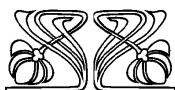
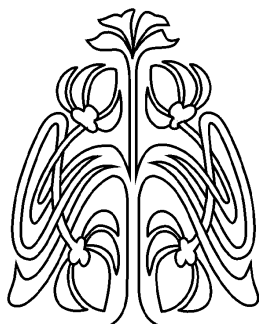
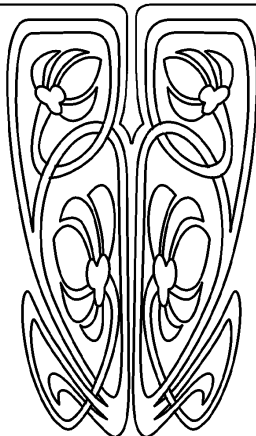




МЕТОДИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ



МЕТОДИЧЕСКИЙ
ОТДЕЛ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 72–81
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 72–81
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-1-72-81>

Методическая статья
УДК 372.853:621.3.01(075.8)

Метрология XXI века. Радиотехнические величины и эталоны в единицах SI

А. В. Хохлов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Хохлов Артур Вениаминович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики Института физики, hohlovav@sgu.ru, <https://orsid.org/0000-0003-0273-6473>

Аннотация. Обсуждаются методические рекомендации для преподавателей и исследователей-экспериментаторов по метрологическому сопровождению измерений и правильному использованию единиц физических величин при чтении курсов теории связи и радиоизмерений и проведении практических занятий. Обсуждается методика расчета новых эталонов радиотехнических единиц измерений на основе современных научно-технических достижений и фундаментальных физических констант.

Ключевые слова: метрология, измерение, единицы измерений, физическая величина, фундаментальные физические константы, система единиц SI, эталоны

Для цитирования: Хохлов А. В. Метрология XXI века. Радиотехнические величины и эталоны в единицах SI // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 72–81. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-1-72-81>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Methodical article

Metrology of the XXI century. Radio engineering quantities and standards in the SI system of units

A. V. Khokhlov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Arthur V. Khokhlov, hohlovav@sgu.ru, <https://orsid.org/0000-0003-0273-6473>

Abstract. Background and Objectives: The article discusses the methodological recommendations for teachers and experimental researchers on metrological support of measurements and the correct use of units of physical quantities when reading courses in the theory of communication and radio measurements and conducting practical classes. The method of calculating new standards of radio engineering units of measurements based on modern scientific and technical achievements and fundamental physical constants is discussed. **Materials and Methods:** Modern measurements of physical quantities use two main international systems of units – Metric and SI, historically related to each other. The task of forming a holistic idea of the origin of the main physical units of measurement is posed. This material is rarely discussed in the literature. **Results:** It has been shown how the transition from physical quantities to the apparatus of fundamental physical constants reflects the transition from classical physics to modern general theoretical concepts and enables one to create a simpler and at the same time the most fundamental definition of the entire system of SI units to introduce formulas for the exact calculation of radio engineering units,



including magnetic quantities. **Conclusion:** The SI system of units is devoid of the division of units of measurement into basic and derived ones, and provides the utmost accuracy of measuring standards for communication systems.

Keywords: metrology, measurement, units of measurement, physical quantity, fundamental physical constants, SI system of units, standards

For citation: Khokhlov A. V. Metrology of the XXI century. Radio engineering quantities and standards in the SI system of units. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-1-72-81>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В российской и зарубежной печати в последние годы появилось много публикаций об утверждении 26-й Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) новых определений в Международной системе единиц SI и о признании системы SI в качестве основной Международной системы единиц большинством стран мира [1–5]. Эта информация необходима студентам всех физико-математических и технических направлений для формирования целостной картины представления о происхождении физических единиц измерения. Утверждение новых определений единиц физических измерений и полный переход от материальных объектов эталонов к теоретическим расчетам последних с помощью формул и уравнений, описывающих фундаментальные законы природы, привело к решению целого комплекса задач согласования единиц физических, в частности, радиотехнических измерений, и передачи информации на большие расстояния в коммуникационных системах. Между тем даже в учебниках и учебных пособиях, рекомендованных для бакалавров и магистров Минобрнауки РФ [6–8] о Международной системе единиц SI лишь упоминается, а многие преподаватели и большинство бакалавров и магистров не имеют представления о новой системе единиц SI и важнейших изменениях, происшедших в связи с ее принятием в метрологии и измерительной технике.

Поэтому было целесообразным и даже необходимым представить студентам и преподавателям сообщение об эволюции основных систем физических измерений, о создании новой системы единиц измерений SI, о ее фундаментальной роли в развитии физических измерений в целом и в создании эталонов и мер предельной точности для радиофизических единиц измерений.

Цель работы – дать методические рекомендации преподавателям и исследователям-экспериментаторам по метрологическому сопровождению измерений и правильному использованию единиц физических величин при чтении курсов теории связи и радиоизмерений и проведении практических занятий; сформировать представ-

ления о Международной системе SI, ее свойствах и возможностях; обосновать необходимость введения фундаментальных физических констант (ФФК) в теории радиоизмерений и при построении новых эталонов радиотехнических единиц.

1. Метрология, физические величины и системы единиц физических величин

Метрология – это теоретическая основа измерений, наука о методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности измерений. *Измерение* – нахождение значения искомой реальной величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Эти определения метрологии и измерений закреплены в ГОСТ СССР № 1169 от 6 мая 1983 г. и охватывают общую теорию измерений. Определение измерений было уточнено в Рекомендации межгосударственной стандартизации РМГ 29–99 как совокупность операций по применению технических средств, хранящих единицу физической величины (ФВ), воспроизводимую мерой или эталоном, и обеспечивающих нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей и получение численного значения этой величины. Согласно РМГ 29–99 мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Современные методы воспроизведения единиц ФВ формируются на основе научно-технических достижений и фундаментальных физических констант (ФФК). Совокупность приемов и средств измерений составляет *метод измерений*, а измеренное значение принимается за *действительное значение* реальной величины.

Физическая величина – это одно из свойств физического объекта (явления, процесса), *общее* в качественном отношении для многих физических объектов и *индивидуальное* для каждого из них в количественном отношении. Так, например, сила тока – общее свойство для многих объектов, а величина 2 мА – индивидуальное свойство данного тока. Числовое значение



ФВ зависит от выбранной единицы измерения. ФВ различных объектов могут характеризовать не только их свойства, но и функциональные связи между ними. Это позволило применить системный подход к выбору единиц ФВ. **По-видимому**, первой наиболее удачной для измерения механических величин оказалась система трех независимых друг от друга и поэтому названных *основными* ФВ: длины, массы и времени, предложенная в 1032 г. Карлом Гауссом. Одновременно предлагалось укрупнить единицы их измерения и принять за основные сначала сантиметр, грамм и секунду, а затем метр, килограмм и секунду. Так появились системы единиц СГС и МКС. На их основе с помощью известных уравнений связи были установлены другие ФВ, названные *производными* и определены единицы измерений для электрических и магнитных величин.

Совокупность ФВ, образованная из основных и производных единиц, называется **системой единиц измерения**. В соответствии с принципом построения система измерений должна содержать минимальное число основных единиц, входящих в те разделы науки, для которых она предназначена, причем каждой ФВ ставится в соответствие только одна единица измерения. Для измерения величин молекулярной физики, например, оказалась удобной система с четырьмя основными единицами: длины, массы, времени и температуры.

2. Метрическая система единиц

После Великой французской революции (1789–1794) разработкой рациональной системы измерений занялась Парижская академия наук. Лучшие ученые того времени решили отказаться от предшествующих систем, связывающих единицы измерений с размерами человеческого тела (пядь, локоть, фут и т. д.), и создать новую систему мер, основанных на «неизменных прототипах, взятых из природы», чтобы ее могли признать все государства. Наиболее «неизменными прототипами» были Солнечная система с планетами, земной шар, вещества, его составляющие (горные породы, вода).

Это была **новая система измерений, названная метрической**, так как ее первой единицей стал метр. Изобретатели новой метрической системы совершили *громкий шаг вперед* от предшествующих систем измерений к системе, основанной на «природных прототипах», т. е.

физических величинах, физических процессах, химических свойствах веществ

В качестве основных ФВ в метрической системе единиц были выбраны шесть величин: длина L , масса M , время T , электрический ток I , термодинамическая температура Θ , сила света J и шесть соответствующих основных единиц измерения (*метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела*). После длительной дискуссии между физиками и химиками Международное бюро мер и весов (МБМВ) в 1971 г. добавило количество вещества N и единицу моль в качестве седьмой основной величины и единицы измерений. Считается, что основные единицы имеют **независимую размерность**, т. е. ни одна из них не может быть получена из других. Наряду с основными предлагалось использовать *производные* единицы, образуемые из основных с помощью алгебраических операций. Важным свойством метрической системы стала ее десятичность, когда для любой ФВ существует лишь одна главная единица и набор дольных и кратных единиц, образуемых с помощью десятичных множителей, соответствующих приставкам кило-, мега-, и дольных единиц с приставками деци-, милли-, микро-. Для широкого применения единиц были созданы эталоны в виде материальных объектов с предельной точностью воспроизведения единиц, физические свойства и конструкции которых определялись характером воспроизводимых ФВ и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Были установлены 4 уровня эталонов: международные, первичные, вторичные и рабочие. Международные эталоны, представляющие собой единицы ФВ с максимальной точностью, стали хранить в Международном бюро мер и весов (МБМВ) в Севре вблизи Парижа. Первичные эталоны измерений стали исходными для государств и получили название государственных. Вторичные и рабочие эталоны соподчинялись первичным эталонам. Эталоны были созданы для основных и производных ФВ системы единиц.

Рассмотрим эталоны единиц основных ФВ Метрической системы.

1. *Единица длины* – метр. Образован от греческого «metron», т. е. мера. Вначале метр определялся как одна сорок миллионная часть земного меридиана. Позже метр стали измерять через длину волны красной линии кадмия. При этом относительную ошибку измерения эталона длины удалось уменьшить до 10^{-7} . В 1983 г. 1 м



был определен как длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299792458$ секунду.

2. *Единица массы.* Масса занимает особое место среди основных физических величин. Единицей массы признан килограмм. Первоначально единицей была признана масса одной миллионной доли кубического метра воды с максимальной плотностью при температуре 3.98°C и давлении 101325 Па, но прототип массы оказался на 28 мкг тяжелее. Поэтому за эталон килограмма был принят цилиндр из платино-иридиевого сплава ($90\% \text{Pt} + 10\% \text{J}$) диаметром 39 мм и высотой 39 мм. Он хранится в МБМВ в Севре.

3. *Единица времени – секунда.* Исторически отражает движение Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Однако продолжительность суток в разное время года отличается. Поэтому в 1956 г. МБМВ принял в качестве единицы времени так называемую «эфемеридную секунду»: $1 \text{ с} = 1/31556925.9747$ тропического года 1900 . При этом точность измерения секунды повысилась до 10^{-7} . Позже для точного измерения секунды стали применять цезиевый, водородный и рубидиевый стандарты частоты излучения.

4. *Единица силы тока – Ампер.* Определяется по закону Ампера: 1 А равен силе постоянного электрического тока, который, протекая по двум прямолинейным параллельным бесконечно длинным проводникам ничтожно малого сечения, находящимися в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, создает силу взаимодействия между ними $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона (Н) на каждый метр длины. Единица силы тока окончательно утверждена в 1948 г.

Это единственная основная ФВ, связанная с электро- и радиотехническими измерениями. Все остальные ФВ в комплексе электрических измерений являются производными. Особую роль среди них выполняет электрическое напряжение и ЭДС. Эталоном или мерой ЭДС долгое время оставался нормальный элемент – гальванический элемент с насыщенным раствором сульфата кадмия и электродами из ртути и амальгамы кадмия. Насыщенный элемент при температуре 20° обеспечивал ЭДС 1.01858 В. В настоящее время для эталона единицы ЭДС используется квантовый эффект Джозефсона. Этот наиболее точный и стабильный эталон электрического напряжения удалось реализовать при протекании тока через охлажденный ниже критической температуры сверхпроводящий джозефсоновский контакт.

Различают стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. Нестационарный эффект Джозефсона возникает между сверхпроводниками с туннельным контактом. Когда к контакту приложено постоянное напряжение U , через контакт протекает переменный ток с частотой ω

$$I(t) = I_0 \sin(\varphi_0 + 2eUt/h), \quad (1)$$

где I_0 и φ_0 – амплитуда и начальная фаза колебаний, e и h – ФФК, взятые из перечня, рекомендованного Комитетом по данным для науки и техники (CODATA) Международного научного совета (ISC) в 2018 г. Отсюда $\omega = 2\pi f = 2eU/h$ – круговая частота тока $I(t)$, а величина $\omega/2\pi U = f/U = 2e/h = 483.59767$ МГц/мкВ – постоянная Джозефсона. Нестационарный эффект Джозефсона обратим: при облучении контакта излучением с частотой $\omega = 2\pi f = 2eU/h$ постоянное напряжение на контакте изменяется ступенчато по закону $U = n(h/2e)f$. При выполнении равенства $2e = nhf$ с увеличением n на 1 возникают ступеньки с интервалом 4 – 5 мВ. При этом погрешность восстановления единицы напряжения составляет $5 \cdot 10^{-9}$. В настоящее время описанный квантовый эталон единицы ЭДС используется в прецизионных измерениях, например при измерении отношения e/h – заряда электрона и постоянной Планка. В обычных радиоизмерениях эталонами служат полупроводниковые стабилитроны с погрешностью восстановления 10^{-6} .

Основными характеристиками магнитных полей и материалов, предназначенных для хранения и передачи рабочим мерам, являются магнитная индукция B (в теслах), магнитный поток Φ_B (в Веберах) и магнитный момент p_m (в Вб·м или А·м²). Эталоны магнитных полей имеют сложную, громоздкую конструкцию и отличаются наличием большого числа измерительных катушек. Так, эталон единицы магнитной индукции представляет собой структуру из трех соленоидов на кварцевых каркасах. Индукция, создаваемая в их центральных частях при токе 1 А , равна: 7.5×10^{-4} , 1.15×10^{-4} и 0.57×10^{-4} Тесла, а квадратный контур со стороной в 1 м при силе тока 1 А создает магнитный момент $p_m = 1$ Вб·м. Погрешности воспроизведения этих единиц не превышают 0.0004% . Единицы магнитных величин, как правило, определяются по электрическим величинам, функционально связанным с магнитными, и воспроизводятся эталонами и мерами. Для нас важно насколько



упрощаются эти эталоны при переходе в систему единиц SI.

5. *Единица термодинамической температуры* – Кельвин. Это абсолютная мера температуры и один из основных параметров термодинамики. Термодинамическая температура определяется третьим законом термодинамики, согласно которому теоретически самая низкая температура является нулевой. Для определения Кельвина фиксируется еще тройная точка воды – такое состояние чистой воды, когда лед, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. Этому состоянию в качестве основной точки фиксации приписана термодинамическая температура $\Theta = 273.16$ К. XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам в 1976 г. наряду с абсолютной термодинамической шкалой утвердила следующую связь температур Цельсия и Кельвина: $\theta^{\circ}\text{C} = (\Theta - 273.15)$ К.

6. *Единица силы света*. Сила света – это пространственная плотность светового потока, равная отношению светового потока к величине телесного угла, в котором равномерно распределено излучение. До 1967 г. единицей силы света считалась свеча. Уточненное название единицы силы света, принятое Генеральной конференцией, получило название *кандела* и было основано на излучении света абсолютно черным телом при температуре затвердевания платины, которая несколько раз уточнялась. В 1979 г. МБМВ приняла новое определение канделы как источника монохроматического излучения с частотой 540.1012 Гц (или 555 нм, зеленый свет) и мощностью $1/683$ Вт, излучаемого в определенном направлении в телесный угол 1стерадиан.

7. *Единица количества вещества* – моль. По определению содержит столько структурных единиц, сколько их содержится в 12 граммах моноизотопа углерода C^{12} . Из определения видно, что это число точно не установлено, но по физическому смыслу оно равно постоянной Авогадро $N_A = 6.02214076 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

Для дальнейшего изложения важно только отметить, что в качестве международных эталонов метрической системы единиц использовались материальные артефакты, построенные с учетом точных характеристик земных материалов.

В 1875 г. 17 стран, в том числе Россия, подписали Метрическую конвенцию и Метрическая система единиц была признана международной.

3. Международная система единиц SI

Система единиц SI – это современный вариант Международной метрической системы. Она разработана на ее основе, сохранила основные ФВ, их названия базовые единицы – метр, килограмм, секунду, ампер, кельвин, моль и кандела (единицу силы света). В 1960 г. 11-я Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) официально сформировала и определила систему единиц SI, но формирование единиц SI путем фиксации числовых значений всех семи определяющих констант было выполнено только в 2018 г., и с тех пор система констант периодически пересматривается в соответствии с достижениями науки и техники. Последний и, возможно, наиболее существенный пересмотр системы единиц SI с момента ее создания был сделан на 26-й ГКМВ (2018 г.) и описывается в [5, 9].

Система единиц SI задумывалась так, чтобы ее основные единицы характеризовали физические свойства всего окружающего нас мира, а связывающие их уравнения опирались на современные общетеоретические представления о природе (квантовую теорию, электродинамику, физику твердого тела, теорию тонких структур и другие) и представляли собой согласованную систему единиц, предназначенную для использования во всех сферах жизни, включая фундаментальную науку и производство. Если ранее при построении систем измерений, в том числе и метрической системы единиц, в качестве основных выбирались ФВ, входящие в те разделы науки, для которых они создавались, то теперь были нужны универсальные физические величины, характеризующие свойства всего окружающего нас мира. Ими стали *фундаментальные физические константы* (ФФК) – физические величины характеризующие не объекты, а физические свойства всего окружающего нас мира, входящие в уравнения фундаментальных законов природы и свойств материи, возникающие в теоретических моделях наблюдаемых явлений. ФФК совместно с подходящей теорией должны объяснять поведение любой физической системы на микроскопическом и макроскопическом уровне.

Таким образом, возникло обобщение метрологии на новый базис, состоящий из ФФК, характеризующих фундаментальные законы природы, и изменились основы формирования единиц измерений. Это обобщение ознаменовало *переход на новые принципы в метрологии и теории из-*



мерений и может рассматриваться как первый шаг к созданию метрологии XXI века.

Предполагалось, что система единиц СИ будет развиваться. Для этого единицы были концептуально отделены от их определений. По мнению физиков-теоретиков, набор ФФК не является фиксированным и тесно связанным с выбором ФВ для системы единиц измерения. Он может расширяться вследствие открытия новых явлений и создания теорий, их объясняющих, или сокращаться при построении более общих фундаментальных теорий. Набор значений ФФК и коэффициентов для их перевода регулярно издается Комитетом по данным для науки и техники (CODATA). Так, в 2018 г. в перечень ФФК была включена гравитационная постоянная $G = 6.674\ 30(15) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

ФФК делятся на безразмерные и размерные. Безразмерные константы π или e (основание натуральных логарифмов) известны давно. Такие физические константы как постоянная тонкой структуры $\alpha \cong 1/137$, масса W -бозона или бозона Хиггса появились в теоретической физике совсем недавно. Полная стандартная модель требует 25 фундаментальных безразмерных констант. Список таких безразмерных ФФК составлен, но их численные значения не удается объяснить в рамках существующих общепринятых теорий. Они определяются только путем измерений.

Размерные константы можно разделить по способу их обоснования на метрологически независимые и все остальные. Размерные физические константы называются *метрологически независимыми*, если они не позволяют составить ни одну комбинацию, которая будет безразмерной постоянной. Это и есть ФФК. Максимальное число ФФК, необходимое и достаточное для установления единиц всех физических величин выбранной системы, равно числу *основных единиц* системы измерений. Обосновать численные значения размерных ФФК принципиально невозможно, так как они определяются не Природой, а человеком при выборе основных единиц измерений. Описанная выше метрическая система основана на семи ФФК и содержит семь основных единиц измерений. Определение единиц СИ оказывается более сложным, так как в качестве основных выбран набор из семи ФФК (определяющих констант), «обеспечивающий фундаментальные, стабильные и универсальные основы для сравнения с наименьшими неопределенностями

и признанный оптимальным с учетом прогресса в науке» (из 26-й ГКМВ). Набор определяющих констант, выбранных из массива ФФК и представленных в единицах Метрической системы, образуют:

- 1) точное значение частоты перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 $\Delta f_{\text{Cs}} = 9\ 192\ 631\ 770$ Гц,
- 2) скорость света в вакууме c , равная $299\ 792\ 458$ м/с,
- 3) постоянная Планка h , равная $6.62607015 \times 10^{-34}$ Дж·с,
- 4) элементарный заряд e , равный $1.602176634 \times 10^{-19}$ Кл,
- 5) постоянная Больцмана k , равная 1.380649×10^{-23} Дж/К,
- 6) постоянная Авогадро N_A , равная $6.02214076 \times 10^{23}$ моль $^{-1}$
- 7) световая эффективность $K_{\text{КД}}$, равная 683 лм/Вт монохроматического излучения с частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц,

где герц, джоуль, кулон, люмен и ватт, обозначаемые как Гц, Дж, Кл, лм и Вт соответственно, связаны с единицами секунда, метр, килограмм, ампер, кельвин, моль и кандела.

Определение размерностей основных единиц системы СИ выполнено в работе [9], но формирование неосновных, в частности, радиотехнических единиц, не проводилось. Поэтому напомним методику формирования размерностей основных единиц системы СИ, а затем перейдем к формированию остальных единиц.

Начнем с основной единицы времени – секунда (1 с). Частота определяющей константы сверхтонкого расщепления атома цезия-133 $\Delta f_{\text{Cs}} = 9\ 192\ 631\ 770$ Гц, т. е. за 1 с совершается $9\ 192\ 631\ 770$ колебаний. Тогда отношение $\Delta f_{\text{Cs}}/9\ 192\ 631\ 770$ дает точное значение величины 1 Гц, а обратное отношение – единицу времени 1 секунду:

$$1 \text{ Гц} = \frac{\Delta f_{\text{Cs}}}{9\ 192\ 631\ 770} = 1.087827757 \cdot 10^{-10} \Delta f_{\text{Cs}}, \quad (2)$$

$$1 \text{ с} = \frac{9\ 192\ 631\ 770}{\Delta f_{\text{Cs}}} = 9\ 192\ 631\ 770 \Delta f_{\text{Cs}}^{-1}.$$

Следующая основная единица системы СИ – единица длины – метр (1 м). Чтобы определить 1 м, используем еще одну ФФК – скорость света в вакууме: $C = 299\ 792\ 458$ м/с. Один метр – это расстояние, которое проходит свет в вакууме



за время 1/299 792 458 с. Тогда с учетом соотношений (2) имеем

$$1 \text{ м} = \left(\frac{C}{299792458} \right) = \frac{9192631770}{299792458} \cdot \frac{C}{\Delta f_{Cs}} \cong 30.633319 C \cdot \Delta f_{Cs}^{-1}. \quad (3)$$

В число основных единиц системы SI входят единица термодинамической температуры – Кельвин, единица количества вещества – моль и единица силы света в заданном направлении – кандела. Они вычисляются по той же методике, что и секунда, и потому будут введены только в принятом окончательном выражении:

$$1 \text{ Кельвин (К)} = \frac{1.380649 \cdot 10^{-23}}{(6.62607015 \cdot 10^{-34})(9192631770)} \frac{\Delta f_{Cs} h}{k} \approx 2.2666653 \Delta f_{Cs} \cdot h \cdot k^{-1};$$

$$1 \text{ моль} = \frac{6.02214076 \cdot 10^{23}}{N_A} = 6.02214076 \cdot 10^{23} N_A^{-1}, \quad (4)$$

где N_A – число Авагадро;

$$1 \text{ кандела (K}_{\text{кд}}) = \frac{(\Delta f_{Cs})^2 h K_{\text{кд}}}{(6.62607015 \cdot 10^{-34})(9192631770)^2 683} = 2.614830 \cdot 10^{10} (\Delta f_{Cs})^2 h K_{\text{кд}}.$$

Все представленные единицы выражены через определяющие константы.

Основная единица системы SI 1 Ампер определяется при задании фиксированного числового значения равным e , что соответствует заряду 1 Кл = А·с, деленному на секунду, выраженную через Δf_{Cs} . Тогда

$$1 \text{ А} = e / 1.602176634 \cdot 10^{-19} \cdot \text{с}^{-1} = 6.789687 \cdot 10^8 e \cdot \Delta f_{Cs}. \quad (5)$$

Седьмая основная единица – килограмм (1 кг). Эта единица была последней мерой, эталоном которой длительное время служил материальный объект. Ситуация изменилась 20 мая 2019 г., когда 26-я ГКМВ приняла решение рассчитывать эталонный килограмм по универсальной формуле, основанной на принципах квантовой физики:

$$1 \text{ кг} = 1.4755214 \cdot 10^{40} \cdot h \cdot \Delta f_{Cs} \cdot \text{с}^{-2}. \quad (6)$$

Таким образом, в метрологии закончилась эпоха материальных объектов в качестве эталонов и был совершен переход на более стабильные

методы расчетов при помощи формул, основанных на ФФК. Больше нет эталона из двух длинных проводов для определения тока в 1 Ампер, нет тройной точки воды для определения единицы Кельвина и т. д. Переход к расчетам эталонов ФВ по формулам, основанным на ФФК, привел к более простому и более фундаментальному определению всей системы единиц SI и может рассматриваться как еще один шаг к созданию метрологии XXI века.

Некоторые из определяющих констант (h , C) уже известны как фундаментальные и определяют квантовые эффекты и пространственно-временные свойства частиц и полей. С их помощью можно определить и другие единицы. А вот элементарный заряд e , хотя и равен заряду электрона, но по существу соответствует константе взаимодействия электромагнитной силы через постоянную тонкой структуры $\alpha = e^2 / (2c\epsilon_0 h) \cong 1/137$, где ϵ – электрическая проницаемость вакуума или электрическая постоянная. Природа определяющих констант варьируется при изменении размера фундаментальных природных констант.

До 2019 г. h , e , k и N_A не определялись априори, а представляли собой довольно точно измеренные величины. В 2019 г. их значения были зафиксированы по определению на основе лучших на тот момент теоретических оценок, что обеспечивало преемственность с предыдущими определениями базовых единиц. Одним из следствий переопределения единиц системы SI является исчезновение различий в формировании основных и производных единиц, поскольку любая единица может быть теоретически построена непосредственно из семи определяющих констант (ФФК). Это еще одно значительное отличие системы единиц SI от всех других единиц и может рассматриваться как третий шаг к созданию метрологии XXI века.

Подводя итоги рассмотрения новой системы единиц SI, учтем вывод физиков теоретиков, согласно которому эволюция физической картины мира – это переход от физики без ФФК (классическая физика) к физике с ФФК (современная физика), т. е. классическая физика – это предельный случай современной физики, когда характерные параметры исследуемых явлений далеки от ФФК.

Выше уже отмечалось, что создатели метрической системы совершили громадный скачок в развитии теории измерений. Сейчас мы являемся свидетелями еще более важного скачка:



перехода от системы, основанной на физических процессах и артефактах, к *теоретическому определению единиц измерений на основании современных общетеоретических представлений и ФФК*

Способы определения единиц стали более абстрактными и идеализированными. При этом оказалось возможным независимо воспроизводить единицы измерений в любом месте и в любое время. Столь подробное рассмотрение методов формирования единиц измерений в системе SI обусловлено тем, что о фундаментальных особенностях Международной системы единиц SI крайне редко удается прочитать в научной, и тем более учебной, литературе.

Понятно, что описание Международной системы единиц SI оказалось непростым, но нам хотелось создать представление об одном из главных достижений метрологии XXI века.

4. Радиотехнические единицы измерений в Международной системе SI

Развитие радиоэлектроники как области науки и техники, реализующей применение электромагнитных колебаний и волн в космической связи, телевидении, радиолокации и т. д., способствовало разработке специализированных систем радиоизмерений и созданию соответствующих единиц измерений. Без измерения длины волны и точного значения частоты было трудно проводить многие измерения. Многочисленность и широкие пределы значений измеряемых величин (по частоте от 10^{-4} до 10^{12} Гц, по напряжению от 10^{-8} до 10^3 В, по мощности от 10^{-16} до 10^8 Вт) создавали новый этап развития метрологии.

В метрической системе физических измерений присутствовала только единица 1 А, имеющая непосредственную связь с радиоизлучением и обработкой сигналов. В качестве эталонов производных радиотехнических единиц на основе квантового эффекта Джозефсона был создан высокостабильный стандартный образец ЭДС, а в качестве меры эталонного сопротивления – на квантовом эффекте Холла фиксированное сопротивление величиной 25812.807 Ом.

Система единиц SI оказалась значительно богаче. Прежде всего в набор определяющих констант вошла частота перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 $\Delta f_{Cs} = 9\,192\,631\,770$ Гц, т. е. образовалась наиболее точно измеряемая ФФК, обладающая общедоступной высшей точностью

измерений в метрологической практике. Колебания этой частоты стали доступны для передачи без искажений на большие расстояния, что оказалось существенным для телекоммуникационных измерений и изменило связь радиотехнических единиц измерений с системой единиц SI. Дополнительные требования к радиоизмерениям возникали с изобретением полупроводниковых транзисторов, а затем и интегральных схем с высокой степенью интеграции. Главные трудности определения единиц радиотехнических величин были связаны с магнитными измерениями и были полностью решены только в системе единиц SI.

Прежде чем определять размерности единиц электрических и магнитных измерений в системе SI, проведем вспомогательные вычисления: установим выражения 1 Дж и 1 Вт через определяющие константы системы SI. Поскольку размерность постоянной Планка равна [Дж·с], 1 Дж и 1 Вт в системе SI определяются по формулам

$$1 \text{ Дж} = h \cdot c^{-1} = \frac{h \cdot \Delta f_{Cs}}{(6.62607015 \cdot 10^{-34} \cdot 9\,192\,631\,770)} = 1.6417389806252 \cdot 10^{23} \cdot h \cdot \Delta f_{Cs}; \quad (7)$$

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} \cdot c^{-1} = \frac{h \cdot \Delta f_{Cs}^2}{9\,192\,631\,770} = 1.7859299233 \cdot 10^{13} \cdot h \cdot (\Delta f_{Cs})^2. \quad (8)$$

Как уже отмечалось, в комплексе электрических единиц измерения особую роль выполняет разность потенциалов или ЭДС – работа электрического поля при перемещении точечного заряда в 1 Кл, т. е. размерность [U] = Дж/Кл. Используя формулу (7) и ФФК заряда электрона **e**, получим для Вольта (1 В), Вебера (1 Вб) и для единицы индукции магнитного поля Тесла (1 Тл) выражения:

$$1 \text{ В} = (1.6417389806252 \cdot 10^{23})(1.602176634 \cdot 10^{-19}) \times h \Delta f_{Cs} / e = 2.6303558329 \cdot 10^4 \cdot h \Delta f_{Cs} \cdot e^{-1}; \quad (9)$$

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot c = (2.6303558329 \cdot 10^4)(9\,192\,631\,770) \times h \Delta f_{Cs} / e \cdot \Delta f_{Cs} = 2.4179892596 \cdot 10^{14} \cdot h \cdot e^{-1}, \quad (10)$$

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб} \cdot m = (2.4179892596 \cdot 10^{14})(30.633319) \cdot hc / e \cdot \Delta f_{Cs} = 7.4143576 \cdot 10^{15} \cdot h \cdot c \cdot e^{-1} \Delta f_{Cs}^{-1}. \quad (11)$$



Таким образом, используя определяющие константы (ФКК) системы единиц SI, получены эталоны всех единиц радиотехнических измерений. Все единицы физических величин выражены через размерности определяющих констант посредством несложных формул. Полученные в системе SI выражения единиц радиоизмерений

в отечественной литературе не встречаются, а в иностранной литературе чаще всего используется только представление эталона в 1 Тл.

Производные единицы электрических и магнитных измерений со специальными названиями и размерностями в метрической системе единиц и в единицах SI приведены в таблице.

Производные единицы электрических измерений со специальными названиями

Derived electrical units with special names

Величина / Quantity	Спец. название / Special title	Размер в основных единицах / Size in basic units	Размер в единицах системы СИ / Size in the SI system of units
Мощность / Power	Ватт / Watt	$Вт = Дж/с = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3}$	$Вт = 1.7859299 \cdot 10^{13} \cdot h \cdot (\Delta f_{Cs})^2$
ЭДС, разность потенциалов / EMF potential difference	Вольт / Volt	$В = Дж/Кл = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3} \cdot А^{-1}$	$В = 2.6303558 \cdot 10^4 \cdot h \cdot \Delta f_{Cs} \cdot e^1$
Магнитный поток / Magnetic flux	Вебер / Weber	$Вб = В \cdot с = кг \cdot м^2 \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$	$Вб = 2.4179892596 \cdot 10^{14} \cdot h \cdot e^{-1}$
Количество электричества / Electricity quantity	Кулон / C	$Кл = А \cdot с$	$Кл = 6.241509 \cdot 10^{18} \cdot e$
Сопrotивление / Resistance	Ом / Ohm	$Ом = В/А = кг \cdot м^2 \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$	$Ом = 3.87404579 \cdot 10^{-5} \cdot h \cdot e^2$
Емкость / Capacity	Фарад / Farad	$Ф = Кл/В = кг^{-1} \cdot м^{-2} \cdot с^4 \cdot А^2$	$Ф = 2.372876 \cdot 10^{14} \cdot e^2 \cdot h(\Delta f_{Cs})^{-1}$
Индуктивность / Inductance	Генри / Henry	$Гн = Вб/А = кг \cdot м^2 \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$	$Гн = 3.561267 \cdot 10^5 \cdot h \cdot e^2 \cdot \Delta f_{Cs}^{-1}$
Частота / Frequency	Герц / Hertz	$Гц = с^{-1}$	$Гц = 1.087827757 \cdot 10^{-10} \cdot \Delta f_{Cs}$

Заключение

Настоящая работа является методической и посвящена рассмотрению методических рекомендаций преподавателям и исследователям-экспериментаторам по метрологическому сопровождению измерений и правильному использованию единиц физических величин. Рассмотрена фундаментальная роль ФФК в создании современной системы единиц измерений и эталонов предельной точности. Показано, как переход от физических величин к фундаментальным физическим константам отражает переход от классической физики к современным общетеоретическим представлениям и позволяет создать более простое и одновременно наиболее фундаментальное определение всей системы единиц SI, вводить формулы для точного расчета единиц измерений радиотехнических, в том числе магнитных величин, и сделать серьезный задел для формирования метрологии XXI века, лишенной основных и производных единиц измерений и обеспечивающей предельную точность эталонов. Работа будет полезной при рассмотрении в курсах лекций способов передачи эталонных значений физических величин в современных сетях связи.

Список литературы

1. Davis R. S., Barat P., Stock V. A brief history of the unit of mass : Continuity of successive definitions of the kilogram // Metrologia. 2016. Vol. 53. P. 12–18.
2. Бегунов А. А. Прецизионные измерительные ячейки. Метрологические исследования // Метрология. 2016. № 1. С. 52–64.
3. Newell D. B. A more fundamental International System of Units // Physics Today. 2014. Vol. 67, № 7. P. 35–41.
4. Kalinin M. I. On the status of plane and solid angles in the International System of Units (SI) // Metrologia. 2018. Vol. 55. P. 1088–1094.
5. Сток М. Пересмотр Международной системы единиц СИ – на пути к СИ, основанной на фундаментальных физических константах // Измерительная техника. 2017. № 12. С. 6–12.
6. Метрология. Теория измерений : учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры / под ред. В. К. Жукова. М. : Юрайт, 2019. 414 с.
7. Лютиков И. В., Фомин А. Н., Леусенко В. А., Викторов Д. С., Филонов А. А., Ляценко Л. И., Копылов В. А. Метрология и радиоизмерения : учебник / под общ. ред. Д. С. Викторова. Красноярск : Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2016. 508 с.
8. Бавыкин О. Б., Вячеславова О. Ф. Метрология : учебник. М. : Форум, 2019. 522 с.
9. Международная система единиц (SI). Изд. 9-е. М. : Росстандарт, 2019. 96 с.



10. Лукашин В. Г., Булатов М. Ф. Эталоны и стандартные образцы в измерительной технике. Электрорадиоизмерения. М. : Техносфера, 2018. 402 с.

References

1. Davis R. S., Barat P., Stock V. A brief history of the unit of mass : Continuity of successive definitions of the kilogram. *Metrologia*, 2016, vol. 53, pp. 12–18.
2. Begunov A. A. Precision Measuring Cells. *Metrological Research*. *Metrology*, 2016, no. 1, pp. 52–64 (in Russian).
3. Newell D. B. A more fundamental International System of Units. *Physics Today*, 2014, vol. 67, no. 7, pp. 35–41.
4. Kalinin M. I. On the status of plane and solid angles in the International System of Units (SI). *Metrologia*, 2018, no. 10, pp. 1088–1094.
5. Stoke M. Revision of the International System of Units SI – on the Way to SI, Based on Fundamental Physical Constants. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Technology], 2017, no. 12, pp. 6–12 (in Russian).
6. *Metrologiya. Teoriya izmerenij : ucheb. posobie dlya bakalavriata i magistratury*. Pod red. V. K. Zhukova [Zhukov V. K., ed. *Metrology. Measurement Theory : Textbook for Undergraduate and Graduate Programs*]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 414 p. (in Russian).
7. Lyutikov I. V., Fomin A. N., Leusenko V. A., Viktorov D. S., Filonov A. A., Lyashchenko L. I., Kopylov V. A. *Metrologiya i radioizmereniya : uchebnik. Pod obshch. red. D. S. Viktorova* [Viktorov D. S., ed. *Metrology and Radio Measurements : Textbook*]. Krasnoyarsk, Sib. Feder. un-t Publ., 2016. 508 p.
8. Bavykin O. B., Vyacheslavova O. F. *Metrologiya : uchebnik* [Metrology : Textbook]. Moscow, Forum Publ., 2019. 522 p. (in Russian).
9. *Mezhdunarodnaya sistema edinits (SI)* [International System of Units (SI)]. 9th ed. Moscow, Rosstandart Publ., 2019. 96 p. (in Russian).
10. Lukashin V. G., Bulatov M. F. *Etalony i standartnye obratzy v izmeritel'noj tekhnike. Elektroradioizmereniya* [Standards and Reference Materials in Measuring Technology. Electroradio Measurements]. Moscow, Technosphera Publ., 2018. 402 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.09.2021; одобрена после рецензирования 07.11.2021; принята к публикации 02.12.2021
The article was submitted 22.09.2021; approved after reviewing 07.11.2021; accepted for publication 02.12.2021