

2. Kasparov K. N., Ivlev G. D., Belaziorava L. I., Mironov V. N., Penyazkov O. G. High temperature measurement in fast phenomena by spectrometry of photoelectrons // High Temperatures-High Pressures. 2012. V. 41. No. 5. P. 325—340.

3. Краснов К. В., Осипов Г. И., Ростовцева В. В. Метод определения температуры широкополосным оптическим пирометром спектрального отношения // Измерительная техника. 1987. № 3. С. 10—12.

4. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.

5. Лукирский П. И. О фотоэффекте. Л.; М.: Гостехтеоретиздат, 1933.

6. Арсеньева-Гейль А. Н. Внешний фотоэффект с полупроводников и диэлектриков. М.: Гостехтеоретиздат, 1957.

7. Физические величины: справочник / Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Дата принятия: 26.10.2016.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.321

Воспроизведение вольта на основе переходов Джозефсона СИС- и СНС-типа

А. С. КАТКОВ, В. Э. ЛОВЦЮС, А. И. БЫКОВ, В. И. ШЕВЦОВ, Г. В. НОВОДЕРЕЖКИН

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

Представлены результаты сравнения воспроизводимого постоянного напряжения при использовании аппаратуры на основе переходов Джозефсона СИС- и СНС-типа. Полученная разность воспроизводимых напряжений в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ —10 В не превысила 0,5 нВ.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, джозефсоновские микросхемы, воспроизведение напряжения, сравнения эталонов вольта.

The results of dc voltage comparison reproduced by apparatus based on SIS and SNS type Josephson junctions are presented. The resulting difference of reproducible voltages in the range from 1 mV to 10 V is not exceeded 0,5 nV.

Key words: Josephson effect, Josephson arrays, voltage reproduction, comparisons of voltage standards.

Внедрение эффекта Джозефсона для воспроизведения единицы электрического напряжения в РФ началось с применения так называемых точечных ниобиевых контактов [1], которые были прообразом современных переходов Джозефсона СНС-типа (сверхпроводник — нормальный металл — сверхпроводник). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) контакта позволяла изменять воспроизводимое напряжение в диапазоне 0—1,5 мВ (100 ступенек при частоте облучения 8 ГГц) за счёт регулировки протекающего через переход тока. Развитие технологии определило создание переходов СИС-типа (сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник), основное преимущество которых заключалось в воспроизведении напряжения при нулевом токе через переход. Это снизило требования к разбросу параметров переходов при их последовательном соединении, что в итоге привело к возможности создания джозефсоновских микросхем с выходным напряжением 1 В, а позже и 10 В. При этом ВАХ переходов СИС-типа является многозначной, что затрудняет установление воспроизводимого напряжения заданного значе-

ния и не позволяет получать стабильное во времени напряжение ввиду спонтанных перескоков с одного квантового уровня на другой. Дальнейший технологический прогресс позволил снизить разброс параметров переходов, поэтому цепочки из переходов СНС-типа стали конкурировать с переходами СИС-типа. Преимуществом первых является стабильность выходного напряжения и большая помехоустойчивость в результате более широкой (до 100 раз) квантовой ступени. Ещё одно преимущество переходов СНС-типа — однозначность ВАХ, что даёт возможность формировать заданную последовательность квантовых уровней напряжения или реализовывать квантовое цифроаналоговое преобразование (ЦАП). В связи с тем, что ЦАП связано с необходимостью использования программных средств управления, такие микросхемы называют программируемыми. Аппаратура на основе микросхемы СИС-типа (производство Германии, РТВ) функционирует во ВНИИМ с 1999 г. и утверждена в качестве Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения ГЭТ 13—01. Точностные характеристики

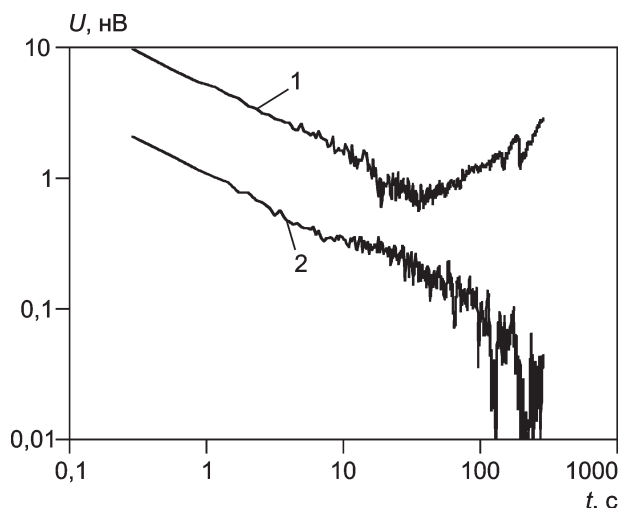


Рис. 1. Зависимость шумового напряжения U от времени t усреднения:

1 — нановольтметр Kethley 2182; 2 — усилитель EM A10

аппаратуры эталона неоднократно подтверждены ключевыми сличениями, в том числе, с использованием транспортируемых эталонов вольты на эффекте Джозефсона [2—9].

В настоящее время проводятся исследования программируемой джозефсоновской микросхемы с выходным напряжением 10 В (производитель Supracor, Германия) с целью её дальнейшего применения в составе ГЭТ 13—01. С этой целью разработан и исследован комплекс аппаратуры, включающий криогенный зонд, блок смещения и источник СВЧ-сигнала. Для визуального контроля характеристик микросхемы изготовлен специализированный блок. Особенностью криогенного зонда являются коаксиальные кабели для управления 18 сегментами микросхемы, однако это

повышает теплоприток к микросхеме, увеличивает расход гелия и добавляет трудности при компоновке зонда. Положительным отличием программируемой микросхемы является возможность реализации квантового ЦАП, что расширяет функциональные возможности эталона при калибровке различных средств измерений, включая аналого-цифровые преобразователи и цифроаналоговые преобразователи в режиме реального времени, а также измерения линейности преобразования измеряемого напряжения прецизионных средств измерений.

Основным элементом экспериментального образца на основе программируемой джозефсоновской микросхемы (ЭО ПДМ) является криогенный зонд, реализующий следующие функции: размещения микросхемы при температуре 4,2 К; ослабления электромагнитных полей и земного магнитного поля; подачи управляющих и съёма информационных сигналов; обеспечения низкого уровня термоЭДС, утечек, сопротивления измерительных цепей, малого уровня теплопередачи; размещения коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом; соединения с СВЧ-генератором при малом уровне затухания сигнала и отсутствии гальванической связи; отсутствия термоакустических колебаний гелия; устранения замороженных магнитных потоков в микросхеме.

Для управления микросхемой СНС-типа разработан блок смещения, функциями которого являются: управление сегментами микросхемы с помощью 18 каналов блока смещения; задание расчётного уровня управляющего напряжения на каждом канале; реализация напряжения $1 \cdot 10^{-3}$ —10 В, воспроизводимого микросхемой; обеспечение выходного сопротивления блока смещения 50 Ом; обеспечение рабочих токов на выходе блока смещения в диапазоне до 10 мА; обеспечение дискретности изменения управляющего напряжения на уровне 180 мкВ.

Разработан алгоритм управления напряжениями, подаваемыми на 18 сегментов микросхемы СНС-типа, и соответствующая управляющая программа. В процессе выполнения алгоритма формируются активные и пассивные каналы управления. Активные каналы формируют расчётные токи через микросхему, пассивные каналы — расчётные напряжения без управляющих токов. Все напряжения формируются относительно одной общей точки. Регулировка напряжения на выходе канала производится на уровне 1 мВ для всех напряжений, что обеспечивает установку рабочего тока микросхемы с погрешностью порядка 20 мкА при ширине квантовой ступени на уровне 1 мА.

Работу микросхемы обеспечивает синтезатор СВЧ-сигнала с СВЧ-усилителем, разработанные по индивидуальному заказу. Диапазон частот, используемых для облучения микросхемы, находится в пределах 69—72 ГГц. Рабочий уровень мощности СВЧ-сигнала, поступающего на вход криогенного зонда, не превышает 80 мВт.

Разработан специализированный блок, который позволяет визуально контролировать ВАХ джозефсоновской микросхемы на экране осциллографа при различных режимах её работы с целью определения критического тока в диапазоне $-10 \dots +10$ мА, ширины ступеней по току и рабочих токов сегментов микросхемы, выявления замороженных магнитных полей в джозефсоновской микросхеме и определения влияния помех.

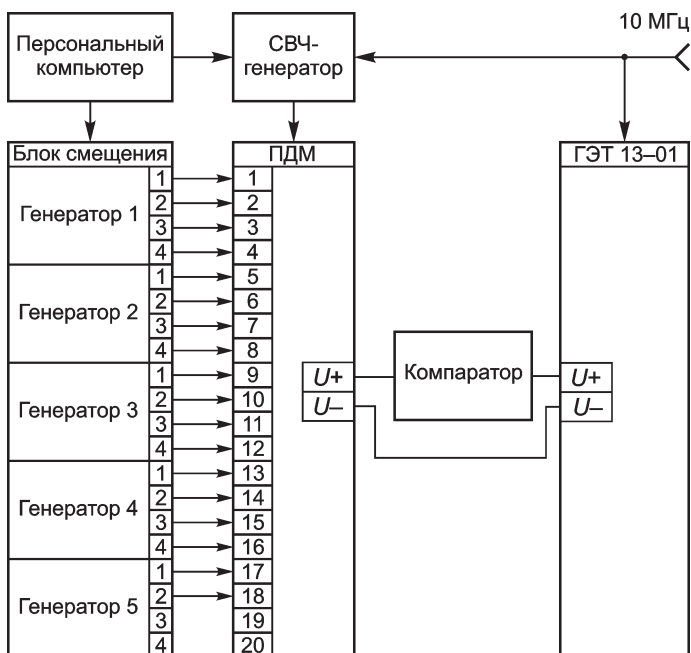


Рис. 2. Схема сравнения выходных напряжений ГЭТ 13—01 и ЭО ПДМ

Таблица 1

Технические параметры ГЭТ 13—01 и ЭО ПДМ

Параметр	Номинальное напряжение, В									
	10		1		100 · 10 ⁻³		10 · 10 ⁻³		1 · 10 ⁻³	
	ГЭТ 13—01	ЭО ПДМ	ГЭТ 13—01	ЭО ПДМ	ГЭТ 13—01	ЭО ПДМ	ГЭТ 13—01	ЭО ПДМ	ГЭТ 13—01	ЭО ПДМ
Частота облучения, ГГц	72,0476	69,4525	72,1788	69,5524	72,0000	72,0000	72,0000	72,0000	72,0000	72,0000
Число переходов	67122	69624	6700	6953	672	672	68	68	7	7
Ток источника смещения, мА	0	4,1	0	4,1	0	4,1	0	4,1	0	4,1
Расчётное напряжение, мкВ	1000000,014	999999,1811	1000000,12407	999999,87014	100050,06225	100050,06225	10124,11344	10124,11344	1042,18815	1042,18815
Расчётная разность, нВ	-833,8		-253,93		0		0		0	

Экспериментальный образец ПДМ исследован с целью определения его метрологических характеристик. Исследованы систематические составляющие погрешности воспроизводимого напряжения, связанные с возможными утечками в измерительной цепи, влиянием термоЭДС, наводок, дефектами в джозефсоновской микросхеме. Проведённые исследования позволили выявить высокую чувствительность ЭО ПДМ к электрическим помехам, в частности, связанным с функционированием преобразователей в источниках питания, вычислительными процессами в компьютере, влиянием фильтров сетевых подключений и др. В каждом отдельном случае проведены исследования с целью снижения или исключения влияния помех в результате применения специализированных фильтров и дополнительных источников питания с аналоговым управлением.

В качестве итогового исследования проведено сравнение напряжения, воспроизводимого ЭО ПДМ, с напряжением, воспроизводимым ГЭТ 13—01. Для этого выходные напряжения ЭО ПДМ и ГЭТ 13—01 включали встречно друг другу через нановольтметр Kethley 2182. Были проведены серии по 30 измерений разности при положительном и отрицательном напряжениях. Время усреднения одного измерения составляло 10 с. Результаты измерений положительной и отрицательной разности усредняли с целью исключения влияния термоЭДС и смещения нуля в нановольтметре. Измерения при напряжениях 1 и 10 В выполняли с учётом того, что эквивалентность ГЭТ 13—01 международному эталону вольта МБМВ при данных напряжениях подтверждена результатами международных ключевых сличений. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность установки напряжений с отличием от номинального значения менее 1 мкВ. Для номинальных напряжений 100, 10 и 1 мВ выбрана частота облучения переходов 72 ГГц с целью достижения разности сравниваемых напряжений менее 1 мкВ. Для сравнения выходного напряжения ЭО ПДМ и напряжения ГЭТ 13—01 использовали компаратор, состоящий из цифрового нановольтметра Kethley 2182 и нановольтового усилителя EM A10. Предварительно были изучены их шумовые характеристики при короткозамкнутом входе (рис. 1). Результаты исследований показали, что шумы усилителя ниже, чем шумы нановольтметра. Однако применение усилителя не позволяет заметно снизить шумы, так как основным их источником является нестабильность термоЭДС измерительной цепи, соединяющей компаратор и два криогенных зонда температурой 4,2 К. Нестабильность термоЭДС связана с притоком теплоты по медным кабелям, находящимся как при комнатной температуре, так и при криогенной температуре джозефсоновской микросхемы.

Сравнения выходных напряжений ЭО ПДМ и ГЭТ 13—01 (рис. 2) проведены при номинальных напряжениях 10; 1 В и 100; 10; 1 мВ. Технические параметры ГЭТ 13-01 и ЭО ПДМ представлены в табл. 1.

Измерения проводили в экранированной камере при минимальном уровне внешних помех. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные сравнения выходных напряжений ГЭТ 13—01 и ЭО ПДМ

Параметр	Номинальное напряжение, В				
	10	1	$100 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Средняя разность измерений выходных напряжений ГЭТ 13—01 и ЭО ПДМ, нВ	–833,5	–254,02	–0,07	0,2	0,04
Среднее квадратическое отклонение средней разности при 30 измерениях, нВ	0,6	0,2	1,6	0,85	0,7
Абсолютная погрешность средней разности, нВ	–0,3	0,09	–0,07	0,2	0,04

Результаты исследований показали работоспособность ЭО ПДМ и возможность достижения высоких метрологических характеристик. Выявлены факторы, которые оказывают влияние на достижение высокой точности и требующие проведения дальнейших исследований для их устранения.

В дальнейшем ЭО ПДМ предполагается ввести в состав ГЭТ 13—01 при проведении работ по его совершенствованию.

Литература

1. **Айнитдинов Х. А., Боровицкий С. И., Малиновский Л. Л.** Нестационарный эффект Джозефсона на точечном контакте при высоких напряжениях // ЖЭТФ. 1979. Т. 76. № 5. С. 1342—1350.

2. **Avrons D., Katkov A., Krzhimovsky V., Reymann D., Witt T. J.** Bilateral comparison of 1.018V standards between the VNIIM and the BIPM, BIPM Rapport BIPM-99/2. [Электрон. версия] <http://www.bipm.org/pdf/RapportBIPM/1999/02.pdf> (дата обращения: 20.11.2016).

3. **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.

4. **Behr R. and 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. V. 42. (Technical Supplement 2005). P. 01005. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/42/1A/01005/meta>

5. **Katkov A. S., Cherhyaev P. A.** Final report on COOMET.EM.BIPM-K11.a: Comparison of Josephson voltage standards by using Zener transfer standards // Metrologia. 2007. V. 44. (Technical Supplement 2007). P. 01003.

6. **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, BIPM Publications. 2007. P. 1—10.

7. **Катков А. С., Солве С.** Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 70—73.

8. **Катков А. С., Черняев П. А.** Ключевые сличения эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь // Измерительная техника 2013. № 5. С. 69—72.

9. **Катков А. С., Черняев П. А.** Ключевые сличения эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь с помощью квантового эталона сравнения // Измерительная техника. 2016. № 4. С. 69—71.

Дата принятия: 20.01.2017.