

Квантовые эффекты и фундаментальные константы в основе эталонов единиц электрических величин

С. В. Шерстобитов, М. В. Карпова, М. А. Тертычная

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская область, Российская Федерация,
e-mail: s_sherstobitov@rambler.ru, Lab-610@vniiftri.ru, marina_ter@mail.ru

Рассмотрены принципы построения современных эталонов в области единиц электрических величин, основанные на квантовых эффектах и фундаментальных константах в соответствии с новыми определениями Международной системы единиц. Исследованы используемые методы построения квантовых измерительных преобразователей, а также режимы работы экспериментальной установки. Создан экспериментальный образец эталонного комплекса. Описано разработанное под данную задачу программное обеспечение. Приведена методика измерений. Показано, что результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, хорошо согласуются с теоретическими исследованиями. Сформулированы выводы о возможном использовании результатов исследований в построении новых эталонных комплексов и определены задачи для будущих исследований. Показано, что эталоны единиц электрических величин на основе квантовых эффектов и фундаментальных констант находят применение в метрологии средств измерений электрических величин.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, эталон постоянного и переменного электрического напряжения, квантовый измерительный преобразователь.

В области электрических измерений ведущие мировые метрологические центры достаточно давно используют эталоны с мерами на основе квантовых эффектов в сверхпроводниках. В основе таких эталонов лежит эффект Джозефсона, связывающий постоянное электрическое напряжение с частотой сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Связь происходит через константу Джозефсона (отношение двух зарядов электрона к постоянной Планка) и квантовый эффект Холла, воспроизводящий значение электрического сопротивления (импеданс) через константу фон Клитцинга (отношение постоянной Планка к заряду электрона в квадрате). В настоящее время в Российской Федерации функционируют не менее четырёх эталонов вольты с квантовыми мерами на эффекте Джозефсона и не менее двух эталонов электрического сопротивления с квантовой мерой на эффекте Холла. Основная цель проводимого анализа – теоретическое и экспериментальное исследование возможности построения квантовых мер эталонных комплексов для реализации взаимосогласованного воспроизведения базовых единиц электрических величин с привязкой к квантовым эффектам и фундаментальным константам.

Новые определения Международной системы единиц (СИ). На состоявшейся в ноябре 2018 г. 26-й Генеральной конференции по мерам и весам (CGPM) было принято решение об отмене существующих определений четырёх из семи основных единиц Международной системы единиц (СИ) – килограмма, ампера, кельвина, моля (метр, секунда, кандела – остались без изменений) и замене их новыми определениями. Новые определения единиц фиксируют

значения постоянной Планка h , элементарного заряда e , постоянной Больцмана k , постоянной Авогадро N_A [1]. Следовательно, все основные и производные единицы можно установить из семи референсных констант.

Консультативный комитет по электричеству и магнетизму (ССЕМ) Международного комитета мер и весов (CIPM) сформировал предложения о том, как основная единица СИ – ампер А, а также производные единицы электрических величин – вольт V, Ом Ω , сименс S, кулон C, фарад F, генри H, ватт W, тесла T, вебер Wb могут быть реализованы на практике с учётом новых определений [2].

На данный момент актуальные значения семи констант, включая постоянную Планка, элементарный заряд e , скорость света в вакууме c , постоянную Больцмана k , постоянную Авогадро N_A , частоту сверхтонкого расщепления основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$, световую эффективность монохроматического излучения частотой 540 ТГц K_{cd} , можно получить на веб-сайте BIPM или Комитета по данным для науки и техники CODATA [3].

Существующие эталоны. Формулировка цели и постановка задачи для исследований. В ВНИИФТРИ разработан и с 2001 г. используется вторичный эталон единицы постоянного электрического напряжения ВЭТ 13-13-01, имеющий в своём составе квантовую меру электрического напряжения на эффекте Джозефсона [4]. Данный ВЭТ 13-13-01 предназначен для метрологического обеспечения следующих средств измерений:

на основе прецизионных стабилизаторов, в частности, твердотельных мер напряжения;

применяемых в области геофизических, акустических и гидроакустических измерений, калибраторов и измерителей электрических и радиотехнических величин;

средств измерений высшего звена в области электрохимии и физхимии.

Именно в этих областях деятельности, закреплённых за ВНИИФТРИ, в последнее время ощущается потребность в точных электрических измерениях, реализация которых возможна на аппаратуре вторичного эталона с квантовой мерой электрического напряжения на эффекте Джозефсона.

Аппаратура ВЭТ 13-13-01 совместно с комплектом высокостабильных термостатированных мер электрического сопротивления из состава вторичного эталона электрического сопротивления 2.1.ZZT.0290.2018 используется также для косвенных измерений силы тока, реализуя новое определение единицы силы тока – ампера. С помощью аппаратуры проходит поверка, калибровка, юстировка широкого спектра средств измерений, применяемых ВНИИФТРИ в составе государственных эталонов, а также аппаратуры сторонних организаций в областях электрических, радиотехнических и других видов измерений.

Построение эталонов постоянного электрического напряжения в мировой практике в целом считается законченным этапом. Таких эталонов во всём мире эксплуатируется более 60 шт. Следующий этап, в развитии которого в настоящее время заняты многие ведущие национальные метрологические институты – разработка принципов построения и организация сличений эталонов переменного напряжения

на эффекте Джозефсона. Ранее об этом упоминалось только с теоретической точки зрения, а с развитием современных цифровых технологий и технологий производства сверхпроводящих интегральных схем такие принципы становятся реальностью. Поэтому один из выводов, сформированный на CGPM и включённый в рабочую программу, которая разработана для реализации стратегии развития ВРМ, включает в себя, в частности, такое мероприятие как организация сличений эталонов переменного напряжения, основанных на эффекте Джозефсона.

Для расширения измерительных возможностей существующих эталонов и построения эталонных комплексов, реализующих новые определения единиц электрических величин (постоянное, переменное, импульсное напряжение, сила постоянного и переменного тока, мощность и др.) на основе квантовых эффектов, требуется разработать квантовые меры воспроизводящих сигналов как постоянного, так и переменного и импульсного напряжений. Данная задача является основной целью исследований, описанных в настоящей статье. Кроме того, необходимо обеспечить теоретическую и экспериментальную базы для измерений переменного напряжения и напряжения произвольной формы, базы для определения характеристик прецизионных цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и систем на их основе, широко применяемых в современном приборостроении и метрологии.

Основные практические достижения в этом направлении стали возможны в связи с развитием технологии

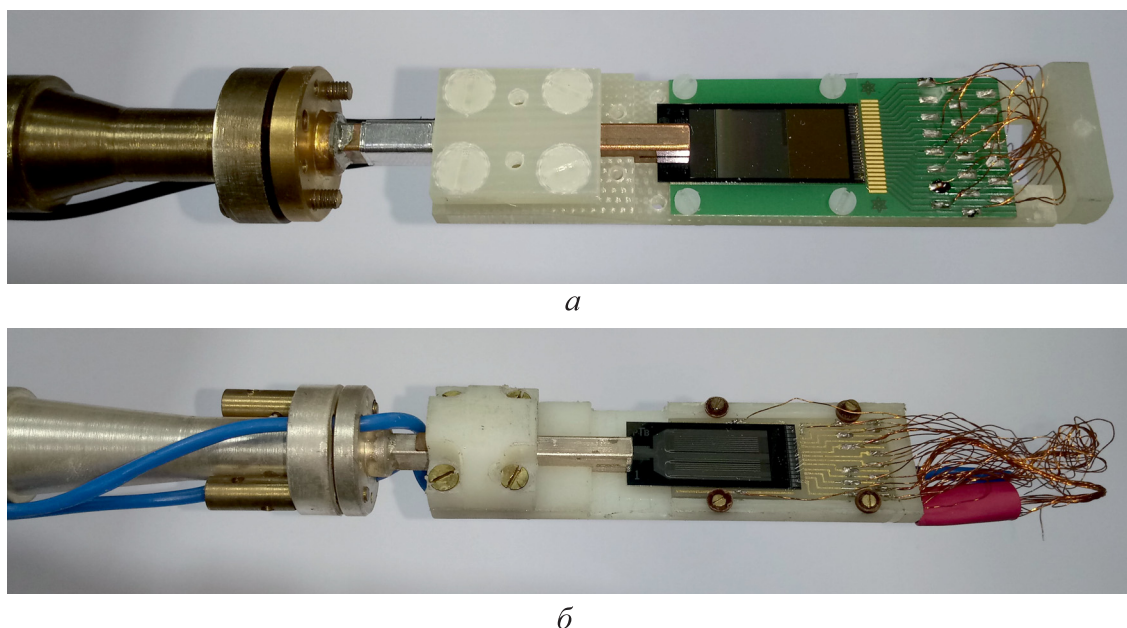


Рис. 1. Джозефсоновские интегральные преобразователи:
SNS 70 ГГц, 10 В (а), SINIS 70 ГГц, 1 В (б)

Fig. 1. General view of Josephson integrated converters:
SNS 70 GHz, 10 V (a), SINIS 70 GHz, 1 V (b)

производства интегральных схем, содержащих сильношунтированные переходы Джозефсона SNS (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник), и переходы SINIS (сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник). Внешний вид джозефсоновских интегральных преобразователей, задействованных в данных исследованиях и работающих с частотой СВЧ-смещения 70 ГГц, показан на рис. 1. На рис. 1, а представлен образец интегральной схемы, содержащей 69598 переходов, которые изготовлены по технологии SNS с выходным напряжением до 10 В. На рис. 1, б приведена интегральная схема, содержащая 8192 перехода, выполненных по технологии SINIS с выходным напряжением 1 В. Данные интегральные преобразователи позволяют быстро управлять выходным напряжением и формировать не только сигналы постоянного напряжения, но и сигналы импульсного напряжения, а также ступенчатые аппроксимации переменного низкочастотного напряжения. Вольт-амперная характеристика таких преобразователей является однозначной функцией и, управляя силой протекающего тока, можно установить преобразователь на требуемую ступеньку напряжения.

Основные методы построения квантовых мер переменного электрического напряжения. В настоящее время существует несколько способов управления напряжением на джозефсоновском переходе для построения эталонов переменного напряжения. Основными из них считаются: 1) двоичный массив джозефсоновских переходов [5]; 2) накачка джозефсоновского преобразователя серий пикосекундных импульсов (дельта – сигма джозефсоновский преобразователь) [6]; 3) широтно-импульсная модуляция СВЧ-мощности [7, 8]; 4) оптические методы смещения импульсными лазерами или лазерами с разной длиной волны [9–11].

В рамках проводимых работ авторы настоящей статьи тщательно исследовали первый способ, а третий и четвёртый способы были впервые ими предложены и исследованы.

Работа установки в режиме двоичного массива джозефсоновских переходов. В случае двоичного массива джозефсоновских переходов интегральная схема с переходами Джозефсона изготавливается с отводами от двоичных групп переходов (1, 2, 4, 8, 16, 32...) для возможности независимого управления включением различного числа переходов и формирования программируемого напряжения постоянного тока и ступенчатой аппроксимации переменного напряжения. На рис. 2 приведена осциллограмма выходного синусоидального ступенчатого сигнала разработанной авторами экспериментальной установки в режиме двоичного массива джозефсоновских переходов, управляемых от компьютера многоканальным источником тока смещения.

Для реализации источника эталонных сигналов на основе цепочки джозефсоновских переходов, разделённых на двоичные секции, была разработана специальная аппаратура управления, криозонды для размещения джозефсоновского интегрального преобразователя и программное

U , 500 мВ/дел.

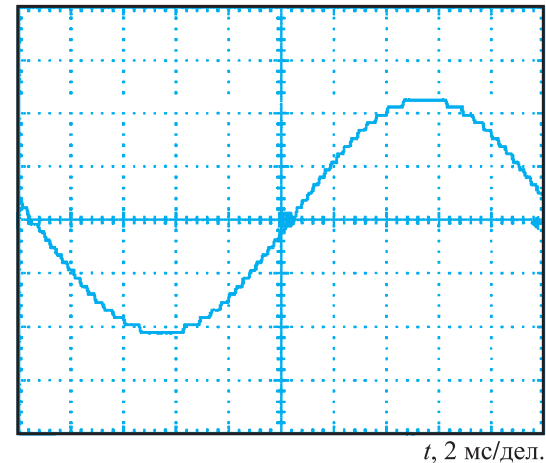


Рис. 2. Выходной синусоидальный сигнал ступенчатой аппроксимации с джозефсоновского преобразователя с двоичными группами переходов

Fig. 2. Output step approximation sinusoidal signal from Josephson Converter with binary groups of Josephson junctions

обеспечение для формирования сигналов управления. Программное обеспечение состоит из двух блоков: компьютерного генератора цифрового сигнала и блока обработки цифровых реализаций. Программный генератор цифрового сигнала вычисляет и записывает в оперативную память компьютера или в специальный файл последовательность отчётов y_j гармонического сигнала вида

$$y_j = A_0 + \sum_{k=1}^M A_k \cos\left(\frac{2\pi}{\mu} k + \varphi_k\right) + \psi_j, \quad (1)$$

где $j=0, 1, \dots, N-1$ – номер отсчёта; N – число отсчётов в реализации; A_0 – постоянная составляющая сигнала; $k=1, \dots, M$ – номер гармоники; A_k – амплитуда k -й гармоники; $\mu = F_d/F$ – число отсчётов на период сигнала, F – частота основного тона, F_d – частота дискретизации; φ_k – начальная фаза k -й гармоники; ψ_j – отсчёт белого шума, т. е. случайная функция, описывающая аддитивный белый шум с нулевым средним значением.

Цифровая реализация генерируется в формате «long double» (формат с плавающей запятой повышенной точности) и затем конвертируется в соответствии с входной кодировкой ЦАП: обратный или прямой код; число двоичных разрядов 16, 24, 32. Отсчёты ψ_j удовлетворяют условию нормировки

$$\zeta = \bar{\psi}^2 / P, \quad (2)$$

где ζ – отношение шум–сигнал; $\bar{\psi}^2 = \psi_j^2$ – мощность шума (черта сверху означает усреднение по времени); $P = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M A_k^2$ – суммарная мощность гармоник.

Блок обработки цифровых реализаций использует модель сигнала (1) и программу восстановления (измерения) значений параметров μ , A_k , φ_k , ζ модели сигнала (1).

Программа реализует алгоритм, минимизирующий функционал Φ «близости» обрабатываемой и модельной последовательностей:

$$\Phi(\mu, A_k, \varphi_k, \zeta) = \sum_{j=0}^{N-1} [x_j - y_j(\mu, A_k, \varphi_k, \zeta)]^2,$$

где x_j – отсчеты обрабатываемой последовательности; $y_j(\mu, A_k, \varphi_k, \zeta)$ – модельные отсчеты, определяемые по формулам (1), (2).

Так как частоты сигнала F и дискретизации F_d входят в модель (1) только в виде отношения F_d/F через параметр μ , то программа обработки может восстановить только отношение μ . Определение значения одной из частот F или F_d возможно только в случае, если известно значение другой частоты. При известном значении μ задача определения остальных параметров A_k , φ_k , ζ сводится к задаче линейной регрессии [12], которая решается аналитически точно. Неопределённость полученных результатов в этом случае связана со стохастическим характером шума ψ_j , погрешностью округления отсчётов при их преобразовании в цифровую форму и числом отсчётов N в обрабатываемой реализации.

В проводимых экспериментальных исследованиях применяли несколько типов джозефсоновских преобразователей с двоичными секциями: с выходным напряжением до 10 мВ и частотой СВЧ-смещения 10 ГГц; с выходным напряжением до 1 В или 10 В и частотой СВЧ-смещения 70 ГГц.

Для исследования метрологических характеристик установки использовали преобразователь переменного напряжения Fluke 792A (Fluke Corporation, США) для выходных сигналов менее 1 В, мультиметры 8508A (Fluke Corporation,

США), 3458A (Keysight technologies, Inc., США) и разработанный прецизионный 24-разрядный АЦП, который перед измерениями калибровали на постоянном токе. После оцифровки результаты программно обрабатывали. Частотный диапазон выходных синусоидальных сигналов с предложенной микросхемой ограничен уровнем 1 кГц при относительной погрешности воспроизведения среднеквадратического значения (СКЗ) выходного напряжения на уровне $1 \cdot 10^{-6}$ – $2 \cdot 10^{-5}$. Отметим, что разработанная установка может воспроизводить импульсные сигналы напряжения с частотой следования импульсов до 1,5 МГц и точными квантованными значениями амплитуды перепада импульса напряжения.

Накачка джозефсоновского преобразователя серий пикосекундных импульсов. Для построения более высокочастотных эталонов и эталонов с низкими гармоническими составляющими в мировой практике предлагается применять джозефсоновские микросхемы с накачкой пикосекундными импульсами [6]. Упрощённая структурная схема такой установки приведена на рис. 3. Для получения биполярного выходного сигнала используются два массива (цепочки) джозефсоновских переходов, соединённых сверхпроводящей проводкой. Для каждой из двух цепочек необходимо обеспечить по три сигнала управления: сигнал цифровой кодовой последовательности импульсов с частотой следования 10 Гбит/с; СВЧ-синусоидальный сигнал смещения 15 ГГц; компенсирующий сигнал. Установка очень сложна в изготовлении и настройке. Для её реализации необходим программируемый генератор импульсных последовательностей с частотой следования до 20 ГГц и специально изготовленные интегральные микросхемы. Число переходов Джозефсона в таких микросхемах ограничено затуханием в микрополосковой линии. Это делается

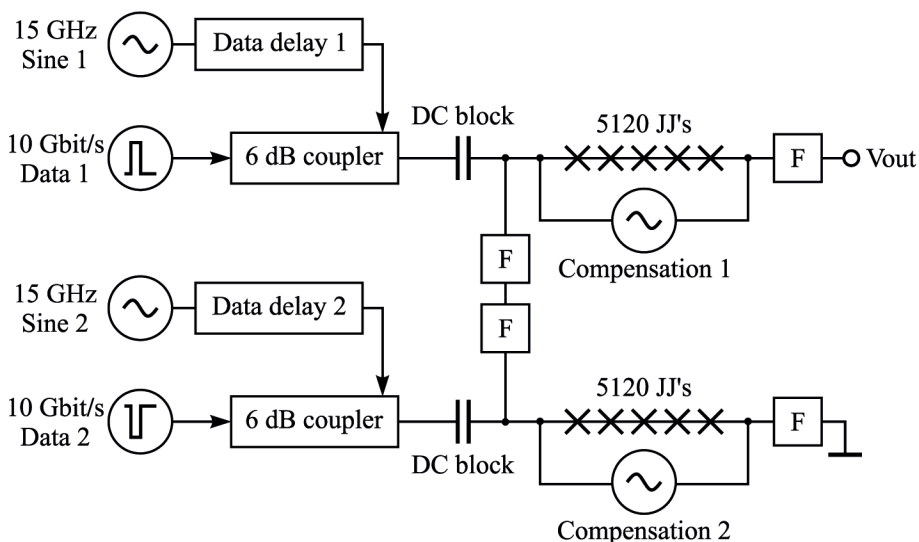


Рис. 3. Структурная схема синтезатора переменного напряжения с накачкой серий импульсов пикосекундной длительности

Fig. 3. Block diagram of an alternating voltage synthesizer pumped with a series of pulses of picosecond duration

для того, чтобы все переходы получали приблизительно одинаковую амплитуду импульсов смещения, что ограничивает максимальное выходное напряжение. Кроме того, необходима гальваническая развязка всех сигналов управления. Несмотря на описанные сложности в практических реализациях установки с накачкой серий импульсов путём последовательного соединения до восьми джозефсоновских преобразователей удалось продемонстрировать выходное напряжение до 1 В с уровнем гармонических составляющих ниже –121 дБ для синтезируемых синусоидальных сигналов частотой порядка 1 кГц [13].

Учитывая особенности работы установок на эффекте Джозефсона, в мировой практике были разработаны несколько процедур сличения выходных сигналов таких эталонов для проведения дальнейших международных сличений. Установки, построенные на

данном принципе, позволяют формировать либо спектрально чистые сигналы, либо сигналы с малой погрешностью среднеквадратического значения переменного напряжения.

Широтно-импульсная модуляция СВЧ-мощности. В связи со сложностью и высокой стоимостью реализации установок со смещением пикосекундными импульсами во ВНИИФТРИ предложена, разработана и изготовлена установка с широтно-импульсной модуляцией СВЧ-мощности [7]. В рассматриваемой установке напряжение на джозефсоновском переходе переключается с одной квантовой ступеньки на другую посредством модуляции синусоидальной СВЧ-мощности смещения. Для реализации предложенного способа проведено математическое моделирование, в котором рассматривались несколько алгоритмов формирования управляющих сигналов. Были определены теоретические пределы для погрешности воспроизведения амплитуды синтезируемых сигналов и разработаны требования к характеристикам джозефсоновских переходов, необходимых для перекрытия ступенек на вольт-амперной характеристике [14, 15]. Разработано программное обеспечение для формирования реализаций цифровых сигналов управления СВЧ-модуляторами для синтеза гармонических сигналов посредством метода широко-импульсной модуляции СВЧ-мощности и джозефсоновских интегральных схем. Были изготовлены быстродействующие модуляторы СВЧ-мощности диапазона 10 и 70 ГГц, а также проведены экспериментальные исследования. В ходе работы получены результаты синтеза сигналов переменного низкочастотного напряжения, хорошо согласующиеся с теоретическими исследованиями.

Выводы и задачи для будущих исследований. Оптимизация алгоритмов управления, согласования джозефсоновской интегральной схемы, выходных фильтров и конструкции синтезатора в целом позволит в дальнейшем генерировать низкочастотные сигналы переменного напряжения требуемого спектрального состава с относительной неопределённостью СКЗ не более $1 \cdot 10^{-6}$.

В последнее время вызывает активный практический интерес возможность оптического смещения джозефсоновского перехода, которое даёт преимущества в тепловой развязке, гальванической развязке сигналов управления и новые возможности построения как синтезаторов переменного и импульсного напряжения, так и детекторов СВЧ-излучения вплоть до терагерцовой области. Эти исследования авторы настоящей статьи планируют продолжить в будущих разработках.

Таким образом, с внедрением современных криокулеров, не требующих в огромном количестве жидких газов [15], цифровых технологий и технологий производства квантовых измерительных преобразователей, оптоэлектрических технологий, установки на квантовых эффектах позволят реализовать эталоны и экспериментальные установки постоянного электрического напряжения, переменного электрического напряжения, импульсного напряжения, напряжения произвольной формы с требуемым набором гармонических составляющих, эталоны электрического сопротивления постоянному и переменному току на эффекте Холла

и, соответственно, эталоны электрической мощности, эталоны силы тока, в том числе ультрамалых токов. Новые эталонные комплексы с опорой на квантовые эффекты и фундаментальные константы позволят в ближайшем будущем реализовать широкий круг взаимосогласованных эталонов единиц электрических и радиотехнических величин в соответствии с новыми определениями.

Список литературы

1. Рекомендации международного бюро мер и весов по практическому применению системы СИ. URL: www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/ (дата обращения: 20.11.2019).
2. Рекомендации международного бюро мер и весов по практическому определению ампера и других электрических единиц системы СИ. URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-ampere.pdf> (дата обращения: 20.11.2019).
3. Актуальные значения фундаментальных констант комитета по данным для науки и техники CODATA. URL: <https://www.codata.org/committees-and-groups/fundamental-physical-constants> (дата обращения: 01.12.2019).
4. Васильев Д. Р., Карпов О. В., Крутиков В. Н., Кумовой В. Д., Тертычная М. А., Шерстобитов С. В. Вторичный эталон единицы постоянного напряжения ВЭТ 13-13-01, основанный на эффекте Джозефсона // Измерительная техника. 2003. № 3. С. 25–29.
5. Hamilton C. A., Burroughs C. J., Kautz R. L., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, vol. 44, no. 2, pp. 223–225. DOI: 10.1109/19.377816
6. Benz S. P., Hamilton C. A., *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 22, pp. 3171–3173. DOI: 10.1063/1.115814
7. Карпов О. В., Бухштабер В. М., Тертычная М. А., Тертычный С. И., Шерстобитов С. В. Квантовый цифровой синтезатор переменного напряжения на основе широтно-импульсной модуляции тока смещения джозефсоновского перехода // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 2. С. 246–252. DOI: 10.1134/S1064226909020181
8. Karpov O. V., Buchstaber V. M., Sherstobitov S. V., Tertychniy S. I., Tertychnaya M. A., Niemeyer J., *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 104, no. 9, pp. 093911–093911-4. DOI: 10.1063/1.2960455
9. Urano C., Kaneko N., Oe T., Maezawa M., Itatani T., Gorwadkar S., Saitu H., Maeda J., Kiryu S., *Physica C*. 2007, vol. 464–465, pp. 1123–1126. DOI: 10.1109/tasc.2019.2899851
10. Kieler O., Karlsen B., Per Alfred Ohlckers, Bardalen E., Muhammad Nadeem Akram, Behr R., Ireland J., Williams J., Malmbeek H., Palafox L., Wendisch R., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, p. 1200205. DOI: 10.1109/tim.2018.2877562
11. Sherstobitov S. V., Dobrovolskiy V. I., Karpova M. V., *Abstracts of BIPM Workshop The Quantum Revolution in Metrology*, Paris, France, September 28–29, 2017, URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/WS-Quantum-Revolution/S4/S4-15.pdf> (дата обращения: 20.11.2019).

12. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.

13. Karpov O. V., Buchstaber V. M., Sherstobitov S. V., Tertychniy S. I., Niemeyer J., Kieler O., *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, pp. 93–97. DOI: 10.1063/1.2358817

14. Kieler O. F., Behr R., Wendisch R., Bauer S., Palafox L., Kohlmann J., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2014.2366916

15. Oliver F. Kieler, Thomas Scheller, Johannes Kohlmann, Cryocooler Operation of a Pulse-Driven AC Josephson Voltage Standard at PTB, *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2013, vol. 3, pp.189–193. DOI: 10.4236/wjcmp.2013.34031

References

1. The BIPM recommended practical system of units of measurement is the International System of Units, available at: www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/ (accessed: 20.11.2019).

2. The BIPM definition of the ampere and other electric units in the SI, available at: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-ampere.pdf> (accessed: 20.11.2019).

3. Actual values of the The Fundamental Physical Constants available at: CODATA Task Group on Fundamental Physical Constants <https://www.codata.org/committees-and-groups/fundamental-physical-constants> (accessed: 01.12.2019).

4. Vasil'ev D. R., Karpov O. V., Krutikov V. N., Kutovoi V. D., Tertychnaya M. A., Sherstobitov S. V., *Measurement Techniques*, 2003, vol. 46, no. 3, pp. 254–261. DOI: 10.1023/A:1024061212665

5. Hamilton C. A., Burroughs C. J., Kautz R. L., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, vol. 44, no. 2, pp. 223–225. DOI: 10.1109/19.377816

6. Benz S. P., Hamilton C.A., *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, no. 22, pp. 3171–3173. DOI: 10.1063/1.115814

7. Karpov O. V., Buchstaber V. M., Tertychnaya M. A., Tertychnyi S. I., Sherstobitov S. V., *Communications Technology*

and *Electronics*, 2009, vol. 54, no. 2, pp. 234–240. DOI: 10.1134/S1064226909020181

8. Karpov O. V., Buchstaber V. M., Sherstobitov S. V., Tertychniy S. I., Tertychnaya M. A., Niemeyer J., *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 104, no. 9, pp.093911–093911-4. DOI: 10.1063/1.2960455

9. Urano C., Kaneko N., Oe T., Maezawa M., Itatani T., Gorwadkar S., Saitu H., Maeda J., Kiryu S., *Physica C*. 2007, vol. 464–465, pp. 1123–1126. DOI: 10.1016/j.physc.2007.01.066

10. Kieler O., Karlsen B., Per Alfred Ohlckers, Bardalen E., Muhammad Nadeem Akram, Behr R., Ireland J., Williams J., Malmbeek H., Palafox L., Wendisch R., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, no. 5, p. 1200205. DOI:10.1109/tim.2018.2877562

11. Sherstobitov S. V., Dobrovolskiy V. I., Karpova M. V., Optically driven quantum Josephson voltage standard. *Abstracts of BIPM Workshop The Quantum Revolution in Metrology*, Paris, France, September 28–29, 2017. available at: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/WS-Quantum-Revolution/S4/S4-15.pdf> (accessed: 20.11.2019).

12. Kalitkin N. N. *Chislennye metody*. St. Petersburg, BXV-Petersburg Publ., 2011, 592 p. (in Russian).

13. Karpov O. V., Buchstaber V. M., Sherstobitov S. V., Tertychniy S. I., Niemeyer J., Kieler O., *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, pp. 93–97. DOI: 10.1063/1.2358817

14. Kieler O. F., Behr R., Wendisch R., Bauer S., Palafox L., Kohlmann J., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2014.2366916

15. Oliver F. Kieler, Thomas Scheller, Johannes Kohlmann, Cryocooler Operation of a Pulse-Driven AC Josephson Voltage Standard at PTB, *World Journal of Condensed Matter Physics*, 2013, vol. 3, pp.189–193. DOI: 10.4236/wjcmp.2013.34031

Дата поступления: 20.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Quantum effects and fundamental constants in the basis of standards of electric units

Sergey V. Sherstobitov, Maria V. Karpova, Marina A. Tertychnaya

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: s_sherstobitov@rambler.ru, Lab-610@vniifri.ru, marina_ter@mail.ru

The paper describes the principles of construction of modern standards in the field of electrical units with reference to quantum effects and fundamental constants in accordance with the new definitions of the SI system of units. The description of the methods used to build a quantum standards, description of the used measurement quantum transducers, modes and operation principle the experimental setup of the reference complex studied in this work. The description of the software developed for this task is given. The method of measurements and the results obtained in the course of experimental studies, which are in good agreement with theoretical studies, are described. Conclusions and tasks for future research are formulated. Field of application – metrology of measuring instruments of electrical units.

Key words: Josephson effect, standard of CD voltage, standard of AC voltage, quantum measurement transducer.