

УДК 537.312.62

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (ВОЛЬТА) ВЭТ 13-13-01

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

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

Lab-610@vniiftri.ru

*В статье изложен принцип работы вторичного эталона единицы постоянного электрического напряжения ВЭТ 13-13-01, использующий для воспроизведения единицы электрического напряжения вольта квантовые эффекты в сверхпроводниках, в частности эффект Джозефсона. Эталон является основой электрических измерений, к которому также привязываются многие электро-химические измерения. Приводится описание и результаты метрологических исследований эталона с 2001 по 2015 годы.*

*Article is stated principle of the work secondary voltage standard VET 13-13-01, using for reproducing the unit of the voltage a quantum effects in superconductor, in particular Josephson effect. The Standard is a base of the electric measurements to which also become attached many electro-chemical measurements. Happens the description and results of the metrological studies of the standard with 2001 on 2015.*

*Ключевые слова: вторичный эталон, электрические напряжения, эффект Джозефсона, квантовые эффекты*

Вторичный эталон единицы постоянного электрического напряжения ВЭТ 13-13-01 (далее – вторичный эталон) разработан во ФГУП «ВНИИФТРИ» и с 2001 года активно используется на предприятии. Вторичный эталон предназначен для решения следующих основных задач.

1. Метрологическое обеспечение производства средств измерений на основе прецизионных стабилизаторов, в частности, твердотельных мер напряжения.

2. Метрологическое обеспечение средств измерений на основе прецизионных ЦАП и АЦП, используемых в области геофизических, акустических и гидроакустических измерений, калибраторов и измерителей электрических величин.

3. Метрологическое обеспечение средств измерений высшего звена в области электрохимии и физхимии.

Именно в этих областях деятельности, закрепленных за ФГУП «ВНИИФТРИ», в последнее время ощущается потребность в точных электрических измерениях, реализация которых возможна на аппаратуре вторичного эталона с использованием эффекта Джозефсона [1,2].

Метрологические характеристики вторичного эталона:

- номинальное значение постоянного электрического напряжения, при котором эталон хранит и передает единицу, составляет 1 В, 10 В;

- среднее квадратическое отклонение результатов измерений  $S_{\Sigma 0}$  при сличении с государственным первичным эталоном не превышает  $5 \cdot 10^{-8}$  при 10 независимых измерениях;

- нестабильность эталона за год  $\nu_0$  не превышает  $3 \cdot 10^{-7}$ .

Межаттестационный интервал эталона составляет 36 месяцев.

В состав вторичного эталона входят: групповая мера напряжения на основе термостатированных нормальных элементов (МНЭ), квантовая мера напряжения на эффекте Джозефсона, твердотельная мера на прецизионных стабилизаторах, аппаратура для компарирования напряжения постоянного тока, состоящая из нановольтметра, мультиметра, коммутатора.

МНЭ обеспечивает хранение размера единицы электрического напряжения (вольта). Квантовая мера напряжения на эффекте Джозефсона воспроизводит размер вольта с привязкой к фундаментальным константам и обеспечивает контроль нестабильности электродвижущей силы (ЭДС) МНЭ. Твердотельная мера на прецизионных стабилизаторах предназначена для передачи размера напряжения на уровнях 1 В и 10 В от вторичного эталона к эталонам более низких звеньев поверочной схемы и проведения сличений с государственным первичным эталоном единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01.

МНЭ состоит из группы нормальных элементов в термостате. В группу входят шесть нормальных элементов типа Х482, причем 5 нормальных элементов (№7, №8, №9, №11 и №12) используются для хранения размера единицы постоянного электрического напряжения, а один из них (№10) – для передачи размера единицы.

Термостат МНЭ имеет двухконтурную схему регулирования температуры и включает в себя следующие узлы: ячейку с нормальными элементами, тепловой экран, схемы регулирования температуры первого и второго контуров, контрольный платиновый термометр сопротивления и систему питания термометра. Термостат снабжен источником бесперебойного питания от аккумулятора, который обеспечивает его функционирование при возможных кратковременных отключениях электрической сети. Термостат настроен на поддержание температуры нормальных элементов на уровне  $T_0 = 30,275$  °С. Температура нормальных элементов измеряется с помощью контрольного платинового термометра сопротивления ТСПН-5В с номинальным сопротивлением 100 Ом.

Проведенные исследования эталона в период с 2001 по 2015 гг. показали, что нестабильность температуры в течение 1 ч составляет менее 0,3 мК. Анализ результатов исследований показал, что термостат полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к термостатам для эталонов на нормальных элементах ( $\delta T \leq 2$  мК за время измерений).

Квантовая мера напряжения состоит из криозонда с джозефсоновским

интегральным преобразователем, который погружается во время работы в сосуд Дьюара с жидким гелием, генератора СВЧ диапазона 68-76 ГГц, рубидиевого стандарта частоты для привязки частоты СВЧ генератора, частотомера, осциллографа и блока смещения.

Квантовая мера напряжения является источником точного напряжения, формируемого с использованием эффекта Джозефсона, в котором СВЧ частота преобразуется в высокостабильное напряжение постоянного тока.

При смещении джозефсоновского перехода переменным СВЧ током частотой  $f_p$  на нём возникает постоянное напряжение  $U_J = n f_p / K_J$ , где  $K_J = 483597,9$  ГГц/В – константа Джозефсона,  $n$  – номер ступеньки Шапиро,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

В процессе работы квантовой меры значения напряжения постоянного тока передаются твердотельной мере на уровне 1,018 В и 10 В или прецизионным вольтметрам. Затем размер единицы напряжения используется для контроля стабильности групповой меры на нормальных элементах.

Результаты измерений напряжения МНЭ за период с 2001 г. по 2015 г., полученные в рамках сличений при поверке на Государственном первичном эталоне единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01, представлены на рис. 1. Относительная нестабильность групповой МНЭ за год, определенная в результате анализа последних двух сличений, проведенных в июле 2015 года и апреле 2012 года, составила порядка  $3,3 \cdot 10^{-8}$ .

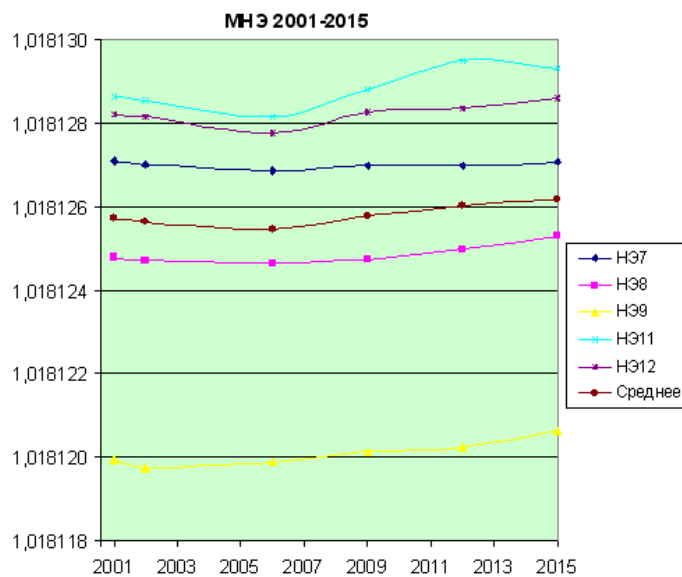


Рис. 1. Результаты измерений меры на нормальных элементах с 2001 по 2015 годы

Аппаратура вторичного эталона, комплекс высокостабильных мер и измерителей напряжения и термостатированных мер электрического сопротивления используются также для косвенных измерений силы тока. С помощью аппаратуры проходит поверка, калибровка, юстировка широкого спектра средств измерений, используемых как во ФГУП «ВНИИФТРИ» в составе государственных эталонов, так и сторонних предприятий в областях электрических, электрохимических и других видах измерений.

В настоящее время аппаратура квантовой меры вторичного эталона ВЭТ 13-13-01 используется для воспроизведения не только постоянного, но и переменного электрического напряжения на эффекте Джозефсона [2,3]. В экспериментальной установке используется Джозефсоновский интегральный преобразователь (рис. 2), состоящий из двоичных групп Джозефсоновских переходов типа SNS (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник) общим числом 69631 переходов. Преобразователь облучается СВЧ частотой диапазона 75 ГГц.

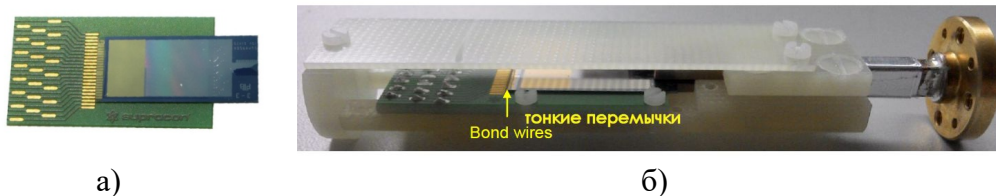


Рис. 2. Джозефсоновский интегральный преобразователь  
 а) внешний вид джозефсоновского интегрального преобразователя SNS 10 В 75 ГГц;  
 б) преобразователь, установленный на держателе с СВЧ волноводным фланцем

При облучении преобразователя СВЧ частотой диапазона 75 ГГц на его вольт-амперной характеристике появляются ступеньки напряжения (рис. 3).

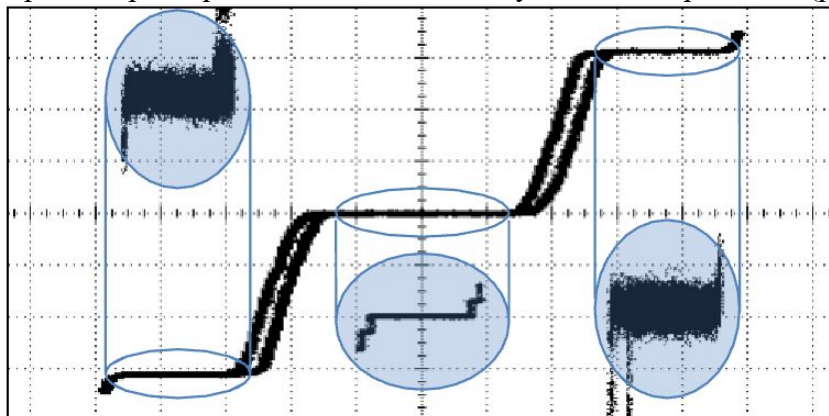


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика Джозефсоновского интегрального преобразователя SNS 75 ГГц 10 В. По оси X: 1 мА/дел., по оси Y: 3,4 В/дел

Данный преобразователь изготовлен совместно немецкими институтом РТВ и фирмой Supracon. Преобразователь имеет критический ток порядка 3,6 мА, ширину  $\pm 1$  ступеньки порядка 1,2 мА и рассчитан на воспроизведение постоянного и быстро программируемого переменного напряжения с выходным напряжением от  $\pm 150$  мкВ до  $\pm 10,7$  В, 17 Бит. Экспериментальная установка совместно с преобразователем переменного напряжения прецизионным Fluke 792А позволяет проводить измерения постоянного и переменного напряжения с большой точностью, определять нелинейность и проводить калибровку средств измерений электрических величин, ЦАП – АЦП, измерительных преобразователей.

### Литература

1. Васильев Д.Р., Карпов О.В., Крутиков В.Н., Кутовой 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.
2. Karpov O.V., Buchstaber V.M., Sherstobitov S.V., Tertychniy S.I., Tertychnaya M.A., Niemeyer J.// Quantum digital ac waveform synthesizer on pulse-width modulation method// Journal of Applied Physics, 2008, т. 104. № 9, p. 093911-4.
3. 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.