

Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ

А. С. КАТКОВ*, С. СОЛВЕ**

* Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: a.s.katkov@vniim.ru

** Международное Бюро мер и весов, Севр, Франция, e-mail: stephane.solve@bipm.org

Приведены результаты ключевых сличений государственного первичного эталона единицы электрического напряжения — вольты, хранящегося во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, и эталона вольты на эффекте Джозефсона МБМВ. Для измерений ВНИИМ представил меру напряжения на основе эффекта Джозефсона с номинальным выходным напряжением 10 В. Измерения выполнялись аппаратурой из состава эталона вольты МБМВ. Мету напряжения ВНИИМ планируется использовать в качестве эталона сравнения при проведении сличений национальных эталонов вольты. Результаты сличений показали высокую степень эквивалентности сравниваемых первичных эталонов ВНИИМ и МБМВ, которая характеризуется относительной суммарной стандартной неопределенностью $2 \cdot 10^{-10}$ при напряжении 10 В.

Ключевые слова: эталон вольты, эффект Джозефсона, мера напряжения, эталон сравнения.

The results of key comparisons of the state primary standard of electric voltage unit stored in D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM) with Josephson's array voltage standard of BIPM are given. VNIIM presented for measurements the 10 V-Josephson voltage measure. Output voltage of the measure was measured by equipment of the BIPM voltage standard. The VNIIM voltage measure is planned to be operated as a transfer standard for national voltage standards comparisons. The measurements results have shown the high degree of equivalence of compared VNIIM and BIPM primary standards with combined relative standard uncertainty $2 \cdot 10^{-10}$ at voltage 10 V.

Key words: voltage standard, Josephson's effect, voltage measure, transfer standard.

В рамках международной Договоренности о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами, Международное Бюро мер и весов (МБМВ) провело в ноябре 2010 г. прямые ключевые сличения эталонов вольты, основанных на эффекте Джозефсона, с ВНИИМ им. Д. И. Менделеева [1].

Сличения проводились согласно техническому протоколу BIPM.EM-K10.b, опция А, в соответствии с которой МБМВ выполняло измерения выходного напряжения транспортируемого эталона сравнения (ТЭС) ВНИИМ [2], используя аппаратуру и методику измерений эталона МБМВ. Предварительно в сентябре 2010 г. ТЭС сличали во ВНИИМ с государственным первичным эталоном электрического напряжения — вольты [3]. В ноябре 2010 г. эталон сравнения был доставлен в МБМВ, где в течение 2 дней проводились прямые сличения ТЭС с международным эталоном вольты. Ниже описаны эксперименты и результаты, полученные в процессе сличений.

Эталон вольты МБМВ. Международный эталон вольты построен на базе эффекта Джозефсона. Основой эталона является интегральная джозефсоновская схема (ИДС) типа сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник фирмы Nupres с выходным напряжением 10 В. Кроме того, имеются аппаратура для микроволнового облучения ИДС и источник смещения постоянного тока. Выходная микроволновая мощность формируется генератором на диоде Ганна, частота которого стабилизируется с использованием частотомера EIP 578В и аппаратуры ETL/Advantest. Информация о параметрах изолированной ИДС снимается с помощью вольт-амперной характеристики (ВАХ), измеряемой усилителем с

оптической развязкой. Во время проведения измерений выходное напряжение на ИДС, отключенной от контрольной аппаратуры, регулируется выбором частоты облучения и номера используемой ступени ВАХ таким образом, чтобы разность сравниваемых напряжений была меньше 1 мкВ. Регистрация разности напряжений осуществляется аналоговым нановольтметром в поддиапазоне измерений 3 мкВ. При случайном скачке напряжения на микросхеме (переход с одного квантового уровня на другой) программа управления останавливает процесс измерений. Сопротивление измерительных проводников в эталоне составляет порядка 4 Ом. Их термоЭДС не превышает 100 нВ и исключается изменением полярности сравниваемых напряжений. Сопротивление, определяющее токи утечки между измерительными проводниками, превышает 100 ГОм.

Транспортируемый эталон сравнения ВНИИМ. Описание эталона приведено в [2]. Основные характеристики эталона: номинальное выходное напряжение ИДС типа сверхпроводник—изолятор—нормальный проводник—изолятор—сверхпроводник (СИНИС) 10 В; сила тока смещения $I_{\text{см}} = (2,35 \pm 0,10)$ мА; частота облучения 69,7 ГГц; мощность облучения 40 — 80 мВт; эффективное сопротивление измерительной цепи 8 Ом, ее сопротивление изоляции 50 ГОм.

Отличительная особенность ИДС, используемой в эталоне сравнения, состоит в наличии гистерезиса вблизи рабочей ступени (рис. 1), что исключает наклон ступени при воздействии низкочастотных помех малой интенсивности [4].

Процедура сличений при напряжении 10 В

Предварительные измерения. Перед выполнением сличений проводили подготовительные работы, включающие проверку наличия замороженных магнитных потоков в ИДС

эталоны сравнения путем измерения силы критического тока, а также контроль вида вольт-амперной характеристики (см. рис. 1) с целью проверки параметров рабочей ступени напряжения. Затем ТЭС был подключен к эталону МБМВ и проведено три измерения выходного напряжения ТЭС в соответствии с протоколом МБМВ при номинальном выходном напряжении 10 В. Воспроизводимое напряжение ТЭС характеризовалось частотой облучения 69,731880 ГГц, числом ступеней 69350 и силой рабочего тока 2,29 мА, напряжение эталона МБМВ — частотой облучения 75,091710 ГГц, числом ступеней 64400 и нулевым рабочим током. Теоретическая разность воспроизводимых эталонами напряжений составила

$$\Delta_{\text{теор}} = U_{\text{ТЭС}} - U_{\text{МБМВ}} = -508,68 \text{ нВ.}$$

Результаты предварительных измерений показали, что отличие экспериментального значения разности напряжений от теоретического $\Delta_{\text{эксп}} - \Delta_{\text{теор}} = 1,09 \text{ нВ}$ со стандартной неопределенностью 2,6 нВ.

Полученный предварительный результат свидетельствует о высоком уровне стабильности измерений и электромагнитной совместимости аппаратуры сравниваемых эталонов. Дальнейшие измерения, проведенные при различных вариантах заземления и подключения питающих напряжений, подтвердили высокое качество аппаратурной реализации эталонов.

Методика измерений на эталоне вольт МБМВ. При выполнении измерений от цепи управления отсоединяется ИДС эталона и вследствие этого ток смещения через нее не протекает. Шасси приборов эталонного комплекса связаны с точкой заземления, имеющейся в лаборатории. Две ИДС сравниваемых эталонов включены последовательно через измеритель напряжения и соединены одноименными полюсами. При проведении сличений в соответствии с опцией А в аппаратуре эталона вольт МБМВ используется методика, которая применяется при измерениях выходного напряжения мер на основе стабилизаторов. Отличительная особенность состоит в изменении полярности сравниваемых напряжений, которое осуществляется при помощи блока смещения ИДС без использования переключателя полярности в измерительной цепи. Полярность напряжений на обеих ИДС изменяется вручную, типичное время переключения — не более 10 с. Измеритель разности напряжений ИДС, в качестве которого используется нановольтметр, подсоединяется таким образом, что входная цепь «высокого» потенциала нановольтметра подводится к ИДС МБМВ. Процедура получения результата измерения включает обработку ряда измерений при следующих включениях приборов в измерительной схеме:

$$+U-D, +U+D, -U-D, -U+D, -U-D, -U+D, +U-D, +U+D,$$

где $+U$ и $-U$ — положительная и отрицательная полярности выходного напряжения ИДС; $+D$ и $-D$ — прямая и обратная полярности подключения входа нановольтметра к измерительной цепи.

Изменение полярности подключения нановольтметра применяется для компенсации нелинейности в изолирующем усилителе, расположенном между выходом аналогового нановольтметра и входом цифрового регистрирующего вольтметра. Это также позволяет снизить влияние термоЭДС измерительной цепи.

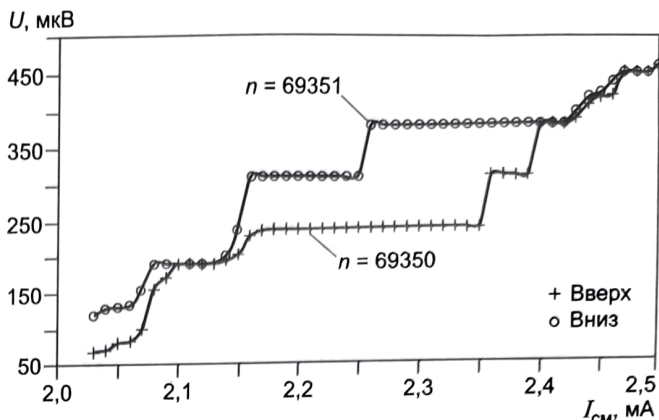


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ИДС типа СИНИС вблизи напряжения 10 В эталона сравнения:

мощность облучения на входе ИДС 20 мВт; рабочая часть ступени напряжения с квантовым номером $n = 69350$ находится в диапазоне изменения силы тока смещения 2,19 — 2,29 мА

В соответствии с алгоритмом работы эталона МБМВ каждый измерительный шаг из упомянутого выше ряда измерений содержит 10 начальных и 30 последующих измерительных точек. Каждая из 30 точек не должна отличаться от среднего значения 10 начальных точек более чем на значение двух стандартных отклонений. В противном случае измерение выполняется заново. Каждый шаг продолжается 25 с, что соответствует времени нахождения ИДС МБМВ на выбранной ступени напряжения. Длительность получения результата измерения составляет около 5 мин.

При проведении измерений блок смещения эталона МБМВ используется для ручной подстройки выбранного номера ступени ИДС после каждого изменения полярности. Программное обеспечение эталона служит для управления процессом измерения и записи данных. В качестве нановольтметра в эталоне МБМВ применяется аналоговый прибор типа EM-N1a в поддиапазоне измерений 3 мкВ. После каждого переключения при измерениях введена задержка порядка 10 с для снижения эффекта заряда конденсаторов в фильтре измерительной цепи.

Проведение сличений. По сравнению со схемой предварительных измерений существенных изменений в измерительную схему не вносилось. В процессе сличений проведены исследования факторов, влияющих на точность измерений, таких как заземление корпуса ТЭС, схема подключения эталонов к сетевому питанию, наклон ступени напряжения на выходе ТЭС.

Первые пять измерений выполнены при силе тока смещения ИДС ТЭС, равной 2,24 мА, и питании эталона МБМВ от сети. При подключении ТЭС к аппаратуре эталона МБМВ отмечено повышение уровня шумов, зафиксированное на экране осциллографа эталона МБМВ. Однако это не повлияло на стабильность ступени ИДС МБМВ. Измерения с 6-го по 10-е выполнены при питании эталона МБМВ от аккумуляторов. При проведении измерений с 11-го по 15-е в ТЭС дополнительно использовался усилитель микроволновой мощности. Как показали исследования, значительного изменения мощности облучения и характеристик ИДС ТЭС не последовало, поскольку установленное ранее значение коэффициента усиления было близко к единице. Измерения с 16-го по 20-е выполнены после калибровки поддиапазона

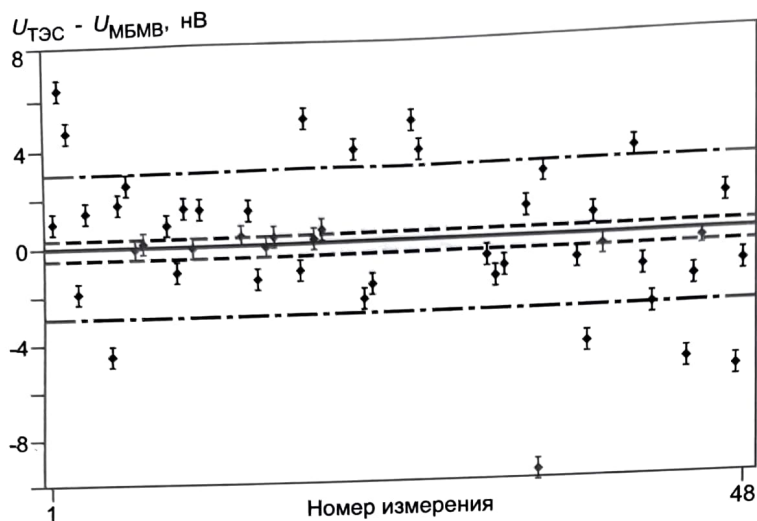


Рис. 2. Результаты измерений при номинальном напряжении 10 В: сплошная линия — среднее значение, штрихпунктирные и пунктирные — средние квадратические отклонения соответственно экспериментальных данных и среднего значения

3 мкВ нановольтметра путем изменения частоты облучения ИДС МБМВ, измерения с 21-го по 24-е — при отключении заземления ТЭС и подключении эталона МБМВ к питанию от сети. Влияния отключения заземления ТЭС не выявлено. Не отмечено также влияния источника питания микроволнового генератора ТЭС при различных фазах его подсоединения к сети и использовании сетевых фильтров. Периодически проводилась установка заданной ступени ИДС ТЭС из-за ее перекоков на дробную часть ступени ВАХ при переключениях в аппаратуре эталона МБМВ.

Исследована зависимость напряжения ТЭС от тока смещения. Так, измерения с 25-го по 27-е и с 30-го по 32-е выполнены при силе тока смещения, равной 2,28 мА, а измерения с 28-го по 29-е и с 33-го по 35-е — при силе тока 2,18 мА. Полученные результаты не выявили зависимости напряжения ступени ИДС ТЭС от силы тока смещения.

При проведении измерений выявлена нестабильность работы микроволнового генератора на диоде Ганна эталона МБМВ, вследствие чего он был заменен. Частота облучения ИДС МБМВ при этом составляла 74,163510 ГГц. После замены генератора была выполнена серия измерений с 36-го по 48-е, в которых происходили отключения (подключение) заземления ТЭС и замена сетевого питания эталона МБМВ на аккумулятор, как в измерениях с 1-го по 10-е и с 21-го по 24-е.

На рис. 2 представлены результаты всех 48 измерений, использованные для расчета результата сличений.

Чтобы исследовать влияние электромагнитной совместимости двух эталонов и влияние шумов при сличении, дополнительно измеряли разности выходных напряжений эталонов при нулевом напряжении на обоих ИДС. Проведена серия из 24 измерений, в которых изменялись условия питания эталона МБМВ и заземления ТЭС. Среднее значение разности составило $-0,01$ нВ при стандартной неопределенности этого значения $0,38$ нВ. Разброс результатов измерений не отличался от данных, полученных при сличении напряжений 10 В, что указывало на основной источник шумов — входную цепь нановольтметра.

Для контроля сопротивления изоляции между измерительными проводниками, которое является основным источником неопределенности типа В, использовали мегомметр типа Keithley 500. При измерении в условиях комнатной температуры сопротивление составило $5 \cdot 10^9$ Ом, а при погружении зонда в сосуд Дьюара с жидким гелием оно увеличилось до $5 \cdot 10^{10}$ Ом. Данный эффект связан с утечками в печатной плате, находящейся вблизи ИДС ТЭС, которые значительно уменьшаются при охлаждении до температуры жидкого гелия. Дополнительные исследования фильтра низкой частоты ТЭС, проведенные во ВНИИМ [2], подтвердили полученное значение $5 \cdot 10^{10}$ Ом, которое объясняется наблюдающимся эффектом абсорбции в диэлектрике конденсаторов, используемых в фильтре.

Результаты сличений. Экспериментальные данные, полученные при различных частоте облучения, силе рабочего тока ступени, условиях заземления и подключения к сети, позволяют считать, что измерения были в значительной степени независимыми, поэтому стандартное отклонение среднего значения из 48 измерений принято в виде u_A — неопределенности типа А.

Источниками неопределенности типа В являются значение частоты генераторов миллиметрового диапазона, облучающих ИДС эталонов, токи утечки, коэффициент пре-

образования нановольтметра и его нелинейность. Неисключенные остатки воздействия термоЭДС и смещения нуля нановольтметра, суммируясь случайным образом, содержатся в неопределенности типа А, а такие источники неопределенности вследствие детектирования мощности облучения или наклона ступени не обнаружены. Оценка неопределенности типа В при проведении сличений ТЭС и эталона МБМВ приведена в табл. 1. Необходимо отметить, что оба эталона имели общий опорный источник высокостабильной частоты 10 МГц, влияние которого на измерения было пренебрежимо мало. Влияние сопротивления утечки оценивалось с учетом сопротивления измерительной цепи и равномерного закона распределения. Неопределенность типа В, вносимая нановольтметром, оценивалась максимальной разностью изменения его коэффициента усиления, полученной в процессе калибровки, выполняемой до и после проведения измерений.

Таблица 1

Оценка неопределенности типа В при сличении ТЭС ВНИИМ и эталона МБМВ

Источник неопределенности	Вклад в относительную неопределенность эталона	
	МБМВ	ТЭС
Смещение частоты	$8,0 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$
Сопротивление утечки	$5,0 \cdot 10^{-11}$	$9,5 \cdot 10^{-11}$
Нановольтметр	$7,0 \cdot 10^{-11}$	—
Итого	$8,6 \cdot 10^{-11}$	$10,7 \cdot 10^{-11}$

Относительная разность значений размеров единицы напряжения, воспроизводимых сравниваемыми эталонами, составила $(U_{ТЭС} - U_{МБМВ})/U_{МБМВ} = -1,05 \cdot 10^{-11}$ при относительной стандартной неопределенности $u_A/u_{МБМВ} = 4,3 \cdot 10^{-11}$.

Результаты проведенных в сентябре 2010 г. измерений ТЭС по ГЭТ 13—01 [2] позволяют установить связь размеров единицы напряжения, воспроизводимых эталонами

вольта ВНИИМ и МБМВ, и представить их в базе данных МБМВ. Степень эквивалентности D между эталонами вольта ВНИИМ и МБМВ получена на основе соотношения (табл. 2):

$$D_{\text{ВНИИМ-МБМВ}} = D_{\text{ВНИИМ-ТЭС}} + D_{\text{ТЭС-МБМВ}}$$

с неопределенностью $u_{\text{ВНИИМ-МБМВ}}^2 = u_{\text{ВНИИМ-ТЭС}}^2 + u_{\text{ТЭС-МБМВ}}^2$.

Таблица 2

Результаты сличений эталонов вольта

Сличаемые эталоны	Степень эквивалентности D , нВ	Суммарная неопределенность u , нВ
ВНИИМ — ТЭС	0,00	1,80
ТЭС — МБМВ	-0,105	0,96
ВНИИМ — МБМВ	-0,105	2,04

Примечание. При расчете суммарной неопределенности степени эквивалентности $D_{\text{ВНИИМ-МБМВ}}$ неопределенность типа В, входящая в $D_{\text{ТЭС-МБМВ}}$, исключена, так как она была учтена при расчете $D_{\text{ВНИИМ-ТЭС}}$.

Заключение. Проведенные сличения показали надежность работы аппаратуры обоих эталонов при различных схемах подключения, в том числе при питании от сети и отсутствии заземления на корпусе ТЭС. Отмечена необходимость подстройки выходных напряжений эталонов перед началом измерений.

Степень эквивалентности эталонов вольта ВНИИМ и МБМВ при напряжении 10 В получена на уровне -0,1 нВ с суммарной неопределенностью 2 нВ.

Литература

1. **Solve S. e. 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. V. 48. Tech. Suppl. 01007.

2. **Катков А.С., Ловцюс В. Э.** Компактный эталон сравнения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 41—45.

3. **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; **Aleksandrov V. S., Katkov A. S., Telitchenko G. P.** New State Primary Standard and State Test Scheme for Instruments for Measuring DC Electrical Voltage and Electromotive Force // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 3. P. 228—232.

4. **Behr R. e. a.** Josephson Arrays at 70 GHz for Conventional and Programmable Voltage Standards // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1999. V. 48. N 2. P. 270—273.

Дата принятия 15.08.2011 г.