

ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья


УДК 621.317.72.024.089.68

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-45-58>



Метрологическое обеспечение в области измерений постоянного напряжения и ЭДС: от нормальных элементов к квантовому эталону

А. С. Катков  , В. И. Шевцов, А. И. Быков, В. Э. Ловцюс, М. Н. Беликова

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия
 a.s.katkov@vniim.ru

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы метрологического обеспечения на примере высшего звена Государственной поверочной схемы для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы. Кратко рассмотрена история возникновения и развития эталонных измерений постоянного напряжения и электродвижущей силы в Российской империи, СССР и Российской Федерации. Приведены результаты работ по совершенствованию Государственного первичного эталона ГЭТ 13, завершённые в 2022 г.

Ключевые слова: нормальный элемент, эталон, постоянное напряжение и ЭДС, джозефсоновская микросхема

Используемые сокращения: НЭ – нормальный элемент; СИ – средство измерений; ДМ – джозефсоновская микросхема; ЭДС – электродвижущая сила.

Ссылка при цитировании: Метрологическое обеспечение в области измерений постоянного напряжения и ЭДС: от нормальных элементов к квантовому эталону / А. С. Катков [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 5. С. 45–58. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-45-58>


Статья поступила в редакцию 15.05.2023; одобрена после рецензирования 10.10.2023; принята к публикации 25.12.2023.

MEASUREMENT STANDARDS

Review article

Metrological Support in the field of DC Voltage and EMF Measurements: from Normal Elements to a Quantum Standard

Alexander S. Katkov  , Vladimir I. Shevtsov, Andrey I. Bykov, Viktor E. Lovtsus, Margarita N. Belikova

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
 a.s.katkov@vniim.ru

Abstract: The article deals with the issues of metrological support on the example of the highest level of the State Verification Scheme for measuring instruments of direct current voltage and electromotive force. The origin and development of reference measurements of DC voltage and electromotive force in the Russian Empire, the USSR, and modern Russia is briefly reviewed. The results of work on improving the State Primary Standard GET 13 completed in 2022 are presented.

Keywords: standard cell, standard, direct voltage and EMF, Josephson array

Abbreviations used in the article: SC – standard cell; MI – measuring instrument; JA – Josephson array; EMF – electromotive force.

For citation: Katkov A. S., Shevtsov V. I., Bykov A. I., Lovtsus V. E., Belikova M. N. Metrological support in the field of DC voltage and EMF measurements: from normal elements to a quantum standard. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(5):45–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-45-58>

The article was submitted 15.05.2023; approved after reviewing 10.10.2023; accepted for publication 25.12.2023.

Введение

Развитие высокотехнологических отраслей науки и техники в настоящее время трудно, а вернее – невозможно представить без точных измерений постоянного электрического напряжения. Точные измерения постоянного электрического напряжения занимают фундаментальное место едва ли не во всех секторах отечественной экономики, но особенно – в авиакосмической отрасли, атомной промышленности, приборостроении, автомобилестроении, медицине. В последние два года значительно выросло количество передач единицы от Государственного первичного эталона вторичным эталонам, а также разрядным рабочим эталонам от вторичных эталонов, хранящихся в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». При этом, единица передавалась как эталонам региональных центров стандартизации и метрологии, так и эталонам крупных промышленных предприятий, в том числе – эталонам ФБУ «ГНМЦ» Минобороны России. Перечисленные выше обстоятельства объясняют причины, по которым к настоящему времени существенно ужесточились требования к системе метрологического обеспечения в области измерений постоянного электрического напряжения.

Как было сказано, требования к метрологическим характеристикам как средств измерений, так и эталонов очевидно и неизбежно возрастают. Потому представляется актуальным рассмотреть вопрос развития системы метрологического обеспечения в области измерений постоянного электрического напряжения.

Необходимо также учесть, что контекст данной работы гораздо шире. В условиях санкционных ограничений на поставку в Российскую Федерацию высокотехнологичной продукции, в том числе и продукции приборостроения, остро встает вопрос импортозамещения и восстановления отечественного приборостроения.

Приоритетная цель статьи – представить анализ состояния в области измерений постоянного электрического напряжения на примере верхнего звена Государственной поверочной схемы.

Исторический экскурс

Прежде чем приступить к рассмотрению состава Государственного первичного эталона единицы постоянного напряжения, его метрологических характеристик, целесообразно провести исторический экскурс в историю возникновения и развития измерений постоянного напряжения и электродвижущей силы в Российской империи, СССР и Российской Федерации. Единица измерения электрического потенциала, разности потенциалов, электродвижущей силы, электрического напряжения – вольт. Воспроизведению вольта уделялось первостепенное внимание в Главной палате мер и весов России, а позже и во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Поэтому представляет интерес обратиться к истории создания первых эталонов вольта.

До 1870 г. практическое использование электричества было ограничено телеграфией, гальванопластикой и освещением некоторых маяков. Но с 1870 г. область применения электричества в технике и в быту значительно расширилась. Свершились такие судьбоносные открытия, как электрическая свеча Яблочкова, лампы накаливания Эдисона и Свана, динамо-машина Грамма и Сименса, микрофон, телефон, стала возможной передача электрической энергии на расстояние, нашли промышленное применение электрохимические процессы и так далее. Эти изобретения и стали предтечей появления новой области техники – электротехники. В свою очередь быстрый рост электротехники был обусловлен успехом первой Международной электрической выставки в Париже в 1881 г., в связи с которой был создан Международный конгресс электриков. Данный

конгресс впервые отметил острую необходимость установления в международном масштабе единых электрических единиц и, кроме того, необходимость совместной разработки методов изготовления образцов этих единиц и образцовых приборов.

Далее вопрос создания эталонов обсуждался Международным конгрессом электриков в Чикаго в 1893 г. Обсуждение этих вопросов в Чикаго привело к созданию системы международных электрических единиц. Решения чикагского конгресса послужили отправной точкой для законодательных инициатив в области электрических единиц ряда стран: Австралии, Великобритании, Соединенных Штатов Америки, Франции, Германии, которые узаконили эти единицы в 1894–1898 гг. Законодательными актами в этих странах при реализации международных электрических единиц были установлены серебряный вольтметр и НЭ Кларка и Вестона. Параллельно проводились исследования абсолютных измерений электрических единиц с помощью ампер-весов Кельвина и Пеллата, квадрантного электрометра Кельвина.

Неясности и ошибки, допущенные чикагским конгрессом в определениях, а также отсутствие единой спецификации для реализации эталонов с надлежащим единообразием и точностью привели к тому, что вопрос о международных электрических единицах оставался в тот период предметом международного внимания. Окончательное решение этого вопроса стало возможным в 1908 г. на Лондонской международной конференции по электрическим единицам и эталонам. Официальными представителями России на этой конференции были профессор Н. Г. Егоров и профессор Л. П. Свенторжецкий. На лондонской конференции международные единицы были установлены независимо от абсолютных единиц. Конференция приняла в качестве законодательной основы и для практических целей электрических измерений систему международных электрических единиц, основными единицами которой являлись международный ом и международный ампер. При этом считалось, что в качестве основной системы должна оставаться система абсолютных практических единиц.

Остальные международные единицы определялись как производные от международного ома и международного ампера. В частности, международный вольт был определен как электрическое напряжение, производимое током силой в один международный ампер в проводнике, имеющем сопротивление в один международный ом.

В 1899 г. профессор Н. Г. Егоров опубликовал статью [1], в которой были представлены результаты

посещения в 1896–97 гг. метрологических организаций Англии, Франции, Австро-Венгрии и Германии. В 1899 г. Н. Г. Егоров сформулировал задачи по научному и техническому развитию эталонов электрических единиц и поверке электроизмерительных приборов, что и привело к открытию в 1900 г. электрического отделения Главной палаты мер и весов Российской Империи. Но уже с 1899 г. начались работы по созданию эталонов вольта. Бывшим инспектором Главной палаты мер и весов М. В. Ивановым по указанию Н. Г. Егорова были изготовлены образцы НЭ Латимера-Кларка [2]. При всех измерениях, связанных с поверкой и калибровкой электроизмерительной техники, в электрическом отделении Главной палаты мер и весов пользовались НЭ и копиями манганиновых эталонов ома фирмы Вольфа с сертификатами Физико-технического института Германии.

М. В. Ивановым по известным спецификациям была изготовлена партия НЭ Кларка и проведены исследования путем взаимных сличений НЭ при различных режимах работы с помощью потенциометра – «компенсационного аппарата» Фейснера. Исследования показали, что разность ЭДС составляла порядка 0,004–0,010 В при различных температурах. Для получения окончательных результатов были проведены измерения ЭДС с помощью серебряного вольтметра по методике Физико-технического института Германии. Сам вольтметр (рис. 1) был изготовлен в соответствии с правилами, принятыми Международным конгрессом в Чикаго в 1893 г.

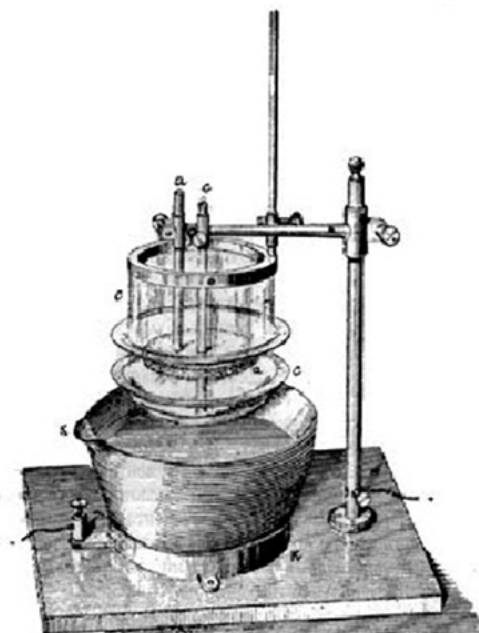


Рис. 1. Серебряный вольтметр
Fig. 1. Silver voltmeter

Вольтаметр (рис. 1) содержал платиновую чашку – катод, анодом служила серебряная пластина, укрепленная на штативе с помощью серебряного стержня. В качестве электролита использовался 15(20)-процентный раствор азотнокислого серебра. Для определения ЭДС эталонных НЭ с помощью серебряного вольтамметра составлялась электрическая цепь из последовательно соединенных вольтамметра, эталонных катушек сопротивления (две катушки по 1 Ом) и аккумуляторной батареи. При этом падение напряжения на эталонных катушках сравнивалось с ЭДС НЭ Е, которую и надо было определить. Сама ЭДС вычислялась как

$$E = R \cdot i = \frac{R \cdot q}{t \cdot e} \text{ международный вольт,}$$

где q – количество выделившегося при электролизе серебра, мг; $e = 1,118$ мг – количество серебра, выделяемого током 1 А за 1 с; t – время, в течение которого выделялось серебро током i , с; R – сопротивление эталонных катушек, Ом.

Позже, в 1901 г., М. В. Иванов изготовил два НЭ Вестона, которые впоследствии были исследованы одновременно с ранее изготовленными НЭ Кларка. В дальнейшем НЭ Вестона (рис. 2) в Главной палате мер и весов изготавливала А. Б. Феррингер, т. к. при исследованиях было выявлено, что эти элементы имеют более высокую механическую надежность и значительно меньший температурный коэффициент. Впоследствии они заменили НЭ Кларка.

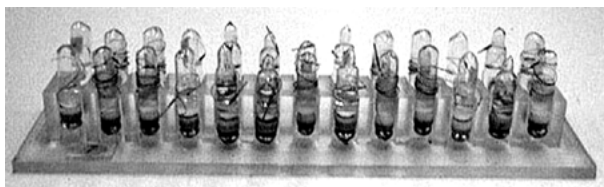


Рис. 2. Группа нормальных элементов Вестона
Fig. 2. The Weston group of standard cells

В 1909 г. Н. Г. Егоров, ставший к этому времени управляющим Главной палатой мер и весов, начал работы по созданию эталонов ома, вольта и ампера [3], и в 1910 г. было изготовлено уже 6 НЭ. В 1910 г. А. Б. Феррингер была откомандирована в Национальную физическую лабораторию (НФЛ) Англии, где приняла участие в совместном со специалистом НФЛ изготовлении 39 НЭ, которые были сличены с НЭ НФЛ. Впоследствии в Главную палату мер и весов был доставлен 31 НЭ из изготовленных 39. Общее число НЭ в Главной палате мер и весов достигло 44 – они и составили Государственный эталон электродвижущей силы.

К 1914 г. в Главной палате оставалось 42 НЭ со стабильными значениями электродвижущей силы. Работа прервалась в 1916 г. на период Первой мировой и Гражданской войн и возобновилась только в ноябре 1922 г. В 1923 и 1924 гг. исследования эталонной группы НЭ проводились ежемесячно, чтобы наверстать упущенное время. Затем к измерениям приступали один раз в 3 месяца. Было установлено, что отклонения ЭДС эталонных НЭ от среднего значения ЭДС группы составляли $1 \cdot 10^{-5}$. Поэтому было принято решение проводить определение ЭДС эталонных НЭ по серебряному вольтаметру и ртутным образцам эталона сопротивления не чаще одного раза в 3–5 лет.

В 1926 г. Главная палата начала сличение своих эталонов с эталонами метрологических учреждений Англии, Германии, США, Франции и Японии, тем самым приняв активное участие в работе международных метрологических организаций. Эти работы продолжались вплоть до 1930 г., когда Главная палата вошла в число четырех национальных институтов, представивших в Консультативный комитет по электричеству (ККЭ) доклады о результатах сличений и предложения по дальнейшей работе.

В 1933 г. по предложению первой сессии ККЭ в Международном бюро мер и весов (МБМВ) была организована электрическая лаборатория, основной задачей которой являлось сличение эталонов электрических величин разных стран. Электрическая лаборатория МБМВ в 1934–35 гг. организовала сличения эталонов. В этих сличениях принял участие и Всесоюзный институт метрологии и стандартизации (ВИМС), в который в 1931 г. была преобразована Главная палата мер и весов. ВИМС представил в МБМВ группу НЭ и две катушки сопротивления, предварительно сличенные с Государственными эталонами СССР. Эти сличения установили сходимость электрических единиц всех государств, участвовавших в сличении, в пределах 0,001 % (кроме Франции). В результате были установлены средние значения единиц сопротивления и ЭДС пяти государств: СССР, США, Англии, Японии и Германии. Международные сличения электрических эталонов (катушек сопротивления и НЭ) электрической лабораторией МБМВ повторялись в 1936–37 и 1939 гг.

В 1938 г. был изменен состав группового эталона [4]: эталон состоял из 24 НЭ. В 1940 г. была произведена замена 8 НЭ и среднее значение ЭДС группового эталона было принято равным $1,018310(4)$ международного вольта [5]. В июле 1941 г. эталон был эвакуирован из Ленинграда в Свердловский филиал ВИМС; из филиала он вернулся в ВИМС в мае 1944 г. Групповой эталон единицы ЭДС к тому времени состоял из 22 НЭ.

В 1946 г. Международный комитет по мерам и весам (МКМВ) МБМВ принял решение, в соответствии с которым первый международный вольт устанавливался равным 1,00034 абсолютного вольта. По результатам исследований группового эталона единицы ЭДС, которые проводились с 1939 по 1948 гг., было выявлено, что среднее значение ЭДС понизилось на 60 мкВ. Принимая во внимание решение МКМВ и данные научных исследований, в 1948 г. было принято решение об изменении значения ЭДС группового эталона. Это значение было принято равным 1,018590 абсолютного вольта вместо действовавшего ранее значения 1,018310 международного вольта.

В 1948 г. IX Генеральная конференция по мерам и весам вновь вернулась к рассмотрению предложений по переходу от международных электрических единиц к абсолютным практическим единицам, и в 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам приняла резолюцию: «В качестве основных единиц практической системы единиц для международных сношений принять: единицу длины – метр, единицу массы – килограмм, единицу силы тока – ампер, единицу термодинамической температуры – градус Кельвина, единицу силы света – свечу».

Таким образом, основной электрической единицей стал ампер. В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам окончательно приняла новую систему единиц – SI (Международная система единиц). К этому времени ведущие метрологические организации зарубежных стран уже имели установки, основанные на принципе токовых весов, для абсолютного определения ампера, т. е. через размеры основных механических единиц: метр, килограмм, секунду.

В 1947 г. во ВНИИМ были созданы токовые весы (рис. 3) с однослойными цилиндрическими катушками. С этого времени и до создания во ВНИИМ в 1979 г. установки для воспроизведения вольта на основе эффекта Джозефсона единица ЭДС определялась через абсолютные измерения силы тока на токовых весах и эталон ома. Для воспроизведения единицы ЭДС были отобраны 4 НЭ – эталоны сравнения, ЭДС которых сравнивалась с падением напряжения на специальной эталонной катушке сопротивления в 1 Ом, создаваемым током, измеряемым на токовых весах. Хранение единицы осуществлялось по-прежнему группой НЭ, среднее значение которой устанавливалось по результатам взаимных сличений с эталонами сравнения.

В 1955 г. с помощью токовых весов было установлено новое среднее значение ЭДС группы первичного эталона из 20 НЭ, равное 1,018608 абсолютного вольта.

Было принято решение о том, что повторные изменения единицы будут осуществляться лишь тогда, когда измерения на токовых весах обнаружат изменение среднего значения ЭДС группового эталона, превышающее 0,001 %, т. е. ± 10 мкВ.

В послевоенные годы во ВНИИМ продолжались работы по исследованию и совершенствованию НЭ Вестона как в части их конструкции, так и химического состава электролита и стеклянной оболочки. В 1968 г. при лаборатории электрических измерений ВНИИМ был создан специальный участок по совершенствованию и изготовлению эталонных НЭ, где под руководством В. В. Мюллер эти работы продолжили Н. Н. Градская, Т. П. Платонова, И. И. Попова, Н. С. Рубчевская. Работы по исследованию метрологических характеристик НЭ проводили Е. А. Чалова и А. С. Савушкина [5]. В результате



Рис. 3. Ампер-весы

Fig. 3. The ampere balance

созданные этим коллективом НЭ по своим метрологическим параметрам стали одними из лучших в мире и применялись в первичном и вторичных эталонах и образцовых мерах ЭДС. Разработанная ими и при их непосредственном участии технология изготовления эталонных насыщенных НЭ, имеющих стабильность ЭДС за год на уровне $(5-10) \cdot 10^{-6}$ В, была внедрена в серийное производство на заводе «Микроприбор», г. Львов, и используется до настоящего времени (рис. 4).



Рис. 4. Промышленно изготовленные нормальные элементы

Fig. 4. Industrially produced standard cells

МБМВ с 1968 по 1969 гг. на основании результатов абсолютных измерений, выполненных в Англии, США, Японии, изменило значение единицы вольт: единица МБМВ была уменьшена на 11 мкВ. В это же время единица вольт СССР была уменьшена на 16 мкВ на основе собственных абсолютных измерений с помощью эталонов ампера и ома и уточнения размера единицы силы тока путем измерения гиромагнитного отношения протона в слабом и сильном магнитных полях [6]. По результатам сличений с МБМВ в 1970 г. единица вольт СССР отличалась от единицы вольт МБМВ на +2,16 мкВ, т. е. $V_{\text{ВНИИМ-69}} - V_{\text{МБМВ-69}} = 2,16 \text{ мкВ}$.

В конце 60-х и в 70-х гг. XX столетия во ВНИИМ были начаты и успешно развивались исследования по применению кремниевых стабилитронов (диодов Зенера) для создания стабильных мер напряжения с целью возможной замены ими НЭ как более транспортируемых эталонов. Эти исследования были начаты под руководством профессора П. Н. Горюнова его учеником канд. техн. наук В. М. Шишкиным [7] и послужили толчком в развитии этого направления в ряде отраслевых институтов СССР, а также в метрологических институтах стран-членов СЭВ [8].

ВНИИМ с 60-х годов прошлого столетия возглавил работы по метрологическому обеспечению в области измерений постоянного напряжения и ЭДС. В ведущих отраслях промышленности (в головных институтах

министерства обороны, электронной, аэрокосмической, ракетной техники, приборостроительной промышленности и др.) были созданы и внедрены комплексы рабочих эталонов вольт (группы по 10 НЭ и аппаратура для передачи единицы и обеспечения условий хранения эталона) – всего 9 рабочих эталонов [9].

В 70-е годы прошлого столетия началась новая эпоха в создании эталонов – переход на воспроизведение единиц физических величин через физические константы с применением стабильных физических эффектов. Начало нового этапа в развитии области измерений постоянного напряжения связано с открытием в 1962 г. британским физиком Б. Джозефсоном эффекта туннелирования электронов в сверхпроводниках при температуре жидкого гелия (4,2 К). Уравнение измерения, описывающее эффект Джозефсона, который положен в основу создания эталона вольт, имеет вид

$$U = fnh/2e = fn\Phi_0 = fn/K_J,$$

где $h/2e$ – отношение постоянной Планка к удвоенному заряду электрона; f – частота электромагнитного облучения перехода Джозефсона; Φ_0 – квант магнитного потока; K_J – константа Джозефсона; n – номер ступени вольтамперной характеристики перехода Джозефсона.

В 1972 г. МКМВ рекомендовало применять следующее значение константы: $K_J = 483594 \text{ ГГц/В}$.

Работы ВНИИМ по созданию установки на эффекте Джозефсона связаны с именами В. О. Арутюнова, С. В. Горбачевича, Ю. В. Тарбеева, К. А. Краснова. Первые измерения ЭДС НЭ с использованием аппаратуры на основе эффекта Джозефсона были выполнены во ВНИИМ в 1974–75 гг. [10]. Эти работы проводились до 1980 г. под руководством Т. Б. Рождественской и В. И. Кржимовского при участии А. С. Каткова, В. Э. Ловцюса, А. С. Мженя, А. И. Смирнова, В. М. Гуревича и завершились созданием эталона вольт первого поколения ГЭТ 13–80 на основе эффекта Джозефсона [11] (рис. 5). В состав были включены мера напряжения на эффекте Джозефсона, группа из 19 НЭ, находящаяся в термостате при температуре 25 °С, и компараторы для передачи единицы от меры напряжения группе НЭ. Точность эталона характеризовалась значениями НСП $1 \cdot 10^{-6}$ и СКО $5 \cdot 10^{-8}$.

В период с 1984 по 1989 гг. во ВНИИМ был создан комплекс аппаратуры второго поколения на основе квантового эффекта Джозефсона, утвержденный в качестве Государственного первичного эталона вольт ГЭТ 13–89. Внешний вид эталона вольт второго поколения на основе квантового эффекта Джозефсона представлен на рис. 6. Сессией ККЭМ в 1988 г. была принята



Рис. 5. Внешний вид эталона ГЭТ 13–80
Fig. 5. Appearance of GET 13–80

рекомендация E1-88 о переходе на новое значение константы Джозефсона $K_J = 483597,9$ ГГц/В, которое с 1990 г. стало использоваться в ГЭТ 13–89. Применение нового значения константы Джозефсона K_{J90} привело к тому, что единица напряжения СССР изменилась на 3,58 мкВ, в то время как единица напряжения МБМВ изменилась на 8,06 мкВ, что подтвердило высокий уровень научных исследований, проводимых во ВНИИМ. Достигнутая точность воспроизведения вольта характеризовалась оценками НСП $5 \cdot 10^{-9}$ и СКО $5 \cdot 10^{-9}$. Это была одна из самых высоких точностей для эталонов, построенных с использованием аппаратуры второго поколения.



Рис. 6. Внешний вид ГЭТ 13–89
Fig. 6. Appearance of GET 13–89

Во ВНИИМ на основе теоретических и экспериментальных работ, выполненных в период с 1991 г. по 1999 г. под руководством канд. физ.-мат. наук В. С. Александрова при участии А. С. Каткова, Е. Д. Колтика, И. В. Коротковой, В. И. Кржимовского, В. Э. Ловцюса, С. В. Потапова, Б. С. Таубе, Г. П. Телитченко, был создан комплекс эталона единицы напряжения третьего поколения [12] и разработана новая Государственная поверочная схема. При создании эталона были использованы интегральные джозефсоновские микросхемы, полученные в результате

проведения совместных работ со специалистами Физико-технического института (ФТИ) Германии – профессором Ю. Нимайером и доктором Р. Бэром.

В апреле 2001 г. этот комплекс был утвержден Госстандартом России в качестве Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения ГЭТ 13–01. Внешний вид эталона вольта третьего поколения на основе квантовой меры напряжения МН-2 представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид эталона вольта ГЭТ 13–01
(на основе меры МН-2)
Fig. 7. Appearance of the voltage standard GET 13–01
(based on the MN-2 measure)

Квантовый эталон четвертого поколения

Успешное функционирование ГЭТ 13–01 в течение многих лет подтвердило высокую точность воспроизведения единицы электрического напряжения. Эта точность была подтверждена рядом завершенных ключевых сличений [13–16]. В то же время практическая эксплуатация в составе эталона ДМ СИС-типа (сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник) показала, что ДМ обладает многозначной вольтамперной характеристикой. Это,

в свою очередь, затрудняло установление заданного значения напряжения и не позволяло получить стабильное во времени напряжение ввиду спонтанных перескоков напряжения с одного квантового уровня на другой. Это свойство используемой ДМ ограничивало вероятность расширить функциональные возможности эталона, в частности, – проводить долговременные измерения с применением напряжения, соответствующего одной квантовой ступени, а также реализовать изменение выходного напряжения эталона по заданному алгоритму.

Появление ДМ безгистерезисного типа (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник, СНС) [17] позволило избавиться от спонтанных перескоков напряжения с одного квантового уровня на другой и решить проблему стабильности воспроизводимого напряжения. В свою очередь это позволило расширить функциональные возможности применения меры напряжения на основе ДМ СНС-типа.

Проведенные исследования меры напряжения на основе ДМ СНС-типа и оценка ее метрологических характеристик с применением ГЭТ 13–01 [18] показали возможность использования данного вида меры в составе первичного эталона. Применение квантового эффекта Джозефсона в Государственном первичном эталоне с опорой на значения фундаментальных физических констант в соответствии с новой Международной системой единиц позволяет повысить точность воспроизведения напряжения и расширить диапазон значений в область малых напряжений. В соответствии с соглашением о предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям на осуществление расходов в области обеспечения единства измерений, в период 2020–2022 гг. были проведены работы по совершенствованию Государственного первичного эталона ГЭТ 13–01, которые привели к изменению как состава эталона, так и его метрологических характеристик.

По положительным результатам государственных приемочных испытаний в 2022 г. утвержден новый состав усовершенствованного Государственного первичного эталона электрического напряжения. Особенностью структуры нового эталона является наличие в его составе двух квантовых мер напряжения. Состав нового эталона включает следующие характеристики:

1) **квантовую меру напряжения МН-2**, применявшуюся ранее в составе ГЭТ 13–01, построенную на основе ДМ СНС-типа. ДМ встроена в криогенный преобразователь, обеспечивающий рабочие условия:

- температуру среды, в которой находится ДМ, 4,2 К;
- экранирование от магнитного поля Земли;
- экранирование от электромагнитных помех;

– стабильность термоЭДС измерительных проводников.

ДМ облучается сверхвысокочастотным сигналом в диапазоне частот 72–77 ГГц, синхронизированным с опорной частотой 10 МГц, формируемой рубидиевым стандартом частоты. Установка выходного напряжения ДМ реализуется блоком смещения, который совместно с осциллографом осуществляет контроль параметров ДМ (значение критического тока и ширину по току квантовой ступени напряжения).

Воспроизводимое напряжение определяется уравнением Джозефсона

$$U = Nf/K_J, \quad (1)$$

где $N = \pm (1, 2, 3, \dots, n)$, n – число квантовых ступеней; f – частота облучения микросхемы, ГГц;

$K_J = 483597,848416984$ ГГц/В – константа Джозефсона, рекомендованная 26 Генеральной конференцией по мерам и весам 20 мая 2019 г.;

2) **квантовую меру напряжения МН-3** (рис. 8), построенную на основе ДМ СНС-типа. ДМ встроена в криогенный преобразователь, обеспечивающий рабочие условия, перечисленные выше. Воспроизводимое напряжение также, как и мере МН-2, определяется уравнением (1). ДМ облучается сверхвысокочастотным сигналом в диапазоне частот 69,5–70,5 ГГц, синхронизированным с опорной частотой 10 МГц. Установка выходного напряжения ДМ реализуется 17-канальным блоком смещения, управляемым специально разработанным программным обеспечением (ПО) с помощью персонального компьютера. Данное ПО совместно с встроенным в меру нановольтметром и переключателями полярности имеет возможности выполнять следующие действия: а) контроль параметров ДМ (значение критического тока и ширину по току квантовой ступени при напряжении 10 В); б) калибровку прецизионных мер напряжения (до 3 шт. одновременно); в) калибровку вольтметров и калибраторов постоянного напряжения в диапазоне от 1 мВ до 10 В; г) регистрацию результатов проведенных калибровок; д) удаление замороженных магнитных потоков в ДМ;

3) **аппаратуру, осуществляющую передачу единицы напряжения;**

4) **аппаратуру для контроля параметров окружающей среды при измерениях;**

5) **вспомогательные устройства и специальные инженерные сооружения, обеспечивающие функционирование ГЭТ 13.**

Дополнительной опцией меры напряжения МН-3 является возможность формирования воспроизводимого

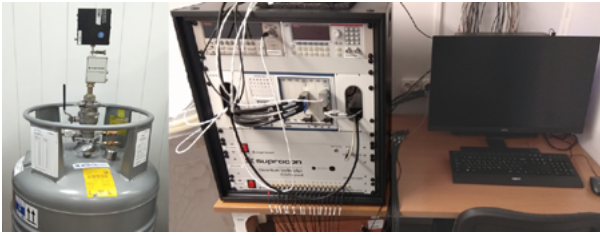


Рис. 8. Внешний вид меры напряжения МН-3 из состава эталона ГЭТ 13–2023

Fig. 8. Appearance of the stress measure MN-3 from GET 13–2023

уровня квантового напряжения, изменяющегося во времени, и сравнения его с измеряемым напряжением.

Возможность применения двух различных квантовых мер напряжения в ГЭТ 13 позволяет решить ряд важных задач:

1) обеспечить прослеживаемость единицы напряжения к международному эталону вольт, хранящемуся в МБМВ, что реализует поддержку строк измерительных и калибровочных возможностей (СМС) за счет проведенных международных ключевых сличений с ГЭТ 13–01 (мера МН-2) в рамках ВІРМ.К10 (квантовые меры напряжения 1,018 В и 10 В), ВІРМ.К11 (меры напряжения на стабилитронах 1 В и 10 В), ЕUROMЕТ.ЕМ.ВІРМ-К10.а, СООМЕТ.ЕМ.ВІРМ-К10.б, СООМЕТ.ЕМ.ВІРМ-К11.а, СООМЕТ.ЕМ.ВІРМ-К11. Результаты сличений, опубликованные в базе данных МБМВ [19], подтвердили, что точность воспроизведения напряжения с помощью Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения находится на уровне лучших национальных эталонов вольт;

2) использовать результаты проведенных ключевых сличений для подтверждения метрологических характеристик введенной в состав эталона меры напряжения безгистерезисного типа (мера напряжения МН-3) путем проведения взаимных сличений двух квантовых мер;

3) использовать свойства гистерезисной микросхемы (мера напряжения МН-2), позволяющей исключить влияние наводок на точность воспроизведения, т. к. при наличии критического значения наводок микросхема четко регистрирует это состояние путем изменения вида вольтамперной характеристики;

4) использовать свойства безгистерезисной микросхемы (мера напряжения МН-3), имеющей значительно более широкие по току квантовые ступени, что позволяет работать с более высоким уровнем внешних шумов и наводок;

5) использовать автоматизацию меры МН-3 для повышения качества проведения поверок и калибровок

как прецизионных мер напряжения, так и калибраторов и вольтметров в широком диапазоне напряжений.

Результаты исследования

Анализ погрешностей (неопределенностей) воспроизведения единицы

Оценки погрешностей и неопределенностей воспроизведения единиц на первичном эталоне ГЭТ 13 проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 8.381-2009.

При воспроизведении единицы величины в качестве оценки случайной погрешности эталона принимается среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего арифметического результата воспроизведения при числе независимых измерений $n=30$ при проведении сличений с квантовым эталоном.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}},$$

где \bar{x} – среднее арифметическое значение измеряемой величины; x_i – i -ый результат измерений величины; n – число измерений величины.

Неисключенные систематические погрешности (НСП) эталона представлены границами (доверительными границами)

$$\theta(p) = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{x}_i} \right)^2} \theta_i^2,$$

где θ_i – границы i -ой составляющей неисключенной систематической погрешности; K – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности. Значение коэффициента K для доверительной вероятности 0,95 принимают равным 1,1.

Неопределенность при воспроизведении единицы величины эталоном характеризуют стандартными неопределенностями, оцениваемыми по типу А, и стандартными неопределенностями, оцениваемыми по типу В.

При воспроизведении единицы величины стандартную неопределенность, оцениваемую по типу А, характеризуют СКО среднего арифметического результатов воспроизведения при числе независимых измерений n

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

Стандартные неопределенности, оцениваемые по типу В, определяются следующим образом: а) на основе теоретических (аналитических) исследований комплексов средств измерений и других технических средств,

входящих в состав эталона; б) с применением знаний о поведении и свойствах соответствующих материалов и средств их измерений; в) с учетом условий измерений, влияющих факторов, возникающих при измерениях.

В предположении о равномерном распределении входной величины в симметричном интервале (a_{i-} , a_{i+}) стандартная неопределенность по типу В вычисляется по формуле

$$u_B = \sqrt{\sum_{n=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{x}_i} \right)^2 u_B^2(\bar{x}_i)},$$

где $u_B^2(\bar{x}_i) = \frac{a_i^2}{3}$ – стандартная неопределенность из-

мерений i -ой входной величины, оцениваемая по типу В, $a_i = (a_{i+} - a_{i-})/2$; a_{i-} – нижняя граница отклонения измеряемой величины от результата измерений; a_{i+} – верхняя граница отклонения измеряемой величины от результата измерений.

Анализ составляющих НСП эталона

Напряжение U_M на выходе квантовых мер напряжения поясняется эквивалентной цепью воспроизведения электрического напряжения (рис. 9). В мере напряжения МН-3, выходное напряжение которой формируется выбором квантовой ступени с помощью тока управления $I_{уп}$, возможно влияние резистивности $r_{ст}$ квантовой ступени, что может вызывать появление добавочного напряжения $\Delta U_D = r_{ст} \cdot \Delta I_{ст}$, где $\Delta I_{ст} = I_{уп} - I_{ст}$ есть отклонение тока управления от тока центра ступени $I_{ст}$.

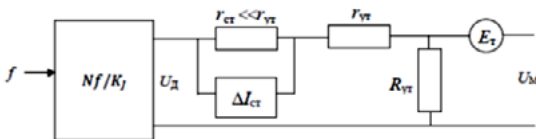


Рис. 9. Эквивалентная цепь воспроизведения единицы электрического напряжения

Fig. 9. Equivalent circuit for reproducing a unit of electrical voltage

Изменение напряжения на выходе мер $\Delta U_{ут}$ характеризуется действием сопротивлений проводников измерительной цепи $r_{ут}$ и сопротивлением изоляции между этими проводниками $R_{ут}$.

Кроме того, влияние температурных полей, имеющих место при проведении измерений с применением криогенных температур, обуславливает наличие термо-ЭДС в измерительной цепи E_T .

Уравнение воспроизведения единицы электрического напряжения, реализованное в эталоне при проведении серии из n измерений и двух полярностях воспроизводимого напряжения, имеет вид:

$$U_M = N \frac{f(1 + \delta f)}{K_J} \left(1 - \frac{r_{ут}}{R_{ут}} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{r_{ст} (\Delta I_{стi}^+ - \Delta I_{стi}^-)}{2n} + \sum_{i=1}^n \frac{(E_{Ti}^+ - E_{Ti}^-)}{2n},$$

где δf – относительная погрешность частоты облучения микросхемы.

Абсолютная погрешность при воспроизведении напряжения описывается выражением:

$$\Delta U_M = N \frac{f}{K_J} \delta f - N \frac{f}{K_J} \left(\frac{r_{ут}}{R_{ут}} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{r_{ст} (\Delta I_{стi}^+ - \Delta I_{стi}^-)}{2n} + \sum_{i=1}^n \frac{(E_{Ti}^+ - E_{Ti}^-)}{2n}.$$

Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единицы электрического напряжения оценивается как композиция неисключенных остатков погрешностей, каждая из которых оценивается путем элементарного исследования источников погрешности.

Обобщенные результаты исследований составляющих НСП воспроизведения единицы электрического напряжения приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты следующих исследований:

- среднеквадратического отклонения среднего арифметического результатов измерений (S);
- НСП (Θ);
- неопределенностей воспроизведения единицы электрического напряжения по типу А (u_A) и типу В (u_B);
- суммарной стандартной неопределенности (u_Σ) и расширенной неопределенности (U_p) при коэффициенте охвата $k=2$.

Заключение

Комиссия по проведению Государственных испытаний прошедшего совершенствование Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения на основании положительных результатов испытаний рекомендовала утвердить ГЭТ 13 в новом составе и с новыми метрологическими характеристиками. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 604 от 21 марта 2023 г.

Таблица 1. Составляющие погрешности при воспроизведении единицы
Table 1. Components of error when reproducing a unit

Составляющая НСП	Обозначение	Значение	Вид погрешности
НСП частоты облучения	Θ_f	$5 \cdot 10^{-10}$	относительная
НСП, вызванная сопротивлениями утечки	Θ_{UT}	$1 \cdot 10^{-10}$	относительная
НСП, вызванная наклоном ступени	Θ_{CT}	$1 \cdot 10^{-10}$	относительная
НСП, вызванная действием термоЭДС	Θ_T	$1 \cdot 10^{-10}$ В	абсолютная

Таблица 2. Результаты исследований
Table 2. Research results

Значение напряжения, В	Значение составляющих погрешности (неопределенности), нВ				
	$S(u_A)$	Θ	u_B	u_Σ	U_p
10	0,6	3,21	1,70	1,76	3,6
1	0,2	0,65	0,34	0,53	1,1
0,1	0,4	0,57	0,30	0,50	1,0
0,01	0,2	0,57	0,30	0,50	1,0
0,001	0,3	0,57	0,30	0,50	1,0

утвержден Государственный первичный эталон единицы электрического напряжения и ему присвоен регистрационный номер ГЭТ 13–2023. Этим же приказом ученым-хранителем ГЭТ 13–2023 назначен главный научный сотрудник лаборатории Государственных первичных эталонов и научных исследований в области измерений режимов электрических цепей доктор технических наук, доцент Александр Сергеевич Катков.

Совершенствование Государственного первичного эталона ГЭТ 13–2023 привело к следующим результатам:

- расширены функциональные возможности эталона: передача единицы стала возможна как для источников напряжения (мер и калибраторов), так и для измерителей напряжения;

- в 1 000 раз расширен диапазон измерений эталона при воспроизведении и передаче единицы напряжения – до 1 мВ вместо реперных точек 1 В и 10 В;

- повышен уровень автоматизации эталонных измерений.

Усовершенствованную аппаратуру первичного эталона планируется использовать при проведении международных сличений эталонов, воспроизводящих постоянные напряжения, изменяющиеся во времени, в том числе – по синусоидальному закону. Новые возможности реализуются за счет применения безгистерезисной ДМ, многоканаль-

ного блока смещения ДМ и программного обеспечения для реализации заданного алгоритма управления.

В связи с переутверждением ГЭТ 13–2023 в метрологическую практику введена Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы, утвержденная приказом Росстандарта от 28 июля 2023 г. № 1520.

Благодарности: Все исследования проводились в лаборатории Государственных первичных эталонов и научных исследований в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», коллективу которой авторы выражают благодарность за их участие в работе по совершенствованию ГЭТ 13.

Acknowledgments: All studies were carried out in the laboratory of State Primary Standards and Scientific Research in the field of Measuring the Modes of Electrical Circuits, D. I. Mendeleev Institute for Metrology; the authors express their gratitude to the team of this laboratory for their participation in the work to improve GET 13.

Вклад соавторов: Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Author Contributions: The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Конфликт интересов: Катков А. С. является членом редакционной коллегии журнала «Эталоны. Стандартные образцы». Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи.

Conflict of interests: Katkov A. S. is a member of the Editorial Board of the journal «Measurement Standards. Reference Materials». The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Егоров Н. Г. О правительственной выверке электрических измерительных приборов в западноевропейских государствах // Временник. 1899. Ч. 4. С. 81–121.
2. Иванов М. В. Нормальные элементы Латимера-Кларка Главной Палаты Мер и Весов // Временник. 1900. Ч. 5. С. 36–59.
3. Егоров Н. Г. Предварительные работы по приготовлению эталонов основных электрических единиц // Временник. 1911. Ч. 1. С. 122–131.
4. Чураева Е. С. Состояние эталона международного вольты СССР с 1932 по 1937 г. Исследования в области электрических измерений // Труды ВНИИМ. 1939. Вып. 24(40).
5. Колосов А. К., Чалова Е. А. Состояние государственного эталона вольты СССР // Труды ВНИИМ. 1960. Вып. 39(99).
6. Рождественская Т. Б., Широков К. П. Установление нового размера единицы ЭДС – вольты // Измерительная техника. 1970. № 8.
7. Горюнов П. Н., Шишкин В. М. Электрические, тепловые и временные характеристики термокомпенсированных стабилитронов типа Д818. Исследования в области электрических измерений // Труды ВНИИМ. Вып. 1971. Вып. 115(175).
8. Галахова О. П., Рождественская Т. Б., Шишкин В. М. Обеспечение единства измерений электрических величин в странах-членах СЭВ // Измерительная техника. 1972. № 5.
9. Барбарович В. Ю. Автоматизированный рабочий эталон единицы ЭДС в диапазоне значений 1–10 В // Измерительная техника. 1993. № 8.
10. Аппаратура для контроля стабильности ЭДС нормальных элементов на основе эффекта Джозефсона / С. В. Горбачев [и др.] // Измерительная техника. 1976. № 4. С. 59–61.
11. Новый государственный первичный эталон единицы электродвижущей силы – вольты / Ю. В. Тарбеев [и др.] // Измерительная техника. 1981. № 12. С. 3–5.
12. Александров В. С., Катков А. С., Телитченко Г. П. Новый государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы // Измерительная техника. 2002. № 3. С. 6–9.
13. Bilateral comparison of 1.018V standards between the VNIIM and the BIPM: BIPM Rapport BIPM-99/2 / D. Avrons [et al.]. France: BIPM Publications, 1999.
14. Katkov A. S., Solve S., Stock M. Bilateral Comparison of 10 V Standards between the VNIIM (Russia) and the BIPM, August to October 2007 (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM.EM-K11.b): Rapport BIPM-07/07. France: BIPM Publications, 2007. p. 10.
15. Behr R., Katkov A. S. Final Report on the key comparison EUROMET.BIPM.EM.K-10.a. Comparison of Josephson array voltage standards by using a portable Josephson transfer standard // Metrologia. 2005. Vol. 42, № 1A, P. 01005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/1A/01005>
16. Comparison of the Josephson voltage standards of the VNIIM and the BIPM (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM.EM-K10.b) / S. Solve [et al.] // Metrologia. 2011. Vol. 48, № 1A. P. 01007. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/1A/01007>
17. AC and DC voltages from a Josephson arbitrary waveform synthesizer / S. P. Benz [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2001. Vol. 50, № 2. P. 181–184. <https://doi.org/10.1109/19.918096>
18. Katkov A., Shevtsov V., Gubler G. VNIIM 10 V programmable Josephson voltage standard // 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018): abstract, Paris, France, 08–13 July 2018. IEEE Xplore: 2018. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500892>

REFERENCE

1. Egorov N. G. About the government reconciliation of electrical measuring instruments in the Western European states. *Vremennik*. 1899;4:81–121. (In Russ.).
2. Ivanov M. V. Normal elements of latimer-clark of the main chamber of weights and measures. *Vremennik*. 1900;5:36–59. (In Russ.).
3. Egorov N. G. Preliminary work on the preparation of standards of basic electrical units. *Vremennik*. 1911;10:122–131. (In Russ.).
4. Churaeva E. S. State of the standard of the international volt of the USSR from 1932 to 1937 Research in the field of electrical measurements. *Proceedings of VNIIM*. 1939;24(40). (In Russ.).
5. Kolosov A. K., Chalov E. A. The State of the State Standard of the USSR Volt. *Proceedings of VNIIM*. 1960;39(99). (In Russ.).
6. Rozhdestvenskaya T. B., Shirokov K. P. Establishment of a new size of the EMF unit – volt. *Measurement techniques*. 1970;8. (In Russ.).
7. Goryunov P. N., Shishkin V. M. Electrical, thermal and temporal characteristics of thermally compensated zener diodes type D818. Research in the field of electrical measurements. *Proceedings of VNIIM*. 1971;115(175). (In Russ.).

8. Galakhova O. P., Rozhdestvenskaya T. B., Shishkin V. M. Ensuring the uniformity of measurements of electrical quantities in the CMEA member countries. *Measurement techniques*. 1972;5. (In Russ.).
9. Barbarovich V. Yu. Automated working standard of the EMF unit in the range of 1–10 V. *Measurement techniques*. 1993;8. (In Russ.).
10. Gorbatshevich S. V., Krasnov K. A., Mazurov V. P., Satrapinsky A. F., French E. T., Yashin T. V. Apparatus for monitoring the stability of the EMF of normal elements based on the Josephson effect. *Measurement techniques*. 1976;4:59–61. (In Russ.).
11. Tarbeev Yu. V., Koltik E. D., Rozhdestvenskaya T. B., Galakhova O. P., Krasnov K. A., Krzymowski V. I. The new state primary standard of the electromotive force unit is the volt. *Measurement techniques*. 1981;12:3–5. (In Russ.).
12. Aleksandrov V. S., Katkov A. S., Telitchenko G. P. New state primary standard and state verification scheme for measuring instruments for constant electric voltage and electromotive force. *Measurement techniques*. 2002;3:6–9. (In Russ.).
13. Avrons D., Katkov A., Krzhimovsky V., Reymann D., Witt T. J. Bilateral comparison of 1.018 V standards between the VNIIM and the BIPM: BIPM Rapport BIPM-99/2. France: BIPM Publications; 1999.
14. Katkov A. S., Solve S., Stock M. Bilateral Comparison of 10 V Standards between the VNIIM (Russia) and the BIPM, August to October 2007 (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM.EM-K11.b): Rapport BIPM-07/07. France: BIPM Publications; 2007. p. 10.
15. Behr R., Katkov A. S. Final Report on the key comparison EUROMET.BIPM.EM.K-10.a. Comparison of Josephson array voltage standards by using a portable Josephson transfer standard. *Metrologia*. 2005;42(1A):01005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/1A/01005>
16. Solve S., Chayramy R., Stock M., Katkov A. Comparison of the Josephson voltage standards of the VNIIM and the BIPM (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM.EM-K10.b). *Metrologia*. 2011;48(1A):01007. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/1A/01007>
17. Benz S. P., Burroughs C. J., Dresselhaus P. D., Christina L. A. AC and DC voltages from a Josephson arbitrary waveform synthesizer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2001;50(2):181–184. <https://doi.org/10.1109/19.918096>
18. Katkov A., Shevtsov V., Gubler G. VNIIM 10 V programmable Josephson voltage standard // 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018): Abstract, 08–13 July 2018, Paris, France. IEEE Xplore: 2018. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8500892>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ГОСТ 8.381-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения точности = State system for ensuring the uniformity of measurements. Standards. Ways for expressing the accuracy. М.: Стандартинформ; 2012. С. 2022.

ГЭТ 13–2023 Государственный первичный эталон единицы электрического напряжения: институт-хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1408837>

Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2023 года № 1520 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : официальный сайт. 2020. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1302294216>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Катков Александр Сергеевич – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: a.s.katkov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5597-9437>

Шевцов Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент, руководитель научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: V.I.Shevtsov@vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. Katkov – Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Chief Researcher Laboratory of State Standards in the field of Measuring Modes of Electric Circuits, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.s.katkov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5597-9437>

Vladimir I. Shevtsov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of State Standards in the field of Measuring Modes of Electric Circuits, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: V.I.Shevtsov@vniim.ru

Быков Андрей Игоревич – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: A.I.Bykov@vniim.ru

Ловцюс Виктор Эдуардович – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19

Беликова Маргарита Николаевна –техник научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений режимов электрических цепей ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: m.n.belikova@vniim.ru

Andrey I. Bykov – Researcher of the Research Laboratory of State Standards in the field of Measuring Modes of Electric Circuits, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: A.I.Bykov@vniim.ru

Viktor E. Lovtsus – Leading Engineer of the Research Laboratory of State Standards in the field of Measuring Modes of Electric Circuits, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia

Margarita N. Belikova – Technician of the Research Laboratory of State Standards in the field of Measuring Modes of Electric Circuits, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: m.n.belikova@vniim.ru