

Научная статья

УДК 621.317.32

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-30-35>

## Перспективы применения квантовых мер напряжения на эффекте Джозефсона для совершенствования эталонов вольт

Александр Сергеевич Катков<sup>1✉</sup>, Анастасия Николаевна Петровская<sup>2</sup>, Глеб Борисович Гублер<sup>3</sup>, Владимир Иванович Шевцов<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>A.S.Katkov@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5597-9437>

<sup>2</sup>A.N.Petrovskaya@vniim.ru

<sup>3</sup>G.B.Gubler@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1418-3680>

<sup>4</sup>V.I.Schevtsov@vniim.ru

**Аннотация.** Описано совершенствование эталонов вольт на основе эффекта Джозефсона как этап развития квантовых эталонов вольт ВНИИМ. Создание и совершенствование аппаратуры проведено на базе джозефсоновских микросхем типа «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» для воспроизведения постоянных напряжений до 10 В. Представлены результаты разработки транспортируемых квантовых эталонов на базе джозефсоновских безгистерезисных микросхем типа «сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник» и «сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник». Показано, что безгистерезисные микросхемы можно применять для воспроизведения постоянных напряжений, а также напряжений произвольной формы путём аппроксимации сигналов джозефсоновскими ступенями и импульсной сигма-дельта модуляции, позволяющей воспроизводить напряжение с заданным уровнем гармоник. Приведены результаты исследования передачи единицы вольт измерительным каналам переменного напряжения с высокоточными аналого-цифровыми преобразователями из состава Государственного первичного эталона единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2019.

**Ключевые слова:** эффект Джозефсона, джозефсоновская микросхема, квантовая мера напряжения, сверхпроводник, изолятор, нормальный металл

**Для цитирования:** Катков А. С., Петровская А. Н., Гублер Г. Б., Шевцов В. И. Перспективы применения квантовых мер напряжения на эффекте Джозефсона для совершенствования эталонов вольт // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 30–35. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-30-35>

## Prospects for the application of voltage quantum measures based on the Josephson effect for improving Volt standards

Alexander S. Katkov<sup>1✉</sup>, Anastasia N. Petrovskaya<sup>2</sup>, Gleb B. Gubler<sup>3</sup>, Vladimir I. Shevtsov<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>A.S.Katkov@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5597-9437>

<sup>2</sup>A.N.Petrovskaya@vniim.ru

<sup>3</sup>G.B.Gubler@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1418-3680>

<sup>4</sup>V.I.Schevtsov@vniim.ru

**Abstract.** The improvement of volt standards based on the Josephson effect as a stage in the development of VNIIM quantum volt standards is described. The creation and improvement of equipment was carried out based on Josephson arrays of the “superconductor – insulator – superconductor” type for reproducing direct current voltages up to 10 V. The results of the development of transportable quantum standards based on Josephson hysteresis-free array of the “superconductor – normal metal – superconductor” and “superconductor – insulator – normal metal – insulator – superconductor” are presented. It is shown that hysteresis-free arrays can be used to reproduce constant voltages, as well as voltages of arbitrary shape by approximating signals with Josephson steps and pulsed sigma-delta modulation, which makes it possible to reproduce voltage with a given level of harmonics. The results of a study of the transfer of a unit of volt to measuring channels of alternating voltage with high-precision analog-to-digital converters from the State primary standard of electric power units in the frequency range from 1 to 2500 Hz GET 153-2019 are presented.

**Keywords:** Josephson effect, Josephson array, quantum measure of voltage, superconductor, insulator, normal metal

**Введение.** Открытие квантового эффекта Джозефсона в 1962 г. [1] позволило резко повысить стабильность

воспроизводимого постоянного напряжения, которая до этого времени зависела от свойств электрохимических

элементов (называемых нормальными элементами), применяемых в качестве эталонов. Разработки ВНИИМ в области создания так называемых переходов Джозефсона, начиная с 1990 г. позволили внедрить эффект Джозефсона для воспроизведения единицы напряжения в первичном эталоне вольты, а установление в 1997 г. значения константы Джозефсона с неопределённостью 0,4 мкВ/В – отказаться от использования группы нормальных элементов в составе первичного эталона вольты ВНИИМ. В 2018 г. на 26-й Генеральной конференции по мерам и весам утверждена обновлённая Международная система единиц [2], в которой неопределённость константы Джозефсона принята равной нулю.

Совершенствование аппаратной реализации эталона вольты на эффекте Джозефсона связано с увеличением воспроизводимого напряжения до 10 В и применением переходов Джозефсона безгистерезисного типа, имеющих высокую стабильность воспроизводимого напряжения, а также с возможностью воспроизведения напряжения, изменяющегося во времени в виде ступенчатой кривой, что позволяет аппроксимировать напряжения произвольной формы. Дальнейшие исследования квантовых мер с применением метода импульсной накачки переходов Джозефсона показали возможность воспроизведения переменного напряжения, в том числе синусоидального с малым уровнем гармоник.

Цель настоящей работы – представить результаты исследований квантовых мер напряжения на основе эффекта Джозефсона с использованием гистерезисных и программируемых микросхем и микросхем с импульсной накачкой и применения этих мер в составе Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01 для привязки единицы напряжения к фундаментальным константам в соответствии с новым определением Международной системы единиц.

**Воспроизведение квантовых напряжений с использованием микросхем типа «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник».** Внедрение эффекта Джозефсона для воспроизведения единицы электрического напряжения в Российской Федерации началось с применения точечных ниобиевых контактов, которые являлись прообразом современных переходов «сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник» (СНС) Джозефсона. Развитие технологии привело к созданию переходов «сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник» (СИС), основное преимущество которых заключалось в воспроизведении напряжения при нулевом токе через переход. При облучении перехода сверхвысокочастотным (СВЧ) сигналом на его вольтамперной характеристике появляются квантовые ступени напряжения – ступени Шапиро [3].

Напряжение на одиночном переходе Джозефсона  $U$  определяется как

$$U = khf / (2e), \quad (1)$$

где  $k = \pm 1, 2, 3, \dots$  – номер ступени;  $h$  – постоянная Планка;  $f$  – частота СВЧ-сигнала;  $e$  – заряд электрона.

Формула (1) показывает, что напряжение задаётся двумя переменными параметрами – номером ступени и частотой. Типичное значение напряжения  $U$  при  $k=1$  и частоте 70 ГГц составляет около 140 мкВ. Для получения больших напряжений

надо сложить напряжения на нескольких переходах, увеличить значение частоты и число используемых ступеней на одном переходе.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) перехода СИС с облучением СВЧ-сигналом представлена на рис. 1, а.

Свойство переходов СИС работать при нулевом токе смещения позволило снизить требования к разбросу их параметров при последовательном соединении переходов, что в итоге привело к созданию джозефсоновских микросхем с выходным напряжением 1 В, а позже и 10 В. ВАХ переходов СИС является многозначной, поэтому затруднительно установить заданное значение воспроизводимого напряжения и невозможно зафиксировать напряжение в течение длительного времени из-за возможных спонтанных переходов с одного квантового уровня на другой. Мера для воспроизведения постоянного напряжения с микросхемой СИС в 2001 г. утверждена в качестве Государственного первичного эталона электрического напряжения ГЭТ 13-01 [4]. Мера включает следующие основные элементы:

источник СВЧ-излучения синусоидальной формы с регулировкой для установки оптимальной мощности облучения в процессе поиска ступени Шапиро;

одноканальное устройство управления для установки заданного выходного напряжения;

блок видеоконтроля, предназначенный для определения параметров микросхемы, обзора рабочей ступени Шапиро и определения её качества при заданной мощности облучения, а также степени влияния помех в процессе воспроизведения напряжения;

микросхему СИС, размещённую в специальном зонде при температуре жидкого гелия (4,2 К). Зонд имеет магнитное экранирование, защищающее микросхему от воздействия магнитного поля Земли, и фильтры низкой частоты для защиты от помех, поступающих по измерительным цепям.

Микросхема СИС работает без протекания постоянного тока через неё. Плавное изменение выходного напряжения достигается за счёт изменения частоты облучения, дискретное – путём изменения номера ступени Шапиро.

Единица электрического напряжения, воспроизводимая ГЭТ 13-01, прослеживается к эталону вольты Международного бюро мер и весов (МБМВ) через ключевые сличения,

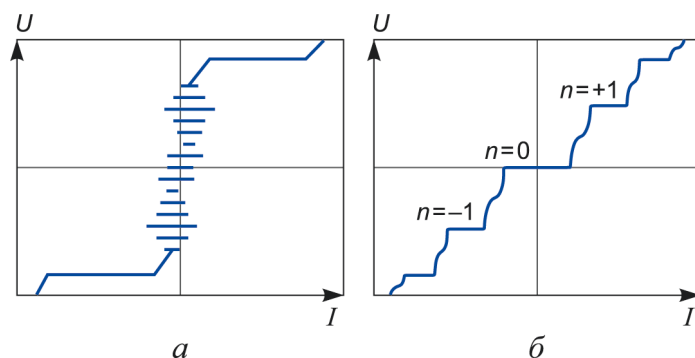


Рис. 1. Вольтамперные характеристики переходов СИС (а) и СНС (б)

Fig. 1. The current-voltage characteristics of SIS (a) and SNS (b)

Таблица 1

Сравнение квантовых напряжений  $U$ 

| $U$ , В | ПСЗР, нВ | СКО, нВ |
|---------|----------|---------|
| 10      | 0,40     | 0,60    |
| 1       | 0,09     | 0,20    |
| 0,1     | –0,07    | 1,60    |
| 0,01    | 0,20     | 0,85    |
| 0,001   | 0,04     | 0,70    |

**Воспроизведение квантовых напряжений с использованием микросхем СНС.** Отличие установок для воспроизведения квантового напряжения на основе переходов СНС от установок на базе переходов СИС заключается в формировании стабильных квантовых ступеней, существенно более широких по току. Чтобы выбрать квантовую ступень, задают ток смещения, проходящий через середину ступени. На рис. 1, б представлена ВАХ перехода СНС при прикладываемом к переходу СВЧ-сигнале.

В микросхемах СНС содержится большее число (примерно в пять раз) переходов, чем в обычных микросхемах СИС, вследствие того, что в микросхемах СНС обычно применяется только первая ступень Шапиро.

При создании джозефсоновских как СИС, так и СНС микросхем особое внимание уделяется равномерности СВЧ-облучения всех переходов. Для достижения равномерности используется режим бегущей волны, для которого необходимо согласовать элементы микросхемы с нагрузкой и СВЧ-генератором. С этой целью цепочки джозефсоновских переходов объединяют в согласованную полосковую линию, разбивают переходы на секции, которые включаются параллельно относительно СВЧ-сигнала. В России разработки джозефсоновских микросхем проводило ЗАО «Компэлст» [9].

Применение синусоидальных СВЧ-генераторов приводит к необходимости управления выходным напряжением микросхем СНС, путём изменения числа переходов, формирующих напряжения. Поэтому при таком построении микросхем существует необходимость формирования достаточного количества цепей управления и, соответственно, группировки переходов с целью уменьшения числа отводов, которые влияют на СВЧ согласование. Наиболее распространённая группировка переходов производится по коду  $2^n$  или в так называемой квазидвоичной последовательности.

Установка для воспроизведения постоянного напряжения с СНС микросхемой [10] содержит следующие элементы:

источник СВЧ-излучения синусоидальной формы;

многоканальное устройство управления, необходимое для установки заданного выходного напряжения и содержащее набор генераторов постоянного напряжения с выходным сопротивлением 50 Ом;

блок видеоконтроля, предназначенный для определения параметров микросхемы;

СНС микросхему, размещённую в специальном зонде при температуре жидкого гелия. Зонд имеет магнитное

экранирование, защищающее микросхему от воздействия магнитного поля Земли.

**Сравнение квантовых мер напряжений на микросхемах СИС и СНС.** В [11] описаны исследования разности воспроизводимых квантовых напряжений с применением джозефсоновских микросхем СИС и СНС в диапазоне  $U = 0,001 \dots 10$  В. Результаты исследований погрешности среднего значения разности (ПСЗР) и среднего квадратического отклонения (СКО) представлены в табл. 1.

Воспроизводимые напряжения включали встречно через нановольтметр Keithley 2182. Серии состояли из 30 измерений разности при положительном и отрицательном напряжениях. Время усреднения одного измерения составляло 10 с. Результаты положительной и отрицательной разности усредняли с целью исключения влияния термоэлектродвижущей силы и смещения нуля в нановольтметре. Полученная погрешность разности воспроизводимых напряжений указанном в диапазоне не превысила 0,4 нВ.

**Воспроизведение переменного напряжения с использованием эффекта Джозефсона.** Существуют различные методы воспроизведения переменного напряжения с использованием эффекта Джозефсона, каждый из них имеет особенности применения (вид схемы, тип оборудования, метод СВЧ-облучения и т. д.). Все частные случаи можно свести к двум концепциям: «метод синусоидального облучения», «метод импульсного облучения». Во ВНИИМ исследованы оба метода [11, 12].

Предельные возможности воспроизведения переменного напряжения с помощью преобразователя на эффекте Джозефсона с программируемой микросхемой и с импульсной накачкой оцениваются на уровне относительных погрешностей 0,1 и 0,01 мкВ/В соответственно.

Таким образом, квантовые эталоны в перспективе позволяют при частотах не более 1 кГц получить метрологические характеристики, превышающие типичные (на уровне относительной погрешности 0,4 мкВ/В) для традиционного метода воспроизведения с помощью термоэлектрических преобразователей.

**Исследование высокочастотного аналого-цифрового преобразователя с применением программируемой микросхемы СНС.** В [13] описаны исследования мультиметра типа 3458A – прецизионного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – в режиме постоянного тока при измерениях параметров переменных сигналов в низкочастотном диапазоне с помощью разработанной квантовой меры. Мера воспроизводит напряжения на основе программируемой микросхемы СНС. Определены возможности калибровки входящего в состав вольтметра интегрирующего АЦП в разных поддиапазонах напряжения, а также нестабильность во времени результатов измерений. В квантовой мере использовалась джозефсоновская программируемая микросхема производства РТВ (Германия). Параметры микросхемы: критический ток 4 мА; выходное напряжение до 1,2 В; ширина ступени по току 1 мА; частота 72 ГГц и мощность до 80 мВт СВЧ-облучения. Выходные сигналы квантовой меры: аппроксимирующий синусоиду ступенчатый сигнал частотой 50

или 53,3 Гц, амплитудой до 1,2 В, числом ступеней на период 24, числом уровней напряжения 25 или 211; ступенчатый сигнал, аппроксимирующий многотональный сигнал.

При измерениях АЦП синхронизирован по переходу через нуль измеряемого сигнала частотой 53,333 Гц. С целью исключения переходных процессов при установлении квантовой ступени перед началом измерений введена задержка порядка 50 мкс при длительности воспроизведения квантовой ступени 781 мкс и времени интегрирования АЦП порядка 350 мкс.

Измерены действующие значения (СКЗ) переменного напряжения в диапазоне 0,06–0,9 В с помощью АЦП в трёх поддиапазонах постоянного напряжения  $U$ : 0,1; 1 и 10 В (поддиапазон напряжения – номинальное значение одного из возможных пределов измерения АЦП). Отличие измеренного значения напряжения от расчётного находится в пределах нескольких единиц микровольт, делённых на вольты (табл. 2).

Стандартное отклонение результатов измерений напряжения в поддиапазоне 1 В для 12 измерений составило 0,13 мкВ/В при отклонении 0,9 мкВ/В от расчётного значения.

Измерены значения гармонических составляющих сигнала, сформированного путём суммирования основного тона с набором гармонических составляющих заданной амплитуды. Значения амплитуды для суммированных гармоник составили 30 и 20 % для второй и третьей гармоник соответственно. Вследствие конечной дискретизации по уровню синтезированного сигнала возникает пятая гармоника, её значение также рассчитано (0,51 %) и измерено. Абсолютные погрешности измеренных с помощью АЦП значений коэффициентов второй, третьей и пятой гармоник многотонального сигнала программируемой квантовой меры в поддиапазоне 1 В составили соответственно  $-0,00013$ ;  $-0,00012$ ;  $0,00003$  %.

Согласно результатам измерений исследованный АЦП имеет высокие метрологические характеристики (неопределённость менее 5 мкВ/В) при напряжениях от десятков милливольт (см. табл. 2). Это позволяет измерять параметры низкочастотных сигналов, включая их действующее значение и спектральные характеристики, опираясь на стабильный масштабный коэффициент преобразования АЦП и стабильный внутренний опорный источник напряжения, откалиброванный по внешней мере. Полученные результаты использованы при оценке метрологических характеристик канала измерения переменного тока на основе безреактивного шунта с низковольтным выходом и канала измерения переменного напряжения Государственного первичного эталона единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2019.

**Исследование квантовых мер переменного напряжения на основе переходов СНС с импульсной накачкой.** Наиболее перспективным и активно развиваемым является метод импульсной накачки, который позволяет не только измерять, но и воспроизводить переменное напряжение высокой точности с расчётными параметрами. Во ВНИИМ с 2019 г. в тесном сотрудничестве с РТВ (Германия) ведутся работы по созданию квантовых эталонов для воспроизведения переменного напряжения [13] на основе джозефсоновских микросхем с переходами СНС.

Таблица 2

Погрешность измерений, мкВ/В, сигнала квантовой меры при переменном напряжении 0,06–0,9 В

| $U$ , В | 0,06 В | 0,20 В | 0,35 В | 0,75 В | 0,90 В |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,1     | 4,5    | –      | –      | –      | –      |
| 1       | 2,5    | 1,7    | 1,6    | 1,0    | –      |
| 10      | –      | –      | –      | 2,5    | 2,0    |

В режиме импульсной накачки на джозефсоновские микросхемы подаются последовательности импульсов от биполярного импульсного генератора. Последовательность импульсов формируется из синтезированной в программе цифровой копии сигнала с помощью метода дельта-сигма преобразования [14, 15]. Джозефсоновские микросхемы преобразуют эти импульсы в сигнал, состоящий из импульсов с квантованным напряжением. Спектр этого сигнала содержит низкочастотную составляющую, определяющую синтезируемое переменное напряжение, и паразитные высокочастотные составляющие, которые ослабляются с помощью фильтров. Частоты паразитных составляющих превышают типичную частоту следования импульсов (несущую частоту) 14 ГГц. Для расширения диапазона формируемых напряжений применяется дополнительный источник компенсации, форма его выходного сигнала повторяет форму воспроизводимого напряжения [16, 17].

Воспроизводимое напряжение и режим работы джозефсоновской микросхемы контролируются с помощью анализатора спектра. Качество воспроизводимого переменного напряжения оценивается по амплитуде, частоте, напряжению гармоник, уровням помех и шума. Дополнительное экранирование микросхем и питание от специальных аккумуляторных источников обеспечивает снижение воздействия наводок, обусловленных высокой чувствительностью джозефсоновских микросхем к воздействию переменных электрических полей.

Джозефсоновские переходы под действием импульсной накачки могут формировать сигналы произвольной формы, в которых побочные гармоники подавляются более чем на шесть порядков [14, 18]. На практике для получения такого ослабления требуется тщательная настройка выходов биполярного импульсного генератора. Каждый канал независимо настраивается по шести параметрам трёхуровневого сигнала: амплитуде положительных и отрицательных импульсов; коэффициенту заполнения положительных и отрицательных импульсов; постоянному смещению и задержке выдачи импульса в канале. На рис. 2 представлен спектр воспроизводимого синусоидального сигнала при частоте основной гармоники 125 Гц, несущей частоте 14 ГГц. Спектр воспроизводимого синусоидального сигнала получен на двух микросхемах с 9000 и 10500 переходами без применения сигнала компенсации. Каждая джозефсоновская микросхема воспроизводит 30 и 35 мВ соответственно.

На рис. 3 показана возможность воспроизведения сигнала со сложным спектральным составом – представлен

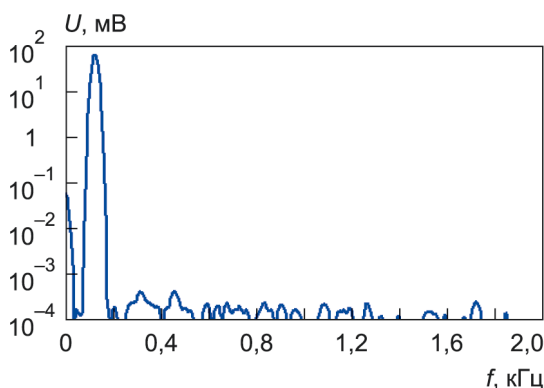


Рис. 2. Частотный спектр воспроизводимого синусоидального сигнала при частоте 125 Гц и действующем напряжении 65 мВ на двух джозефсоновских микросхемах, сигнал компенсации отсутствует

Fig. 2. Frequency spectrum of the synthesis signal at 125 Hz and sinusoidal voltage 65 mV RMS on two Josephson chips. Without compensation circuit

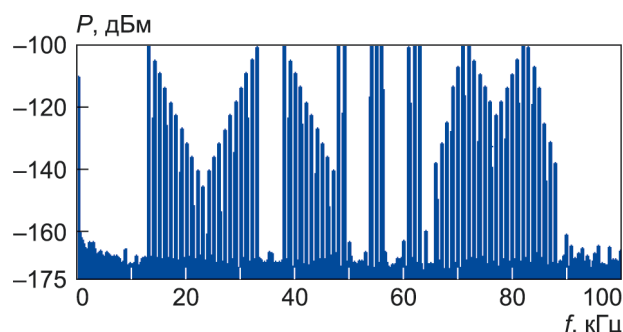


Рис. 3. Частотный спектр сигнала, который воспроизводит акроним VNIIM на четырёх джозефсоновских микросхемах, сигнал компенсации отсутствует

Fig. 3. Frequency spectrum of the synthesis signal logotype VNIIM on four Josephson chips. Without compensation circuit

Таблица 3

**Погрешности низковольтных измерений**

| СКЗ, мВ | $\Delta$ , нВ | $\sigma$ , нВ |
|---------|---------------|---------------|
| 10      | 46,0          | 1,9           |
| 0,1     | -3,3          | 1,2           |
| 0,01    | 2,1           | 2,2           |

частотный спектр сигнала, который воспроизводит латинский акроним «ВНИИМ» (вид сигнала похож на последовательность английских букв V N I I M). Данная возможность позволяет переходить к воспроизведению с помощью квантовых технологий параметров гармоник сигнала. Сигнал напряжения получен

при последовательном подключении четырёх микросхем (двух по 9000 переходов и двух по 10500) и включает в себя 62 гармоники.

Подключая несколько микросхем, можно повышать уровень воспроизводимого напряжения. На четырёх джозефсоновских микросхемах, содержащих суммарно 35994 перехода, получили синусоидальное напряжение 0,5 В, которое использовали для передачи единицы вольты измерительным каналам переменного напряжения с высокоточным АЦП на основе мультиметра 3458А со специальным программным обеспечением из состава ГЭТ 153-2019 [19].

Перед началом измерений мультиметр 3458А предварительно прогревали и калибровали по мере постоянного напряжения 10 В. Измерения проводили в течение нескольких дней без использования дополнительных калибровочных процедур. Для уменьшения влияния измерительных цепей и входных параметров мультиметра 3458А частота, воспроизводимая джозефсоновской микросхемой с импульсной накачкой, устанавливалась равной 62,5 или 125 Гц [20]. В результате исследования рабочих параметров джозефсоновских микросхем установили возможность воспроизведения напряжений на уровне 0,5 В с шириной ступеней Шапиро в диапазоне 0,7–1,2 мА.

Обычно ширину ступени Шапиро определяют с помощью анализатора спектра на базе платы NI PXI 5922 [16]. Авторы настоящей статьи использовали новый метод определения ширины ступени по току с помощью метода выборок [19, 20], обеспечивающий измерение наклона ступени с разрешением 0,015 мкВ.

Исследовали кратковременную стабильность измерения переменного напряжения методом выборок, получили значение менее 0,03 мкВ/В в течение 5 мин.

При многодневных измерениях стабильность мультиметра 3458А оценена на уровне  $\pm 0,09$  мкВ/В, что позволяет использовать систему на его основе в качестве эталона сравнения или эталона-переносчика при сличениях или калибровках на переменном напряжении.

Квантовые меры переменного напряжения применяли при изучении АЦП в режиме измерения действующего значения низковольтных сигналов [20]. Установили, что характеристики мультиметра 3458А, работающего в режиме АЦП, после дополнительной обработки сигнала сопоставимы с характеристиками типичного синхронного усилителя при работе на частотах 10–400 Гц. Результаты исследования – погрешность  $\Delta$  и СКО  $\sigma$  – при трёх СКЗ основной гармоники напряжения представлены в табл. 3. Частота основной гармоники в этом эксперименте составляла 92,86 Гц, времена дискретизации и апертуры для АЦП устанавливали равными 0,5 и 0,35 мс соответственно. Одна серия измерений включала выборку из 20000 измерений.

Данные исследования продемонстрировали возможность использования 3458А в качестве малощумящего милливольтметра переменного напряжения на уровне нановольта.

Мультиметр 3458А совместно со специализированным программным обеспечением, реализующим методы обработки выборок сигнала, может служить эталоном сравнения между двумя квантовыми мерами с джозефсоновскими микросхемами переменного напряжения аналогично тому, как эталоны на основе мер постоянного напряжения служат эталонами сравнения между квантовыми эталонами постоянного напряжения на основе эффекта Джозефсона.

Результаты проведенных исследований позволяют сформировать систему передачи параметров переменного напряжения от квантовых мер к измерительным каналам напряжения и тока многофункционального ГЭТ 153-2012.

**Заключение.** Результаты исследования квантовых мер напряжения на основе эффекта Джозефсона с использованием гистерезисных и программируемых микросхем, микросхем с импульсной накачкой позволяют применять такие

меры в составе ГЭТ 13-01 и привязать единицу напряжения к фундаментальным константам в соответствии с новым определением Международной системы единиц.

Наибольшее практическое значение этих исследований заключается в создании надёжной высокоточной системы воспроизведения постоянного напряжения в диапазоне 0,001–10 В и формировании задела для воспроизведения переменного напряжения синусоидальной и сложной форм с опорой на фундаментальные константы и передачи единицы напряжения высокоточным АЦП и вольтметрам в диапазоне частот 0–1000 Гц.

Достигнутые результаты позволяют обеспечить возрастающие потребности науки и промышленности в точности измерений на уровне лучших национальных эталонов.

#### Список источников / References

1. Josephson B. D., *Phys. Lett.*, 1962, vol. 1, no. 7, pp. 251–253. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(62\)91369-0](https://doi.org/10.1016/0031-9163(62)91369-0)
2. *The International System of Units (SI)*, 9th ed., Paris, Bureau International des Poids et Mesures, 2019.
3. Shapiro S., *Phys. Rev. Lett.*, 1963, vol. 11, no. 2, pp. 80–82. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.80>
4. 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., *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, no. 3, pp. 228–232. <https://doi.org/10.1023/A:1015954501462>].
5. Катков А. С. Транспортируемый эталон сравнения на эффекте Джозефсона // Измерительная техника. 2005. № 2. С. 48–51 [Katkov A. S., *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, no. 2, pp. 175–179. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0119-8>].
6. Катков А. С., Ловцус В. Э. Компактный эталон сравнения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 41–45 [Katkov A. S., Lovtsyus V. E., *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 7, pp. 801–807. <https://doi.org/10.1007/s11018-011-9807-8>].
7. Behr R., Katkov A. S., *Metrologia. Technical Supplement*, 2005, vol. 42, 01005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/1A/01005>
8. Катков А. С., Солве С. Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 70–73 [Katkov A., Solve S., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 11, pp. 1313–1318. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9873-6>].
9. Гудков А. Л., Катков А. С., Козлов А. И., Краснополин И. Я., Самусь А. Н. СПИС программируемого эталона вольты и перспектива развития джозефсоновской элементной базы // Приборы. 2011. № 11(137). С. 19–25 [Gudkov A. L., Katkov A. S., Kozlov A. I., Krasnopolin I. Ya., Samus A. N., *The programmable voltage standard SCIC and the development prospect of Josephson element base, Pribory*, 2011, no. 11 (137), pp. 19–25 (In Russ.)].
10. Lee J., Behr R., Palafox L., Katkov A., Schubert M., Starkloff M., Bock A. C., *Metrologia*, 2013, no. 50, pp. 612–622. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/50/6/612>
11. Катков А. С., Ловцус В. Э., Быков А. И., Шевцов В. И., Новодережкин Г. В. Воспроизведение вольты во ВНИИМ на основе СИС и СНС переходов Джозефсона // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 45–48. [Katkov A. S., Lovtsyus V. E., Bykov A. I., Shevtsov V. I., Novoderezhkin G. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 589–593. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1240-1>].
12. Катков А. С., Ловцус В. Э., Быков А. И., Шевцов В. И., Петровская А. Н., Бэр Р., Киелер О. Квантовая мера для воспроизведения сигналов переменного напряжения // Измерительная техника. 2020. № 4. С. 39–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-4-39-43> [Katkov A. S., Lovtsyus V. E., Bykov A. I., Shevtsov V. I., Petrovskaya A. N., Behr R., Kieler O. F., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 295–300. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01786-0>].
13. Gubler G., Katkov A., Investigation of ADC-Aided AC Measurement through the use of PJVS, *Conference Digest CPEM 2012*, Washington, 2012, pp. 64–65. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6250662>
14. Kieler O. F., Iuzzolino R., Kohlmann J., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 230–233. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2019283>
15. Schreier R., Temes G., *Understanding Delta-Sigma Data Converters*, Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 2005, 566 p.
16. Benz S. P., Dresselhaus P. D., Rüfenacht A., Bergren N. F., Kinard J. R., Landim R. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 838–843. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2008.4574646>
17. Benz S. P., Burroughs C. J., Dresselhaus P. D., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 612–616. <https://doi.org/10.1109/77.919419>
18. Flowers-Jacobs N. E., Rüfenacht A., Fox A. E., Dresselhaus P. D., Benz S. P., *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, 2016, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540601>
19. Гублер Г. Б., Никитин А. Ю., Шапиро Е. З., Алексеева Н. С. Многофункциональный государственный первичный эталон единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2019 // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. № 16(1). С. 7–16. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-1-7-16> [Gubler G. B., Nikitin A. Yu., Shapiro E. Z., Alekseeva N. S., Multifunctional state primary power standard in the frequency range from 1 to 2500 Hz, GET 153-2019, *Measurement Standards. Reference Materials*, 2020, no. 16(1), pp. 7–16 (In Russ.)].
20. Katkov A., Gubler G., Shevtsov V., Petrovskaya A., Behr R., Kieler O., *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2020)*, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191742>

Статья поступила в редакцию 02.06.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 16.06.2022.  
The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 16.06.2022.