

В.Ю.ШИШМАРЁВ

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Учебник

*Рекомендовано  
Федеральным государственным автономным  
учреждением «Федеральный институт развития  
образования» (ФГАУ «ФИРО») в качестве учебника  
для использования в учебном процессе образовательных  
учреждений, реализующих программы среднего  
профессионального образования по специальностям 220703  
«Автоматизация технологических процессов и производств  
(по отраслям)», 230113 «Компьютерные системы и комплексы»,  
учебная дисциплина «Электротехнические измерения»*

*Регистрационный номер рецензии 662  
от 18 декабря 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2013

УДК 621.3(075.32)

ББК 31.2я723

Ш657

Рецензенты:

председатель предметной комиссии радиоэлектронных приборов,  
преподаватель 14-й категории специальных предметов  
Московского техникума космического машиностроения *Т. В. Киселева*;  
главный специалист ОАО «Московский институт электромеханики  
и автоматики», канд. техн. наук *В. И. Галкин*

**Шишмарёв В. Ю.**

Ш657 Электротехнические измерения : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 304 с.

ISBN 978-5-7695-7419-1

Приведены основные понятия о физических величинах, их единицах, эталонах, системах единиц. Представлены методы электротехнических измерений и классификация средств измерений. Рассмотрены метрологические показатели и погрешности измерений и измерительных приборов. Показаны схемы и рассмотрены принципы работы механизмов и измерительных цепей электроизмерительных приборов. Рассмотрены принципы работы и конструктивные схемы типовых электроизмерительных приборов для измерения токов, напряжений, мощности, параметров электрических цепей и компонентов, электронных цепей с сосредоточенными параметрами, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, амплитудно-частотных характеристик. Представлены приборы для формирования стандартных измерительных сигналов и образцовая измерительная аппаратура. Рассмотрены вопросы автоматизации измерений.

Учебник может быть использован при освоении общеобразовательной дисциплины «Электротехнические измерения» в соответствии с требованиями ФГОС СПО по специальностям 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)», 230113 «Компьютерные системы и комплексы».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.3(075.32)

ББК 31.2я723

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

© Шишмарёв В. Ю., 2013

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-7419-1

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- АИП — автоматический измерительный прибор  
АРА — автоматическая регулировка амплитуды  
АЦП — аналого-цифровой преобразователь  
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика  
АЭП — аналоговый электроизмерительный прибор  
ВЧ — высокая частота  
ГИС — гибкая измерительная система  
ГКМВ — Генеральная конференция по мерам и весам  
ГКЧ — генератор качающейся частоты  
ГЛИН — генератор линейно изменяющегося напряжения  
ГН — генератор напряжения  
ГС — генератор сигналов  
ГСС — генератор стандартных сигналов  
ДН — делитель напряжения  
ДТП — дифференциальный трансформаторный преобразователь  
ИВК — измерительно-вычислительный комплекс  
КИС — компьютерно-измерительная система  
КТД — компенсационный дифференциальный трансформатор  
МХ — метрологическая характеристика  
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство  
ОУ — операционный усилитель  
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство  
ПСД — плата сбора данных  
СВЧ — сверхвысокая частота  
СКО — среднее квадратичное отклонение  
ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика  
ФНЧ — фильтр низкой частоты  
ФЧХ — фазочастотная характеристика  
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь  
ЦИП — цифровой измерительный прибор  
ЭДС — электродвижущая сила  
ЭЛО — электронно-лучевой осциллограф  
ЭЛТ — электронно-лучевая трубка

Измерительные приборы и системы из исследовательских лабораторий давно уже проникли во многие области деятельности человека, прежде всего в промышленность и на транспорт. Они широко используются при разработке, создании и эксплуатации многих технических объектов и систем. Все большее применение во всех отраслях промышленности находят электротехнические измерения и приборы. В связи с этим учебная дисциплина «Электротехнические измерения» включена в планы обучения студентов различных технических специальностей. Кроме того, в последние десятилетия точные методы и технологии, требующие электротехнических измерений, нашли широкое применение в химии, биологии, медицине, сельском хозяйстве и ряде других областей.

Будущие специалисты в этих областях знаний в той или иной степени также должны обладать знаниями в сфере электротехнических измерений и приборов.

Развитие экономики в последние годы тесно связано с ускоряющимся повышением требований к качеству. Качество разнообразными способами влияет на непрерывность и ритмичность производства, себестоимость продукции, объем ее выпуска, производительность труда и эффективность в целом ряде процессов производства. Высокое качество продукции способствует удовлетворению постоянно растущих потребностей населения, а также стабилизации и развитию международных связей.

Контроль многочисленных параметров качества является в первую очередь задачей измерительных приборов. Высокое качество продукции может быть достигнуто только там, где измерительные приборы и системы составляют неотъемлемую часть процесса производства. Кроме того, необходимое повышение качества предъявляет все возрастающие требования к эффективности самой измерительной техники, поэтому обеспечение качества и измерительная техника в процессах производства неразрывно связаны между собой.

Измерительные приборы и системы, в том числе и электроизмерительные, исторически развивались в тесной связи с объективными потребностями общества.

Научно-техническая революция (XX в. и начало XXI в.), характеризующаяся широким распространением средств автоматизации управления производственными процессами, вызвала значительный подъем всей техники измерения.

Современные механизированные, частично или полностью автоматизированные и в высокой степени производительные, промышленные производства функционируют только при сравнительно больших затратах на проведение контроля и измерений. Требования к качеству, надежности и быстродействию измерений постоянно возрастают. Диапазоны измерений ряда физических величин за последние 20 лет расширились на несколько порядков.

В промышленно развитых странах трудоемкость контроля и измерений составляет в среднем от 10 до 15 % трудоемкости всего общественного производства. В некоторых отраслях промышленности, например в электротехнической, на транспорте, в приборостроении и радиоаппаратостроении, электротехнические измерения являются основными.

За последние годы в измерительной технике благодаря достижениям микроэлектроники произошли значительные качественные изменения. Средства измерений стали включать в себя микропроцессоры, которые обеспечивают автоматическое управление процессами измерений и обработки данных, т. е. придают этим средствам «интеллектуальные» свойства.

В связи с разработкой различных датчиков в интегральном микроэлектронном исполнении у электроизмерительной техники появились новые приложения и перспективы развития. Нашла широкое применение и цифровая измерительная техника. В связи с постоянным расширением и усложнением задач контроля в настоящее время достаточно часто применяются не только отдельные приборы, но и измерительные системы, представляющие собой комплексы, обеспечивающие измерения различных величин с необходимой точностью, а также в ряде случаев передачу измерительной информации, ее обработку и регистрацию. Таким образом, вопросы изучения и освоения приборов и измерительных систем становятся все более актуальными не только для разработчиков этих систем, но также и для их пользователей.

## ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

### 1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ КАК ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЙ

Объектом измерений являются физические величины, которые принято делить на основные и производные. *Основные величины* независимы друг от друга, но они важны для установления связей с другими физическими величинами, которые называют *производными*. Например, в формуле Эйнштейна основной величиной является масса, а производной величиной — энергия. Основным величинам соответствуют основные единицы измерений, а производным — производные. Совокупность основных и производных единиц представляет собой *систему единиц физических величин*.

Первой системой единиц считается метрическая система, в которой за основную единицу длины был принят метр, а за единицу веса<sup>1</sup> — вес 1 см<sup>3</sup> химически чистой воды при температуре около +4 °С — грамм (позже — килограмм). В 1799 г. были изготовлены первые прототипы (эталон) метра и килограмма. Кроме этих двух единиц метрическая система в своем первоначальном варианте включала в себя единицы площади (ар — площадь квадрата со стороной 10 м), объема (стер — объем куба с ребром 10 м) и вместимости (литр — объем куба с ребром 0,1 м). Таким образом, в метрической системе еще не было четкого подразделения единиц величин на основные и производные.

Понятие системы единиц как совокупности основных и производных впервые было предложено немецким ученым К. Ф. Гауссом в 1832 г. За основные единицы в этой системе были приняты: единица длины — миллиметр, единица массы — миллиграмм, единица времени — секунда. Эту систему единиц называли *абсолютной*.

<sup>1</sup> В XVIII в. понятия «вес» и «масса» не различались и выражали одну и ту же величину.

Ученые разных стран предлагали и другие системы единиц физических величин для создания единой международной системы измерений. Однако в настоящее время некоторые страны мира продолжают проводить измерения на основе исторически сложившихся у них единиц измерения, например, в Великобритании, США и Канаде основной единицей массы считают фунт, причем его размер в системе «британских имперских мер» и «старых винчестерских мер» различен. В мировой практике наиболее широко распространена Международная система единиц (СИ).

## 1.2. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

---

В 1954 г. на Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) были определены шесть основных единиц физических величин для их использования в международных отношениях: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. В 1960 г. на этой конференции была утверждена Международная система единиц — SI. Аббревиатура системы составлена из начальных букв французского названия «Système International d'Unités» — система интернациональная (СИ). В последующие годы на заседаниях ГКМВ были приняты ряд дополнений и изменений, в результате чего в систему стали входить семь основных единиц, две дополнительных и ряд производных единиц физических величин. Были также разработаны следующие определения основных единиц:

- единица длины — *метр* — длина пути, который проходит свет в вакууме за  $1/299\,792\,458$  долю секунды;
- единица массы — *килограмм* — масса, равная массе международного прототипа килограмма;
- единица времени — *секунда* — время, равное  $9\,192\,631\,770$  периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей;
- единица силы электрического тока — *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  $1\text{ м}$

друг от друга, создал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н;

- единица термодинамической температуры — *кельвин* — термодинамическая температура, равная  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды. Кроме термодинамической температуры допускается применение температуры Цельсия (единица — градус Цельсия);
- единица количества вещества — *моль* — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг;
- единица силы света — *кандела* — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.

Кроме основных в СИ есть дополнительные единицы для измерения плоского и телесного углов — *радиан* и *стерадиан* соответственно, а также большое количество производных единиц пространства и времени, механических, электрических, магнитных, тепловых, световых и акустических величин, а также производных единиц в области ионизирующих излучений. В России СИ официально была принята путем введения в 1963 г. соответствующего государственного стандарта.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

**Измерением** называется процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Получаемая при этом информация называется *измерительной*.

Определенная информация об объекте измерения должна быть известна до проведения исследований, что является важным фактором, обуславливающим эффективность измерения. Такую информацию об объекте измерения называют *априорной*. При полном отсутствии этой информации измерение невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные методы и средства измерений.



Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте измерения в двух формах: пассивной и активной. *Пассивная информация* представляет собой совокупность сведений, характеризующих объект. К такой информации, например, относится информация о величине напряжения источника питания. Информация является *активной*, если она имеет форму энергетической характеристики какого-либо явления. Подобные энергетические явления называются *сигналами*. Их примерами являются электрические, оптические и акустические сигналы, используемые для передачи информации.

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

$$A = kA_0,$$

где  $A$  — значение измеряемой физической величины;  $k$  — отношение измеряемой величины к образцу;  $A_0$  — значение величины, принятой за образец.

*Принцип измерений* представляет собой совокупность физических принципов, на которых основаны измерения, например применение эффекта Холла для измерения мощности или эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения.

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

Метод измерений следует отличать от *методики измерений*, которая представляет собой общий или поэтапный план проведения измерений, т. е. намеченного распорядка измерений, определяющего состав применяемых приборов, последовательность и правила проведения операций.

*Объект измерений* — это реальный физический объект, свойства которого характеризуются одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

В технической литературе и нормативной документации часто упоминается *алгоритм измерений*, под которым следует понимать точное предписание о перечне и порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение искомого значения физической величины.

*Достоверность измерений* определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется 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* определяет качество измерений и отражает 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* характеризует качество измерений и отражает близкие результаты измерений одной и той же величины, полученные в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенные к одним и тем же условиям.

Измерения как экспериментальные процедуры определения значений измеряемых величин весьма разнообразны. Их классифицируют по определенным признакам, например по способу получения результата измерения подразделяют на прямые и косвенные.

*Прямым* называется измерение, когда искомое значение физической величины находится непосредственно из опытных данных. Часто под прямыми понимают такие измерения, при которых не производится промежуточных преобразований. Это, например, измерение напряжения и силы тока такими электроизмерительными приборами, как вольтметр и амперметр. Прямые измерения очень распространены в практике измерений. Математически прямые измерения можно охарактеризовать элементарной формулой

$$A = x,$$

где  $A$  — измеряемая величина;  $x$  — значение величины, найденное путем ее измерения и называемое результатом измерения.

*Косвенным* называется измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Косвенные измерения можно охарактеризовать следующей формулой:

$$A = (x_1, x_2, \dots, x_m),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_m$  — результаты прямых измерений величин, связанных известной функциональной зависимостью с искомым значением измеряемой величины  $A$ .

Косвенные измерения характерны для практики измерений, например измерение мощности методом амперметра — вольтметра, определение резонансной частоты колебательного контура по результатам прямых измерений емкости и индуктивности контура и т. д.

## 1.4. ВИДЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

На практике при измерении единицы величины применяются технические средства, которые имеют нормированные погрешности и называются *средствами измерений*. К средствам измерений относятся: меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и системы, измерительные принадлежности.

**Мерой** называют средство измерений, предназначенное для воспроизведения физических величин заданного размера. К данному виду средств измерений относятся гири, концевые меры длины и т. п. На практике используют однозначные и многозначные меры, а также наборы и магазины мер. *Однозначные меры* воспроизводят величины только одного размера (гиря), а *многозначные* — несколько размеров физической величины. Например, миллиметровая линейка отражает длину предмета в сантиметрах и миллиметрах.

Наборы и магазины представляют собой объединения (сочетания) однозначных или многозначных мер для получения возможности воспроизведения некоторых промежуточных или суммарных значений величины. *Набор мер* составляет комплект однородных мер разного размера, которые применяются в нужных сочетаниях, например набор лабораторных гирь. *Магазин мер* — сочетание мер, объединенных конструктивно в одно механическое целое, в котором предусмотрена возможность посредством ручных или автоматизированных переключателей, связанных с отсчетным устройством, соединять составляющие магазин меры в нужном сочетании. По такому принципу устроены магазины электрических сопротивлений.

При пользовании мерами следует учитывать номинальное и действительное значения мер, а также, например, погрешность меры. *Номинальным* называют значение меры, указанное на ней. *Действительное значение меры* должно быть зафиксировано в специальном свидетельстве в качестве результата высокоточного изме-

рения с использованием официального эталона. Разность между номинальным и действительным значениями называется *погрешностью меры*.

**Измерительный преобразователь** — это средство измерений, которое служит для преобразования сигнала измерительной информации в форму, удобную для обработки или хранения, а также передачи в показывающее устройство. Измерительные преобразователи либо входят в конструктивную схему измерительного прибора, либо применяются совместно с ним, но сигнал преобразователя не поддается непосредственному восприятию наблюдателем. Например, преобразователь может быть необходим для передачи информации в память компьютера, усиления напряжения и т. д. Преобразуемую величину называют *входной*, а результат преобразования — *выходной* величиной. Основной метрологической характеристикой измерительного преобразователя считается соотношение между входной и выходной величинами, называемое *функцией преобразования*.

Преобразователи подразделяют на *первичные*, непосредственно воспринимающие измеряемую величину; *передающие*, на выходе которых величина приобретает форму, удобную для регистрации или передачи на расстояние; *промежуточные*, работающие в сочетании с первичными и не влияющие на изменение рода физической величины.

**Измерительные приборы** — это средства измерений, которые позволяют получать измерительную информацию в форме, удобной для восприятия пользователем. Различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения.

*Приборы прямого действия* отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем соответствующую градуировку в единицах этой величины. Изменения рода физической величины при этом не происходит. К приборам прямого действия относятся, например, амперметры, вольтметры, термометры и т. п.

*Приборы сравнения* предназначены для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. Эти приборы широко используются в научных целях и на практике для измерения таких величин, как яркость источников излучения, давление сжатого воздуха и др.

**Измерительные установки и системы** — это совокупность средств измерений, объединенных по функциональному признаку со вспомогательными устройствами, для измерения одной или нескольких физических величин объекта измерений. Обычно такие

системы автоматизированы и обеспечивают ввод информации в систему автоматизации самого процесса измерения, обработку и отображение результатов измерений для восприятия их пользователем. Эти установки (системы) используются и для контроля (например, производственных процессов), что особенно актуально для метода статистического контроля.

**Измерительные принадлежности** — это вспомогательные средства измерений величин. Они необходимы для вычисления поправок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности. Например, термометр может быть вспомогательным средством, если показания прибора достоверны при строго регламентированной температуре; психрометр — когда строго оговаривается влажность окружающей среды.

Измерительные принадлежности вносят определенные погрешности в результат измерений, связанные с погрешностью самого вспомогательного средства.

По метрологическому назначению средства измерений делят на два вида: рабочие средства измерений и эталоны. Рабочие средства измерений применяют для определения параметров (характеристик) технических устройств, технологических процессов, окружающей среды и др. Они могут быть лабораторными (для научных исследований), производственными (для обеспечения и контроля заданных характеристик технологических процессов), полевыми (для самолетов, автомобилей, судов и т. п.). Каждый из этих видов рабочих средств отличается особыми показателями. Так, лабораторные средства измерений должны быть точными и чувствительными, а их показания — характеризоваться высокой стабильностью. Производственные средства обладают устойчивостью к воздействиям температуры, влажности, вибрации и другим факторам, которые могут оказать влияние на достоверность и точность показаний приборов. Полевые средства работают в условиях, которые постоянно изменяются в широких пределах внешних воздействий. Особым средством измерений является эталон.

## 1.5. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

**Эталон** — это средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы физической величины и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средств измерений и утвержденное

в качестве эталона в установленном порядке. Классификацию, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057—80. «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения».

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются физической величиной, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать по крайней мере тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

*Неизменность* — это свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

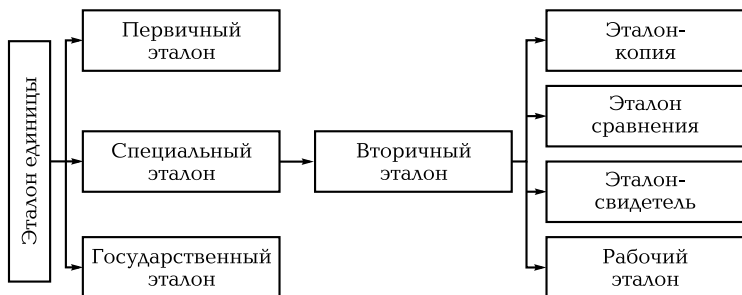
*Воспроизводимость* — возможность воспроизведения единицы физической величины на основе ее теоретического определения с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

*Сличаемость* — возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерений. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Различают следующие виды эталонов (рис. 1.1): первичный, специальный, государственный, вторичный.

*Первичный эталон* гарантирует воспроизведение и хранение единицы с наивысшей в стране точностью (по сравнению с другими эталонами той же величины). Первичные эталоны являются уникальными средствами измерений. Они часто представляют собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники, и составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений.

*Специальный эталон* обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы



**Рис. 1.1.** Классификация эталонов

от первичного эталона с требуемой точностью не осуществима, и служит для этих условий первичным эталоном.

*Государственным* является первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного эталона для страны. Утверждение проводит главный метрологический орган страны. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Точность воспроизведения единицы физической величины должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники. В состав государственных эталонов включаются средства измерений, с помощью которых воспроизводят и(или) хранят единицу физической величины, контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы, осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран.

*Вторичный эталон* хранит размер единицы, полученной путем сличения с первичным эталоном соответствующей физической величины. Также эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. В состав вторичных эталонов включаются средства измерений, с помощью которых хранят единицу физической величины, контролируют условия хранения и передают размер единицы.

По метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на эталон-копию, эталон сравнения, эталон-свидетель и рабочий эталон.

*Эталон-копия* предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Он создается в случае необходимости проведения большого числа поверочных работ в целях предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он не всегда является его физической копией.

*Эталон сравнения* применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

*Эталон-свидетель* используется для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель. Его основное назначение — обеспечивать возможность контроля постоянства основного эталона.

*Рабочий эталон* применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Это самые распространенные эталоны. В целях повышения точности измерений физических величин рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических органах и лабораториях министерств и ведомств.

## 1.6. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ СИСТЕМЫ СИ

Эталонную базу России составляют 114 государственных эталонов и более 250 вторичных эталонов единиц физических величин.

Единица времени *секунда* впервые определялась через период вращения вокруг оси Земли или Солнца. До недавнего времени секунда равнялась  $1/86\,400$  части солнечных средних суток.

В 1967 г. на XIII ГКМВ было принято новое определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается  $9\,192\,631\,770$  колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей. Данное определение реализуется с помощью цезиевых реперов частоты.

*Репер*, или *квантовый стандарт частоты*, представляет собой устройство для точного воспроизведения частоты электромагнитных колебаний в сверхвысокочастотных и оптических спектрах, основанное на измерении частоты квантовых переходов атомов, ионов или молекул.



В области измерений электрических и магнитных величин, включая радиотехнические, созданы и функционируют 32 эталона. Они охватывают не только большой диапазон значений измеряемых величин, но и широкий спектр условий их измерений, прежде всего частоты, доходящей до десятков гигагерц. Основу составляют эталоны, которые наиболее точно воспроизводят основные единицы и определяют размеры производных единиц. Это государственные первичные эталоны единиц электродвижущей силы (ЭДС), электрического сопротивления и электрической емкости. Первые два из них разработаны недавно и основаны на квантовых эффектах Джозефсона и Холла соответственно.

До последнего времени единицу силы электрического тока — *ампер* — на практике приходилось определять по тем действиям, которые ток оказывал в окружающей среде, например выделение теплоты при прохождении тока через проводник, осаждение вещества на электродах при прохождении тока через электролит, механические действия тока на магнит или проводник с током. Последние и были положены в основу эталона ампера (1948), реализованного на токовых весах.

В связи с введением в метрологическую практику эталона единицы электрического напряжения — *вольта* на основе эффекта Джозефсона и эталона единицы электрического сопротивления — *ома* на базе эффекта Холла назначение ампер-весов как средства, необходимого для представления единицы напряжения, утратило смысл. Применение эффекта Джозефсона (для аппаратной реализации) и константы Джозефсона (для воспроизведения единицы напряжения) позволило повысить точность воспроизведения единицы тока примерно на два порядка. Новый эталон ампера состоит из двух комплексов. Первый основан на принципе установления размера ампера через вольт и ом с использованием квантовых эффектов Джозефсона и Холла, а второй — через фарад, вольт и секунду с применением методов электрометрии.

Современный государственный эталон ампера имеет следующие диапазоны воспроизводимых значений силы тока:  $1 \cdot 10^{-3} \dots 1$  А (посредством квантовых эффектов) и  $1 \cdot 10^{-16} \dots 1 \cdot 10^{-9}$  А (при использовании методов электрометрии). Он обеспечивает воспроизведение единицы силы тока со средним квадратичным отклонением результата измерений, не превышающим  $5 \cdot 10^{-8}$  А при номинальных значениях силы тока  $1 \cdot 10^{-3} \dots 1$  и  $1 \cdot 10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-4}$  А. Неисключенная систематическая погрешность не должна превышать  $2 \cdot 10^{-8}$  А при номинальных значениях силы постоянного тока  $1 \cdot 10^{-3}$  и 1 А.