

УДК 006.91:544

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ ФГУП «ВНИИФТРИ»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО ЭТАЛОНА
ЕДИНИЦЫ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ (ВОЛЬТА) ВЭТ 13-13-01**

С.В. Шерстобитов, М.А. Тертычная, М.В. Карпова

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская область
Lab-610@vniiftri.ru*

В статье изложены новые предложенные определения основных электрических величин с учетом предстоящего в ноябре 2018 года переопределения системы СИ, описаны способы практической реализации основных электрических величин с опорой на уточненные значения фундаментальных констант, описан принцип работы вторичного эталона единицы постоянного электрического напряжения ВЭТ 13-13-01, использующего для воспроизведения единицы электрического напряжения вольта эффект Джозефсона. Эталон является основой электрических измерений, к которому прослеживаются многие СИ из состава эталонов электрохимических, электрических и радиотехнических измерений.

Article is stated new definition of electrical units based on new SI definition, describe principle of the work secondary voltage standard VET 13-13-01, using for reproducing the unit of the voltage a quantum effects in superconductor, in particular Josephson effect. The standard is a base of the electric measurements to which also become attached many electrochemical and radiotechnical measurements.

Ключевые слова: основные единицы, производные единицы, вторичный эталон, квантовые эффекты, эффект Джозефсона.

Key words: base units, derived units, secondary voltage standard, quantum effects, effect Josephson.

Предстоящее переопределение системы СИ

Генеральная конференция по мерам и весам (CGPM) состоится 18 ноября 2018 года.

По результатам работы конференции, вероятно, произойдет отмена существующих определений четырех из семи основных единиц международной системы единиц СИ – килограмм, ампер, кельвин, моль (метр, секунда, кандела – остаются без изменений) и замена их новыми определениями, которые фиксируют значения постоянной Планка h , элементарного заряда e , постоянной Больцмана k , постоянной Авогадро N_A [1].

Как следствие, все основные и производные единицы могут быть установлены из семи референсных констант.

Точные значения семи констант, включая скорость света в вакууме c , частоту сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{cs}$, световую эффективность монохроматического излучения частотой 540 ТГц K_{cd} , следующие:

$$h=6,262\,070\,04 \cdot 10^{-34} \text{ Js (Дж}\cdot\text{с)} \quad (1)$$

$$e=1,602\,176\,621 \cdot 10^{-19} \text{ C (Кл)} \quad (2)$$

$$k=1,380\,648\,5 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \text{ (Дж/К)} \quad (3)$$

$$N_A=6,022\,140\,857 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \text{ (моль}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

$$C=299\,792\,548 \text{ ms}^{-1} \text{ (м/с)} \quad (5)$$

$$\Delta\nu_{Cs}=9\,192\,631\,770 \text{ Hz (Гц)} \quad (6)$$

$$K_{cd}=683 \text{ Lm W}^{-1} \text{ (Лм/Вт)} \quad (7)$$

Консультативный комитет по электричеству и магнетизму (ССЕМ) Международного комитета мер и весов (СІРМ) сформировал предложения, как основная единица системы СИ – ампер, А, и производные единицы – электрических величин вольт, V (В), ом, Ω (Ом), сименс, S (См), кулон, C (Кл), фарад, F (Ф), генри, H (Гн), ватт, W (Вт), тесла, T (Тл), вебер, Wb (Вб), могли бы быть реализованы на практике, основываясь на новых определениях. Эти предложения доступны на веб-сайте ВІРМ [1].

Определение ампера, основной единицы системы СИ

Согласно [2] ампер в системе СИ определялся как сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона. Физически провести такой эксперимент с определением силы притяжения между проводниками с высокой точностью достаточно сложно, что ограничивает погрешность определения основной единицы системы СИ, ампер.

Предлагается переопределить единицу силы тока ампер, А (А), как фиксированное численное значение элементарного заряда e , равного $1,602176621 \cdot 10^{-19}$, выраженное в единицах кулона, C (Кл), которое эквивалентно А·с (А·с) (ампер·секунда), где секунда определена в терминах частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133, $\Delta\nu_{Cs}$.

Практическая реализация основной единицы системы СИ ампер, А

а) Используя закон Ома $A=V/\Omega$ ($I=U/R$) и используя практическую реализацию производных единиц СИ – вольт V (В) и Ом Ω (Ом), основанном на эффекте Джозефсона и квантовом эффекте Холла.

б) Используя приборы на основе одноэлектронного туннелирования (SET) и выражение $A=C/s$ ($I=Q/s$), т.е. используя значение элементарного заряда e (2) и практическую реализацию единицы времени секунды s (с).

в) Используя выражение $I=CdU/dt$, $A=FV/s$, на основе производных единиц СИ – вольта, V (В), и фарада, F (Ф), и основной единицы СИ – секунды s (с).

Практическая реализация единицы электрического напряжения и ЭДС вольт, V (В), производной единицы СИ

Единицу электрического напряжения вольт, V (В), предлагается определять как и ранее, используя эффект Джозефсона с учетом следующего уточненного значения константы Джозефсона K_j , равного

$$K_j = 483597,8525000000 \text{ ГГц} \cdot \text{В}^{-1}. \quad (8)$$

Это обновленное значение предлагается зафиксировать до 16-значущих цифр, что будет достаточно для большинства приложений.

Константа Джозефсона представляет из себя отношение двух зарядов электрона к постоянной Планка $K_j = 2e/h$, значения h , e определены выражениями (1) и (2).

Предыдущее значение константы Джозефсона, зафиксированное для метрологической практики в 1990 году и используемое по настоящее время, составляет $K_{j-90} = 483597,9 \text{ ГГц} \cdot \text{В}^{-1}$.

Обновленное и старое значения константы Джозефсона отличаются в $98,222 \cdot 10^{-9}$ раз.

Это подразумевает, что единица напряжения, реализуемая по K_{j-90} , была больше, чем в предлагаемом варианте с использованием выражения (8).

Таким образом, численное значение напряжения, измеряемое в терминах K_{j-90} , будет меньше, чем измеренное в новых предлагаемых выражениях системы СИ (8) $V = I/K_j$.

Для большинства пользователей это изменение пройдет незаметно, т.к. изменения довольно незначительны, порядка 0,1 мкВ при измерении напряжения 1 В, или 1 мкВ на уровне 10 В, однако для государственных эталонов это значительная величина, находящаяся на уровне погрешности вторичных эталонов согласно [3]-[6].

Практическая реализация единицы электрического сопротивления и импеданса ом, Ω (Ом), производной единицы СИ

Предлагаются следующие возможные варианты практической реализации единицы электрического сопротивления, Ω (Ом):

а) используя квантовый эффект Холла и следующее значение константы фон Клитцинга $R_K = h/e^2$:

$$R_K = 25\,812,80745550000 \text{ } \Omega. \quad (9)$$

Это новое значение рассчитано до 16-значущих цифр;

б) компарированием неизвестного сопротивления с импедансом известного конденсатора (электрической емкости), используя, например, квадратурный мост. Значение емкости конденсатора может быть расчетным и значение электрической константы из выражения (10).

Предыдущее значение константы фон Клитцинга: $R_K = 25\,812,807 \text{ } \Omega$.

Значит, численное выражение сопротивления, измеренное в терминах R_{K-90} , будет меньше в $17,646 \cdot 10^{-9}$, чем аналогичное измерение в определении (9).

**Практическая реализация единицы электрической проводимости
сименс, S (См), производной единицы СИ**

Единица электрической проводимости S реализуется из значения электрического сопротивления Ом, Ω (Ом): $S=\Omega^{-1}$.

**Практическая реализация единицы электрического заряда
кулон, C (Кл), производной единицы СИ**

Единицу электрического заряда кулон, C (Кл), предлагается реализовать одним из нижеперечисленных способов.

- а) Измерение длительности, t , протекания электрического тока, I , описанных ранее.
- б) Определение суммы заряда в емкости конденсатора, Q , в терминах фарада, реализуемого методами (8) а) или (8) б), используя соотношение $C=Q/V$ ($Q=C \cdot V$) путем измерения электрического напряжения на конденсаторе в терминах V , измеряемого с использованием эффекта Джозефсона и формулы (8).
- в) на основе эффекта одноэлектронного туннелирования (SET) для переноса известной суммы заряда, основанного на значении элементарного заряда e , определенного выражением (2).

**Практическая реализация единицы электрической емкости
фарад, F (Ф), производной единицы СИ**

Единица электрической емкости фарад, F (Ф), предлагается реализовать следующими методами:

- а) компарированием импеданса известного сопротивления, воспроизводимого посредством эффекта Холла и константы фон Клитцинга (9), включая использование квантованного сопротивления эффекта Холла для сравнения неизвестной емкости при помощи измерительного моста;
- б) используя расчетный конденсатор и значение электрической константы ϵ_0 (диэлектрическая проницаемость вакуума), определенное выражением (10).

**Практическая реализация единицы индуктивности генри,
H (Гн), производной единицы СИ**

- а) Компарирование импеданса неизвестной индуктивности с импедансом известной ёмкости, посредством известного сопротивления, используя, например, мост Максвелла – Вейна (измерение реактивного сопротивления), где известные емкость и сопротивление определены через квантовый эффект Холла и константы фон Клитцинга (9).
- б) Используя расчетную индуктивность, например, катушку взаимной индуктивности Кэмпбелла (Campbell type mutual inductor) и значение константы μ_0 (13).

**Практическая реализация единицы электрической мощности
ватт, W (Вт), производной единицы СИ**

Единица электрической мощности реализуется, исходя из других электрических единиц и закона Ома, $W=V^2/\Omega$ ($P=U^2/R$) и реализации электрического напряжения и сопротивления через квантовые эффекты Джозефсона и Холла с использованием соответствующих констант (8, 9).

**Практическая реализация единицы магнитной индукции
тесла, Т (Тл), производной единицы СИ**

а) Используя соленоид, катушку Гельмгольца или проводник иной конфигурации известных размеров, несущий электрический ток, определенный в терминах ампера, и значение константы μ_0 (13) в расчетах плотности магнитного потока, генерируемого током, текущим через проводник.

б) Используя ядерный магнитный резонанс (NMR) (ЯМР) с образцом известного гиромангнитного отношения, например, сферический образец чистого H_2O при 25 °С и наиболее последнее рекомендованное значение экранированного гиромангнитного отношения протона γ_p , выдаваемого CODATA (Committee on Data for Science and Technology – Комитет по данным для науки и техники).

**Практическая реализация единицы магнитного потока вебер,
Wb (Вб), производной единицы СИ**

Единица магнитного потока вебер (по определению, изменение магнитного потока через замкнутый контур со скоростью один вебер в секунду наводит в этом контуре ЭДС, равную одному вольту) может быть реализована через единицу магнитной индукции тесла, используя отношение $\text{Wb}=\text{T}\cdot\text{m}^2$, или через единицу вольта, используя отношение $\text{Wb}=\text{V}\cdot\text{s}$ ($\text{Вб}=\text{В}\cdot\text{с}$). Также может быть использован квант магнитного потока Φ_0 , который характеризует магнитные свойства сверхпроводника, соотносящегося к постоянной планка h и элементарному заряду e , $\Phi_0=h/e$.

**Практическая реализация единицы магнитной постоянной μ_0 ,
(магнитной проницаемости вакуума)**

Новые определения килограмма, ампера, кельвина, и моля не изменяют отношения магнитной постоянной μ_0 (магнитной проницаемости вакуума), электрической постоянной ϵ_0 (диэлектрическая проницаемость вакуума), характеристический импеданс вакуума Z_0 (11), адмиттанс вакуума Y_0 (12), и скорость света в вакууме c . Более того, они не изменяют точное значение скорости света, от которой точно зависит определение метра, основной единицы в системе СИ.

$$\epsilon_0=1/(\mu_0\cdot c^2), \quad (10)$$

$$Z_0=\mu_0\cdot c=(\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}, \quad (11)$$

$$Y_0=1/(\mu_0\cdot c)=(\epsilon_0/\mu_0)^{1/2}=1/Z_0, \quad (12)$$

$$\mu_0=12,566\ 370\ 6144(18)\cdot 10^{-7}. \quad (13)$$

**Вторичный эталон единицы постоянного электрического
напряжения ВЭТ 13-13-01**

Вторичный эталон единицы постоянного электрического напряжения ВЭТ 13-13-01 (далее – вторичный эталон) разработан во ФГУП «ВНИИФТРИ» и с 2001 года активно используется на предприятии. Вторичный эталон предназначен для решения следующих основных задач.

1. Метрологическое обеспечение производства средств измерений на основе прецизионных стабилитронов, в частности твердотельных мер напряжения.
2. Метрологическое обеспечение средств измерений на основе прецизионных ЦАП и АЦП, используемых в области геофизических, акустических и гидроакустических измерений, калибраторов и измерителей электрических величин.
3. Метрологическое обеспечение средств измерений высшего звена в области электрохимии и физхимии.

Именно в этих областях деятельности, закрепленных за ФГУП «ВНИИФТРИ», в последнее время ощущается потребность в точных электрических измерениях, реализация которых возможна на аппаратуре вторичного эталона с использованием эффекта Джозефсона [4, 5].

Метрологические характеристики вторичного эталона:

- номинальное значение постоянного электрического напряжения, при котором эталон хранит и передает единицу, составляет 1 В, 10 В;
- среднее квадратическое отклонение результатов измерений $S_{\Sigma 0}$ при сличении с государственным первичным эталоном не превышает $5 \cdot 10^{-8}$ при 10 независимых измерениях;
- нестабильность эталона за год v_0 не превышает $3 \cdot 10^{-7}$.

Межаттестационный интервал эталона составляет 36 месяцев.

В состав вторичного эталона входят: групповая мера напряжения на основе термостатированных нормальных элементов (МНЭ), квантовая мера напряжения на эффекте Джозефсона, твердотельная мера на прецизионных стабилитронах, аппаратура для компарирования напряжения постоянного тока, состоящая из нановольтметра, мультиметра, коммутатора.

МНЭ обеспечивает хранение размера единицы электрического напряжения (вольта). Квантовая мера напряжения на эффекте Джозефсона воспроизводит размер вольта с привязкой к фундаментальным константам и обеспечивает контроль нестабильности электродвижущей силы (ЭДС) МНЭ. Твердотельная мера на прецизионных стабилитронах предназначена для передачи размера напряжения на уровнях 1 В и 10 В от вторичного эталона к эталонам более низких звеньев поверочной схемы и проведения сличений с Государственным первичным эталоном единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01.

МНЭ состоит из группы нормальных элементов в термостате. В группу входят шесть нормальных элементов типа Х482. Термостат МНЭ имеет двухконтурную схему регулирования температуры и включает в себя следующие узлы: ячейку с нормальными элементами, тепловой экран, схемы регулирования температуры первого и второго контуров, контрольный платиновый термометр сопротивления и систему питания термометра. Термостат снабжен источником бесперебойного питания от аккумулятора. Термостат настроен на поддержание температуры нормальных элементов на уровне

$T_0=30,275$ °С. Температура нормальных элементов измеряется с помощью контрольного платинового термометра сопротивления ТСПН-5В с номинальным сопротивлением 100 Ом.

Исследования эталона, проведенные в период с 2001 по 2017 гг., показали, что нестабильность температуры в течение 1 ч составляет менее 0,3 мК. Анализ результатов исследований показал, что термостат полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к термостатам для эталонов на нормальных элементах ($\delta T \leq 2$ мК за время измерений).

Квантовая мера напряжения состоит из кризонда с джозефсоновским интегральным преобразователем, который погружается во время работы в сосуд Дьюара с жидким гелием, генератора СВЧ диапазона 68-76 ГГц, рубидиевого стандарта частоты для привязки частоты СВЧ генератора, частотомера, осциллографа и блока смещения.

Квантовая мера напряжения является источником точного напряжения, формируемого с использованием эффекта Джозефсона, в котором СВЧ частота преобразуется в высокостабильное напряжение постоянного тока.

При смещении джозефсоновского перехода переменным СВЧ током частотой f_p на нём возникает постоянное напряжение $U_J = n f_p / K_J$, где $K_J = 483597,9$ ГГц/В – константа Джозефсона, n – номер ступеньки Шапиро, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

В процессе работы квантовой меры значения напряжения постоянного тока передаются твердотельной мере на уровне 1,018 и 10 В или прецизионным вольтметрам. Затем размер единицы напряжения используется для контроля стабильности групповой меры на нормальных элементах.

Результаты измерений напряжения МНЭ за период с 2001 по 2015 г., полученные в рамках сличений при поверке на Государственном первичном эталоне единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01, представлены на рисунке 1. Относительная нестабильность групповой МНЭ за год, определенная в результате анализа последних двух сличений, проведенных в апреле 2012 года и в июле 2015 года и, составила порядка $3,3 \cdot 10^{-8}$.

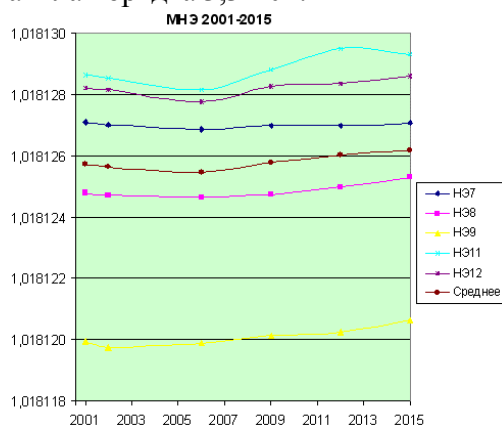


Рис. 1. Результаты измерений меры на нормальных элементах с 2001 по 2015 г.

Аппаратура вторичного эталона, комплекс высокостабильных мер и измерителей напряжения и термостатированных мер электрического сопротивления (вторичный эталон электрического сопротивления) используются также для косвенных измерений силы тока. С помощью аппаратуры проходит поверка, калибровка, юстировка широкого спектра средств измерений, используемых как во ФГУП «ВНИИФТРИ» в составе государственных эталонов, так и сторонних предприятий в областях электрических, электрохимических и других видах измерений.

В настоящее время аппаратура квантовой меры вторичного эталона ВЭТ 13-13-01 используется для воспроизведения не только постоянного, но и переменного электрического напряжения. В установке используется Джоузефсоновский интегральный преобразователь, состоящий из двоичных групп Джоузефсоновских переходов типа SNS (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник) общим числом 69631 переходов, показанный на рисунке 2. Преобразователь облучается СВЧ частотой диапазона 75 ГГц.

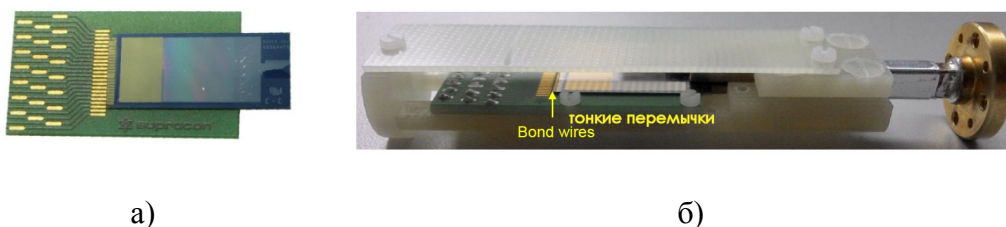


Рис. 2. а) – джоузефсоновский интегральный преобразователь SNS 10 В 75 ГГц;
б) – преобразователь, установленный на держателе с СВЧ волноводным фланцем

Данный преобразователь изготовлен совместно немецкими институтом РТВ и фирмой Suprason. Преобразователь имеет критический ток порядка 3,6 мА, ширину ± 1 ступеньки порядка 1,2 мА, рассчитан на воспроизведение постоянного и программируемого переменного напряжения с выходным напряжением от ± 150 мкВ до $\pm 10,7$ В, 17 Бит. Экспериментальная установка совместно с преобразователем переменного напряжения прецизионным Fluke 792А прецизионными вольтметрами позволяет проводить измерения постоянного, переменного и импульсного напряжения с большой точностью, определять нелинейность и проводить калибровку средств измерений электрических величин, ЦАП – АЦП, измерительных преобразователей на их основе.

Заключение

Таким образом, в мировой метрологической практике предстоит переопределение системы СИ и переход на определение основных единиц элек-

трических величин с использованием квантовых эффектов с уточненными значениями постоянных и фундаментальных констант. В части электрических измерений предстоит переход на новое определение ампера, новые численные значения констант Джозефсона и фон Клицинга, что приведет к изменению значений электрического напряжения и сопротивления, воспроизводимых соответствующими эталонами. Соответствующие изменения коснутся единиц, связанных с ними: сименс, кулон, фарад, генри, ватт, вебер. Многие из предложенных способов практической реализации единиц электрических величин, являются новыми, малоизученными в нашей стране и связанными с новейшими технологиями построения высокочувствительной прецизионной аппаратуры с использованием достижений физики, квантовой электроники, микроэлектроники и новых материалов. Тем не менее, это большой шаг навстречу независимому и гармоничному воспроизведению основных электрических величин с опорой на квантовые эффекты и уточненные значения фундаментальных констант. В связи с этим актуальным видится вопрос совершенствования государственных эталонов электрических величин в соответствии с изложенными новыми определениями и способами воспроизведения и передачи размера единиц с привязкой к уточненным значениям постоянных и фундаментальных констант.

Литература

1. www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/
2. Международный Комитет мер и весов, 1946 год, Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ, 1948 год.
3. ГОСТ 8.027-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы.
4. Васильев Д.Р., Карпов О.В., Крутиков В.Н., Кутовой В.Д., Тертычная М.А., Шерстобитов С.В. Вторичный эталон единицы постоянного напряжения ВЭТ 13-13-01, основанный на эффекте Джозефсона // Измерительная техника, 2003, № 3, с. 23-29.
5. Карпов О.В., Buchstaber V.M., Sherstobitov S.V., Tertychniy S.I., Tertychnaya M.A. Quantum digital AC waveform synthesizer based on pulse-width modulation method J. Niemeyer // Journal of Applied Physics, 2008, т. 104, № 9, с. 093911-4.
6. Карпов О.В., Бухштабер В.М., Тертычная М.А., Тертычный С.И., Шерстобитов С.В. Квантовый цифровой синтезатор переменного напряжения на основе широтно-импульсной модуляции тока смещения джозефсоновского перехода // Радиотехника и электроника, 2009, т. 54, № 2, с. 246-252.