

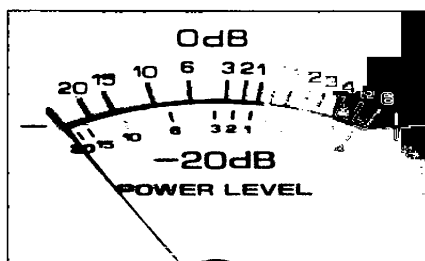
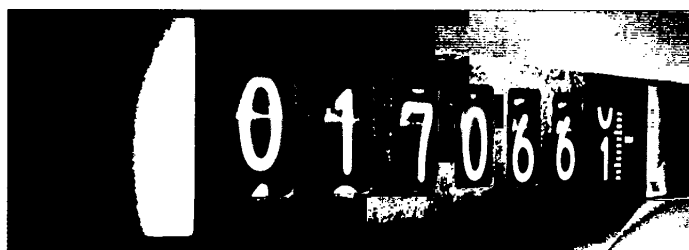
30K-1
6690

№2
2013

МЕТРОЛОГИЯ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Метрология



ИЗМЕРЕНИЯ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ



Всемирный день метрологии
20 Мая

www.worldmetrologyday.org



© 2013 BIPM-OIML

ISSN 2073 - 1469



9 772073 146008

В. П. Лобко,
П. А. Черняев,
Е. А. Казакова,
А. А. Волкодатов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МАЛЫХ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

УДК 006.85.621.217.785.024(047)(476)

В статье приведены результаты экспериментальных исследований основных узлов метрологического оборудования для воспроизведения малых постоянных токов.

The article provides results of an experimental research on basic components of metrological equipment used for reproduction of low direct currents.

Во второй половине прошедшего столетия на базе электрометров создано большое количество разнообразных приборов с широкими функциональными и эксплуатационными возможностями, которые обычно объединяют понятием «электрометрическая аппаратура» (ЭМА). Уровень развития современной ЭМА в значительной степени определяет прогресс ряда важнейших направлений науки и техники.

Физические процессы, определяющие метрологические характеристики ЭМА, во многом специфичны и не характерны для других направлений электроизмерительной техники. Большим своеобразием отличаются методы и средства для метрологического обеспечения единства и правильности измерений в электрометрическом диапазоне (по току – менее 10 нА, по сопротивлению постоянному току – более 100 Мом) [1]. Правила эксплуатации ЭМА также отличны от общепринятых для других измерительных приборов.

Современные тенденции и перспективы развития высокоточных измерений в области постоянного тока связаны с применением эталона вольт на эффекте Джозефсона и эталона ома на квантовом эффекте Холла, которые реализуют связь фундаментальных физических констант [2-4]. В области малых постоянных токов появляются квантовые устройства, реализующие связь силы тока с зарядом электрона и частотой (временем).

Консультативным комитетом по электричеству и магнетизму в 2007 году принята рекомендация Е1 о предполагаемых изменениях Международной системы единиц SI и, в частности, действующего определения ампера. Предложено примерное определение ампера: «Ампер есть электрический ток, эквивалентный потоку, содержащему точно $1/(1,60217653 \cdot 10^{-19})$ элементарных зарядов в секунду» [5].

С развитием нанотехнологий появилась возможность воспроизводить ампер (и его дольные единицы) в соответствии с предлагаемым определением. В некоторых странах метрологическими институтами проводятся работы по созданию квантового

эталона электрического тока на основе эффекта одноэлектронного туннелирования [4] с использованием одноэлектронного насоса (как меры тока) и счетчика единичных электронов (как измерителя тока). В экспериментальной работе NIST (США) получен ток $1 \cdot 10^{-12}$ А с ошибкой переноса электронов 0,015 ppm [4]. Во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева проводятся исследования по применению канальных умножителей для счета электронов в цепи протекающего тока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-18}$ А и более [6] (ток $1 \cdot 10^{-18}$ А соответствует примерно 6,24 электрона в секунду через поперечное сечение проводника). Развитие данных устройств позволяет надеяться на появление квантового эталона тока, который обеспечит передачу значения единицы силы тока в миллиамперную область без большой потери точности, что позволит замкнуть так называемый «квантовый метрологический треугольник» [7].

Основным ограничением точностных возможностей передачи заданного потока электронов от эталона электрометрическим измерителям будет являться наличие нестационарных (релаксационных) процессов в конструктивных узлах последних и естественного ионизирующего излучения [8,9]. Аналогичная ситуация сложилась в метрологической аппаратуре постоянного напряжения. При воспроизведении значения 10 В постоянного напряжения (на основе эффекта Джозефсона) с точностью до единиц нановольт [10] и передачи этих значений напряжения мерам (эталонам) напряжения (осуществляющим хранение единицы напряжения), а также высокоточным калибраторам и измерителям напряжения (выполняющим функции вторичных эталонов), собственные шумы последних составляют сотни нановольт [11].

В конце прошедшего столетия в Минском научно-исследовательском приборостроительном институте (МНИПИ) были разработаны, а заводом БелВАР изготовлены, калибраторы малых постоянных токов и больших сопротивлений ЕК1-6 и НК4-1 [12,13]. Эти калибраторы предназначались для обеспечения серийного производства многих

электрометрических приборов (BK2-16, B7-29, B7-30, B7-45, B7-49, B7-57/1, A2-1, A2-4, E6-13 и др.) и для проведения поверочных работ в условиях эксплуатации. Длительная эксплуатация ЭМА при наличии необходимых калибраторов позволяет сделать реальную оценку особенностей применения и надежности соответствующих измерителей и эталонной аппаратуры. Так, через 15 лет эксплуатации наиболее часто наблюдались случаи отказа ЭМА из-за изменений в цепях питания (высыхали электролитические конденсаторы). При этом изменялись режимы работы активных комплекствующих элементов, и они выходили из строя.

Диапазон воспроизводимых токов названных калибраторов находится в пределах от $1 \cdot 10^{-17}$ А до $1 \cdot 10^{-3}$ А. В их комплект входят специальные соединительные узлы, обеспечивающие хороший электрический контакт выходной цепи калибратора со входной цепью измерителя (без использования кабельных соединителей при токах менее $1 \cdot 10^{-10}$ А и малощумящих узлов с использованием кабелей при токах более $1 \cdot 10^{-10}$ А).

В настоящее время объем выпуска ЭМА в нашей стране значительно уменьшился. Многие приборы у потребителей выработали ресурс и поэтому не используются. Вместо отечественных электрометрических измерителей у промышленных организаций стали появляться измерители малых токов зарубежных фирм (Keithley и др.). Кроме этого, стали появляться универсальные вольтметры [14] с разрешением измерения постоянного тока до $1 \cdot 10^{-12}$ А, которые поступают в поверку. БелГИМ сохранил закупленные ранее калибраторы и измерители малых токов, и эта аппаратура обеспечивает калибровку поступающих в поверку соответствующих приборов. Лучшая точность названных калибраторов составляет порядка 0,2 – 0,3 % в наноамперном и пикоамперном диапазонах. Некоторые электрометрические измерители, поступающие из других стран, в указанном диапазоне токов необходимо поверять с точностью лучше 0,1%. Ввиду того, что наши калибраторы малых токов создавались в восьмидесятые годы минувшего столетия, нами было принято решение (исходя из современных достижений) уточнить факторы, ограничивающие точность этих калибраторов.

В основу работы приборов ЕК1-6 и НК4-1 в диапазоне токов менее 1 нА положено использование генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) со временем развертки не менее 600 секунд (со стабильной крутизной S) и дифференцирующей цепью с конденсаторами емкостью C_d , обладающими высокими значениями сопротивления изоляции и хорошей временной и температурной стабильностью. Воспроизводимый ток (I_e) в цепи дифференцирующего конденсатора в течение не менее 10 минут определяется выражением [8]

$$I_e = dQ/dt = d(CU)/dt = CdU/dt = C_d \cdot S, \quad (1)$$

где U – линейно изменяющееся во времени t напряжение;

Q – заряд электронов на конденсаторе емкостью C_d .

В приведенном выражении хорошо просматривается связь воспроизводимого тока с зарядом потока электронов и частотой (временем).

При выпуске калибраторов на заводе-изготовителе и в процессе эксплуатации метрологические характеристики определялись точностными параметрами вольтметра и датчиками временных интервалов (для измерения крутизны напряжения S) и измерителями значений емкостей C_d дифференцирующих конденсаторов. В области предельно малых токов (I_e меньше $1 \cdot 10^{-13}$ А) учитывались составляющие, обусловленные нестационарными процессами в изоляторах [8,9] и токами за счет естественного ионизирующего излучения. Погрешности вольтметров тех лет выпуска для измерения крутизны S изменяющегося напряжения и измерителей емкостей конденсаторов были значительными. Точное измерение емкости каждого дифференцирующего конденсатора в составе названных калибраторов затруднено из-за особенностей конструкции выносных блоков, в которых размещены все конденсаторы и элементы коммутации. Для обеспечения более высокой точности измерения емкостей целесообразно каждый конденсатор размещать в отдельном экранированном корпусе.

Информации о зарубежных калибраторах со структурной схемой, аналогичной примененной в приборах ЕК1-6 и НК4-1, до 2000 года не было. Успехи в производстве точных высокоомных резисторов и высокоточном воспроизведении постоянного напряжения позволили фирме Keithley (США) создать резистивный источник малых токов (ИМТ) модели 261, резисторы которого имеют сопротивления от 100 кОм до 1 ТОм. Погрешность задания тока (в зависимости от диапазона) составляет от 0,25% до 1,5% (нестабильность за 3 месяца – 0,15%, температурный коэффициент – 0,01%/К на диапазонах 100 нА – 10 мкА и 0,1%/К при меньших токах) [8]. Приведенные значения погрешности названного ИМТ не могут обеспечить необходимую калибровку современного электрометра модели 6430 той же фирмы. В диапазоне токов от 100 нА до 1 А фирмой Fluke с конца прошедшего столетия выпускается калибратор 5720А, а фирмой Hewlett Packard поставляется мультиметр 3458А (с диапазоном по току от 100 пА до 1 А), точность которых весьма близка к значениям национальных эталонов [15]. Вопросы калибровки этих приборов тщательно рассмотрены в работах [14-19]. С помощью вольтметра 3458А легко осуществляется калибровка приборов ЕК1-6 и НК4-1 в диапазоне токов 10 нА – 1 мА. В области меньших значений воспроизводимых (и измеряемых) токов высокоточная аппаратура за исключением электрометра

6430 Keithley не появилась. В таблице 1 приведены метрологические характеристики этого электрометра по току. Помимо тока этот прибор позволяет измерять сопротивление до 20 ТОм.

Таблица 1

Диапазон	Максимальное разрешение	+(% rdg + amps)
1, 00000 pA	10 aA	1,0% + 7 fA
10, 0000 pA	100 aA	0,50% + 7 fA
100,000 pA	1 fA	0,15% + 30 fA
1,00000 nA	10 fA	0,050% + 200 fA
10,0000 nA	100 fA	0,050% + 2 pA
100,000 nA	1 pA	0,050% + 20 pA
1,00000 µA	10 pA	0,050% + 300 pA
10,0000 µA	100 pA	0,050% + 2 nA
100,000 µA	1 nA	0,025% + 6 nA
1,00000 mA	10 nA	0,027% + 60 nA
10,0000 mA	100 nA	0,035% + 600 nA
100,000 mA	1 µA	0,055% + 6 µA

В период с 2006 по 2007 годы были проведены международные сличения эталонов малых токов (Supplementary Comparison) в рамках EUROMET EM-S24 одиннадцати стран (Германия, Россия, Франция, Англия, Турция, Испания и др.) в диапазоне токов до $1 \cdot 10^{-13}$ А. Пилот-лабораторией являлась PTB (Германия). В качестве эталонного измерителя воспроизводимых токов использовался вышеназванный электрометр 6430 Keithley. Отчета о результатах проведенных сличений пока нет. По информации, полученной от сотрудников ВНИИМ (принимавших участие в названных сличениях, а также в конференции в Англии с докладом по ИМТ), такие страны, как Германия, Франция, Англия, только в начале наступившего века создали эталоны малых токов со структурной схемой, аналогичной примененной в калибраторах БелГИМ (на основе ГЛИН). Аналогичные эталоны малых токов были поставлены ВНИИМ в Казахстан и Южную Корею.

В связи с распространением в мире эталонов малых токов на основе ГЛИН (и неизбежным при этом их совершенствованием) с целью подготов-

ки изготовления эталона БелГИМ были проведены соответствующие экспериментальные исследования. Для высокоточного измерения крутизны изменяющегося напряжения был выбран наилучший вольтметр 3458А фирмы Hewlett Packard. Такой вольтметр входит в комплект оборудования Национального эталона единицы напряжения постоянного тока (НЭ РБ 10-02) БелГИМ, и поэтому необходимо было решить все вопросы его высокоточной калибровки по напряжению и времени для выполнения периодических измерений. С этой целью вольтметр 3458А устанавливали в режим многократных измерений (sweep 100) и с его помощью исследовали два типа ГЛИН: с использованием схемы Миллера (в изделии ЕК1-6) и варианта с аналого-цифровым преобразованием [20] (в изделии НК4-1). В НК4-1 максимальное значение крутизны S напряжения составляет около 10 мВ/с, а в ЕК1-6 – около 20 мВ/с. Так как для измерения S изменяемых (возрастающего и снижающегося) напряжений вольтметром 3458А использовался высокоточный диапазон 10 В (погрешность измерения на этом диапазоне составляет 10 ppm в течение года, а сразу после рекомендуемой фирмой калибровки – единицы микровольт), то было принято решение в ЕК1-6 установить крутизну напряжения близкой к значению 10 мВ/с. Такая процедура предусмотрена руководством по эксплуатации изделия. Все исследования проводились в экранированном помещении при температуре 23° С. В результате многократных измерений было установлено, что среднее значение крутизны НК4-1 составляет 9,1955 мВ/с, а изделия ЕК1-6 – 9,8650 мВ/с. Результаты измерений крутизны S ГЛИН при изменениях напряжения от – 10 В до +10 В представлены на рисунках 1 и 2. Из них видно, что при использовании аналого-цифрового преобразователя (рис. 1) на протяжении 10 минут крутизна S может быть измерена с погрешностью около 0,02%, а в изделии ЕК1-6 погрешность измерения крутизны может достигать 0,05%.

Полученные результаты исследований по выбору схемы ГЛИН вполне удовлетворяют требованиям на создание высокоточного эталонного оборудования.

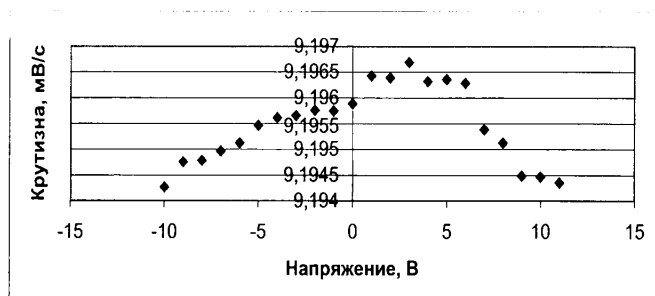


Рис. 1.

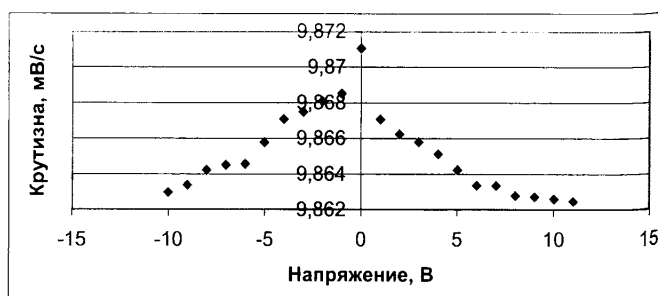


Рис. 2.

Вторая составляющая погрешности воспроизведения тока обусловлена неточностью измерения емкостей дифференцирующих конденсаторов, их температурной и временной нестабильностью, термополяризацией, абсорбцией и утечками из-за изменения сопротивления изоляции. В таблице 2 приведены типы конденсаторов (целесообразные для выполняемых функций), их номинальные емкости и воспроизводимые с их помощью токи. Конденсаторы (всех типов) были исследованы на стабильность емкостей (ТКЕ) в диапазоне температур от 20 до 40°C. Для этого был использован малогабаритный экранированный термостат с возможной установкой температуры до 60°C. Все измерения емкостей конденсаторов проводились с помощью измерителя МНС-1100, входящего в состав Национального эталона единицы электрической емкости. Для воспроизведения предельно малых токов (менее $1 \cdot 10^{-13}$ А) выбраны конденсаторы с емкостями 1 пФ, 10 пФ и 100 пФ в металлических корпусах, с воздушной изоляцией между пластинами и опорными изоляторами из янтаря и лейкосапфира, разработанные МНИПИ. Проведенные исследования показали, что их сопротивление изоляции составляет не менее $1 \cdot 10^{16}$ Ом. Собственные токи конденсаторов 1 и 10 пФ, генерируемые опорными изоляторами из лейкосапфира, составляют менее $1 \cdot 10^{-17}$ А. Результаты исследования ТКЕ этих конденсаторов в диапазоне температур до 40°C приведены в таблице 2 и свидетельствуют об их малом уровне. Абсорбция (свойство частично сохранять имевшийся заряд после кратковременного замыкания накоротко) воздушных конденсаторов весьма мала (при экспериментальных исследованиях не обнаружена). Зависимость емкости конденсаторов от прикладываемого максимально допустимого напряжения также не замечена.

Для воспроизведения токов более $1 \cdot 10^{-12}$ А при выбранной крутизне напряжения 10 мВ/с целесообразно использование конденсаторов с емкостью порядка 1000 пФ и более. Для этих целей были выбраны конденсаторы типа К72П-6, обладающие высоким сопротивлением изоляции

и стабильностью. При исследовании в диапазоне температур наблюдалось проявление их термополяризации [20]. С целью снижения этого явления было предложено встречно-параллельное включение двух конденсаторов. С повышением температуры емкость этих конденсаторов снижается, ТКЕ не превышает 0,012%. Зависимость емкости конденсатора с диэлектриком от приложенного напряжения не превышает тысячных долей процента и ею можно пренебречь. При измерении емкостей конденсаторов сразу после пребывания под рабочим напряжением изменения их емкости не замечено. Собственные помехи конденсаторов, используемых в электрометрических цепях, лучше всего характеризовать значением паразитного тока. С течением времени значение таких токов уменьшается. В нашем случае использованы конденсаторы (К72П-6), изготовленные более 10 лет назад. Оцененный нами их паразитный ток в нормальных условиях достигает $1 \cdot 10^{-14}$ А. При воздействии радиоактивного излучения на конденсаторы (с диэлектриком) возникает дополнительная проводимость. При малых уровнях излучения такое влияние является обратимым и весьма незначительным.

С целью обеспечения более высокоточного измерения емкости дифференцирующего конденсатора каждый из них целесообразно размещать в отдельном металлическом корпусе с унифицированными входными и выходными разъемами, рассчитанными на соединение без дополнительного кабеля с электрометрическими измерителями, разработанными МНИПИ. Использование разъемов типа СР-50 не рекомендуется из-за трения по фторопластовому изолятору при их соединениях (при этом возникают электрические потенциалы до десятков киловольт) [9]. В этом же корпусе последовательно с конденсатором устанавливается резистор (сопротивлением R), обеспечивающий постоянную времени ($t = R \cdot C$) цепи порядка 4,5 с. Для соединения с зарубежными электрометрами изготовлено соединительное устройство на основе антивибрационного кабеля АВК-3.

Технические данные конденсаторов

Таблица 2

Номинальное значение емкости (pF)	Измеренное значение емкости (pF)	Погрешность измерения емкости (%)	Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) (% на 1°C)	Тип или изготовитель конденсатора	Выходной ток
1	1,1024	0,84	0,005	МНИПИ	$1 \cdot 10^{-15}$ А $1 \cdot 10^{-14}$ А
10	10,2530	0,24	0,004	МНИПИ	$1 \cdot 10^{-13}$ А
100	103,920	0,06	0,003	МНИПИ	$1 \cdot 10^{-12}$ А
1000	1109,16	0,03	-0,012	К72П-6	$1 \cdot 10^{-11}$ А
10000	11057,5	0,01	-0,005	К72П-6	$1 \cdot 10^{-10}$ А
100000	112585	0,01	-0,005	К72П-6	$1 \cdot 10^{-9}$ А

С целью сравнительного анализа метрологических параметров воспроизводимых токов (в диапазоне единиц наноампер) в комплект эталонного оборудования был включен микропроводочный резистор сопротивлением $1 \cdot 10^9$ Ом (типа МВСГ) и мера напряжения 732В [11] с уровнями 1,018 и 10 В. Блок-схема предлагаемого метрологического комплекса для диапазона токов от 1 фА до 1 мкА показана на рисунке 3. В результате сравнительных исследований резистивного источника наноамперного диапазона и примерно такого же тока с использованием дифференцирующей цепи и ГЛИН было установлено, что эти методы вполне удобны в применении. Установившиеся значения тока в цепи $R = 1$ ГОм с напряжениями 1 и 10 В более стабильны, быстрее устанавливаются, длительность воспроизведения не ограничивается. Недостатком является то, что отечественное измерительное оборудование не позволяет с высокой точностью установить значение сопротивления резистора МВСГ и его стабильность.

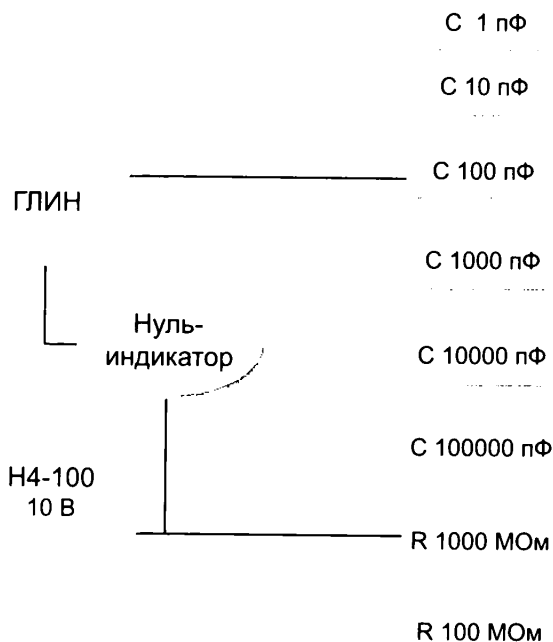


Рис. 3. Блок-схема эталонного комплекса воспроизведения малых токов

Исследования проводились при использовании в качестве измерителей тока вольтметра 3458А Hewlett Packard и вольтметра электрометрического В7-45, а также мер напряжения Н4-100 [21] и 732В. Это позволило воспроизводить силу тока, близкую к значениям $1 \cdot 10^{-9}$ и $1 \cdot 10^{-8}$ А резистивным источником и с помощью ГЛИН и дифференцирующих конденсаторов (емкостью 0,1 мкФ). Вольтметр 3458А имеет высокие метрологические характеристики как по постоянному напряжению (до 1000 В), так и по сопротивлению (до 1 ГОм) и постоянному току (до 1 А) [14, 18]. В таблице 3 приведены его погрешности измерения тока за

различные промежутки времени. Из них видно, что с помощью данного вольтметра можно калибровать приборы ЕК1-6 и НК4-1 при силе тока более 10 нА. Записи некоторых значений воспроизводимых токов при экспериментальных исследованиях оборудования приведены на рисунках 4, 5, 6, 7 и 8.

Таблица 3

Точностные характеристики вольтметра 3458А по току (ppm Reading + ppm Range)

Range	Maximum Resolution	24 Hour	90 Day	1 Year
100 nA	1 pA	10 + 400	30 + 400	30 + 400
1 μA	1 pA	10 + 40	15 + 40	20 + 40
10 μA	1 pA	10 + 7	15 + 10	20 + 10
100 μA	10 pA	10 + 6	15 + 8	20 + 8
1 mA	100 pA	10 + 4	15 + 5	20 + 5
10 mA	1 nA	10 + 4	15 + 5	20 + 5
100 mA	10 nA	25 + 4	30 + 5	35 + 5
1 A	10 nA	100 + 10	110 + 10	115 + 10

Эталонное воспроизведение токов в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ А (как это выполнено в приборах ЕК1-6 и НК4-1) может быть осуществлено с помощью стабильных резисторов типа МРХ или катушек сопротивления первого разряда (100 МОм, 10 МОм, 1 МОм, 100 кОм и 10 кОм) и мер напряжения 732В (или Н4-100) по выходу 10 В. Использование напряжения 10 В обусловлено тем обстоятельством, что выходное сопротивление (источника 10 В) составляет менее 0,1 Ом и введение в измерительную цепь названных резисторов или катушек с сопротивлением R не приведет к изменению опорного напряжения меры. Для контроля стабильности выходного опорного напряжения ГЛИН и меры напряжения типа Н4-100 (в процессе воспроизведения тока) в состав оборудования введен нуль-индикатор на основе нановольметра 2182 (Keithley). Воспроизводимый при этом ток не должен превышать допустимых для катушек значений. Установление размера сопротивления резисторов (от 10 кОм до 1 ГОм) для эталонного воспроизведения тока от 1 нА до 1 мА следует производить с помощью эталона ома с установкой на квантовом эффекте Холла. Источником напряжения 10 В должна быть мера (эталон) на основе эффекта Джозефсона.

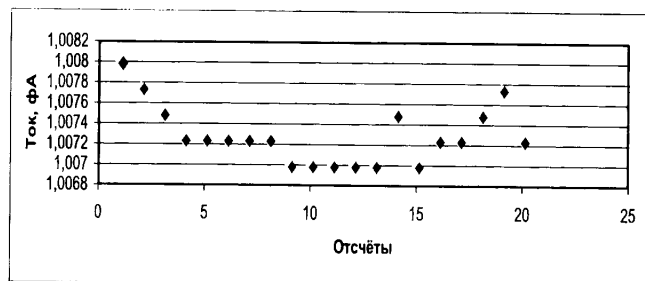


Рис. 4. Результаты воспроизведения тока $1 \cdot 10^{-14}$ А

Расчетное значение воспроизводимого тока $1 \cdot 10^{-14}$ А ($I = S \cdot C_d$) составляет $1,0073 \cdot 10^{-14}$ А. Измерение тока осуществлялось вольтметром В7-45 (с постоянной времени $\tau = 10$ с). Каждая точка отсчета (приведенная на рисунке) рассчитывалась по четырем измерениям (два измерения в положительной полярности изменения крутизны и два – в отрицательной).

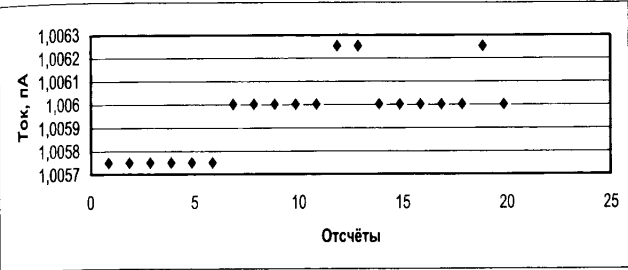


Рис. 5. Результаты воспроизведения тока $1 \cdot 10^{-12}$ А

Расчетное значение воспроизводимого тока $1 \cdot 10^{-12}$ А ($I = S \cdot C_d$) составляет $1,006 \cdot 10^{-12}$ А. Измерение тока осуществлялось вольтметром В7-45 (с постоянной времени 10 с). Каждая точка отсчета рассчитывалась по четырем измерениям.

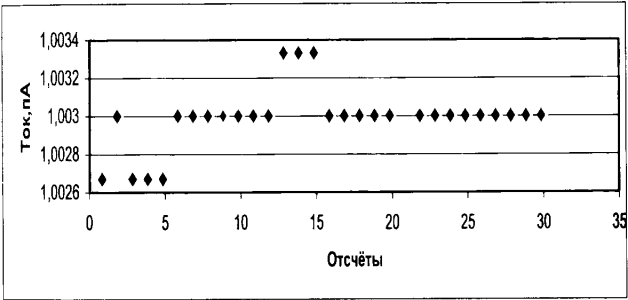


Рис. 6. Результаты воспроизведения тока $1 \cdot 10^{-10}$ А

Расчетное значение воспроизводимого тока $1 \cdot 10^{-10}$ А ($I = S \cdot C_d$) составляет $1,003 \cdot 10^{-10}$ А. Измерение тока проводилось вольтметром В7-45 (с постоянной времени 10 с). Каждая точка отсчета рассчитывалась по четырем измерениям.

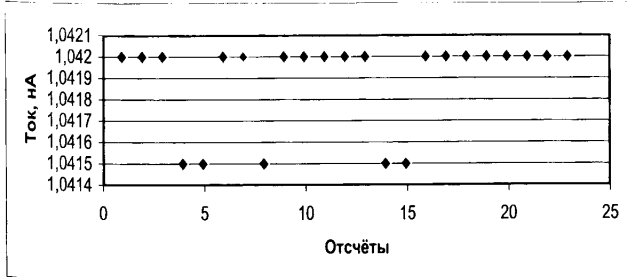


Рис. 7а. Результаты воспроизведения тока $1 \cdot 10^{-9}$ А емкостным методом

Расчетное значение тока $1 \cdot 10^{-9}$ А ($I = S \cdot C_d$) составляет $1,04185$ нА. Измерение проводилось с помощью вольтметра В7-45. Каждая точка отсчета рассчитывалась по двум измерениям (положительной и отрицательной полярности).

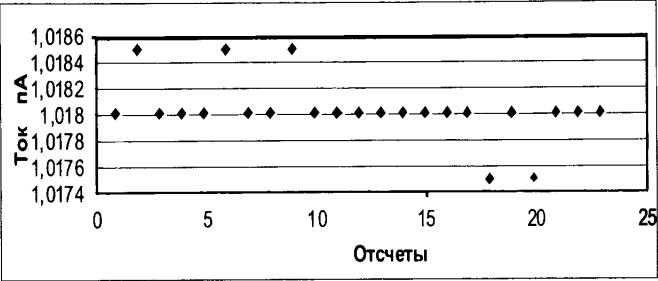


Рис. 7б. Результаты воспроизведения тока $1 \cdot 10^{-9}$ А резистивным методом

Расчетное значение тока $1,018136 \cdot 10^{-9}$ А ($I = U/R$) определялось по значениям напряжения меры 732В (1,018 В) и сопротивления R резистора 1 ГОм. Сопротивление резистора 1 ГОм измерялось цифровым мостом Ц402-М1. Измерение тока осуществлялось мультиметром 3458А (NPLC – 50).

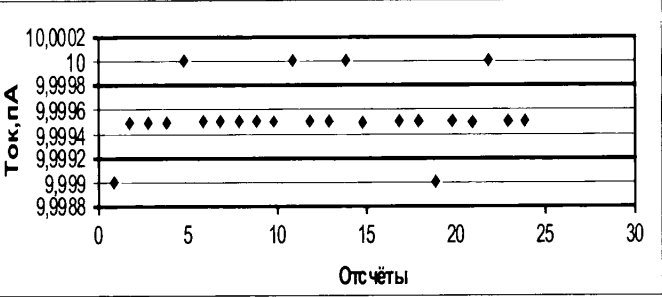


Рис. 8. Результаты воспроизведения тока $1 \cdot 10^{-8}$ А резистивным методом

Расчетное значение тока $9,9995$ нА ($I = U/R$) определялось по значениям выходного напряжения 10 В меры 732В и сопротивления R резистора 1 ГОм (типа МВСГ). Измерение тока (по двум полярностям) осуществлялось по мультиметру 3458А (NPLC – 50).

Проведенные экспериментальные исследования по созданию эталона малых токов БелГИМ в диапазоне от $1 \cdot 10^{-15}$ до $1 \cdot 10^{-9}$ А свидетельствуют о проработке всех вопросов, касающихся его конструктивного исполнения, в частности, генератора линейно изменяющегося напряжения и выносных узлов с дифференцирующими цепями. Необходимое оборудование для исследования параметров создаваемого эталона базируется на основе национальных эталонов единицы постоянного напряжения (на основе эффекта Джозефсона) и единицы электрической емкости.

Введение в состав этого комплекса оборудования микропроводного резистора типа МВСГ (сопротивлением $1 \cdot 10^9$ Ом) и резистора типа

МРХ (сопротивлением $1 \cdot 10^8$ Ом) для воспроизведения силы тока $1 \cdot 10^{-9}$ А (при подаче напряжения 1,018 В от эталона единицы напряжения типа 732В) и тока $1 \cdot 10^{-8}$ А (при подаче 10 В от того же эталона 732В) будет способствовать более плавному переходу в область силы тока до 1 мА с реализацией на основе резисторов типа МРХ (или катушек сопротивления), аттестованных с помощью установок на эффекте Холла и с применением опорного напряжения 10 В от эталона 732В.

Список использованной литературы

1. Павлов О.М., Покусаев А.В., Телитченко Г.П. Эталонная база России в области измерений малых постоянных токов в диапазоне 10^{-16} – 10^{-9} А // Измерительная техника. – 2007. – №11.
2. Steiner R., Williams E., Newell D., Liu R. Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass // Metrologia, 2005, -V.42.
3. Аверин Д.В., Зорин А.Б., Лихарев К.К. Блоховские осцилляции в джозефсоновских переходах малых размеров // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1985. – №88 (2).
4. Keller M.W., Martinis J.M., Zimmerman N.M., Steinbach A.H. Accuracy of electron counting using a 7-junction electron pump // Applied Physics Letters. – 1996. – V.69(12).
5. Recommendation E 1 (2007): Proposed changes to the International System of Units (SI) // CCEM/2007-44 / Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM).
6. Александров В.С., Галахова О.П., Катков А.С., Павлов О. М., Шифрин В. Я. Работы ВНИИМ в области воспроизведения единицы силы электрического тока – ампера // ПРИБОРЫ. – 2009. – № 10 (112).
7. Piquemal F., Geneves G. Argument for a direct realization of the quantum metrological triangle // Metrologia. – 2000. – № 37(3).
8. Илюкович А. М. Техника электрометрии. «ЭНЕРГИЯ», М. – 1976.
9. Черняев П. А., Казакова Е.А. Особенности аппаратуры для измерений сигналов в высокоомных цепях // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 2.
10. Катков А.С., Солве С. Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ // Измерительная техника. – 2011. – № 11.
11. Волкодатов А. А., Казакова Е.А., Катков А.С., Коломиец Т.А., Попко В.В., Сентемова Д.В., Черняев П.А. Результаты сличений эталонов постоянного напряжения Российской Федерации и Республики Беларусь с помощью транспортируемых эталонов сравнения на диодах Зенера // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 2.
12. Калибратор больших сопротивлений и малых токов ЕК1-6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
13. Калибратор постоянного тока НК4-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
14. Казакова Е.А., Черняев П.А. О калибровке мультиметра 3458А фирмы Hewlett Packard в пикоамперном диапазоне // Сборник трудов БелГИМ. – Мн.: БелГИМ, 2010, вып. 8.
15. FLUKE. Вопросы применения. Калибровка цифрового мультиметра компании Hewlett Packard с помощью многофункционального калибратора 5720А компании Fluke. Everett.
16. Gary Bennet. Calibrating Precision Multimeters Using a Characterized Multifunction Calibrator. Fluke Corporation, PO Box 9090, Everett.
17. Fluke. Multimeter Selection Guide Fluke 8508A and Agilent 3458/HFL/ Technical Information.
18. HP 3458A Multimeter. Operating, Programming, and Configuration Manual. Hewlett Packard Company, 1994.
19. Черняев П.А., Казакова Е.А., Попко В.В., Сентемова Д.В. Калибровка эталонных средств измерений в диапазоне 10 мВ – 1000 В постоянного напряжения // Сборник трудов БелГИМ. – Мн.: БелГИМ, 2012, вып. 10.
20. Ковалёв Л.С., Федчун Л.Н., Черняев П.А. Генератор ступенчатого напряжения. Авторское свидетельство СССР № 921060.
21. Черняев П.А., Ковалев Л.С., Федчун Л.Н. Устройство для калибровки электрометров. Авторское свидетельство СССР № 1479903.
22. Володкевич А.А., Костин А.П., Черняев П.А. Мера напряжения Н4-100 // Метрология и приборостроение. – 2007. – № 1.
23. Катков А. С., Павлов О. М., Покусаев А.В. Первичный эталон единицы силы электрического тока – ампера – ГЭТ 4-91 // Мир измерений. – 2011. – №3.

Владимир Павлович Лобко, первый заместитель директора БелГИМ;

Петр Андреевич Черняев, кандидат технических наук, ученый хранитель Национального эталона единицы электрического напряжения – вольты, ведущий инженер БелГИМ;

Елена Андреевна Казакова, начальник отдела БелГИМ;

Андрей Александрович Волкодатов, заместитель начальника отдела БелГИМ

Дата поступления 12.03.2013 г.