

Компактный эталон сравнения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В

А. С. КАТКОВ, В. Э. ЛОВЦЮС

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
С.-Петербург, Россия, e-mail: A.S.Katkov@vniim.ru*

Разработан компактный эталон сравнения в виде меры напряжения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В. Эталон предназначен для проведения международных сличений стационарных эталонов вольта на эффекте Джозефсона и обеспечивает прослеживаемость измерений, проводимых с помощью государственного первичного эталона вольта России, с эталоном вольта МБМВ с относительной неопределенностью менее $2 \cdot 10^{-10}$. Аппаратура эталона сравнения размещается в кейсе, что обеспечивает сохранность при его транспортировке.

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

The 10 V output voltage compact comparison standard based on Josephson effect is designed in the form of voltage measure. The comparison standard is intended for international comparisons of Josephson voltage stationary standards and provides the traceability of measurements conducted by means of Russia's state primary volt standard with volt standard of BIPM with relative uncertainty less than $2 \cdot 10^{-10}$. The comparison standard equipment is placed in a case and that provides the transportation safety.

Key words: *comparison standard, voltage measure, Josephson effect.*

Подписанная Россией Договоренность о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологичес-

кими институтами (НМИ), основана на установлении степени эквивалентности национальных измерительных эталонов, к которым, в частности, относится государственный первич-

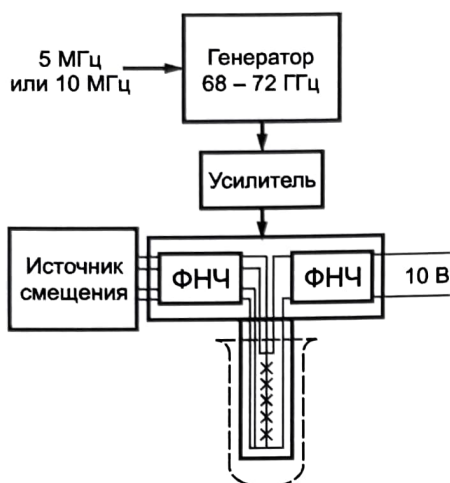


Рис. 1. Структурная схема меры напряжения

ный эталон единицы электрического напряжения — вольт, ГЭТ 13-01 [1, 2].

Международные сличения национальных эталонов вольт на основе квантового эффекта Джозефсона проводились либо при помощи специальных мер напряжения на стабилитронах [3], либо путем перемещения стационарных установок квантовых эталонов [4]. В первом случае неопределенность сличений ограничена параметрами мер напряжения на стабилитронах, включая шумы выходного напряжения, зависимость напряжения от окружающей температуры, давления и влажности, а также достаточно длительного периода проведения измерений, во втором — перемещение комплекса эталонной аппаратуры через границу обычно сопряжено с многочисленными техническими ограничениями и значительными материальными затратами.

Разработка эталонов сравнения (ЭС) для выполнения поставленных задач проводится в ВНИИМ в соответствии с [1]. Подобный транспортируемый квантовый эталон напряжения разработан в НИСТ (США) [5], однако его аппаратура построена как измеритель напряжения, поэтому в процессе сличений необходимо использовать меры напряжения на стабилитронах, с помощью которых происходит передача размера единицы. Завершаются работы по созданию эталона сравнения в МБМВ [6].

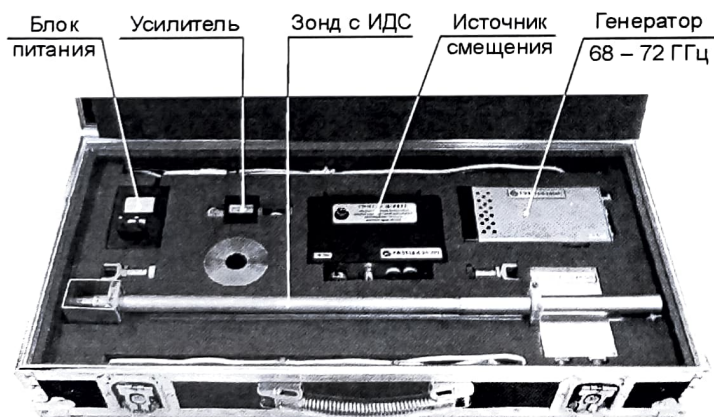


Рис. 2. Внешний вид эталона сравнения в транспортном кейсе

Первый ЭС в виде меры напряжения с выходным напряжением 1 В [7] разработан во ВНИИМ в 2003 г. и применялся при проведении международных сличений национальных эталонов вольт 12 стран Европы и международного эталона вольт МБМВ [6]. Полученные результаты показали перспективность использования подобной аппаратуры.

В настоящей работе представлен квантовый ЭС с выходным напряжением 10 В в виде меры напряжения. Разработка эталона проведена с участием Физико-технического института Германии (ПТБ, Брауншвейг) в рамках программы двустороннего сотрудничества между ВНИИМ и ПТБ. Эталон сравнения размещается в транспортном кейсе 700×350×200 мм, который защищает его при перемещении, в том числе в багажном отсеке самолета.

Эталон прошел апробацию при проведении ключевых сличений ВІРМ.ЕМ-К10.в с участием ВНИИМ и МБМВ.

Принцип действия и состав эталона сравнения. Принцип действия эталона основан на использовании эффекта Джозефсона, который связывает воспроизводимое выходное напряжение U с частотой f и фундаментальными физическими константами — зарядом электрона e и постоянной Планка h в соответствии с уравнением

$$U = 2efN / h = fN / K_J, \quad (1)$$

где N — целое число; K_J — константа Джозефсона.

Формирование выходного напряжения меры осуществляется интегральной джозефсоновской схемой (ИДС), содержащей переходы Джозефсона типа сверхпроводник — изолятор — нормальный металл — изолятор — сверхпроводник (СИНИС) [9], изготовленной в ПТБ. Интегральная схема помещается внутри экрана из криопермаллоя для защиты от магнитного поля Земли, охлаждается до температуры 4,2 К в среде жидкого гелия и облучается электромагнитными волнами миллиметрового диапазона. Вольт-амперная характеристика ИДС при облучении содержит квантовую ступень с напряжением, определяемым уравнением (1). Полярность напряжения ступени зависит от полярности тока смещения, подаваемого на ИДС. Регулировка тока смещения в пределах ширины ступени не вызывает изменения выходного напряжения меры, что позволяет использовать воспроизводимое напряжение для проведения сличений.

Мера содержит пять блоков (рис. 1, 2): криогенный преобразователь, выполненный в виде зонда, приспособленного к размещению в сосудах Дьюара различных конструкций с диаметром входного отверстия от 24 до 50 мм, сверхвысокочастотный (СВЧ) генератор с блоком питания, усилитель СВЧ-мощности и источник тока смещения ИДС. Мера рассчитана на работу в лабораторных условиях.

Криогенный преобразователь включает интегральную джозефсоновскую схему, содержащую 69350 переходов Джозефсона с критической силой тока 1 мА. Число переходов может изменяться в зависимости от мощности облучения, причем возможно появление квантовой ступени с дробным числом переходов. Другая особенность применяемой ИДС — гистерезисный характер вольт-амперной характеристики вблизи квантовой ступени, что обеспечивает отсутствие наклона ступени при воздействии низкочастотных помех малой амплитуды. Выходное напряжение ИДС составляет 10 В при частоте облучения около 70 ГГц. Ширина квантовой ступени по току составляет 100 мкА. Интегральная схема экрана расположена в нижней части зонда внутри магнитного экрана

из криопермаллоя. Зонд изготовлен из тонкостенной трубки (нержавеющая сталь) диаметром 21 мм, внутри которой располагаются волновод и три пары медных проводников. Одна пара используется для подачи тока смещения, две другие — для измерения напряжения. Проводники подключаются к выходным разъемам через фильтр низкой частоты (ФНЧ), состоящий из сверхпроводящей индуктивности, расположенной в нижней части зонда, и LC-фильтров, размещенных в верхней части зонда. При проведении измерений используется четырехзажимная схема подключения ИДС.

Передача СВЧ-мощности от генератора к ИДС осуществляется при помощи сверхразмерного круглого волновода диаметром 14 мм. Длина волновода равна 1 м, при этом ослабление входной мощности составляет не более 2,5 дБ. Зонд выполнен в виде разъемной конструкции, позволяющей уменьшить вдвое (до 63 см) его длину при транспортировке.

Генератор СВЧ построен на основе синтезатора и умножителя. Синтезатор преобразует опорную частоту 5 или 10 МГц в сигнал с изменяемой частотой в диапазоне до 9 ГГц. Затем происходит умножение частоты с коэффициентом 8 и усиление по мощности. Выходной сигнал генератора регулируется в диапазоне 68 — 72 ГГц, выходная мощность достигает 40 мВт. Опорная частота подается от внешнего высокостабильного генератора, используемого в стационарных эталонах вольты на эффекте Джозефсона. В связи с тем, что амплитудно-частотная характеристика как генератора, так и ИДС неравномерная, используется дополнительный усилитель мощности, применяемый для оптимизации рабочих параметров ИДС. Выходная мощность при этом достигает 80 мВт, что достаточно для формирования стабильной ступени напряжения 10 В на выходе ИДС.

Тракт СВЧ имеет гальваническую развязку с криогенным преобразователем, что позволяет значительно ослабить влияние источников помех на воспроизводимое напряжение и аппаратуру, участвующую в сличениях.

Источник смещения предназначен для установки рабочего тока ИДС в центре квантованной ступени напряжения, проверки ее наклона путем изменения тока смещения в пределах ширины ступени, а также контроля критического тока ИДС и наличия замороженных магнитных потоков, которые вызывают изменение рабочих параметров ИДС. Блок источника смещения содержит два аккумулятора с суммарным напряжением 18 В, потенциометр для регулировки тока смещения и переключатель его полярности, резистор для контроля тока через ИДС. Блок также содержит переключатель, коммутирующий внешний вольтметр для контроля силы тока, протекающего через ИДС, и выходного напряжения меры.

Методика измерений и анализ неопределенности. Напряжение U на выходе меры представляет сумму напряжения, воспроизводимого ИДС, и термоЭДС измерительной цепи. ТермоЭДС не превышает 300 нВ, ее дрейф составляет не более 10 нВ в час. Чтобы исключить термоЭДС, выходное напряжение меры измеряют при двух полярностях тока смещения, при этом

$$U = (U_+ - U_-)/2, \quad (2)$$

где U_+ , U_- — выходные напряжения меры при положительной и отрицательной полярностях тока смещения.

При выполнении измерений выходное напряжение меры включается последовательно с выходным напряжением эта-

лона вольты через компаратор, основу которого составляет нановольтметр. В соответствии с правилами проведения сличений анализ факторов, влияющих на измеряемую разность напряжений, выполняется в соответствии с Руководством по выражению неопределенности [10].

Основные источники неопределенности выходного напряжения меры приведены в табл. 1. К источникам неопределенности типа А относятся флуктуации термоЭДС и шумовые системы фазовой автоподстройки частоты, а также различного рода шумов и наводки, не подавленные системой экранирования меры. Значение неопределенности типа А при проведении сличений определяется статистической обработкой результатов измерений, при этом основной вклад в эту неопределенность вносит компаратор, входящий в состав эталона. Поэтому в табл. 1 приведена теоретическая оценка вклада выходного напряжения меры в неопределенность типа А. К источникам неопределенности типа В относятся сопротивление утечки между выходными проводниками и смещение частоты облучения СВЧ-источника сигнала.

Таблица 1

Оценка относительной стандартной неопределенности выходного напряжения транспортируемой меры напряжения

Источник неопределенности	Неопределенность	Оценка
Тепловой шум выходного сопротивления Флуктуации термоЭДС Фазовые шумы генератора СВЧ	Типа А (при измерении в полосе 0,1 Гц)	$0,1 \cdot 10^{-10}$ $0,03 \cdot 10^{-10}$ $0,03 \cdot 10^{-10}$
Сопротивление утечки Сдвиг частоты генератора СВЧ	Типа В	$0,9 \cdot 10^{-10}$ $0,5 \cdot 10^{-10}$
Суммарная неопределенность		$1 \cdot 10^{-10}$

Основной источник утечек в мере напряжения — цепь выходного напряжения, в которой установлены ФНЧ с керамическими конденсаторами. Предварительные измерения показали, что сопротивления, определяющие ток утечки, достигают 10^{12} Ом, что с учетом сопротивления выходной цепи на уровне 10 Ом дает оценку влияния утечки порядка 10^{-11} . Более тщательные исследования показали, что проявление эффекта абсорбции зарядов в конденсаторах фильтра приводит к временной зависимости тока утечки, который влияет на оценку неопределенности измерений. Схемы фильтра и метода измерений сопротивления утечки приведены на рис. 3, а, б.

В соответствии с рис. 3, а сопротивление, определяющее ток утечки между измерительными выводами меры напряжения, рассчитывается по формуле

$$R_L = R/3 + R/3 = 2R/3. \quad (3)$$

Сопротивление контактной платы $R_{пл}$, закрепленной на корпусе, не учитывается при расчете вследствие незначительных токов утечки при температуре жидкого гелия.

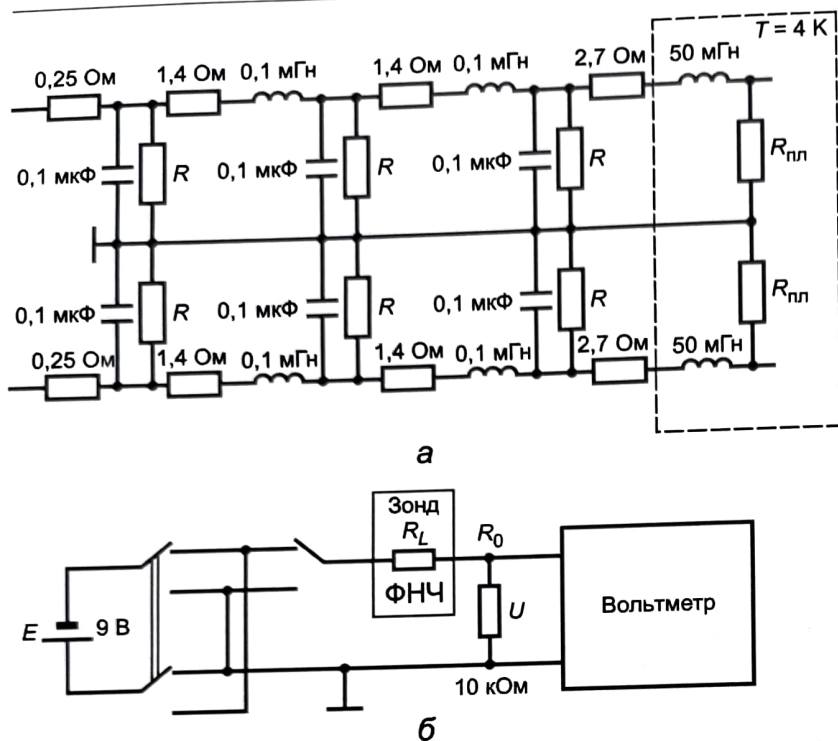


Рис. 3. Схема фильтра низких частот (а) и схема измерения сопротивления утечки R_L (б)

Влияние сопротивления утечки в виде отношения сопротивления проводников к сопротивлению утечки может быть выражено как

$$\delta_{\text{ут}} = (1/\sqrt{3}) \{ (2,7 \cdot 2/2R) + [(2,7 \cdot 2 + 1,4 \cdot 2)/2R] +$$

$$+ [(2,7 \cdot 2 + 1,4 \cdot 4)/2R] \} = 12,3 \cdot \sqrt{3} R = 8,2 \sqrt{3} R_L = \sqrt{3} r_{\text{экв}}/R_L,$$

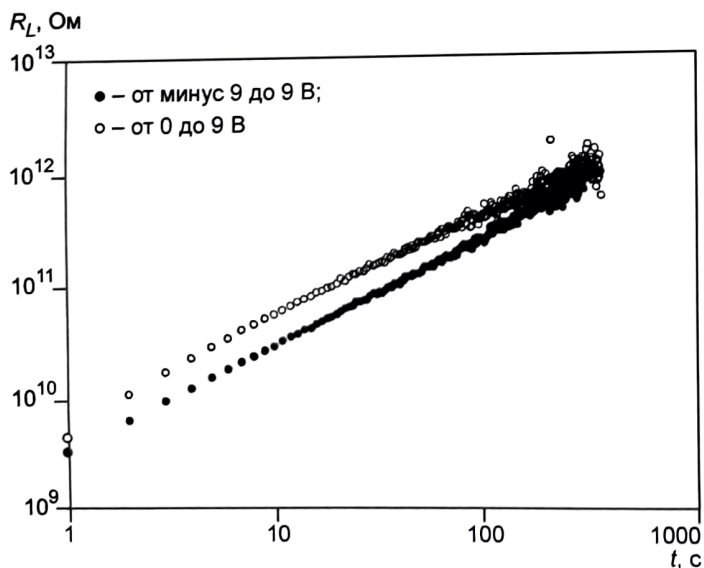


Рис. 4. Результаты измерения сопротивления утечки при скачках испытываемого напряжения от нуля до 9 В и от -9 В до +9 В

где $r_{\text{экв}} = 8,2 \text{ Ом}$ — эквивалентное сопротивление измерительных проводников; R_L — сопротивление утечки фильтра.

Изменение сопротивления утечки определяли с момента переключения напряжения на измерительных проводниках путем регистрации силы тока, протекающего по сопротивлению R_0 в схеме, представленной на рис. 3, б. Постоянная времени заряда емкости фильтра не превышает 4 мкс, поэтому процесс изменения силы тока в течение нескольких минут определяется эффектом абсорбции зарядов в диэлектрике конденсаторов. Результаты измерения сопротивления утечки $R_L = U/I R_0$, выполненные при различных значениях напряжений на измерительных проводниках (рис. 4), показали, что R_L изменяется от $2,9 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$ через 10 с после начала процесса переключения, принимает значение $5 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$ через 18 с и достигает значения $5 \cdot 10^{11} \text{ Ом}$ через 3 мин. Для оценки неопределенности влияния утечки в соответствии с методикой измерения выбрано значение $5 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$, которое предполагает выдержку в течение 15–20 с после смены полярности и установки требуемого напряжения на выходе ГЭТ 13-01.

Эталон сравнения исследовали в рамках подготовки к ключевым сличениям ВРМ.ЕМ-К10.б. Выходное напряжение меры $U_{\text{ЭС}}$ сличалось с выходным напряжением государственного первичного эталона вольты ГЭТ 13-01. Результат сличения

показал, что напряжения на уровне 10 В, воспроизводимые мерой и первичным эталоном, соотносятся как

$$U_{\text{ЭС}}(\text{расч}) - U_{\text{ЭС}}(\text{изм}) = U_{\text{ЭС}}(\text{расч}) - (U_{\text{ГЭТ 13-01}} + \Delta U) = 0,0 \text{ нВ}$$

или разность размеров единицы напряжения, воспроизводимой эталоном сравнения и первичным эталоном,

$$U_{\text{ЭС}} - U_{\text{ГЭТ 13-01}} = 0,0 \text{ нВ}$$

при суммарной стандартной неопределенности $u_c = 1,8 \text{ нВ}$.

Расчетное напряжение на выходе меры $U_{\text{ЭС}}(\text{расч})$ получено при частоте облучения 69,73188 ГГц и номере ступени 69350,5 (ступень с дробной частью). Измеренное напряжение $U_{\text{ЭС}}(\text{изм})$ определено с помощью напряжения первичного эталона (частота облучения 72,0728 ГГц, номер ступени 67098) и полученной разности напряжений $\Delta U = 19,7 \text{ нВ}$.

В качестве измерителя разности напряжений использован нановольтметр Keithley 2182 со следующим режимом работы: предел измерения 10 мВ, частота измерений «1 p/s», аналоговый фильтр отключен, цифровой фильтр «great» включен, счетчик «counter 20», число усреднений 10. Среднее значение и стандартное отклонение измеряемой разности было получено из показаний нановольтметра. Время, необходимое для выполнения измерения, составляло порядка 40 с. Оно включало: 10 с — измерения при положительной полярности (U_+), 20 с — переключения полярности (U_-) и 10 с — измерения при отрицательной полярности. Затем начинали с измерений при отрицательной полярности и заканчивали измерениями при положительной полярности и т. д. Было выполнено шесть серий по десять измерений. Три серии при положительном включении нановольтметра (D_+) и три серии при отрицательном включении (D_-).

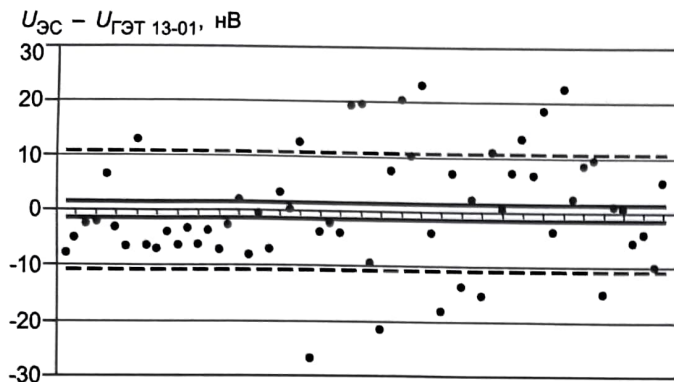


Рис. 5. Результаты измерений разности выходного напряжения меры напряжения 10 В и напряжения государственного первичного эталона ГЭТ 13-01:

пунктирная линия — среднее квадратическое отклонение (СКО) единичного измерения, сплошная линия — СКО результата измерений

Измерения выполнялись по следующей схеме: U_+D_+ , U_-D_+ , U_+D_+ , U_+D_+ , U_+D_+ , U_+D_+ , U_+D_+ . Данные измерений использованы для расчета напряжения, воспроизводимого мерой. Первая, вторая и шестая серии выполнены при положительной полярности включения нановольтметра, остальные при отрицательной полярности.

Результаты измерений приведены на рис. 5, а оценка неопределенности проведенных сличений меры напряжения с ГЭТ 13-01 представлена в табл. 2.

Таблица 2

Относительная стандартная неопределенность сличений эталона сравнения с ГЭТ 13-01

Источники неопределенности	Неопределенность	ЭС	ГЭТ 13-01
Разность выходных напряжений	Типа А (измерения)	$1,4 \cdot 10^{-10}$	
Нуль-детектор	Типа В (оценка)	$0,02 \cdot 10^{-10}$	
Сопровождающие утечки		$0,9 \cdot 10^{-10}$	$0,12 \cdot 10^{-10}$
Сдвиг частоты генератора СВЧ		$0,5 \cdot 10^{-10}$	$0,5 \cdot 10^{-10}$
Суммарная неопределенность	$1,8 \cdot 10^{-10}$		

Полученные результаты подтвердили, что оценка неопределенности выходного напряжения меры согласуется с результатами измерений, метрологические и технические характеристики меры удовлетворяют поставленной задаче. Результаты исследования использованы при проведении ключевых сличений национального эталона вольты России и МБМВ в ноябре 2010 г.

Заключение. Разработан портативный ЭС в виде меры напряжения на эффекте Джозефсона, предназначенный для

проведения международных сличений стационарных эталонов вольты с выходным напряжением 10 В. Проведенные исследования показали, что мера обеспечивает относительную неопределенность сличений на уровне $2 \cdot 10^{-10}$, что позволяет использовать ее как ЭС при организации ключевых сличений в рамках региональных метрологических организаций, обеспечивая прослеживаемость измерений с эталоном МБМВ.

Литература

- ГОСТ 8.027—2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы.
- 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.
- Avrons D. e. a. Bilateral comparison of 1.018V standards between the VNIIM and the BIPM // Rapport BIPM-99/2.
- Behr R., Niemeyer J., Katkov A. Comparison of the Josephson Voltage Standards of VNIIM and PTB // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2001. V. 50. P. 203—205.
- Kupferman S. L., Hamilton C. A. Deployment of a compact, transportable, fully automated Josephson voltage standard // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1999. V. 48. P. 249—252.
- Solve S., Chayramy R. The BIPM compact Josephson voltage standard // Conf. Digest CPEM 2010. Daejeon, 2010. P. 155—156.
- Катков А. С. Транспортируемый эталон сравнения на эффекте Джозефсона // Измерительная техника. 2005. № 2. С. 48—51. Katkov A. S. Portable Comparison Standard Based on the Josephson Effect // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 2. P. 175—179.
- Behr R., Katkov A. S. Final Report on the key comparison EUROMET.BIPM.EM-K10.a. Comparison of Josephson array voltage standards by using a portable Josephson transfer standard // Metrologia. 2005. V. 42. N 1A (Techn. Suppl. 2005). 01005.
- Müller F. e. a. Improved 10 V SINIS series arrays for applications in AC voltage metrology // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17. P. 649—652.
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Geneva: ISO, 1995.

Дата принятия 25.04.2011 г.