.

Существуют определенные правила написания обозначений единиц измерений системы СИ. Так, при написании обозначений производных единиц обозначения единиц, входящих в производные, разделяются точками, стоящими на средней линии как знак умножения «·». Например: Н·м (ньютон-метр), А·м² (ампер·квадратный метр), Н·с/м² (ньютон-секунда на квадратный метр). Наиболее употребительно выражение в виде произведения обозначений единиц, возведенных в соответствующую степень, например м·с⁴. Кроме того, при написании обозначений производных единиц обозначения этих единиц необходимо записывать, строго соблюдая последовательность размерностей основных единиц ФВ, представленных в табл.2.1.

Рассмотрим основные правила, которые использовались при построении различных систем единиц ФВ, в том числе и при построении системы СИ. Исторически сложилось так, что закономерные научно обоснованные связи были вначале установлены в области геометрии и кинематики, а затем в области динамики, термодинамики и электромагнетизма. В такой же последовательности строились и системы единиц ФВ. При построении любой системы единиц ФВ руководствуются главным принципом – удобство применения единиц в деятельности человека и практическая целесообразность их наличия. Однако для достижения этого принципа часто возникают противоречия, которые невозможно преодолеть. Поэтому обычно выбирают наиболее выгодный для практики вариант.

Для построения оптимальной с теоретической точки зрения системы единиц ФВ необходимое количество основных ФВ следует выбирать равным значению разности вида: $N - n$, где « N » – число ФВ используемых в создаваемой системе, а « n » - число уравнений связи между « N » ФВ. На практике, из соображений удобства, количество основных ФВ может быть выбрано несколько большим, чем число $N - n$. Например, в геометрии и кинематике для установления связей между единицами ФВ достаточно уравнения вида:

$$V = K_e \frac{dL}{dt}, \quad (2.2)$$

где V – скорость, K_e – коэффициент пропорциональности, L – длина, t – время. Из данного выражения видно, что « N » – число ФВ используемых в создаваемой системе равно 3, а « n » – число уравнений связи между « N » ФВ равно 1. Тогда, оптимальное количество основных ФВ в системе должно быть равным $N - n = 3 - 1 = 2$. Исторически (до 1983 г.) в качестве основных ФВ, на основании уравнения связи (2.2), были выбраны единицы измерения длины и времени, а в качестве производной ФВ — скорость. В 1983 г. основными были названы единицы измерения времени и скорости, длина же стала производной ФВ. При этом скорости света в вакууме было придано уже более точное, но в принципе всё ещё произвольное значение $c_0 = 299\,792\,458$ м/с. Однако в системе СИ длина до сих пор остается основной ФВ, а ее единица, в настоящее время, определяется следующим образом: *метр — расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долей секунды.*

Известно, что единицей измерения времени, в системе СИ является секунда. При создании системы СИ в 1960 году под секундой, в соответствии с определением [3], понималась – $1 / 31\,556\,925,9747$ часть тропического года для 1900 года января 0 в 12 часов эфемероидного времени. До 1960 года секунда длительное время определялась как $1 / 86\,400$ часть солнечных средних суток. В настоящее время [1] *под секундой* понимается $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Коэффициент пропорциональности K_e , входящий в уравнение (2.2), в настоящее время равен единице. Однако, если бы в 1983 г. было сохранено существовавшее ранее определение метра ("криптоновый") и одновременно постулировано постоянство скорости света, K_e уже нельзя было считать равным единице — он выступал бы как экспериментально определяемая мировая константа.

Для образования системы единиц в области геометрии и кинематики к уравнению (2.2) следует добавить уравнения связи для площади (например, квадрата), объема (например, куба), ускорения и т.д. При добавлении уравнений каждый раз вводится одна новая ФВ и соответственно одно уравнение связи. При этом разность $N - n = 2$ сохраняется, а, следовательно, и система единиц остаётся оптимальной.

При переходе к динамике уравнение (2.2) дополняется уравнением второго закона Ньютона

$$F = k_1 m a \quad (2.3)$$

и законом всемирного тяготения

$$F = k_2 \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.4)$$

где - k_1, k_2 коэффициенты пропорциональности; m, m_1, m_2 — масса тел; a - ускорение; r — расстояние между телами. Таким образом, добавляются два уравнения связи и вводятся две новые ФВ - масса и сила, разность $N-n = 2$ при этом не меняется. При добавлении остальных уравнений механики для давления, работы, мощности и т.д. рассматриваемая разность также не изменяется.

Оба коэффициента в уравнениях (2.3) и (2.4) можно было бы приравнять $k = 1$, при этом сила и масса стали бы производными физическими величинами. Считая, что $m = m_1 = m_2$, из уравнений (2.3) и (2.4) получаем $m = ar^2$, т.е. единица массы есть масса такой материальной точки, которая сообщает единичное ускорение любой другой материальной точке, находящейся на единичном расстоянии. Такая производная единица массы имеет размерность m^3/c и примерно равна $1,5 \cdot 10^{10}$ кг.

Следует отметить, что точность воспроизведения единицы массы при таком ее определении была бы весьма низкой. Поэтому, принимая во внимание известные критерии выбора единиц ФВ и практическую целесообразность наличия единицы массы, ввели "лишнюю" основную единицу — килограмм (единицу массы). Тогда, в одном из законов Ньютона — втором или законе всемирного тяготения, требовалось бы сохранить коэффициент пропорциональности. Был оставлен коэффициент в законе всемирного тяготения, который менее широко применяется на практике. Этот коэффициент - гравитационная постоянная $\gamma = (6,6720 \pm 0,041) \cdot 10^{-11} [(н \cdot м^2)/кг^2]$. Полученная система единиц ФВ не оптимальна с точки зрения одного из базовых критериев, положенных в основу систем единиц физических величин, а именно – необходимо приравнивать к единице коэффициенты пропорциональности в уравнениях связи. Однако, с точки зрения практического удобства полученная система является оптимальной.

Одной из основных единиц физических величин является **килограмм**. При этом за эталон массы в системе СИ, начиная с её существования, принята *масса тела из иридиевой пластины, хранящейся в Международном бюро мер и весов* и называемая килограммом. *Масса в 1 килограмме близка к массе 1000 см³ чистой воды при 4°C* [3]. Следует отметить, что при таком определении килограмма не выполняется один из базовых критериев выбора основных единиц системы ФВ, а именно, -

неуничтожаемость эталонов основных единиц, то есть возможность их воссоздания в случае утери. В результате - эталон килограмма является единственным уничтожаемым из всех эталонов основных единиц системы СИ. Он подвержен старению и требует применения громоздких поверочных схем. Современное развитие науки пока не позволяет с достаточной степенью точности связать килограмм с естественными атомными константами. До сих пор килограмм является чисто договорной единицей.

Сила (вес) в системе СИ является *производной ФВ и измеряется в ньютонах, имеющих размерность $M \cdot K \cdot C^{-2}$* . Другие механические единицы также производные и образуются с помощью соответствующих уравнений связи. Часть их них, имеющих собственное название, приведена в табл. 2.2.

Одна из главных ФВ, используемых при описании тепловых процессов и относящихся к основным ФВ, является **температура (обозначается символом T)**. Единица этой ФВ (*T*) может быть получена как производная с использованием уже введенных ФВ геометрии и механики, на основании известных соотношений термодинамики: закона Менделеева – Клайперона, закона Стефана – Больцмана, закона смещения Вина. Но это бы привело к разным размерностям данной ФВ, как производной единицы ФВ. Поэтому, учитывая то важное место которая занимает температура в современной физике и технике, при создании системы СИ сочли целесообразным принять её в разряд основных ФВ. Введение фактически «лишней» основной ФВ, привело в итоге к появлению таких фундаментальных констант как: постоянная Больцмана, универсальная газовая постоянная, постоянная Стефана – Больцмана, постоянная Вина.

Первоначально в международной системе СИ температура измерялась в градусах Кельвина. В настоящее время слово «градус» опускается и **единицей температуры является Кельвин (K)**. *Один кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды*, т.е. для температуры тройной точки воды установлено значение 273,16 К. Под тройной точкой воды понимается точка в прямоугольной системе координат «давление – температура» для чистой воды, в которой пересекаются три кривые: кривая парообразования, описывающая равновесие системы «жидкость – пар»; кривая плавления, описывающая

равновесие в системе «твёрдое тело – жидкость»; кривая сублимации (возгонки), описывающая равновесие в системе «твердое тело – пар».

Остальные тепловые единицы системы СИ образуются на основании известных уравнений связи между ними и введенными ранее физическими величинами.

В физике электромагнитных явлений к уравнениям механики необходимо добавить три уравнения: 1) уравнение закона Кулона (основной закон электростатики), 2) уравнение связи между электрическим током и электрическим зарядом, 3) уравнение закона Ампера (основной закон электродинамики). В этих уравнениях введены четыре новых физических величины: электрический ток I , электрический заряд q , магнитная проницаемость μ_0 , μ и диэлектрическая проницаемость ϵ_0 , ϵ . Здесь символами μ и ϵ обозначены относительные проницаемости, а символами μ_0 и ϵ_0 – абсолютные проницаемости вакуума. Таким образом, для потребностей физики электромагнитных явлений и получения оптимальной системы единиц необходимо к трём выбранным в механике основным единицам добавить лишь одну единицу измерения дополнительно вводимой основной электромагнитной физической величины, т.к. в данном случае $N - n = 1$.

При выборе основной электромагнитной физической величины учитывался ряд важных моментов. Во-первых, к моменту становления системы СИ в физике, электротехнике широко использовались так называемые практические единицы ФВ: кулон, ампер, вольт, джоуль и др. Их желательно было сохранить. Во-вторых, необходимо было объединить указанные единицы с механическими и тепловыми, кратными и дольными единицами существовавшей системы СГС, создав единую для всех областей науки систему единиц.

В системе СИ за основную единицу электромагнитной ФВ выбрана единица абсолютной магнитной проницаемости $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, называемая магнитной постоянной. Однако формально основной единицей считается ампер. Это связано с тем, что при выборе основной единицы путем постулирования ее численного значения оказывается невозможным материализовать данную единицу в виде эталона. Поэтому реализация такой единицы осуществляется через какую-либо производную единицу. Так, единица скорости материализуется эталоном метра, а единица магнитной проницаемости — эталоном ампера. В разделе электромагнетизма системы СИ нет мировых констант, поскольку система оптимальна и не содержит "лишней" единицы.

По определению, **ампер** — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ н.

Поскольку скорость света в вакууме (c_0) в системе СИ принята равной 299 792 458 м/с, то электрическая проницаемость вакуума ϵ_0 , называемая **электрической постоянной**, также будет точной постоянной:

$$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c_0^2) = 8,854187187 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Измерения световых величин, т.е. измерения параметров электромагнитных колебаний с длиной волны от 0,38 до 0,76 мкм, имеют ту особенность, что в них очень большую роль играет ощущение человека, воспринимающего световой поток посредством глаз. Поэтому световые измерения не вполне объективны. Наблюдателя интересует только та часть потока электромагнитных колебаний, которая напрямую воздействует на глаз. В связи с этим, обычные энергетические характеристики являются не совсем удобными для описания результатов таких измерений. Между энергетическими и световыми величинами существует однозначная взаимосвязь, и, строго говоря, для проведения измерений световых величин не требуется введения новой основной величины. Однако, учитывая исторически сложившееся к моменту возникновения системы СИ число основных единиц ФВ, а также значительное влияние на результаты световых измерений субъекта измерений — человека, было принято решение ввести **в качестве основной единицы силы света — канделлу**. **Канделла** — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Проведенные исследования показали, что средний глаз человека имеет наибольшую чувствительность при длине волны около 0,555 мкм, что соответствует частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Эту зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения описывают **абсолютной световой эффективностью**, которая равна отношению светового потока (т.е. оцениваемой нашим глазом мощности излучения) к полному потоку излучения (т.е. к полной мощности электромагнитного излучения). **Световая эффективность представляет собой величину, позволяющую**

переходить от энергетических величин к световым величинам. Она измеряется в люменах, деленных на ватт. При существующем определении канделлы максимальной световой эффективности придано точное значение $K_m = 683 \text{ Лм/Вт}$, тем самым она возведена в ранг фундаментальных констант. В связи с этим канделла определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной. Остальные световые величины — производные и выражаются через введенные ранее ФВ.

Последней основной единицей системы СИ, характеризующей количество вещества, является моль. Моль была дополнительно введена в систему, спустя 11 лет после введения первых шести единиц, на XIV Генеральной конференции по мерам и весам в 1971 г. **Моль** — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в углероде 12 массой 0,0012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

В связи с тем, что в науке и технике очень часто приходится производить измерение угловых величин, поэтому в систему СИ введены **две дополнительные единицы ФВ — радиан и стерадиан.**

Радиан — это единица измерения плоского угла — угла между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу. Однако на практике часто используют не радиан, а градус ($^\circ$ - угловой градус), минута ($'$ - угловая минута) и секунда ($''$ - угловая секунда). Для перевода этих внесистемных угловых единиц в соответствующую системную единицу используют следующие соотношения: $1^\circ = 2\pi/360 \text{ рад} = 0,017453 \text{ рад}$, $1' = 1^\circ / 60 = 2,9088 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$, $1'' = 1' / 60 = 1^\circ / 3600 = 4,8481 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$. Для обратного перевода – из радианной меры в градусную, используют следующие равенства $1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 45'' = 57,2961^\circ = (3,4378 \cdot 10^3)' = (2,0627 \cdot 10^5)''$.

Стерадиан — это единица измерения телесного угла — угла с вершиной в центре сферы, вырезающего на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Независимо от используемой системы единиц плоский и телесный углы описываются уравнениями вида:

$$\varphi = l/R; \quad \Omega = S/R^2, \quad (2.5)$$

где l - длина дуги, вырезаемой центральным углом на окружности радиусом R ; S - площадь, вырезаемая центральным телесным углом на шаре с радиусом R . На основании этих уравнений и у плоского, и у телесного углов отсутствует размерность для любой системы единиц ФВ. Так размерность плоского угла $[\varphi] = L / L$, а размерность телесного угла

$[\Omega] = L^2 / L^2$, то есть их единицы измерений не зависят от размера основных единиц.

В настоящее время нет устоявшегося мнения о том, к какому типу относятся единицы углов. Большинство [1] полагают необоснованным введение в систему СИ неопределенного понятия дополнительных единиц. По мнению одних, эти единицы являются производными, определяемыми уравнениями (2.5), с той лишь особенностью, что они оказываются одинаковыми во всех системах единиц. Другие считают единицу плоского угла основной, а единицу телесного угла — производной от нее с размерностью рад². Дальнейшее развитие теории измерений покажет, какая из существующих точек зрения окажется истинной.

2.3. Внесистемные единицы физических величин. Множители и приставки для образования единиц физических величин

В зависимости от принадлежности единиц ФВ к принятым и используемым на практике системам единиц ФВ их принято подразделять на системные и внесистемные ФВ. *Системная единица* — единица ФВ, входящая в одну из принятых систем. Все основные, производные, кратные и дольные единицы являются системными. *Внесистемная единица* — это единица ФВ, не входящая ни в одну из принятых систем единиц. Внесистемные единицы по отношению к единицам системы СИ разделяют на четыре вида:

- допускаемые наравне с единицами СИ, например: единицы массы — тонна; плоского угла — градус, минута, секунда; объема — литр и др. Данный вид внесистемных единиц приведен в табл. 2.3;
- допускаемые к применению в специальных областях знаний (науках), например: астрономическая единица, парсек, световой год — единицы длины в астрономии; диоптрия — единица оптической силы в оптике; электрон-вольт — единица энергии в физике и т.д.;
- временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ, например: морская миля — в морской навигации; карат — единица массы в ювелирном деле и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями;
- изъятые из употребления, например: миллиметр ртутного столба — единица давления; лошадиная сила — единица мощности и некоторые другие.

В связи с тем, что часто бывает очень неудобно пользоваться напрямую системными и внесистемными единицами при измерении реальных

физических величин, имеющих большие (очень большие) или малые (очень малые) их числовые значения в её единице измерения, то при практических измерениях часто пользуются кратными или дольными (в

Таблица 2.3

Внесистемные единицы, допускаемые к применению
наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей системы СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
	атомная единица массы	а.е.м.	$1,660\,570 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизит.)
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3600 с
	сутки	сут	86400 с
Плоский угол	градус	°	$(\pi/180)$ рад
	минута	'	$(\pi/10\,800)$ рад
	секунда	"	$(\pi/648\,000)$ рад
	град	град	$(\pi/200)$ рад
Объём	литр	л	10^{-3}
Длина	астрономическая единица	а.е.	$1,45\,598 \cdot 10^{11}$ м (приблизит.)
	световой год	св. год	$9,4605 \cdot 10^{15}$ (приблизит.)
	парсек	пк	$3,0857 \cdot 10^{16}$ (приблизит.)
Оптическая сила	диоптрия	дптр	1 м^{-1}
Площадь	гектар	га	10^4 м^2
Энергия	электрон - вольт	эВ	$1,60\,219 \cdot 10^{-19}$ Дж
Полная мощность	вольт-ампер	ВА	-
Реактивная мощность	вар	вар	-

зависимости от необходимости) единицами измерения этих ФВ. **Кратная единица** — это единица ФВ, в целое число раз превышающая системную или внесистемную единицу. Например, единица длины километр равна 10^3 м, т.е. кратна метру. **Дольная единица** — единица ФВ,

значение которой в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы. Например, единица длины миллиметр равна 10^{-3} м, т.е. является дольной. Приставки для образования кратных и дольных единиц СИ приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

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

Рассмотрим несколько примеров полного и краткого русского написания единиц ФВ с использованием кратных и дольных приставок: эксалошадиных сил (Э л.с.); петалумен (Плм); тераОм (Том); гигаГерц (ГГц); мегатонн (Мт); килограмм (кг); гектар (га); декалитр (дал); дециметр (дм); сантиметр (сВб); миллиампер (мА); микровольт (мкВ); нанофарада (нФ); пикогенри (пГн); фемтоджоуль (фДж); аттоватт (аВт).

При наименовании, соответствующем произведению единиц с кратными или дольными приставками, рекомендуется приставку присоединять к наименованию первой единицы, входящей в произведение. Например, 10^3 единиц момента силы - ньютонометров - следует именовать «килоньютонометр», а не «ньютонокилометр». Записывается это следующим образом: кН·м, а не Н·км.

Кроме приведенных выше примеров внесистемных единиц ФВ в различных отраслях науки и техники широкое применение имеют, так

называемые логарифмические ФВ - логарифм (десятичный или натуральный) безразмерного отношения одноименных ФВ. Логарифмические ФВ применяют для выражения звукового давления, усиления, ослабления.

Единица логарифмической ФВ - бел (Б), которая определяется по следующей формуле:

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

где P_2 и P_1 — одноименные энергетические величины (мощность, энергия).

Для «силовых» величин (напряжение, сила тока, давление, напряженность поля) бел определяется по формуле

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

Дольная единица от бела — децибел (дБ):

$$1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б}$$

Широкое применение получили относительные ФВ — безразмерные отношения двух одноименных ФВ. Они выражаются в процентах (%) или в безразмерных единицах.

2.4. Примеры решения задач на получение производных единиц измерения и по результатам измерения ФВ в различных системах единиц

2.4.1. Получение производных единиц измерения в системе СИ для механических, тепловых и электрических величин

Общее замечание. При решении задач, где требуется нахождение размерностей производных ФВ необходимо помнить, что *при записи размерностей производных ФВ строго соблюдать последовательность размерностей основных ФВ, представленных в табл.2.1.*

Задача №1. Получить размерности единиц измерения в системе СИ для следующих производных ФВ системы СИ механической группы величин:

а) площадь, б) линейная скорость, в) сила, г) объём, д) частота, е) ускорение, ж) угловая скорость, з) плотность.

Решение.

а). Площадь любой плоской фигуры может быть определена через сумму площадей прямоугольников. Уравнение, определяющее площадь прямоугольника со сторонами l и b имеет вид:

$$S = l \cdot b.$$

Тогда размерность площади прямоугольника $[S]$ равна

$$[S] = [l] \cdot [b] = \text{м} \cdot \text{м} = \text{м}^2,$$

а уравнение размерности площади прямоугольника имеет вид:

$$\dim S = L^1 \cdot L^1 = L^2.$$

Ответ: Размерность площади плоской фигуры есть L^2 .

б). Уравнение, определяющее линейную скорость тела, которое при равномерном движении прошло расстояние l за время t имеет вид:

$$V = l / t.$$

Тогда размерность линейной скорости $[V]$ равна

$$[V] = [l] \cdot [t] = \text{м/с},$$

а уравнение её размерности имеет вид:

$$\dim V = L \cdot T^{-1}.$$

Ответ: Размерность линейной скорости есть $L \cdot T^{-1}$.

в). Уравнение, определяющее силу, заставляющую двигаться тело массой m с ускорением a , имеет вид:

$$F = m \cdot a,$$

а ускорение, являясь изменением скорости за единицу времени, определяются уравнением вида:

$$a = dV / dt.$$

Тогда размерность ускорения $[a]$ и силы $[F]$ соответственно равны:

$$[a] = [V] / [t] = (\text{м/с}) / \text{с} = \text{м} / \text{с}^2;$$

$$[F] = [m] \cdot [a] = \text{кг} \cdot \text{м/с}^2,$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim F = LMT^{-2}.$$

Ответ: Размерность силы, действующей на тело, есть LMT^{-2} .

г). Уравнение, определяющее объём, например, прямоугольного параллелепипеда, имеет вид:

$$V = S \cdot H,$$

где – S - площадь основания, H – высота параллелепипеда.

Тогда размерность объёма $[V]$ равна:

$$[V] = \text{м}^2 \cdot \text{м} = \text{м}^3,$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim V = L^2 \cdot L^1 = L^3.$$

Ответ: Размерность объёма тела есть L^3 .

д). Уравнение, определяющее частоту (линейную) f , соответствует её определению, а поэтому имеет вид:

$$f = 1 / T,$$

где T – период периодической функции. Тогда размерность частоты $[f]$ равна:

$$[f] = 1 / [t] = 1 / \text{с} = \text{Гц},$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim f = T^{-1}.$$

Ответ: Размерность частоты (линейной) есть T^{-1} .

е). Уравнение, определяющее ускорение a , согласно его определению, имеет вид:

$$a = V / t,$$

где V – скорость, а t – время.

Тогда размерность ускорения $[a]$ равна:

$$[a] = [V] / [t] = (\text{м/с}) / \text{с} = \text{м/с}^2,$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim a = [LT^{-1}] / [T] = LT^{-2}.$$

Ответ: Размерность ускорения есть LT^{-2} .

ж). Уравнение, определяющее угловую скорость ω , в соответствии с её определением, имеет вид:

$$\omega = \varphi / t,$$

где φ – угол поворота [рад], а t – время. Тогда размерность угловой скорости $[\omega]$ равна:

$$[\omega] = [\varphi] / [t] = [\text{рад}] / \text{с} = 1 / \text{с},$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim \omega = 1 / T^1.$$

Ответ: Размерность угловой скорости есть $1 / T^1$.

з). Уравнение, определяющее плотность вещества ρ , в соответствии с её определением, имеет вид:

$$\rho = m / V,$$

где – m масса вещества, а V объём, который занимает вещество данной массы. Тогда размерность плотности $[\rho]$ равна:

$$[\rho] = [m] / [V] = \text{кг} / \text{м}^3,$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim \rho = L^{-3} \cdot M.$$

Ответ: Размерность плотности вещества есть $L^{-3} \cdot M$.

Задача №2. Получить размерности единиц измерения в системе СИ для следующих производных ФВ системы СИ тепловой группы величин: а) количество теплоты, б) теплоёмкость.

Решение.

а). Уравнение, определяющее количество теплоты Q , выделяемой веществом, для получения её размерности может быть записано с учётом известной эквивалентности теплоты и работы (A), а также работы и энергии (E), в частности кинетической энергии (E_k). Тогда уравнение, определяющее количество теплоты Q для получения её размерности имеет вид:

$$Q = A = E = E_k = 0,5 \cdot m \cdot V^2,$$

где – m масса тела (вещества), а V скорость тела (вещества). Тогда размерность количество теплоты $[Q]$ равна:

$$[Q] = [m] \cdot [V] \cdot [V] = \text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с}) \cdot (\text{м}/\text{с}) = \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 = \text{Дж},$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim Q = L^2 \cdot M \cdot T^{-2}.$$

Ответ: Размерность количества теплоты есть $L^2 \cdot M \cdot T^{-2}$.

б). Уравнение, определяющее теплоёмкости системы C , в соответствии с её определением, имеет вид:

$$C = Q / T,$$

где – Q количество теплоты, а T – температура. Тогда размерность теплоёмкости $[C]$ равна:

$$[C] = (\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2) / \text{К} = \text{Дж} / \text{К},$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim C = L^2 \cdot M \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}.$$

Ответ: Размерность теплоёмкости есть $L^2 \cdot M \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}$.

Задача №3. Получить размерности единиц измерения в системе СИ для следующих производных ФВ системы СИ электрической группы величин: а) плотность электрического тока, б) количество электричества.

Решение.

а). Уравнение, определяющее плотность электрического тока ρ_i , в соответствии с её определением, имеет вид:

$$\rho_i = I / S,$$

где – I сила электрического тока, а S – площадь сечения проводника, по которому протекает электрический ток. Тогда размерность плотности электрического тока $[\rho_i]$ равна:

$$[\rho_i] = A / m^2,$$

а уравнение размерности имеет вид:

$$\dim \rho_i = L^{-2} \cdot I.$$

Ответ: Размерность плотности электрического тока есть $L^{-2} \cdot I$.

в). Уравнение, определяющее количество электричества Q (фактически величину электрического заряда q), в соответствии с известным соотношением, имеет вид:

$$Q = I \cdot t,$$

где – I сила электрического тока, а t – время. Тогда размерность количества электричества $[Q]$ равна:

$$[Q] = A \cdot c = \text{Кл},$$

где – «Кл» наименование единицы измерения, имеющей специальное название (кулон), а уравнение размерности количества электричества имеет вид:

$$\dim Q = T \cdot I.$$

Ответ: Размерность количества электричества есть $T \cdot I$.

2.4.2. Примеры решения задач по результатам измерения ФВ в различных системах единиц

Задача №1. Атмосферное давление составляет 742 мм ртутного столба. Выразить это давление в: а) единицах системы СИ; б) мм водяного столба; в) атмосферах. Плотность ртути равна 13595 кг/м^3 , а воды – 1000 кг/м^3 .

Решение.

а). Уравнение, определяющее давление P столба жидкости с плотность ρ и высотой этого столба h , имеет вид:

$$P = \rho \cdot g \cdot h,$$

где – g ускорение свободного падения, приблизительное значение которого равно $9,8 \text{ м/с}^2$. Тогда, подставляя в него известные по условию задачи значения необходимых величин в системе СИ, получим:

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 13595 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 0,742 \text{ м} = 98\,8578,402 \text{ м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} = 98\,857,402 \text{ [Па]}.$$

Ответ: Атмосферному давлению 742 мм ртутного столба соответствует $98\,8578,402 \text{ м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} = 98\,8578,402 \text{ [Па]}$.

б). Используя выражение для определения давления, представленного при решении задачи по условию а), интересующая нас высота столба определится из равенства:

$$h = P / (\rho \cdot g).$$

В связи с тем, что значение h , в соответствии с условием задачи, требуется определить в мм, т.е. в дольной единице длины системы СИ, то все входящие в выражение для определения h должны быть также в единицах системы СИ. Поэтому, воспользовавшись результатами решения задачи по условию а), а также указанного в условии значения плотности воды, получим:

$$h = (98\,8578,402 \text{ м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}) / (1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}) = 10,08749 \text{ м} \approx 10\,087 \text{ мм (водяного столба)}.$$

Ответ: Атмосферному давлению 742 мм ртутного столба соответствует 10 087 мм водяного столба.

в). В связи с тем, что единица измерения давления – атмосфера, относится к внесистемным единицам измерений и под ней подразумевается нормальное атмосферное давление равное 750 мм ртутного столба (т.е. 1,01 Па) то, составив пропорцию вида:

$$\begin{aligned} 1 \text{ атмосфера} &- 750 \text{ мм рт. ст.} \\ x \text{ атмосфер} &- 742 \text{ мм рт. ст.,} \end{aligned}$$

из неё легко найти искомое значение x по формуле

$$x = (1 \text{ [атм.]}) \cdot 742 \text{ [мм рт. ст.]} / 750 \text{ [мм рт. ст.]} \approx 0,9893 \text{ [атм.]}$$

Ответ: Атмосферному давлению 742 мм ртутного столба соответствует давление в 0,9893 [атм.].

Задача №2. Скорость автомобиля в различные моменты времени составила 5; 11,2; 25,4 м/с. Какие значения показывал спидометр, отградуированный в км/ч.

Решение.

Для нахождения значения скорости автомобиля фактически во внесистемной единице измерения (км/ч), состоящей из кратной множителю 10^3 единицы измерения длины в системе СИ метр (это соответствует километру) и внесистемной единице измерения системы СИ времени – час, необходимо производную единицу измерения «м/с» перевести, используя указанные кратную и внесистемную её составляющие, во внесистемную единицу «км/ч». Зная, что 1 метр равен $1 \cdot 10^{-3}$ километра и что 1 часу соответствует 3600 секунд, получим

$$1 \text{ м/с} = (1 \cdot 10^{-3} \text{ км}) / (1 / 3600 \text{ час}) = 3,6 \text{ км/ч.}$$

Тогда искомые значения скорости: 5 м/с равно $5 \cdot 3,6 \text{ км/ч} = 18 \text{ км/ч}$; 11,2 м/с равно $11,2 \cdot 3,6 \text{ км/ч} = 40,32 \text{ км/ч}$; 25,4 м/с равно $25,4 \cdot 3,6 \text{ км/ч} = 91,44 \text{ км/час}$.

Ответ: Спидометр автомобиля, отградуированный в км/ч, в различные моменты времени показывал соответственно: 18 км/ч; 40,32 км/ч; 91,44 км/час.

Задача №3. Скорость вращения вала трехскоростного асинхронного электродвигателя на холостом ходу составляет на первой скорости 3000 об/мин, на второй - 1500 об/мин; на третьей - 750 об/мин. Найти частоту вращения в рад/с.

Решение.

Для нахождения значения частоты вращения электродвигателя из заданной фактически внесистемной единицы измерения (об/мин), состоящей из внесистемной единицы измерения угла системы СИ - оборот и внесистемной единицы измерения системы СИ времени – минута, в производную единицу измерения системы СИ – рад/с, вначале необходимо перевести эти внесистемные её составляющие в системные единицы системы СИ. Тогда, зная, что 1 оборот любого вращающегося тела равен 360-ти угловым градусам, а это равно углу 2π радиан в системе СИ, и что 1 минута содержит 60 секунд, получим:

$$1 \text{ об/мин} = 2\pi \text{ [рад]} / 60 \text{ [с]} \approx 0,1047 \text{ рад/с.}$$

Отсюда искомые значения частоты вращения вала электродвигателя :

$$3000 \text{ об/мин} = 3 \cdot 10^3 \cdot 0,1047 \text{ рад/с} = 314,1 \text{ рад/с;}$$

$$1500 \text{ об/мин} = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1047 \text{ рад/с} = 157,05 \text{ рад/с;}$$

$$750 \text{ об/мин} = 750 \cdot 0,1047 \text{ рад/с} = 78,525 \text{ рад/с.}$$

Ответ: Частота вращения вала электродвигателя на первой скорости составляет 314,1 рад/с, на второй – 157,05 рад/с, на третьей – 78,525 рад/с.

Задача №4. При испытании автомобиля ВАЗ-2108 было установлено, что мощность его двигателя составила 62 лошадиных силы. Определить мощность в единицах СИ.

Решение.

Мощность в системе СИ, являясь производной ФВ, измеряется в ваттах (см. табл. Известно [3], что $1 \text{ кВт} = 1,36 \text{ л.с.}$ Тогда составив пропорцию вида:

$$1 \text{ кВт} - 1,36 \text{ л.с.}$$

$$x \text{ кВт} - 62 \text{ л.с.},$$

можно найти искомую мощность автомобиля в единице системы СИ, используя уравнение: $x[\text{кВт}] = 1[\text{кВт}] \cdot 62[\text{л.с.}] / 1,36 [\text{л.с.}] \approx 4,559 [\text{кВт}] \approx 4559 [\text{Вт}]$.

Ответ: Мощность автомобиля ВАЗ-2108 в единицах измерения системы СИ составляет 4559 Вт.

Задача №5. Фирмой израсходовано 17,174 ГДж электрической энергии. Выразить расход энергии в кВт·ч. (1 Дж=1 Вт·с).

Решение. Энергия в системе СИ, являясь производной ФВ, измеряется в джоулях (см.табл.2.2). Известно, что: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{с}$ [3]; русское обозначение приставки «гига» - буква Г (в обозначении единицы измерения) соответствует множителю 10^9 , а русское обозначение приставки «кило» - буква «к» соответствует множителю 10^3 (табл.2.4); 1 секунда составляет 1/3600 часть часа. Тогда, учитывая данные особенности обозначений и соотношений единиц измерения, можно записать:

$$17,174 \text{ ГДж} = 17,174 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot \text{с} = (17,174 \cdot 10^9 [\text{Вт}]) \cdot (1/3600 [\text{ч}]) = (17,174 \cdot 10^9 [\text{Вт}]) \cdot (1/3,6 \cdot 10^3 [\text{ч}]) \approx 4,77 \cdot 10^6 [\text{Вт} \cdot \text{ч}] = 4770 [\text{кВт} \cdot \text{ч}].$$

Ответ: Расход электрической энергии фирмой составил 4770 кВт·час.

Задача №6. Погрешность мембранного преобразователя давления составляет 5 мм водяного столба. Выразить погрешность в единицах СИ.

Решение. Столб жидкости или газа, находясь в однородном поле тяготения, создает давление, обусловленное весом этого столба [3], равное

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h,$$

где ρ – плотность воды, равная 1000 кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; h – высота столба.

Погрешность в единицах СИ равна:

$$\Delta P = 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 0,005 \text{ м} = 49,05 \text{ кг}\cdot\text{м}/(\text{с}^2\cdot\text{м}^2) = 49,05 \text{ Н/м}^2 = 49,05 \text{ Па}.$$

Ответ: Погрешность мембранного преобразователя давления в единицах системы СИ составляет $49,05 \text{ Н/м}^2$ или $49,05 \text{ Па}$.

Задача №7. Записать правильно и обосновать необходимые исправления в следующих записях, сделанных при метрологической экспертизе нормативно-технической документации: а) $8,6 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{м}^{-1}$; б) $2,56 \text{ Н}\cdot\text{м}$; в) $0,15 \text{ мкм}$ и $0,3 \text{ мкм}$; г) $97\pm 5 \text{ нФ}$; д) $5 \text{ кг}/(\text{с}^2\cdot\text{м})$; е) $15 \text{ микрокилограмм}$.

Решение.

а). В записи $8,6 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-2}\cdot\text{м}^{-1}$ не соблюдена последовательность записи основных единиц измерения, в соответствии последовательностью представленной в табл.2.1. *Правильная запись:* $8,6 \text{ м}^{-1}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$.

б). В записи $2,56 \text{ Н}\cdot\text{м}$ не соблюдена последовательность записи основных единиц измерения, в соответствии последовательностью представленной в табл.2.1, и использовано сочетание производной единицы измерения (Н) и основной (м). *Правильная запись:* $2,56 \text{ м}^2\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$ или $2,56 \text{ Дж}$, т.к. джоуль производная единица системы СИ, имеющая специальное название.

в). В записях $0,15 \text{ мкм}$ и $0,3 \text{ мкм}$ использована десятичная кратная приставка (см. табл.2.4.) мк (микро), которая недопустима в нормативно-технических документах. *Правильная запись:* $15\cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $3\cdot 10^{-7} \text{ м}$.

г). В записи $97\pm 5 \text{ нФ}$ использована десятичная кратная приставка (см. табл.2.4.) «н» (нано), которая недопустима в нормативно-технических документах. *Правильная запись:* $(97\pm 5)\cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ или $97\pm 5 \text{ м}^{-2}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^4\cdot\text{А}^2$ (см.табл.2.2).

д). В записи $5 \text{ кг}/(\text{с}^2\cdot\text{м})$ не соблюдена последовательность записи основных единиц измерения, в соответствии последовательностью представленной в табл.2.1, а также использованы символы применяемые для записи математических выражений (символ операции деления «/» и круглые скобки «(...)»). *Правильная запись:* $5 \text{ м}^{-1}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$.

е). В записи $15 \text{ микрокилограмм}$ использована запись полного наименования десятичной кратной приставки (см. табл.2.4.) «микро» и

полное наименование основной единицы системы СИ «килограмм» (см.табл.2.1). *Правильная запись:* $15 \cdot 10^{-6}$ кг.

3. ЭТАЛОНЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПОВЕРОЧНЫЕ СХЕМЫ

3. 1. Эталоны единиц физических величин

В подразделе 2.1 данного учебного пособия было приведено определение процесса измерения, как процесса нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Однако следует заметить, что измерение является сложным процессом, включающим в себя целый ряд структурных элементов, к которым относятся: измерительная задача; объект измерения; принцип, метод и средство измерения; модель средства измерения; условия и субъект измерения. Одним из важнейших среди перечисленных структурных элементов является средство измерения, без наличия которого практически невозможно выполнения никакого измерения. В соответствии с ГОСТ 16263-70 *под средством измерения понимается техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.*

При проведении измерений различных ФВ принято выполнять требования, так называемого *единства измерений*, под которым понимается такое состояние измерений, при котором его результаты выражаются в узаконенных единицах, а их погрешность известна с заданной вероятностью. Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все средства измерения одной и той же ФВ. Это достигается путём точного воспроизведения и хранения установленных единиц ФВ и передачи их размеров применяемым средствам измерений в специализированных учреждениях.

Воспроизведение единицы физической величины — это совокупность операций по материализации единицы ФВ с наивысшей в стране точностью посредством государственного эталона или исходного образцового СИ. Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы — это воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру ФВ в соответствии с определением единицы. Оно осуществляется с помощью государственных первичных эталонов. Например, единица массы — 1 килограмм (точно) воспроизведена в виде платиноиридиевой гири, хранимой в Международном бюро мер и весов в качестве международного эталона килограмма. Розданные другим странам эталоны имеют номинальное

значение 1 кг. На основании последних международных сличений (1979) платиноиридиевая гиря, входящая в состав Государственного эталона РФ, имеет массу 1,000000087 кг.

Воспроизведение производной единицы — это определение значения ФВ в указанных единицах на основании косвенных измерений других величин, функционально связанных с измеряемой. Так, воспроизведение единицы силы — Ньютона — осуществляется на основании известного уравнения механики $F = mg$, где m — масса тела; g — ускорение свободного падения.

Передача размера единицы — это приведение размера единицы **ФВ**, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке или калибровке. Размер единицы передается "сверху вниз"— от более точных СИ к менее точным.

Хранение единицы — совокупность операций, обеспечивающая неизменность во времени размера единицы, присущего данному СИ. Хранение эталона единицы ФВ предполагает проведение взаимосвязанных операций, позволяющих поддерживать метрологические характеристики эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняются регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера.

Все средства измерения, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерений, для поверки и градуировки мер и измерительных приборов, делятся на эталоны и образцовые средства измерения.

Эталон — средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера другим средствам измерений. Таким образом, на основании определения эталона, можно сказать, что основное назначение эталонов это обеспечение материально-технической базы воспроизведения и хранения единиц ФВ.

Основные единицы ФВ Международной системы единиц (СИ) должны воспроизводиться централизованно с помощью государственных эталонов. Дополнительные, производные, а при необходимости и внесистемные единицы, исходя из технико-экономической целесообразности, воспроизводятся одним из двух способов:

- централизованно — с помощью единого для всей страны государственного эталона;

- децентрализовано — посредством косвенных измерений, выполненных в органах метрологической службы с помощью соответствующих эталонов.

Централизованно воспроизводится большинство важнейших производных единиц Международной системы единиц (СИ):

ньютон — сила ($1 \text{ Н} = 1 \text{ кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$);

джоуль — энергия, работа ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}$);

паскаль — давление ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$);

Ом — электрическое сопротивление;

вольт — электрическое напряжение.

Децентрализованно воспроизводятся единицы, размер которых не может передаваться прямым сравнением с эталоном (например, единица площади) или если поверка мер посредством косвенных измерений проще, чем сравнение с эталоном, и обеспечивает необходимую точность (например, единица вместимости и объема). При этом создаются поверочные установки высшей точности.

Государственные эталоны хранятся в метрологических институтах Госстандарта РФ. По решению Госстандарта РФ допускается их хранение и применение в органах ведомственных метрологических служб.

Кроме национальных эталонов единиц ФВ существуют международные эталоны, хранимые в Международном бюро мер и весов. Под эгидой Международного бюро мер и весов проводится систематическое международное сличение национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий с международными эталонами и между собой. Например, эталон метра и килограмма сличают один раз в 25 лет, эталоны электрического напряжения, сопротивления и световые — один раз в 3 года.

Большинство эталонов представляют собой сложные и весьма дорогостоящие физические установки, требующие для своего обслуживания и применения ученых высочайшей квалификации.

Все эталоны специально классифицируют в зависимости от метрологического назначения (рис. 3.1). Это назначение установлено документами ГОСТ 8.057—80 и предполагает оснащение метрологической службы: 1) первичными, 2) специальными, 3) государственными и 4) вторичными эталонами.



Рис. 3.1. Классификация эталонов

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью.

Специальный эталон служит для воспроизведения единицы в условиях, в которых первичный эталон не может использоваться и прямая передача размера единицы от первичного эталона, с требуемой точностью, технически неосуществима (например, на высоких и сверхвысоких частотах, в начале и конце участков диапазонов измерений и т.д.).

Первичные и специальные эталоны являются исходными для страны, их утверждают в качестве государственных. Утверждение проводит главный метрологический орган страны. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Точность воспроизведения единицы должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники. В состав государственных эталонов включаются СИ, с помощью которых воспроизводят и (или) хранят единицу ФВ, контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы, осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран;

Все эталоны характеризуются неисключенной систематической погрешностью воспроизведения соответствующей единицы и относительным среднеквадратическим отклонением результата измерения размера этой единицы. Первая величина показывает точность эталона по отношению к принятому определению единицы и важна как для обеспечения правильности измерений, так и для их единства в международном масштабе. Вторая характеризует воспроизводимость эталоном размера единицы и является важнейшей характеристикой обеспечения единства измерений в стране.

Вторичный эталон — эталон, значение которого устанавливается по первичному эталону и он занимает подчиненное положение. Вторичные эталоны, в свою очередь, подразделяются на а) эталоны-копии, б) эталоны сравнения и в) рабочие эталоны.

Эталон-копия предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Благодаря этому первичный эталон разгружается от текущих работ по передаче размера единицы, что повышает срок его службы.

Эталон сравнения применяется для взаимного сличения эталонов, которые по тем или иным причинам нельзя непосредственно сравнивать друг с другом (например, международные сличения эталонов).

Рабочие эталоны являются наиболее распространенной категорией вторичных эталонов, и они предназначены для поверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений. Следует отметить, что рабочими называют такие средства, которые применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

На схеме рис. 3.2 показана метрологическая последовательность передачи размеров единиц от первичного эталона рабочим, затем от рабочих эталонов - образцовым средствам измерений различных разрядов и далее рабочим мерам и измерительным приборам, т.е. рабочим средствам измерений.

Совокупность всех перечисленных эталонов образует эталонную базу Российской Федерации. Рассмотрим в качестве примеров *государственные эталоны единиц наиболее распространенных ФВ* [3, 4].

Эталон длины. До 1960 г. действовал следующий эталон метра (м). Метр определялся как расстояние при 0°C между осями двух соседних штрихов, нанесенных на платиново-иридиевом бруске, хранящемся в Международном бюро мер и весов, при условии что эта линейка находится при нормальном давлении и поддерживается двумя роликами диаметром не менее 1 см, расположенными симметрично в одной продольной плоскости на расстоянии 571 мм один от другого.

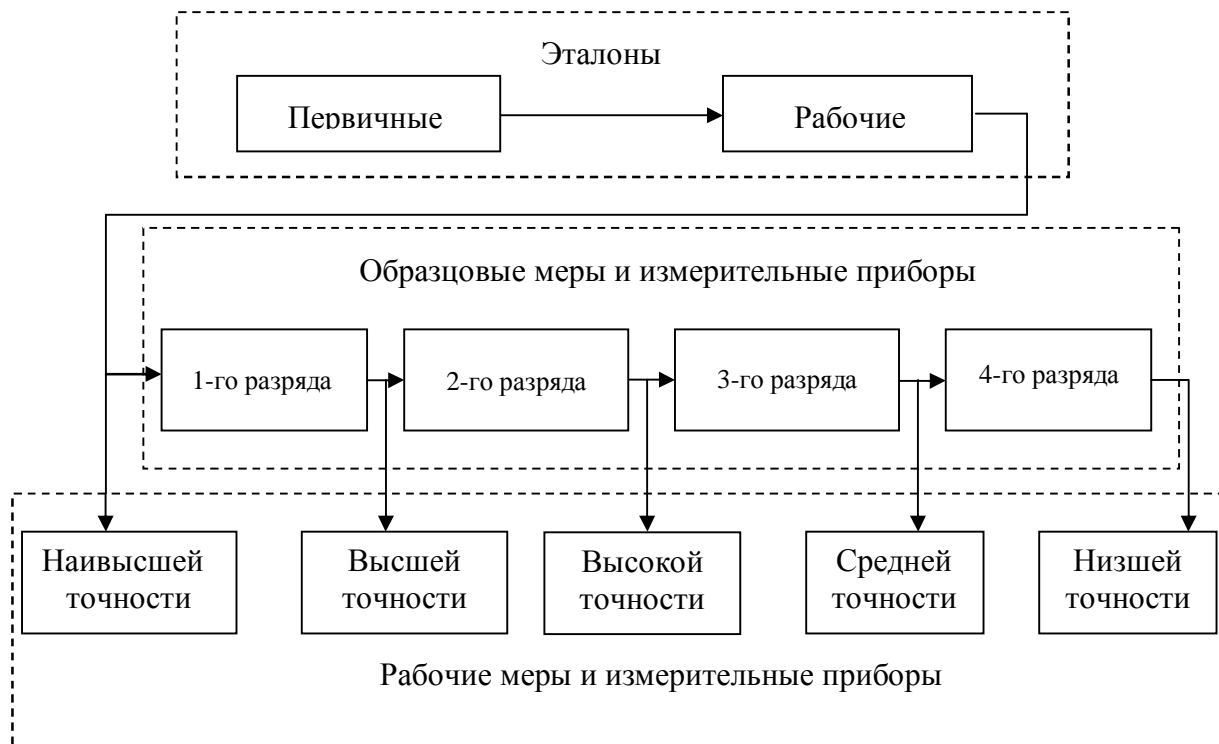


Рис. 3.2. Структура передачи размеров единиц физических величин

Требование к повышению точности (платиново-иридиевый брусок не позволяет воспроизводить метр с погрешностью, меньшей 0,1 мкм), а также целесообразность установления естественного и неразмерного эталона привели к созданию в 1960 г. нового, действующего по настоящее время, эталона метра, точность которого на порядок выше старого. Повторим, что в новом эталоне метр определяется как длина, равная 1 650 763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Физический принцип действия этого эталона заключается в следующем. Возбужденные пары и газы излучают свет, в спектре которого имеется ряд линий. Каждая линия определяется источником монохроматического излучения с определенной длиной волны. Атомы излучают свет после возбуждения, когда они переходят в одно из состояний с более высокого уровня энергии: $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$. Затем атом возвращается в какое-либо другое строго допустимое (дискретное) энергетическое состояние с более низким уровнем энергии. Этот процесс связан с излучением световой энергии.

Государственный первичный эталон метра РФ состоит из следующего комплекса аппаратуры:

источник излучения — газоразрядная лампа с изотопом криптона-86;
 эталонный интерферометр с фотоэлектрическим микроскопом и рефлектором для измерений длины в пределах 0... 1000 мм, снабженный

платиновым термометром сопротивления и дифференциальными термопарами для точных измерений температуры;

эталонный спектроинтерферометр для измерения длин волн в пределах 200...3000 мм.

Место хранения эталона метра — ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) воспроизведения единицы метра не превышает $5 \cdot 10^{-9}$ м.

Эталон постоянно совершенствуется в целях повышения точности, стабильности, надежности. В частности, для эталона метра в настоящее время рассматриваются пути повышения точности. Методы повышения точности базируются на возможности использования атомных пучков в вакууме как источников монохроматического излучения, стабилизированных лазеров в качестве источников интенсивного монохроматического излучения с узкой спектральной линией и других физических эффектов.

Эталон массы. Государственный первичный эталон килограмма РФ (кг) хранится во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. Он обеспечивает воспроизведение единицы массы 1 кг со СКО не более $3 \cdot 10^{-8}$ кг. В состав Государственного первичного эталона килограмма РФ входят:

копия международного прототипа килограмма - платиново-иридиевый прототип № 12, представляющий собой гирю в виде цилиндра с закругленными ребрами диаметром 39 мм и высотой 39 мм;

эталонные весы № 1 и № 2 на 1 кг с дистанционным управлением для передачи размера единицы массы от прототипа № 12 эталонам-копиям и от эталонов-копий рабочим эталонам.

Эталон единиц времени и частоты. Единица времени — секунда (с) входит в число основных единиц СИ, а единица частоты — герц (Гц) — в число производных единиц. Если обозначить частоту гармонических колебаний f , а их период T , то $f = 1/T(1/c)$.

Государственный первичный эталон времени и частоты (ГОСТ 8.129—83) включает комплекс следующих средств измерений:

- цезиевые меры частоты, предназначенные для воспроизведения размеров единиц времени и частоты;
- водородные меры частоты, предназначенных для хранения размеров единиц времени и частоты;
- группу квантовых часов, предназначенных для хранения шкал атомного и координированного времени России;
- аппаратуру для передачи размера единицы частоты в оптический диапазон, состоящую из группы синхронизированных лазеров и сверхвысокочастотных генераторов;
- аппаратуру для внутренних и внешних сличений, включающую перевозимые квантовые часы и лазеры;

- аппаратуру средств обеспечения (автоматическое программирование и коммутация, дистанционный контроль температуры термостатов и напряжения питания генераторов, прием, обработка и регистрация радиосигналов и т.д.).

Государственный первичный эталон времени обеспечивает воспроизведение значений интервалов времени $10^{-9} \dots 10^8$ с в диапазоне частот $1 \dots 10^{14}$ Гц при среднеквадратическом отклонении не более $5 \cdot 10^{-14}$ и неисключенной систематической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-13}$. Нестабильность частоты эталона за интервалы времени измерений от 100 с до 24 часов не должна превышать $2 \cdot 10^{-14}$.

Таким образом, государственный первичный эталон времени и частоты — это сложный радиотехнический комплекс, обеспечивающий передачу размера единиц времени и частоты и шкал времени всем нижестоящим средствам измерений при помощи телевидения, радио и других каналов связи. Точность воспроизведения единиц времени и частоты является наивысшей по сравнению с другими единицами электрических величин, а передача их размера на любые расстояния не вызывает в настоящее время каких-либо технических затруднений. Это позволяет проектировать аппаратуру для частотно-временных измерений, обладающую высокой точностью.

Эталон единицы температуры. Этот эталон представляет собой очень сложную установку. Измерение температуры в диапазоне 0,01... 0,8 К осуществляется по температурной шкале термометра магнитной восприимчивости (ТШТМВ). В диапазоне 0,8... 1,5 К используется шкала гелия-3 (${}^3\text{He}$), основанная на зависимости давления насыщенных паров гелия-3 от температуры. В диапазоне 1,5 ...4,2 К используется шкала гелия-4 (${}^4\text{He}$), основанная на том же принципе. В диапазоне 4,2... 13,81 К температура измеряется по температурной шкале германиевого термометра сопротивления (ТШГТС). Используется зависимость $R = R(t)$. В диапазоне 13,81... 6300 К используется международная практическая температурная шкала (МПТШ-68), основанная на ряде воспроизводимых равновесных состояний различных веществ.

В соответствии с требованиями комплекса государственных стандартов, объединённых в Государственную систему обеспечения единства измерений (ГСОЕИ, упрощённое ГСИ) результаты измерений должны выражаться в единицах величин, допущенных к применению документами ГОСТ 8.417—81 «ГСИ. Единицы физических величин». Согласно этому стандарту **основной единицей электрических величин является единица силы тока — ампер (А). Производными от ампера единицами электрических величин являются:**

- единица электродвижущей силы (ЭДС) и электрического напряжения
- вольт (В);

- единица частоты — герц (Гц);
- единица электрического сопротивления — Ом (Ом);
- единица индуктивности и взаимной индуктивности двух катушек — генри (Гн);
- единица электрической емкости — фарад (Ф).

Все перечисленные единицы воспроизводятся и хранятся посредством Государственных первичных эталонов.

Эталон единицы силы электрического тока. Государственный первичный эталон ампера (регламентируется ГОСТ 8.022—75) — это комплекс средств измерений, в состав которого входят: а) токовые весы; б) мера электрического сопротивления, применяемая при передаче размера ампера (эталон сравнения). С помощью токовых весов реализуется закон взаимодействия электрических токов — закон Ампера, положенный в основу определения ампера. В токовых весах, представляющих собой рычажные равноплечие весы, с одной стороны на коромысло действует сила взаимодействия двух соленоидов, один из которых подвижен и подвешен к этому коромыслу, с другой стороны — гиря известной массы. При протекании по этим катушкам постоянного тока возникает сила их взаимодействия, которая уравнивается силой тяжести (например, массой гири).

Итак, при равновесии весов сила тока определяется: массой гири; ускорением ее свободного падения в месте расположения весов; постоянной электродинамической системы (соленоидов), которая зависит от формы и размеров соленоидов, диаметра сечения провода соленоида, значения относительной магнитной проницаемости среды и т.п. Таким образом, ампер воспроизводится через основные единицы - метр, секунду, килограмм.

Эталон ампера воспроизводит значение силы постоянного электрического тока и обеспечивает передачу размера ампера в диапазоне $10^{-12} \dots 30 \text{ А}$ с относительным среднеквадратическим отклонением результата измерений не более $4 \cdot 10^{-6}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей $8 \cdot 10^{-6}$.

Для воспроизведения и хранения единицы силы переменного тока разработаны и утверждены два государственных специальных эталона.

Государственный эталон силы переменного тока для диапазона частот $40 \dots 10^5 \text{ Гц}$ и значений токов $0,01 \dots 10 \text{ А}$ (ГОСТ 8.183—76) состоит из: 1) набора компарирующих (от слова компаратор — сравнивающее устройство) термоэлектрических преобразователей; 2) потенциометров постоянного тока; 3) меры электродвижущей силы (нормального элемента); 4) набора мер электрического сопротивления; 5) стабилизированных источников постоянного и переменного токов. Данный эталон воспроизводит единицу силы тока с относительным среднеквадратическим отклонением не более

10^{-4} при относительной систематической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-4}$.

Государственный эталон силы переменного тока для диапазона частот 0,1...300 МГц и значений токов 3...100 А (ГОСТ 8.132—74) включает в себя: 1) электродинамический амперметр с двумя коаксиальными измерительными секциями; 2) фотоэлектрический компаратор; 3) измерительный трансформатор. Воспроизведение ампера осуществляется с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-4}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей $8,5 \cdot 10^{-4}$.

Эталон единицы электродвижущей силы и напряжения. Государственный первичный эталон вольта (регламентирован ГОСТ 8.027-81) состоит из: 1) меры напряжения на основе эффекта Джозефсона (возникновение напряжения между двумя разделенными тонким слоем диэлектрика сверхпроводниками, помещенными в высокочастотное электромагнитное поле), 2) группы нормальных элементов; 3) компараторов, для сличения нормальных элементов между собой и с мерой напряжения. В состав вспомогательного оборудования входит комплект, состоящий из компьютера и устройств контроля температуры нормальных элементов, автоматической регистрации результатов измерений и контроля вольтамперных характеристик переходов Джозефсона. Таким образом, эталон базируется на стабильном эффекте Джозефсона и воспроизводит вольт абсолютным методом. Нормальные элементы, помещенные в термостат, обеспечивают хранение этой единицы. Первичный эталон вольта обеспечивает воспроизведение единицы ЭДС и электрического напряжения с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-8}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей 10^{-6} .

Для воспроизведения и хранения единицы напряжения переменного тока разработаны и утверждены два государственных специальных эталона.

Государственный первичный эталон напряжения переменного тока для значений 0,1 ...10 В в диапазоне частот 20...3·10⁷ Гц (ГОСТ 8.184—76) состоит из двух наборов термоэлектрических преобразователей напряжений, потенциометров постоянного тока, меры ЭДС, делителя напряжения и стабилизированных источников постоянного и переменного токов. Эталон воспроизводит единицу напряжения с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-5}$ при относительной систематической погрешности, не превышающей $8 \cdot 10^{-4}$.

Эталон напряжения переменного тока для значений 0,1... 1 В в диапазоне частот 30. ..3·10³ МГц (ГОСТ 8.072—82) включает в себя устройство формирования переменного напряжения, набор болометрических (терморезисторных) преобразователей постоянного и переменного напряжения, терморезисторный мост с автоматическим

уравновешиванием, вольтметры, используемые в качестве компараторов переменного напряжения. Эталон воспроизводит единицу напряжения с относительным среднеквадратическим отклонением не более $5 \cdot 10^{-3}$ при относительной аналитической погрешности, не превышающей $2 \cdot 10^{-2}$.

Эталон единицы электрического сопротивления. Государственный первичный эталон Ома (ГОСТ 8.028—75) обеспечивает воспроизведение единицы электрического сопротивления со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 10^{-7} при систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-7}$. Единица электрического сопротивления — Ом (Ом) входит в число производных единиц СИ. Эталон состоит из десяти мanganin-овых катушек сопротивления с номинальным значением 1 Ом и мостовой измерительной установки.

Эталон единицы электрической емкости. Государственный первичный эталон электрической емкости (ГОСТ 8.371—80) представляет собой расчетный образцовый конденсатор, размещенный в вакуумном блоке, и емкостной мост, с помощью которого осуществляется передача размера единицы емкости на частоте 1 кГц.

Единица электрической емкости — фарад (Ф) входит в число производных единиц СИ. Следует заметить, что часто неправомерно используют термин — фарада. Эталон обеспечивает воспроизведение фарада со среднеквадратическим отклонением, не превышающим $2 \cdot 10^{-7}$ при систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-7}$. Для воспроизведения единицы емкости в более высокочастотном диапазоне (1...100 МГц) разработан и утвержден государственный специальный эталон (ГОСТ 8.267—77). В состав эталона входят четыре коаксиальных конденсатора и высокочастотный компаратор емкости мостового типа. Номинальное значение емкости воспроизводится эталоном со среднеквадратическим отклонением, не превышающим $3 \cdot 10^{-5}$ при систематической погрешности, не превышающей 10^{-4} .

Эталон единицы индуктивности. Государственный первичный эталон единицы индуктивности (ГОСТ 8.029—80) состоит из четырех тороидальных катушек индуктивностей и моста, с помощью которого осуществляется передача размера единицы индуктивности — генри (Гн) — на частоте 1 кГц со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 10^{-6} при систематической погрешности, не превышающей $5 \cdot 10^{-6}$.

3.2. Поверочные схемы передачи размеров единиц физических величин

Несмотря на то, что в России создана мощная эталонная база, прямая передача размеров единиц физических величин от эталонов рабочим средствам измерений затруднена из-за их огромного парка, находящегося в

обращении. Поэтому необходима промежуточная категория средств измерений, предназначенная для осуществления на практике этой передачи, — образцовые средства измерения.

Образцовым средством измерений называется мера, измерительный прибор или преобразователь, служащие для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых. От образцовых средств измерений размеры единиц физических величин передаются далее рабочим мерам и измерительным приборам, т.е. рабочим средствам измерений.

Рабочими называют такие средства измерений, которые применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Общие требования к образцовым средствам измерений, их метрологической аттестации и применению регламентируются ГОСТ 8.382—80. В частности, предусматривается создание образцовых средств измерений одной и той же физической величины нескольких уровней точности — разрядов. При этом образцовые средства измерений 1-го разряда считаются исходными и подлежат поверке непосредственно по рабочим эталонам. Образцовые средства измерений 2-го, 3-го и последующих разрядов являются подчиненными и подлежат поверке по образцовым средствам измерений 1-го, 2-го и последующих разрядов соответственно. Наконец, образцовые средства измерений могут объединяться в измерительные установки, позволяющие быстро выполнять все операции поверки — поверочные установки.

При анализе схемы соподчиненности рабочего эталона с образцовыми средствами измерений, рабочими средствами измерений (мерами) и измерительными приборами необходимо помнить следующее: образцовые средства измерений и измерительные приборы *применяются для измерений, связанных с передачей размера единиц; рабочие средства измерений используются для измерений без передачи размера единиц.*

Для упорядочения соподчиненности эталонов, образцовых и рабочих средств измерений используются **поверочные схемы** — документы, устанавливающие и регламентирующие систему передачи размера единицы физической величины от государственного эталона рабочим средствам измерений.

Общие требования к поверочным схемам регламентирует ГОСТ 8.061—80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение». Так как поверочные схемы предназначены в общем случае для передачи размеров единиц величин от Государственных эталонов до объектов поверки с обеспечением возможности проведения метрологических испытаний (государственных, контрольных, поверки, аттестации и пр.) средств измерений различного класса точности, в их основу положен многоступенчатый принцип. Это значит, что *поверочная схема должна*

состоять не менее чем из двух ступеней передачи размера единицы физической величины.

Поверочные схемы подразделяются на: 1) государственные, 2) ведомственные и 3) локальные (отдельных органов метрологической службы). Основопологающей является государственная поверочная схема, которая распространяется на все средства измерений данной величины, применяемые в стране; ведомственная — на средства измерений, подлежащие поверке внутри ведомства; локальная — на средства измерений, подлежащие поверке в данном органе метрологической службы.

Государственные поверочные схемы представляются потребителям в виде государственного стандарта, который включает в себя 1) чертеж поверочной схемы и 2) пояснительную текстовую часть. Ведомственная и локальная поверочные схемы оформляются в виде чертежа с необходимыми текстовыми объяснениями.

Чертежи поверочной схемы состоят из полей, расположенных друг под другом, и имеют такие наименования: «Эталоны», «Образцовые средства измерений n-го разряда», «Рабочие средства измерений». Варианты графического изображения элементов поверочных схем представлены на рис.3.3, а упрощённая структура чертежа поверочной схемы представлена на рис. 3.4.

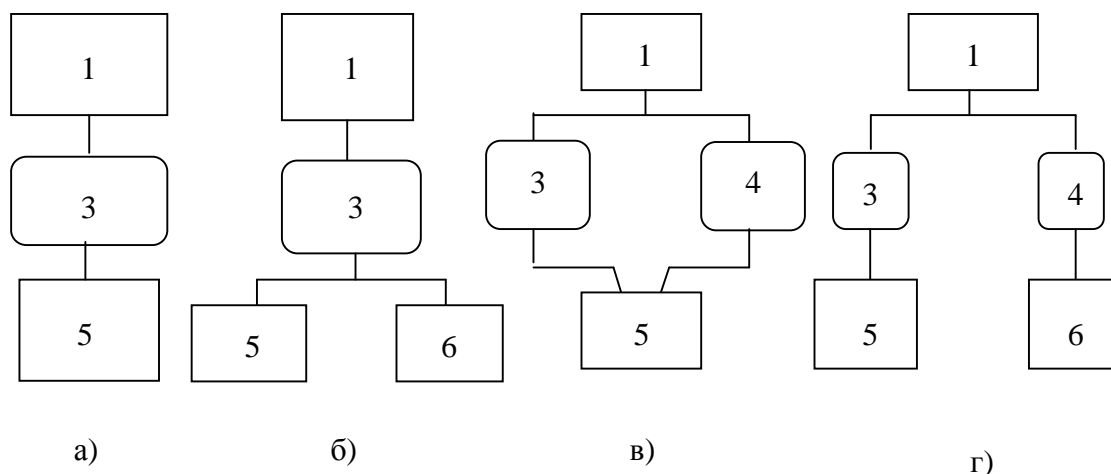


Рис. 3.3. Элементы графического изображения поверочных схем: передача размера: а) от эталона 1 к объекту 5 методом 3; б) от эталона 1 к объектам поверки 5 и 6 методом 3; в) от эталона 1 к объекту поверки 5 методом 3 или 4; г) от эталона 1 к объекту поверки 5 методом 3 и объекту поверки 6 методом 4.

Наименования средств измерений заключают в прямоугольники, а методов поверки — в горизонтальные овалы, передачу размеров единиц сверху вниз изображают сплошными линиями, соединяющими объекты поверки с соответствующими средствами, откуда передается размер единицы.

Отметим, что для многофункциональных средств измерений (например, ампервольтметров, тестеров) используют ряд поверочных схем. В состав поверочных схем могут входить образцовые средства измерений, заимствованные из других поверочных схем, т.е. средства, разработанные для другой поверочной схемы. Так, в состав поверочной схемы средств измерений силы тока входят образцовые меры ЭДС и сопротивлений 2-го, 3-го разрядов.

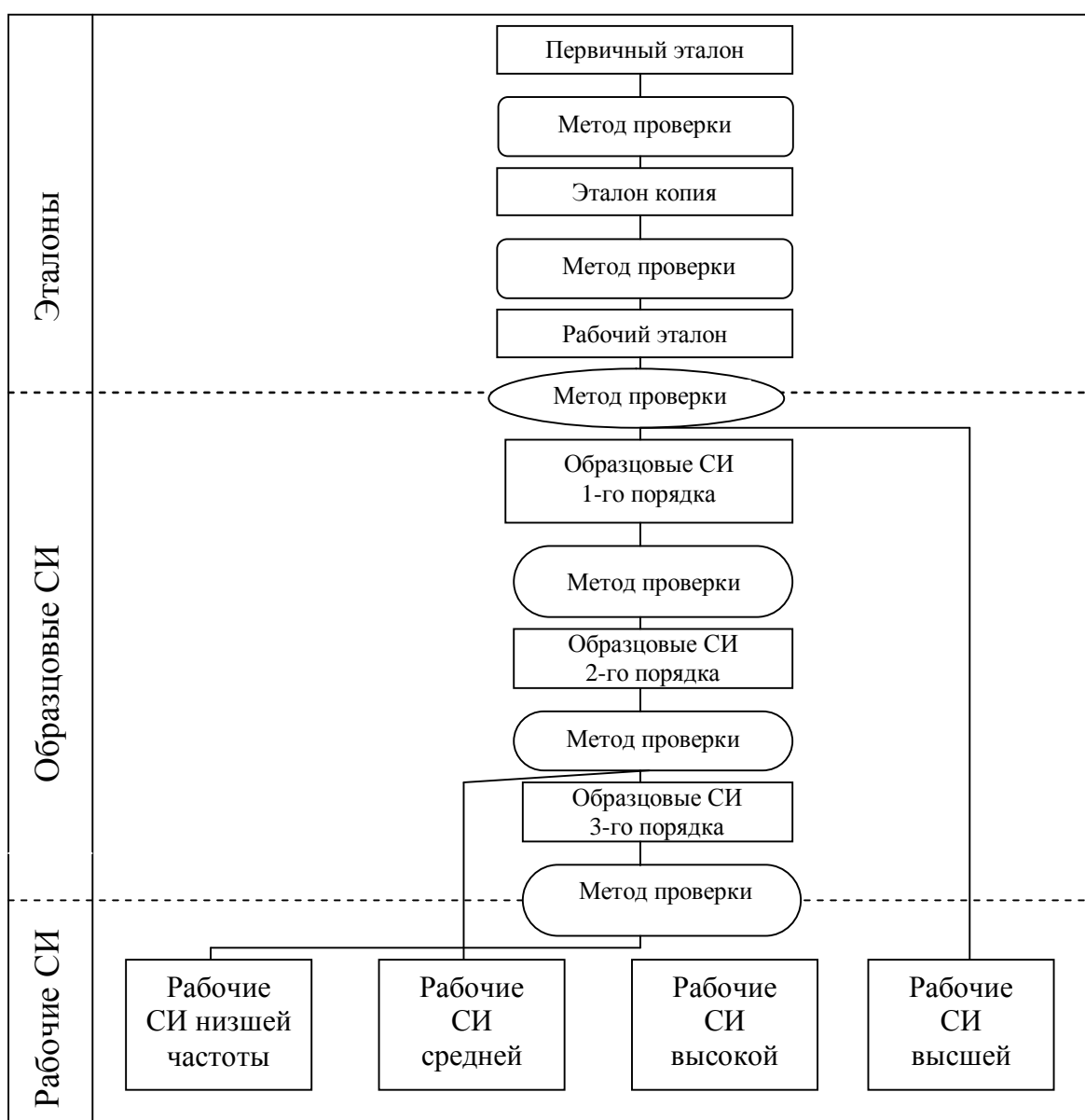


Рис.3.4. Упрощенная структура чертежа поверочной схемы

На чертежах поверочной схемы должны быть указаны :

- наименования средств измерений и методов поверки;
- номинальные значения ФВ или их диапазоны;
- допускаемые значения погрешностей средств измерений;
- допускаемые значения погрешностей методов поверки.

Правила расчёта параметров поверочных схем и оформления чертежей поверочных схем приведены в ГОСТ 8.061- 80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение» [5], а также в рекомендациях МИ 83-76 «Методика определения параметров поверочных схем».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология.: Учеб. пособие для вузов.- М.: Логос, 2000
2. ГОСТ 16263-70 ГСОЕИ. Метрология. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
3. Карякин И.К., Быстров К.Н., Киреев П.С. Краткий справочник по физике. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1964.
4. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: Учебник для нач. проф. образования / С.А.Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М.: Издательский центр «Академия»; ПрофОбрИздат, 2002.
5. ГОСТ 8.061- 80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение». – М.: Изд-во стандартов, 1991.
6. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения. – М.: Радио и связь, 1993.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение. Формально логические основания измерения как процесса познания.....	5
1. Основы общей теории измерений.....	10
1.1. Основные термины и определения общей теории измерений...10	
1.2. Простейшие постулаты свойств физических величин и основное уравнение измерения.....	14
1.3. Шкалы измерений физических величин.....	16
2. Системы физических величин.....	22
2.1. Общие понятия систем физических величин и их единиц.....	22
2.2. Международная система единиц СИ (система СИ).....	24
2.3. Внесистемные единицы физических величин. Множители и приставки для образования единиц физических величин.....	36
2.4. Примеры решения задач на получение производных единиц измерения и по результатам измерения ФВ в различных системах единиц.....	39
2.4.1. Получение производных единиц измерения в системе СИ для механических, тепловых и электрических величин...39	
2.4.2. Примеры решения задач по результатам измерения ФВ в различных системах единиц.....	43
3. Эталоны физических величин и поверочные схемы.....	48
3.1. Эталоны единиц физических величин.....	48
3.2. Поверочные схемы передачи размеров единиц физических величин.....	58
Библиографический список.....	63

Учебное издание

Куприянов Владимир Евгеньевич

Общая теория измерений
Часть 1

Основы общей теории измерений.
Системы и эталоны физических величин

Редактор А.П. Володина

Корректор Е.Ф.Афанасьева

Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР №020275 Подписано в печать |02.03.04.

Формат 60×84/16. Бумага для множит. Техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. Печ. л. 3,95 . Уч-изд. л. 4,39 . Тираж |100 экз.

Заказ – 72-2004 г.

Редакционно-издательский комплекс
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.