

Ключевые сличения эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь

А. С. КАТКОВ*, П. А. ЧЕРНЯЕВ**

* Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ),

С.-Петербург, Россия, e-mail: A.S.Katkov@vniim.ru

** Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ), Минск, Беларусь

Рассмотрены вопросы проведения и результаты ключевых сличений национальных эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь с использованием эталонов сравнения на стабилитронах при напряжениях 1, 018 и 10 В.

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

The problems of realization and the results of key comparisons of national voltage standards of Russian Federation and Belarus Republic by means of Zener references at voltages 1.018 V and 10 V are considered.

Key words: voltage standard, Josephson effect, voltage measure, reference standard.

В рамках сотрудничества национальных лабораторий, входящих в КООМЕТ, в период с 18.07 по 05.08.2011 г., в рамках темы КООМЕТ 530/BU/11 проведены ключевые сличения обновленного эталона вольты БелГИМ и государственного первичного эталона единицы напряжения ВНИИМ [1]. Указанные сличения позволили связать единицу напряжения, воспроизводимую эталонами вольты БелГИМ и МБМВ через завершённые ключевые сличения эталона вольты ВНИИМ [2, 3]. Результаты ключевых сличений COOMET.EM.VIRM-K10.b в виде разности воспроизводимых напряжений между БелГИМ и МБМВ представлены в международный банк данных МБМВ вместе с суммарной неопределённостью измерений БелГИМ — ВНИИМ и ВНИИМ — МБМВ [4].

В 2004 г. введена в строй аппаратура второго поколения эталона вольты БелГИМ. Новый эталон вольты БелГИМ построен с использованием установки supraVOLTcontrol с микропроцессорным управлением, серийный номер 004 [5], имеющей в составе 10 В джозефсоновскую интегральную микросхему (ДМ). Эталон позволяет осуществлять калибровку вторичных эталонов напряжения и вольтметров. Выходное напряжение эталона определяется уравнением

$$U_j = Nf / K_{j90}, \quad (1)$$

где N — целое число ступенек; f — частота электромагнитного излучения; $K_{j90} = 483597,9$ ГГц/В — константа Джозефсона.

В состав эталона входят:

криозонд с 10 В джозефсоновской микросхемой типа SIS, изготовленной по стандартной трехслойной технологии Nb/Al, имеет рабочую частоту 75 ГГц. Криозонд доработан с целью обеспечения использования сосудов Дьюара как RH-65, так и СТГ-40 с диаметрами фланцев соответственно 50 и 25 мм;

сосуд Дьюара RH-65, рассчитанный на непрерывную работу с жидким гелием до 18 сут;

сосуд Дьюара СТГ-40, допускающий непрерывную работу до 45 сут, что позволяет выполнять продолжительные исследования и сличения эталонов;

электронный блок, управляющий процессом измерений совместно с компьютером, содержит источник питания для СВЧ-аттенюатора, систему подключения к ДМ, генератор Ганна с частотой 75 ГГц, вентиль, направленный ответвитель, смеситель и аттенюатор, управляемый по напряжению;

частотомер EIP578, обеспечивающий синхронизацию частоты излучения СВЧ с опорным источником;

нановольтметр Keithley 2182A, используемый для измерений разности напряжений;

трехканальный переключатель полярности со специальными низкотемпературными кабелями соединения с измеряемыми эталонами;

датчики для измерений температуры, влажности и атмосферного давления;

компьютер с интерфейсом стандарта IEEE;

аппаратура для хранения значений ЭДС 1,018 В на основе двух групп нормальных элементов (по 10 элементов в группе);

аппаратура для хранения значений напряжений 1,018 и 10 В на основе мер напряжения типа 732B, 7000N (Fluke) и H4-100 (Минский научно-исследовательский приборостроительный институт);

аппаратура для эталонного воспроизведения напряжения до 1000 В.

Аппаратура эталона БелГИМ имеет различные режимы работы, заданные в используемом программном обеспечении. Для сличения эталонов при помощи двух эталонов сравнения применяли режим работы для калибровки вторичных эталонов, оптимизированный для калибровки мер напряжения на стабилитронах, выходное напряжение которых

подключается к эталону через один из трех идентичных каналов.

При измерении выходного напряжения вторичного эталона обеспечивается изменение полярности с целью исключения термоЭДС в измерительной цепи. В каждой точке проводится 40 измерений (по 20 на каждой полярности) в течение 3 с. В процессе этих измерений ДМ отсоединена от корпуса и блока управления, а включена последовательно с нановольтметром и вторичным эталоном напряжения. Нановольтметр фиксирует разность напряжений между вторичным эталоном напряжения и квантованным уровнем напряжения ДМ. Так как напряжение вторичного эталона (по выходам 1,018 или 10 В) точно неизвестно, система измеряет это напряжение вольтметром для оценки приблизительно значения и выбора наиболее подходящего номера ступеньки (числа N ступенек), который должен быть использован. Остаточная разность напряжений между измеряемым и квантованным напряжением эталона измеряется нановольтметром на пределе 10 мВ. Если измеренная разность напряжений больше 235 мкВ, то управляющая программа осуществляет настройку на следующую ступеньку, на которой напряжение эталона будет ближе к измеряемому.

Государственный первичный эталон напряжения ВНИИМ выполнен на основе преобразователя частота—напряжение на ДМ производства ПТБ (Германия) и имеет выходное напряжение до 10 В. Частота облучения микросхемы от генератора миллиметровых волн равна 72 ГГц, ее стабильность и точность определяются схемой формирования частот с опорой на рубидиевый стандарт частоты. Напряжение, воспроизводимое эталоном сравнения, измеряется при встречном включении с квантованным напряжением первичного эталона через нановольтметр Keithley 2182A. Разность напряжений эталона сравнения и эталона ВНИИМ не превышает 10 мкВ. В процессе измерений происходит переключение полярностей этих эталонов, чтобы исключить напряжения смещения в цепи сравнения и нуля нановольтметра, а также термоЭДС измерительной цепи.

При международных сличениях эталонов постоянного напряжения приняты два вида сличений:

с использованием транспортируемых эталонов сравнения на стабилитронах, в качестве которых обычно служат исследованные меры напряжения на 1,018 и 10 В, и непосредственное сличение джозефсоновских эталонов (так называемые прямые сличения).

Сличения с применением мер напряжения на стабилитронах кроме обеспечения связи национальных эталонов также имеют большую практическую значимость. Национальные эталоны, выполненные на основе эффекта Джозефсона, воспроизводят единицу напряжения (1 или 10 В) при температуре жидкого гелия и обычно используются 2—4 раза в год. Далее воспроизводимые напряжения хранятся при помощи мер напряжения и групповых эталонов на нормальных элементах. Полученные при проведении сличений результаты позволяют надежно определить предельные возможности мер при хранении и передаче единицы напряжения. Знание их параметров обеспечивает калибровку средств измерений (СИ) на высоком уровне точности и при отключении джозефсоновских эталонов. Как показал опыт работы с эталоном вольты БелГИМ [5], имеются трудности при калибровке многих СИ в случае непосредственного их подключения к эталону, например, при больших уровнях

шумов (более 1 мкВ) мер и калибраторов. Выходное напряжение эталона БелГИМ воспроизводится в пределах 1 мВ — 10 В, что очень важно при калибровке высокоточных калибраторов на диапазонах с малым уровнем сигнала (220 мВ и 2,2 В). Однако при большом выходном сигнале калибратора (на пределе 11 В) резко возрастают шумы, поэтому уровень 10 В калибруется только с использованием меры напряжения. Для оценки неопределенности калибровки СИ в диапазоне 1—10 В необходимо иметь оценку неопределенности воспроизводимых напряжений эталона вольты БелГИМ, включая неопределенность передачи единицы напряжения при помощи мер напряжения на стабилитронах.

Напряжения 1,018 и 10 В мер 732В БелГИМ регулярно исследуются как с использованием эталона на нормальных элементах, так и эталона на эффекте Джозефсона [6, 7]. Это позволило выбрать две ($Z1$ и $Z2$) наиболее стабильные меры. Изменение выходных напряжений мер по уровню 1,018 В в течение года не превышает 2 мкВ, а по уровню 10 В — не более 5 мкВ. При сличениях в качестве эталонов сравнения применяли меры напряжения $Z1$ и $Z2$ на стабилитронах. Оценки параметров этих эталонов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки параметров эталонов сравнения $Z1$ и $Z2$

Эталон сравнения	Номинальное напряжение, В	Температурный коэффициент сопротивления, ppm/кОм		Барический коэффициент сопротивления, ppm/кПа	
		значение коэффициента	неопределенность	значение коэффициента	неопределенность
$Z1$	1,018	0,40	0,1	0,014	0,01
	10	0,43	0,1	0,015	0,01
$Z2$	1,018	0,30	0,1	0,016	0,01
	10	0,78	0,1	0,019	0,01

Эталоны сравнения были доставлены во ВНИИМ по железной дороге в течение 16 ч в качестве ручной клади. По прибытию во ВНИИМ меры были выдержаны 6 ч, что позволило завершить зарядку их аккумуляторов. После завершения измерений во ВНИИМ эталоны сравнения были доставлены в БелГИМ тем же путем и затем выдержаны 4 ч для зарядки аккумуляторов в нормальных условиях.

Измерения эталонов сравнения проводили по согласованной методике [4, 8] при встречном включении мер и эталонов через нановольтметр с изменением полярности напряжения мер и эталонов. Питание мер отключали от сети 230 В, 50 Гц за 2 ч до начала измерений. Корпус и экран мер заземляли.

Контролировали условия измерений: температуру в помещении, относительную влажность воздуха, атмосферное давление и температуру внутри мер, измеряя сопротивления термисторов, расположенных в корпусах мер. Изменение сопротивлений термисторов составляет порядка 2 кОм на 1 °С. При измерениях в БелГИМ и во ВНИИМ меры и эталоны находились в экранированных помещениях.

Результаты измерений представлены в табл. 2, 3 в виде средних значений для эталонов сравнения при выходных напряжениях 1,018 и 10 В, приведенных к средней дате измерений во ВНИИМ (27.07.2011 г.); значений стандартных не-

Таблица 2

Результаты измерений эталона сравнения Z1 с поправками

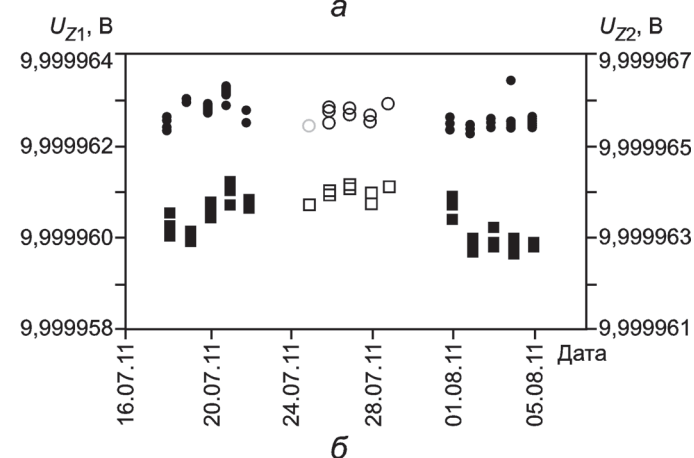
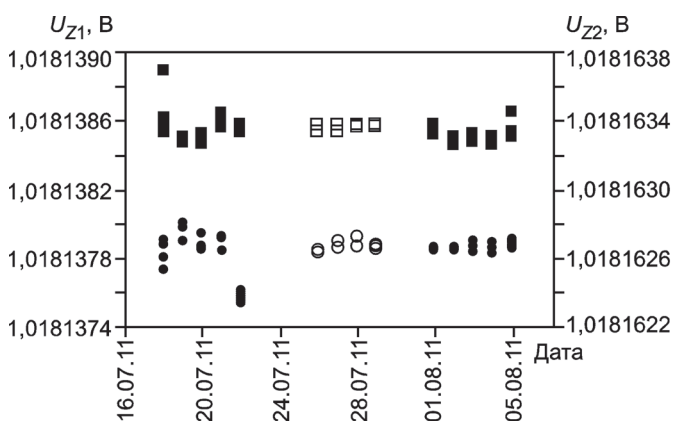
Институт	U_Z , мкВ	u_A , нВ	u_B , нВ	u , нВ	R , кОм	p , кПа	H , %
БелГИМ	1018137,844	17	6	18	38,154	98,77	61,4
ВНИИМ	1018137,851	11	5	12	38,144	101,24	60,4
БелГИМ	9999962,64	70	6	70	38,044	98,77	61,4
ВНИИМ	9999962,36	70	5	70	38,040	101,24	60,4

Таблица 3

Результаты измерений эталона сравнения Z2 с поправками

Институт	U_Z , мкВ	u_A , нВ	u_B , нВ	u , нВ	R , кОм	p , кПа	H , %
БелГИМ	1018163,333	12	6	14	38,154	98,77	61,4
ВНИИМ	1018163,337	7	5	9	38,144	101,24	60,4
БелГИМ	9999963,22	78	6	78	38,044	98,77	61,4
ВНИИМ	9999963,53	70	5	70	38,040	101,24	60,4

определенностей u_A (типа А), u_B (типа В) и соответствующей суммарной неопределенности u для каждого института; средних значений сопротивлений термисторов (для оценки температуры внутри мер), атмосферного давления p и влажности H .



Результаты измерений выходного напряжения 1,018 (а) и 10 В (б) эталонов сравнения в БелГИМ и ВНИИМ без введения поправок:
 ● Z1, ■ Z2 БелГИМ, ○ Z1, □ Z2 ВНИИМ

На рисунках а и б показаны результаты измерений выходного напряжения эталонов сравнения.

Результаты ключевых сличений БелГИМ при напряжениях 1,018 и 10 В с использованием эталонов сравнения БелГИМ Z1 и Z2, приведенных на дату сличений 27. 07. 2011 г., представлены в табл. 4. Некоррелированная неопределенность измерений $w = (r^2 + t^2 + v^2)^{1/2}$; неопределенность передачи на-

пряжения $x = (w_{Z1}^{-2} + w_{Z2}^{-2})^{-1/2}$; коррелированная неопределенность измерений $y = (s^2 + d^2)^{1/2}$, неопределенность $U_{ВНИИМ} - U_{БелГИМ}$ выражается как $f = (y^2 + b^2)^{1/2}$, если $x < b$, и $f = (y^2 + x^2)^{1/2}$, если $x > b$; неопределенность $U_{БелГИМ} - U_{МБМВ}$ принимает вид $g = (f^2 + a^2)^{1/2}$.

Таблица 4

Ключевые сличения БелГИМ

Характеристика	Значения характеристики, мкВ				Обозначение
	$U_{\text{ном}} = 1018000 \text{ мкВ}$		$U_{\text{ном}} = 10000000 \text{ мкВ}$		
	$Z1$	$Z2$	$Z1$	$Z2$	
$U_Z - U_{\text{ном}}$ (БелГИМ)	137,845	163,329	-37,36	-36,78	r
u_A (БелГИМ)	0,017	0,012	0,07	0,08	s
u_B (БелГИМ)	0,006		0,006		—
$U_Z - U_{\text{ном}}$ (ВНИИМ)	137,883	163,376	-37,26	-35,99	t
u_A (ВНИИМ)	0,011	0,007	0,07	0,07	d
u_B (ВНИИМ)	0,005		0,006		—
$U_Z - U_{\text{ном}}$ с поправкой по давлению и температуре (ВНИИМ)	137,851	163,337	-37,59	-36,43	—
Неопределенность по давлению и температуре (ВНИИМ)	0,026	0,025	0,25	0,26	v
Суммарная некоррелированная неопределенность	0,032	0,029	0,27	0,27	w
$U_{\text{БелГИМ}} - U_{\text{ВНИИМ}}$	-0,007	-0,004	0,23	-0,35	—
Среднее значение $U_{\text{БелГИМ}} - U_{\text{ВНИИМ}}$	-0,006		0,06		m
Неопределенность передачи	0,022		0,19		x
Разность $Z1$ и $Z2$ со средним значением	0,001		0,29		b
Коррелированная неопределенность	0,008		0,008		y

Окончание таблицы 4

Характеристика	Значения характеристики, мкВ				Обозначение
	$U_{\text{ном}} = 1018000 \text{ мкВ}$		$U_{\text{ном}} = 10000000 \text{ мкВ}$		
	$Z1$	$Z2$	$Z1$	$Z2$	
Неопределенность $U_{\text{ВНИИМ}} - U_{\text{БелГИМ}}$	0,023		0,29		f
$U_{\text{ВНИИМ}} - U_{\text{МБМВ}}$	0,001		−0,22		n
Неопределенность $U_{\text{ВНИИМ}} - U_{\text{МБМВ}}$	0,027		0,34		a
$U_{\text{БелГИМ}} - U_{\text{МБМВ}}$	−0,005		−0,28		$m+n$
Неопределенность $U_{\text{БелГИМ}} - U_{\text{МБМВ}}$	0,035		0,45		g

В табл. 5 представлена степень эквивалентности единицы, воспроизводимой эталоном напряжения БелГИМ при напряжениях 1,018 и 10 В, с опорным значением эталона напряжения МБМВ $d_i = U_{\text{БелГИМ}} - U_{\text{МБМВ}}$. Стандартная неопределенность разности $u(d_i) = u_{\text{лаб}}$, степень свободы $\nu_{\text{лаб}}$ равна эффективной степени свободы $\nu_{\text{эф}}$, коэффициент k_{95} соответствует уровню значимости 95 % для распределения Стьюдента, расширенная неопределенность $U(d_i) = k_{95}u_{\text{лаб}}$.

Таблица 5

Степень эквивалентности эталона БелГИМ

$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	$d_i, \text{ мкВ}$	$u_{\text{лаб}}, \text{ мкВ}$	$\nu_{\text{лаб}}, \nu_{\text{эф}}$	k_{95}	$U(d_i), \text{ мкВ}$
1,018	-0,005	0,035	125	1,98	0,070
10	-0,28	0,45	125	1,98	0,88

Результаты проведенных ключевых сличений национального эталона постоянного напряжения БелГИМ в 2011 г. свидетельствуют о значительном улучшении его метрологических характеристик по сравнению с аналогичными сличениями с использованием тех же эталонов сравнения в 2006 г. [9, 10]. При напряжении 1,018 В разность относительно опорного значения уменьшилась в 10 раз, а стандартная неопределенность более чем в 6 раз. В 2006 г. эталон вольты БелГИМ не воспроизводил напряжение со значением 10 В.

Завершенные сличения эталона БелГИМ при напряжениях 1,018 и 10 В показали, что аппаратура эталона имеет высокие метрологические характеристики, а полученные результаты находятся на международном уровне.

Литература

1. **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 Measuring DC Electrical Voltage and Electromotive Force // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 3. P. 228—232.
2. **Avrons D. e. a.** Bilateral comparison of 1.018V standards between the VNIIM and the BIPM // BIPM Rapport BIPM-99/2. BIPM Publ., 1999.
3. **Katkov A. S., Solve S., Stock M.** Bilateral Comparison of 10 V Standards between the VNIIM (Russia) and the BIPM (key comparison BIPM.EM-K11.b) // Rapport BIPM-07/07. BIPM Publ., 2007.
4. **Katkov A. S., Chernyaev P. A.** Final report on the bilateral key comparison COOMET.EM.BIPM-K11: Comparison of Josephson voltage standards by using Zener transfer standards // Metrologia. 2012. V. 49. Tech. Suppl. 01008.
5. **Josephson** Voltage Standard supraVOLTcontrol [Электрон. ресурс]. http://www.supracon.com/en/josephson_voltage_standard.htm
6. **Коломиец Т. А., Черняев П. А.** Исследование стабильности выходных напряжений мер 732В и 7000N фирмы Fluke // Метрология и приборостроение. Минск, 2007. № 4. С. 18—21.
7. **Катков А. С., Коломиец Т. А., Черняев П. А.** Подготовительные исследования и проведение сличений национальных эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь // Сб. трудов БелГИМ. Минск, 2007. Вып. 5. С. 8—14.
8. **Волкодатов А. А. и др.** Результаты сличений эталонов постоянного напряжения Российской Федерации и Республики Беларусь с помощью транспортируемых эталонов сравнения на диодах Зенера // Метрология и приборостроение. Минск, 2012. № 2. С. 20—25.
9. **Katkov A. S., Chernyaev P. A.** Final report on COOMET.EM.BIPM-K11.a: Comparison of Josephson voltage standards by using Zener transfer standards // Metrologia. 2007. V. 44. Tech. Suppl. 01003.
10. **Катков А. С., Черняев П. А.** Сличение национальных эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь с помощью эталонов сравнения на стабилитронах // Измерительная техника. 2007. № 7. С. 69—71; **Katkov A. S., Chernyaev P. A.** Comparison of national standards for the volt of the Russian federation and the Belarus republic by means of comparison standards in stabilitrans // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 7. P. 798—801.

Дата принятия 26.02.2013 г.