

## Эталонная база России в области измерений малых постоянных токов в диапазоне $10^{-16}$ — $10^{-9}$ А

О. М. ПАВЛОВ, А. В. ПОКУСАЕВ, Г. П. ТЕЛИТЧЕНКО

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,  
e-mail: G.P.Telitchenko@vniim.ru

Рассмотрено современное состояние эталонной базы России в области измерений малых постоянных токов в диапазоне  $10^{-16}$ — $10^{-9}$  А, приведены метрологические характеристики государственного первичного и транспортируемого эталонов.

**Ключевые слова:** эталон, малый постоянный электрический ток, нанотехнологии, сличения.

The modern condition of standards base of Russia in the field of small current measurements for the range  $10^{-16}$ — $10^{-9}$  A is considered. Metrological features of state primary and transfer standards are shown.

**Key words:** standard, small dc current, nanotechnologies, comparisons.

Приборы для измерения малых постоянных токов в диапазоне  $10^{-16}$ — $10^{-9}$  А и связанных с ними физических величин (постоянное напряжение в высокоомных цепях до  $10^{17}$  Ом, высокоомные сопротивления до  $10^{18}$  Ом, заряды до  $10^{-16}$  Кл) получили название электрометров. Совершенство элементарной базы их входных устройств, принципов построения привело к созданию нового поколения электрометров с использованием микропроцессоров.

Эти приборы применяют в различных областях науки и техники: в биологии — при исследованиях на молекулярном уровне, например, шумовых характеристик мембран биологической клетки; в ядерной физике — при изучении свойств различных веществ; в космических исследованиях — для определения радиационных поясов Земли, измерения степени вакуума; в атомной энергетике — для контроля уровня мощности нейтронного потока и выдачи сигналов предупредительной сигнализации и аварийной защиты; в области ионизирующих излучений — при измерении энергии излучений, параметров нейтронных потоков; в медицине — для контроля уровня облучения при химиотерапии. Они также находят широкое применение при изучении свойств диэлектриков, полупроводников и микросхем. В последние годы активизируются работы по повышению точности воспроизведения и измерения малых токов для решения проблем в области нанотехнологии: при создании элементарной базы микроэлектроники, нанoeлектроники и квантовых компьютеров.

В нашей стране находится в эксплуатации значительное количество разнообразной электрометрической аппаратуры: электрометрические вольтметры ИТЛ-02, ИТН-7, ЭМ-1, В7Э-3, В7-29, В7-30, В7Э-42, В7-45, В7-57 трех модификаций; электрометрические усилители У5-8, У5-9; эталонные калибраторы малых постоянных токов ИТ-12, ЕК1-6, НК4-1; эталонные источники малых токов ИИТ-9 — ИИТ-13. В настоящее время парк электрометрических приборов стремительно расширяется в основном за счет разработок зарубежных фирм. В частности, фирма Keithley Instruments поставляет на рынок приборы более десяти различных модификаций.

В России метрологическое обеспечение средств измерений (СИ) малых постоянных токов в диапазоне  $10^{-16}$ — $10^{-9}$  А осуществляется в соответствии с государственной поверочной схемой [1], возглавляемой государственным первичным эталоном единицы силы постоянного электрического тока ГЭТ 4—91 [2, 3]. Государственный эталон представляет собой автоматизированный комплекс средств измерений. Уравнение измерения, положенное в основу его построения, имеет вид

$$I = CdU/dt,$$

где  $I$  — сила тока;  $C$  — емкость эталонного конденсатора;  $dU/dt$  — изменение напряжения в единицу времени.

При передаче размера единицы эталонным мерам тока используется нулевой компенсационный метод, сущность которого состоит в компенсации зарядов, создаваемых на пластинах эталонного конденсатора токами первичного эталона и поверяемой меры. Комплекс аппаратуры эталона обеспечивает воспроизведение, хранение единицы силы постоянного тока и передачу ее размера в диапазоне  $10^{-16}$ — $10^{-9}$  А. Его метрологические характеристики приведены в табл. 1. Измерительные и калибровочные возможности ВНИИМ в области измерений малых постоянных токов получили международное признание и отражены в банке данных МБМВ (система СМС).

Таблица 1  
Метрологические характеристики ГЭТ 4—91

Диапазон воспроизводимого тока, А	Неисключенная систематическая погрешность	Среднее квадратическое отклонение
$10^{-16}$ — $10^{-15}$	$25 \cdot 10^{-3}$ — $6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$ — $2,5 \cdot 10^{-3}$
$10^{-15}$ — $10^{-14}$	$6 \cdot 10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$ — $0,2 \cdot 10^{-3}$
$10^{-14}$ — $10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
$10^{-13}$ — $10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
$10^{-11}$ — $10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-3}$ — $0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$ — $0,02 \cdot 10^{-3}$

В соответствии с [1] измерители тока в диапазоне  $10^{-16}$ — $10^{-5}$  А поверяют комплектно по мерам малых постоянных токов, но допускается также поэлементная поверка. Однако недостатками поэлементной поверки являются низкая производительность и невысокая точность при высоких требованиях к квалификации поверителей и, кроме того, невозможность определить случайные погрешности поверяемого СИ [4]. В связи с этим предпочтение следует отдать комплектной поверке, осуществляемой по мерам тока. Поэтому для метрологического обеспечения СИ малых постоянных токов разработаны методы и средства поверки, обеспечивающие прямую передачу размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (РСИ), чтобы исключить из нижних звеньев поверочной схемы поэлементную поверку.

Для поверки и калибровки измерителей малых постоянных токов различных типов требуются эталонные меры как с одним известным значением тока на выходе, так и многозначные. Первые предназначены для встраивания в РСИ, чтобы обеспечить периодическую калибровку СИ, в том числе и в автоматическом режиме [5]. В частности, измерители малых токов с логарифмической характеристикой [6] вообще не могут быть прокалиброваны или поверены без встроенных мер малых постоянных токов. Меры малых постоянных токов используются также при компенсационном методе поверки. Они должны обеспечивать изменение воспроизводимого тока во всем диапазоне с дискретностью, по крайней мере, в три раза меньшей их погрешности. Это позволяет при поверке измерителей малых токов со стрелочным отсчетом, изменяя ток меры, установить стрелку прибора на соответствующую оцифрованную отметку, а при поверке цифровых измерителей — установить необходимое значение тока с учетом их разрешающей способности.

К настоящему времени в метрологическую практику России внедрены рабочие эталоны постоянного тока 1-го разряда, доверительная погрешность которых при  $P = 0,95$  составляет  $1,6 \cdot 10^{-2} — 1 \cdot 10^{-6}$ :

резистивно-емкостные эталонные установки УМПТ-5 (диапазон воспроизведения и измерения тока  $10^{-15}$ — $10^{-5}$  А), в которых реализован компенсационный метод измерения тока;

резистивные меры тока (калибраторы тока) типов ПЗ20 (диапазон воспроизведения  $10^{-4}$ — $10^{-1}$  А), ПЗ21 (диапазон воспроизведения  $10^{-4}$ —10 А), МП3001 (диапазон воспроизведения  $10^{-4}$ —30 А);

рабочие эталоны 2-го разряда, доверительная погрешность которых при  $P = 0,95$  составляет  $10 \cdot 10^{-2}$ — $5 \cdot 10^{-3}$ :

резистивно-емкостные эталонные калибраторы тока типов ИТ-12 (диапазон воспроизведения  $10^{-16}$ — $10^{-7}$  А), ЕК1-6 (диапазон воспроизведения  $10^{-16}$ — $10^{-3}$  А), НК4-1 (диапазон воспроизведения  $10^{-16}$ — $10^{-2}$  А);

ионизационные меры тока ИИТ-12—ИИТ-9 (диапазоны воспроизведения  $10^{-12}$ — $10^{-9}$  А);

резистивные меры тока (калибраторы тока) типов ПЗ20 (диапазон воспроизведения  $10^{-7}$ — $10^{-5}$  А), ПЗ21 (диапазон воспроизведения  $10^{-7}$ — $10^{-5}$  А), МП3001 (диапазон воспроизведения  $10^{-7}$ — $10^{-5}$  А), mod 261 фирмы Keithley, США (диапазон воспроизведения  $10^{-14}$ — $10^{-6}$  А).

В последние годы в метрологических лабораториях ведущих стран мира возрос интерес к воспроизведению и измерению сверхмалых постоянных токов (менее  $10^{-10}$  А) в связи с исследованиями устройств, использующих эффект одноэлектронного туннелирования [7]. Поэтому появилась необ-

ходимость в сличении исходных эталонов, предназначенных для работы в этой области измерений. Как известно, для этой цели в метрологической практике применяют транспортируемые эталоны сравнения. Транспортируемый эталон позволяет также осуществить передачу размера единицы от государственного первичного эталона единицы силы постоянного электрического тока рабочим эталонам и РСИ высшей точности на месте их эксплуатации.

Для решения этой задачи в 2003 г. во ВНИИМ создан малогабаритный транспортируемый эталон малых постоянных токов [8]. В основу его положен тот же метод измерений, который использован в ГЭТ 4—91. Однако в этом случае для создания пилообразного напряжения применена цифровая мера линейно изменяющегося напряжения. Принцип действия меры основан на преобразовании цифровых сигналов, вырабатываемых специальным управляющим устройством, в линейно изменяющееся напряжение, которое поступает на вход дифференцирующего блока. Набор дифференцирующих блоков обеспечивает воспроизведение токов в диапазоне  $10^{-15}$ — $10^{-9}$  А. Напряжение на выходе цифровой меры может линейно увеличиваться или уменьшаться в диапазоне 0—24 В в автоматическом режиме, длительность его воспроизведения можно задавать в диапазоне 20—2000 с, крутизну регулировать с дискретностью 1 мВ/с в диапазоне 1—100 мВ/с.

Транспортируемый эталон исследовали комплектным методом на ГЭТ, однако конструктивно предусмотрена также поэлементная поверка по разработанной методике. Метрологические характеристики эталона приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метрологические характеристики транспортируемого эталона малых постоянных токов

Номинальное значение силы тока, А	Неопределенность типа А, $u_A$	Неопределенность типа В, $u_B$	Расширенная неопределенность ( $P = 95\%$ , $k = 2$ ), $U$
$1,0 \cdot 10^{-15}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
$1,0 \cdot 10^{-14}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-13}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-12}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
$1,0 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Метрологические характеристики действующих эталонов позволяют обеспечить поверку и калибровку имеющихся в обращении СИ. Однако наблюдаемая тенденция к повышению метрологических характеристик электрометров, выпускаемых зарубежными фирмами и поступающих во все большем количестве в Россию, требует как модернизации существующего ГЭТ, так и создания эталона малых постоянных токов на принципиально новой основе. Один из возможных путей построения такого эталона — применение счета электронов для расширения диапазона тока в сторону сверхмалых токов. Исследования в этом направлении позволяют наряду с использованием эффекта одноэлектронного туннелирования предложить метод абсолютного воспроизведения малых постоянных токов вплоть до  $10^{-19}$  А.

Литература

1. **ГОСТ 8.022—91.** ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения силы постоянного электрического тока в диапазоне  $1 \cdot 10^{-16}$ —30 А.  
 2. **Katkov A. S. e. a.** // Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Symp. Electromagnetic Metrology. — Peking (China), 1993. — P. 47.  
 3. **Катков А. С. и др.** // Измерительная техника. — 1995. — № 1. — С. 3; **Katkov A. S. e. a.** // Measurement Techniques. — 1995. — V. 38. — N 1. — P. 1.

4. **Илюкович А. М., Куликов В. А.** Средства поверки электрометрической аппаратуры. — М.: Изд-во стандартов, 1978.  
 5. **Антонова Д. И. и др.** Методы и средства измерения малых постоянных токов и их метрологическое обеспечение. — М.: Изд-во стандартов, 1983.  
 6. **Всеволожский Л. А.** // Исследования в области электрометрии / Тр. ВНИИФТРИ. — 1970. — Вып. 1(31). — Ч. 2. — С. 34.  
 7. **Wilde Y. D. e. a.** // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 2001. — V. 50. — N 2. — P. 231.  
 8. **Alexandrov V. S. e. a.** // CPEM Digest. — 2004. — P. 550.

Дата одобрения 03.09.2007 г.

621.317.321

## Состояние и перспективы развития эталонной базы России в области измерений постоянного электрического напряжения

**В. С. АЛЕКСАНДРОВ, А. С. КАТКОВ**

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,  
 e-mail: A.S.Katkov@vniim.ru*

*Рассмотрены вопросы развития эталонной базы России в области измерений постоянного электрического напряжения в диапазоне до 1000 В.*

**Ключевые слова:** эталон вольта, эффект Джозефсона, меры напряжения.

*Questions of development of measurement standard base of Russia in the field of dc electric voltage measurements in a range up to 1000 V are considered.*

**Key words:** voltage standard, Josephson effect, voltage references.

Потребность в повышении точности измерений постоянного электрического напряжения существует практически во всех современных отраслях экономики России. Высокая точность результатов этих измерений является основой решения многих актуальных измерительных задач критических технологий федерального уровня в приоритетных направлениях развития техники. С 90-х годов XX столетия парк средств измерений постоянного напряжения претерпел значительные структурные изменения. В самые последние годы в связи с ростом промышленного производства разрабатываются отечественные и закупаются современные импортные приборы высокой точности, что требует совершенствования средств и методик измерений для использования их в национальной системе метрологического обеспечения. Применяемые приборы для измерений постоянного напряжения (8,5-разрядные калибраторы, вольтметры, аналого-цифровые преобразователи) по своим метрологическим параметрам приближаются к уровню точности государственного первичного эталона.

Важным этапом международных отношений стало подписание Россией в 1999 г. Соглашения о взаимном при-

знании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, целью которого является установить степень эквивалентности национальных измерительных эталонов, поддерживаемых национальными метрологическими институтами (НМИ), и тем самым создать надежную техническую базу для расширения договоренностей в международной торговле, коммерческой деятельности и делах, связанных с составлением нормативной документации.

Развитие системы обеспечения единства измерений обусловлено возможностями использования известных и новых физических явлений при создании исходных средств измерений, в частности, научных и технологических достижений в области физики твердого тела, применяемых для построения прецизионных преобразователей частоты в напряжение с помощью эффекта Джозефсона, прецизионных мер напряжения на стабилитронах.

Анализ точностных характеристик и предельных возможностей существующих методов измерения электрического напряжения однозначно показал, что измерительный принцип, который может служить основой для создания эталона