

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

А. С. КАТКОВ, И. В. КОРОТКОВА, В. Э. ЛОВЦЮС, О. М. ПАВЛОВ, В. И. ШЕВЦОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: o.m.pavlov@vniim.ru

Приведены области применения измерений силы постоянных электрических токов в диапазоне 10^{-16} — 10^{-9} А. Рассмотрены принципы действия и метрологические характеристики государственных эталонов единицы силы постоянного электрического тока — ампера: первичного ГЭТ 4—91 и сравнения ГВЭТ 4-01—2010.

Ключевые слова: электрометрическое средство измерений, калибратор, малые постоянные токи, эталон.

The application of low DC measurements in the range 10^{-16} — 10^{-9} A is presented. The principle of operation and metrological characteristics of the state DC unit — ampere — standards: primary GET 4—91 and comparison GVET 4-01—2010 are considered.

Key words: electrometric instrument, calibrator, low DC current, standard.

Количественная оценка процесса познания осуществляется через измерение, а проникновение в микромир связано с измерением предельных значений некоторых физических величин. К числу таких величин относится сила постоянного электрического тока в диапазоне 10^{-16} — 10^{-9} А. Приборы для измерения и воспроизведения силы постоянного тока в этом диапазоне, а также связанных с ним физических величин (постоянное напряжение в высокоомных цепях до 10^{17} Ом, высокоомные сопротивления до 10^{18} Ом, заряды) получили общее название электрометрических средств измерений (ЭСИ).

Приборы для измерения силы постоянного тока используются в различных областях. Они необходимы при проведении исследований на молекулярном уровне, например, при определении шумовых характеристик мембран биологической клетки. В ядерной физике с их помощью изучают различные свойства веществ; в космических исследованиях определяют радиационные пояса Земли, измеряют степень вакуума. В атомной энергетике такие приборы применяют для контроля уровня мощности нейтронного потока и подачи предупредительного и аварийного сигналов; в области ионизирующих излучений — при измерениях энергии излучений, 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 при создании элементной базы микро-, наноэлектроники и квантовых компьютеров.

Электрометрические приборы многофункциональны. Кроме измерения силы постоянного электрического тока в указанном диапазоне, с их помощью можно измерять постоянные напряжения от единиц микровольт до сотен вольт, сопротивления до 10^{18} Ом, заряды от 10^{-16} до 10^{-3} Кл. Разработаны также калибраторы токов и приборы, совмещающие в себе функции измерителя и калибратора.

Постоянно совершенствуется элементная база входных устройств и принципы построения электрометров. Создано и серийно выпускается новое поколение приборов с использованием микропроцессоров. В настоящее время парк ЭСИ

стремительно расширяется. В частности, фирма Keithley Instruments представляет на рынок приборы более 15 различных модификаций.

Во ВНИИМ единство измерений силы постоянного электрического тока в диапазоне 10^{-16} — 10^{-9} А обеспечивается путем воспроизведения единицы силы тока Государственным первичным эталоном единицы силы постоянного тока ГЭТ 4—91 [1, 2] в соответствии с поверочной схемой [3]. Эталон представляет автоматизированный комплекс средств измерений (СИ), работающий в двух режимах — воспроизведения и измерения токов.

Режим воспроизведения основан на методе получения выходных токов, использующем генератор линейно изменяющегося напряжения, на выходе которого подключается эталонный конденсатор постоянной емкости. Диапазон воспроизводимых токов определяется значениями линейно изменяющихся напряжений и эталонных конденсаторов постоянной емкости. Выходной ток многозначной меры определяется как

$$i_0 = C_0 \Delta U / \Delta t, \quad (1)$$

где C_0 — емкость эталонного конденсатора; Δt — промежуток времени воспроизведения силы тока, за который потенциал пластины конденсатора изменяется на ΔU .

При условии, что интервал Δt задан (10; 100 или 1000 с), а C_0 — эталонная емкость, в зависимости от диапазона равная 1; 10; 100 или 1000 пФ, сила воспроизводимого тока определяется из соотношения

$$i_0 = k \Delta U,$$

где $k = C_0 / \Delta t = \text{const}$.

Режим измерения токов основан на использовании компенсационного метода измерений. Сущность метода состоит в автоматической компенсации заряда, создаваемого неизвестным током на одной из пластин эталонного конденсатора, зарядом, создаваемым известным током на другой пластине конденсатора, т. е. осуществляется встречное включение многозначной меры постоянного тока с неизвестным аттестуемым источником тока.

Таблица 1

Метрологические характеристики ГЭТ 4—91

Диапазон воспроизводимого тока, А	Неопределенность		
	тип А, u_A	тип В, u_B	Расширенная при $P = 95 \%$, $k = 2$, U_p
$1,10^{-16} — 1,10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-3} — 4,7 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-3} — 5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2} — 1,4 \cdot 10^{-2}$
$1,10^{-15} — 1,10^{-14}$	$4,7 \cdot 10^{-4} — 1,8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3} — 1,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2} — 3 \cdot 10^{-3}$
$1,10^{-14} — 1,10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-4} — 1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3} — 1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3} — 2 \cdot 10^{-3}$
$1,10^{-13} — 1,10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-4} — 1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3} — 1,5 \cdot 10^{-3}$
$1,10^{-11} — 1,10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-4} — 3,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3} — 5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3} — 1,5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Метрологические характеристики ГВЭТ 4-01—2010

Диапазон воспроизводимого тока, А	Неопределенность		
	тип А, u_A	тип В, u_B	Расширенная при $P = 95 \%$, $k = 2$, U_p
$1,10^{-15} — 1,10^{-14}$	$8,5 \cdot 10^{-3} — 6,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2} — 3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-2} — 7,5 \cdot 10^{-3}$
$1,10^{-14} — 1,10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-4} — 3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-3} — 1,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3} — 2,8 \cdot 10^{-3}$
$1,10^{-13} — 1,10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-4} — 3,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3} — 1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3} — 2,7 \cdot 10^{-3}$
$1,10^{-12} — 1,10^{-11}$	$3,3 \cdot 10^{-4} — 2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3} — 7,5 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3} — 2 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-11} — 1 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-4} — 2,2 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4} — 7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3} — 1,5 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-10} — 1 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-4} — 2,3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4} — 4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3} — 1 \cdot 10^{-3}$

Метрологические характеристики эталона, полученные в результате теоретического и экспериментального исследований, приведены в табл. 1.

В последние годы в метрологических лабораториях ведущих стран возрос интерес к воспроизведению и измерению малых постоянных токов менее 10^{-9} А в связи с исследованиями устройств, использующих эффект одноэлектронного туннелирования [4]; появилась заинтересованность в сличении исходных эталонов, предназначенных для работы в этой области измерений. Для этой цели в метрологической практике применяются транспортируемые эталоны сравнения, которые позволяют осуществить передачу единицы от государственного первичного эталона единицы силы постоянного электрического тока рабочим эталонам и СИ высшей точности на месте их эксплуатации.

Для решения этой задачи во ВНИИМ создан малогабаритный транспортируемый эталон малых постоянных токов [5] — Государственный вторичный эталон единицы силы постоянного электрического тока — ампера в диапазоне $1 \cdot 10^{-15} — 1 \cdot 10^{-9}$ А (эталон сравнения) ГВЭТ 4-01—2010. В основу его положен тот же метод воспроизведения тока, который использован в ГЭТ 4—91, однако для создания линейно изменяющегося пилообразного напряжения применена цифровая мера. Принцип действия меры основан на преобразовании цифровых сигналов, вырабатываемых управляющим устройством, в линейно изменяющееся напряжение, которое поступает на вход дифференцирующего блока. Набор из пяти 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 воспроизведения напряжения можно задать в диапазоне 20—2000 с. Крутизну линейно изменяющегося напряжения можно регулировать с дискретностью 1 мВ/с в диапазоне 1—100 мВ/с.

Исследование ГВЭТ 4-01—2010 проводили комплексным методом на эталоне ГЭТ 4—91. Конструктивно предусмотрена также поэлементная поверка по разработанной методике. Метрологические характеристики ГВЭТ 4-01—2010, приведены в табл. 2.

Метрологические характеристики действующих эталонов позволяют обеспечить поверку и калибровку имеющихся в обращении ЭСИ. Измерительные и калибровочные возможности ВНИИМ в области измерений силы постоянных токов получили международное признание и внесены в банк данных МБМВ (система СМС).

Однако наблюдаемая тенденция к повышению метрологических характеристик ЭСИ требует как модернизации существующих эталонов, так и постановки поисковых работ по

созданию эталона малых постоянных токов на принципиально новой основе. Один из возможных путей построения такого эталона — использование счета электронов для повышения точности и расширения диапазона тока до 10^{-18} А [6]. Исследования в этом направлении позволят, наряду с эффектом одноэлектронного туннелирования, создать независимый метод абсолютного измерения и воспроизведения малых постоянных токов.

Литература

1. **Katkov A. S. e. a.** Primary Standard of Current Developed of VNIIM // Proc. 2nd Int. Symp. Electromagnetic Metrology. China, 1993. P. 47—48.
2. **Катков А.С. и др.** Государственный первичный эталон силы постоянного электрического тока — ампера // Измерительная техника. 1995. № 1. С. 3—4; **Katkov A. S. e. a.** State primary standard for the unit of direct current, the ampere // Measurement Techniques. 1995. V. 38. N. 1. P. 1—3.
3. **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.
4. **De Wilde Y. e. a.** Measurements of Single Electron Transistor Devices Combined with a CCC: Progress Report // IEEE Trans. IM. 2001. V. 50. N. 2. P. 231—234.
5. **Alexandrov V. S. e. a.** The VNIIM Transportable Lowest DC Current Standard // CPEM Digest, 2004. P. 550—551.
6. **Пат. 2478974 РФ.** Способ воспроизведения единицы силы постоянного электрического тока и устройство для его осуществления / В. С. Александров, О. М. Павлов, Г. П. Телитченко // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 10.

Дата принятия 09.09.2014 г.