

# Основы воспроизведения постоянного напряжения с применением эталона Вольты на эффекте Джозефсона

М. Н. Беликова<sup>1</sup>, А. С. Катков<sup>2</sup>, Ю. А. Громова, Д. В. Шавалдин

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им Д.И. Менделеева

<sup>1</sup>m.n.belikova@vniim.ru, <sup>2</sup>a.s.katkov@vniim.ru

**Аннотация:** В статье представлена история развития эталона Вольты в России. Рассмотрены основы воспроизведения единицы электрического напряжения государственного первичного эталона на каждом этапе развития.

**Ключевые слова:** эталон Вольты, эффект Джозефсона, нормальные элементы, меры напряжения на основе стабилитронов

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электрическое постоянное напряжение и точность его измерения имеет ключевое значение в разных отраслях: авиационной, оборонной, космической промышленности, медицине и науке.

История создания эталона Вольты в России начинается с 1899 г. [1]. В этом году начались работы по созданию эталона, в основе которого применялись нормальные элементы (далее по тексту – НЭ). Внешний вид НЭ представлен на рис. 1.

Нормальный элемент – это химический источник электрического тока с высокостабильной электродвижущей силой (далее по тексту – ЭДС).

В качестве эталона использовались НЭ в виде группы, состоящей из 19 НЭ, чтобы уменьшить случайную погрешность и обеспечить более точное определение действительного значения НЭ.

Основное преимущество НЭ, это высокая стабильность во времени. Действительное значение ЭДС НЭ может быть неизменным в течение долгих лет с точностью до микровольт.

К недостаткам НЭ можно отнести высокую чувствительность к вибрации, температуре и к токам нагрузки.

До 1980 г. НЭ применялись в качестве эталона Вольты для хранения и передачи единицы электрического постоянного напряжения.

В связи с недостатками НЭ в конце 60-х и 70-х годов в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» проводились исследования по использованию кремневых стабилитронов (диодов Зенера) для создания стабильных мер напряжения.



Рис. 1. Внешний вид НЭ

## II. МЕРЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИТРОНОВ

С появлением прецизионных стабилитронов, появилась возможность использования эталонных источников напряжения разработанных на их основе.

Мера напряжения, основанная на стабилитронах – это источник постоянного напряжения, предназначенный для хранения и передачи электрического напряжения с высокой точностью.

Принцип работы основывается на стабилизации напряжения прецизионным стабилитроном с компенсацией температурного дрейфа.

Благодаря небольшим габаритам, весу, малой зависимости от температуры и вибраций, а также высокой стабильности, мера напряжения, основанная на стабилитронах, может использоваться в качестве транспортируемого эталона напряжения.

В 70-е годы произошел переход на воспроизведение физических величин через фундаментальные физические константы с применением квантовых эффектов, таких как эффект Джозефсона.

### III. СТАДИИ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОНА ВОЛЬТА НА ЭФФЕКТЕ ДЖОЗЕФСОНА

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в 1980 г. завершил разработку и утвердил государственный первичный эталон единицы электрического напряжения ГЭТ 13-80 [2], в состав которого была включена установка на эффекте Джозефсона., предназначенная для контроля стабильности группы из 19 НЭ. Установка включала планарный переход Джозефсона на основе свинца разработанный во ВНИИМ. Напряжение на переходе Джозефсона 1 мВ, частота облучения 8 ГГц, резистивный делитель каскадного типа 1000:1 и гальванометр типа НФК-3 с чувствительностью 1 нВ. Точность эталона характеризовалась значением НСП  $1 \cdot 10^{-6}$  и СКО  $5 \cdot 10^{-8}$ .

В дальнейшем были проведены работы по модернизации аппаратуры эталона, внедрены переходы Джозефсона точечного типа из ниобия. Напряжение на переходах составляло порядка 8 мВ, частота облучения 8 ГГц. В состав аппаратуры включен криогенный делитель 121:1 и нуль-индикатор на основе СКВИДа. Группа НЭ переведена в статус эталона-копии. Точность утвержденного эталона Вольта второго поколения ГЭТ 13-89 [3] характеризовалась оценками НСП  $5 \cdot 10^{-9}$  и СКО  $5 \cdot 10^{-9}$ .

В процессе дальнейшей модернизации морально устаревшей аппаратуры в 2001 г. был утвержден эталон Вольта третьего поколения ГЭТ 13-01 [4].

### IV. СОСТАВ ЭТАЛОНА ВОЛЬТА

В состав эталона ГЭТ 13-01 входит:

- криогенный преобразователь частоты в постоянное напряжение на основе джозефсоновской микросхемы;
- сверхвысокочастотный (далее по тексту – СВЧ) генератор;
- синтезатор;
- аппаратура для контроля и управления;
- аппаратура для осуществления передачи единицы напряжения;
- аппаратура для контроля условий содержания и применения первичного эталона.

### V. ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА

Эффект Джозефсона был открыт в 1962 г. физиком Брайаном Джозефсоном.

Эффект состоит в том, что ток сверхпроводимости протекает через тонкий слой диэлектрика, который разделяет два сверхпроводника.

Сверхпроводящее состояние возникает между двумя электродами, соединенными между собой электрическим контактом, погруженным в жидкий гелий, имеющим температуру 4 К.

На данный момент микросхемы на основе джозефсоновских переходов выполняют роль

криогенных преобразователей частоты в напряжение для реализации эффекта Джозефсона. Существуют разные типы переходов, применяемые в эталоне Вольта:

- SIS – сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник;
- SNS – сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник.

Преимущество SIS микросхемы в возможности воспроизведения напряжения при нулевом токе. Для получения большего напряжения необходимо сложить напряжения на нескольких переходах, увеличивая значения частоты.

Существенный недостаток микросхемы SIS в невозможности зафиксировать напряжение в течение длительного времени из-за возможных спонтанных переходов с одного квантового уровня на другой.

Вольтамперная характеристика SIS микросхемы представлена на рис. 2.

Преимущество SNS микросхемы по отношению к SIS в формировании более стабильных ступенек напряжения. К недостаткам можно отнести более высокие требования к равенству параметров входящих в микросхему переходов и содержание большего количества переходов для формирования заданного выходного напряжения.

SIS и SNS микросхемы формируют квантовые напряжения в диапазоне от -10 В до +10 В.

Вольтамперная характеристика SNS микросхемы представлена на рис. 3.

Туннельный ток (ток сверхпроводимости) двух электронов, связанных между собой, зависит от разности фаз степени свободы этих электронов и критического тока. В таких условиях возникает стационарный эффект Джозефсона на постоянном токе.

Критический ток – это ток, при котором сопротивление перестает равняться нулю. У каждой микросхемы значение критического тока свое.

Вольтамперная характеристика (далее по тексту – ВАХ) позволяет наблюдать значение критического тока, для предварительной оценки работоспособности микросхемы.

Как только ток достигает критического значения, появляется сопротивление, вследствие чего и напряжение, образуется нестационарный эффект Джозефсона.

При облучении СВЧ сигналом криогенного преобразователя, содержащего джозефсоновскую микросхему, ВАХ позволяет наблюдать стабильные квантовые ступени напряжения, описываемые уравнением (1).

$$U = N \frac{h}{2e} f = \frac{Nf}{K_J}, \quad (1)$$

где  $N$  – номер ступеньки;  $f$  – частота облучения перехода;  $K_J$  – константа Джозефсона.

Константа Джозефсона  $K_J = 483597,848416984$  ГГц/В, рекомендованная 26 Генеральной конференцией по мерам и весам состоявшей 20 мая 2019 г. До этого времени применяло значение константы  $K_{J90} = 483594,7$  ГГц/В.

Из формулы (1) следует, что напряжение зависит от номера квантовой ступеньки и частоты облучения перехода.



Рис. 1. BAX SIS перехода а) без СВЧ облучения; б) с СВЧ облучением



Рис. 2. BAX SNS перехода а) без СВЧ облучения; б) с СВЧ облучением

## VI. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭТАЛОНА ВОЛЬТА

Передача единицы электрического постоянного напряжения поверяемой (калибруемой) мере производится методом сравнения с помощью компаратора.

С помощью блока видеоконтроля устанавливается необходимое число квантовых ступенек.

Частота СВЧ сигнала синхронизируется с опорной частотой 10 МГц.

Параметры микросхемы на основе джозефсоновского перехода контролируются при помощи осциллографа.

Передача единицы электрического напряжения производится при двух полярностях воспроизводимого напряжения.

Производятся расчет среднего и среднеквадратического значения.

## VII. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭТАЛОНА ВОЛЬТА

На данный момент завершены работы по совершенствованию эталона Вольта на эффекте Джозефсона с помощью установки, выпускаемой фирмой Suprascon. Установка реализует квантовый эффект Джозефсона на новой технологической базе с применением программируемой джозефсоновской микросхемы.

Измерения происходят в автоматическом режиме. С применением микросхемы нового поколения расширился диапазон воспроизводимого напряжения (1 мВ – 10 В), расширились функциональные возможности эталона – проведение поверки и калибровки как мер напряжения, так и калибраторов и вольтметров в автоматическом режиме.

## VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эталоны квантовых эффектов создаются на основе применения фундаментальных физических констант, которые мало зависят от внешних условий и максимально стабильны. Эффект Джозефсона применяют для эталона Вольта во всем мире, т.к. входящие в уравнение измерения заряд электрона ( $e$ ) и постоянная Планка ( $h$ ) – являются константами, а частота воспроизводится с неопределенностью менее  $3 \cdot 10^{-10}$ , что позволяет получать точное и независимое от внешних факторов воспроизведение постоянного электрического напряжения.

Перспективы развития эталона Вольта включают расширение диапазона измерений, функциональных возможностей, включающих проведение измерений нестационарных сигналов, что отражается в появлении квантовых методов измерения переменных напряжений и перспективах проведения международных сличений в данной области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Егоров Н.Г. Временник, ч.4. О правительственной выверке электрических измерительных приборов в западноевропейских государствах. 1899, 81-121.
- [2] Тарбеев Ю.В., Колтик Е.Д., Рождественская Т.Б., Галахова О.П., Краснов К.А., Кржимовский В.И. Новый государственный первичный эталон единицы электродвижущей силы – вольта // Измерительная техника №12, 1981, с. 3-5.
- [3] Колтик Е.Д., Галахова О.П., Кржимовский В.И., Катков А.С., Ловцос В.Э., Мжень А.С., Гуревич В.М., Короткова И.В. Государственный первичный эталон единицы ЭДС и переход на новый размер вольта // Измерительная техника. 1991, N10, с. 6-7.
- [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, N3, 2002, с. 6-9.