

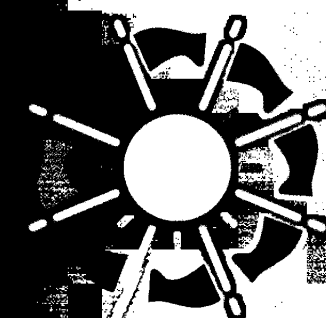
302-1
6690

№ 2
2015

МЕТРОЛОГИЯ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Метрология
Измерения и Свет



Международный
Год Света
2015

Bureau
International des
Poids et
Mesures



Всемирный День Метрологии

20 Мая

www.worldmetrologyday.org



© 2015 BIPM-OIML

ISSN 2073 - 1469



9 772073 146008

УДК 621.317.7.089.6(476)

П. А. Черняев,
Е. А. Казакова,
В. В. Попко,
Д. В. Сентемова

О СОЗДАНИИ И ИССЛЕДОВАНИИ ЭТАЛОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДИАПАЗОНЕ 10 фА – 1 мкА

В статье приведены результаты исследований основных узлов калибраторов малых токов ЕК1-6 и НК4-1, используемых для метрологического контроля электрометрической аппаратуры. Приведены структурная схема государственного эталона для воспроизведения малых токов и рекомендации по выполнению основных узлов с целью достижения наилучших параметров.

This article describes the process of creation of the source standard of the unit of the mass and volume liquid flowrate (water) № IE RB 26-15, determination of its metrological characteristics and their attestation during additional international comparisons of national standards of the mass and volume liquid flowrate of BelGIM (Belarus), PTB (Germany), SMU (Slovakia), LEI (Lithuania), VNIIR (Russia), NNC IM (Ukraine), CNE RUz (Uzbekistan).

Для метрологического контроля аппаратуры, измеряющей постоянные токи в диапазоне 1 фА – 1 мкА, в БелГИМ используются калибраторы малых токов ЕК1-6 и НК4-1. Они разработаны в МНИПИ и изготовлены на заводе БелВАР в восьмидесятые годы минувшего столетия для серийного производства электрометрической аппаратуры (ЭМА) широкого применения. До этого изготавливаемая ЭМА в основном использовалась в дозиметрическом приборостроении, а калибровка приборов производилась с помощью специальных дозиметрических установок с источниками излучения. Общий вид калибраторов показан на рисунках 1 и 2.



Рис.1. Калибратор ЕК1-6

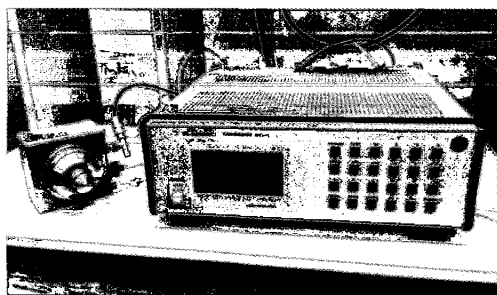


Рис.2. Калибратор НК4-1

Погрешность воспроизведения токов (в зависимости от диапазона) составляет от 0,2 до 3%. Выходные узлы калибраторов (дифференцирующие

цепи) конструктивно выполнены в виде отдельных блоков. Функционально калибраторы предназначены и для калибровки и для поверки измерителей больших сопротивлений (до 10^{17} Ом). В связи с изменением структурных схем таких измерителей их поверка с помощью калибраторов оказалась невозможной.

Соединение дифференцирующей цепи калибратора с входным блоком электрометра В7-45 (рис. 3) осуществляется с помощью «ловителя». При этом осуществляется непосредственная связь основных узлов аппаратуры. Конструкция выходного узла дифференциатора унифицирована с входными узлами ЭМА. Предусмотрено соединение и с помощью специальных кабельных узлов [1-7].

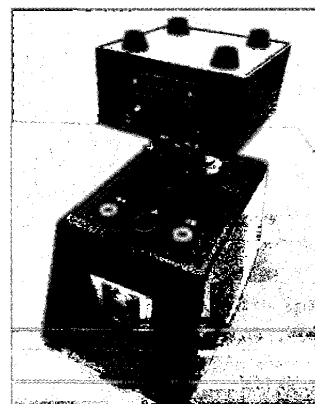


Рис. 3. Соединение выходного блока калибратора (вверху) с входным блоком электрометра В7-45 (внизу)

В диапазоне 1 нА – 1 мкА воспроизведение тока (I_B) осуществляется с помощью стабильного и высокоточного опорного напряжения (U_{on}) и набора стабильных резисторов сопротивлением R в соответствии с выражением: $I_B = U_{on}/R$. По такому принципу фирмой Keithley изготовлялся калибра-

тор токов модели 261. Его резисторы изменяются в диапазоне 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% [8].

В области воспроизведения значений токов от 1 нА и менее используется принцип воздействия линейно изменяющегося напряжения с крутизной S на дифференцирующий конденсатор емкостью C_d , предложенный в семидесятые годы сотрудниками лаборатории электрометрических измерений ВНИИФТРИ [8]. Выходной ток определяется в соответствии с выражением

$$I_B = dQ/dt = d(CU)/dt = C_d dU/dt = C_d S.$$

Калибраторы с таким принципом работы до 2005 года за рубежом не изготавливались. В начале текущего столетия после ознакомления (с участием сотрудников ВНИИМ) с созданными в РБ калибраторами малых токов в лаборатории РТВ (Германия) разработали и изготовили небольшое количество аналогичных эталонных устройств [9].

В период с 2006 по 2013 годы в рамках EUROMET. EM – S24 (EUROMET Project 830) были проведены сличения эталонов 11 лабораторий с участием ВНИИМ [9] при номинальных значениях тока 100 фА, 1 пА, 10 пА, 100 пА и 1 нА. Лаборатория РТВ для сличений представила 12 экземпляров таких устройств [9] (вероятно с целью проведения более широких исследований основных узлов эталонов).

В настоящее время в БелГИМ прорабатывается вопрос создания аналогичного эталона и его сличения с эталоном ВНИИМ. Созданные в МНИПИ калибраторы наиболее удобны при выпуске ЭМА в заводских условиях. С их помощью можно воспроизводить любые значения тока из указанного диапазона. Однако такая универсальность приводит к ограничению точностных возможностей из-за взаимного влияния узлов и коммутатора в дифференциаторе и нестабильности цепочек резистивных делителей в генераторе линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), что нежелательно в эталоне. В связи с этим предложена иная структурная схема эталона, приведенная на рисунке 4.

Каждый дифференцирующий конденсатор и высокоточный резистор предлагается размещать в отдельных малогабаритных металлических корпусах (размерами 100*55*35 мм). Общий вид макетного образца корпуса показан на рисунке 5. Такие размеры и конструктивное исполнение узла эталона позволяет производить его соединение с унифицированным входным разъемом электрометра, располагаемым вертикально (рис.3), а также горизонтально со стороны передней и задней панелей (с использованием крепежных узлов калибраторов). Крутизну выходного напряжения ГЛИН целесообразно установить с номинальным значением 10 мВ/с.

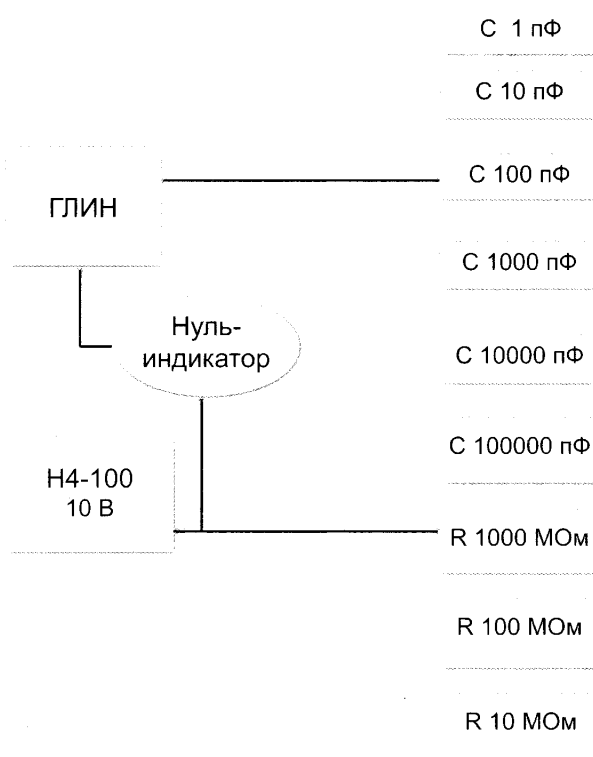


Рис. 4. Блок-схема эталона малых токов

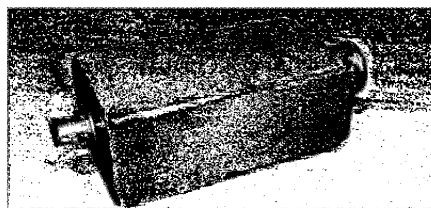


Рис. 5. Общий вид корпуса дифференциатора для эталона

В диапазоне токов более 1 нА в качестве опорного напряжения в настоящее время могут быть использованы меры напряжения 732B (Fluke) или H4-100 (МНИПИ) с номинальным значением выходного напряжения 10 В, которые калибруются по национальному эталону постоянного напряжения в течение длительного времени. Резисторы (с сопротивлением 10^9 Ом, 10^8 Ом и 10^7 Ом) должны быть изготовлены из микропровода (типа МРХ и МВСГ). Они должны быть хорошо экранированы и исследованы с помощью эталона сопротивления. Используемые изоляционные материалы не должны приводить к изменению сопротивления R и к созданию наведенных электрических потенциалов. Подсоединение к измерителю должно быть надежным и защищенным от внешних электрических полей. Результаты предварительных измерений при воспроизведении соответствующих токов показывают хорошую стабильность.

В диапазоне воспроизведения токов менее 1 нА необходимо высокоточное измерение крутизны S линейно изменяющегося напряжения в течение

не менее 600 секунд, и оно должно определяться через каждые 50 или 100 секунд с помощью аппаратуры калибруемой по эталону напряжения (НЭ РБ 10-02) и эталону частоты и времени (НЭ РБ 1-95). Измерение емкостей дифференцирующих конденсаторов должно осуществляться (без вскрытия экранирующего корпуса) с использованием эталона емкости и с учетом влияния используемого в конденсаторах диэлектрика [10]. Конденсаторы и резисторы (обеспечивающие некоторую постоянную времени $\tau = R \cdot C$) должны устойчиво крепиться в корпусах к выходным разъемам и не подвергаться воздействию влаги. К их общей точке должна подсоединяться клемма, используемая при измерении емкости конденсатора. Подсоединение к различным измерителям токов должно осуществляться с помощью унифицированных разъемов, обеспечивающих непосредственную связь (рис. 3), а при необходимости – с помощью специальных кабельных узлов и применением экранированных камер. В выходном разъеме в качестве опорного изолятора должен использоваться лейкосапфир.

Выбор материала для опорных изоляторов электрометрических измерителей и типа изоляционных материалов для дифференцирующих конденсаторов калибраторов производился на основе длительных исследований в МНИПИ при создании аппаратуры дозиметрического приборостроения с начала шестидесятых годов. Для измерения доз излучения использованы фторопластовые конденсаторы емкостью 50, 500, 1000 пФ и 5000 пФ. Требуемое время хранения информации – до 180 суток. Сопротивление изоляции между электродами конденсаторов (при указанном времени хранения заряда) должно превышать все известные удельные сопротивления изоляторов. Для измерения сопротивления изоляции использовался электрометр фирмы Vibron в режиме напряжения. Опорное напряжение (до 1000 В) подавалось на последовательно соединенные исследуемый изолятор и резистор с заданным сопротивлением R , с которого сигнал подавался на вход электрометра. Измерение сигнала затруднялось появлением электрических полей изоляторов. Было установлено, что наиболее высокое сопротивление изоляции имеют фторопласт, янтарь, эскапон (синтетический каучук Понамарёва). Так как промышленностью

изготавливались конденсаторы с пленкой из фторопласта выбор (для дозиметров) был сделан на применение этих конденсаторов с некоторой доработкой их конструкции. Промышленный выпуск приборов с такими конденсаторами показал, что их сопротивление изоляции превышает 10^{21} Ом. При выборе дифференцирующих конденсаторов для калибраторов были применены конденсаторы (емкостью 1000 пФ, 10000 пФ и 100000 пФ) аналогичного типа, так как к ним предъявляются практически те же требования. Внутри корпусов дифференцирующих фторопластовых конденсаторов (так же, как и внутри корпусов конденсаторов для дозиметров) не должно быть воздушного пространства, так как в этом случае наличие воздуха проявляется как ионизационная камера (реагирующая на естественный радиоактивный фон излучения). В тех приборах на конденсаторах измерялся с помощью электрометра уровень электрического потенциала (напряжения), а в калибраторах также с помощью электрометра – стабильность весьма малого зарядного тока конденсатора. Здесь возникли другие трудности: на конденсаторах при изменении температуры, а также после воздействия напряжений более 3 В появляются электрические потенциалы, которые могут исказить крутизну S подаваемого на конденсатор линейно изменяющегося напряжения (ЛИН). Для снижения температурных воздействий предложено [11] дифференцирующий конденсатор выполнять из двух со встречно параллельным включением. Для снижения последствий влияния напряжения более 3 В предложено [12] ввести трехминутный период короткого замыкания конденсатора (режим «сброс»).

Для обеспечения длительности в генераторах линейно изменяемого напряжения не менее 600 секунд (не создавая при этом больших уровней напряжения) было выбрано номинальное значение крутизны S в приборе НК4-1 – 10 мВ/с, а в ЕК1-6 – 20 мВ/с (в дифференциаторе этот уровень уменьшался в два раза). Это позволяет длительно измерять крутизну S высокоточным вольтметром (3458А фирмы Agilent) на пределе 10 В. Формирование ЛИН в ЕК1-6 выполнено на основе интегратора Миллера. Такие схемы весьма сложны в изготовлении и настройке; высоки требования и к интегрирующему конденсатору емкостью 4 мкФ. В НК4-1 с целью уменьшения погрешности ЛИН и

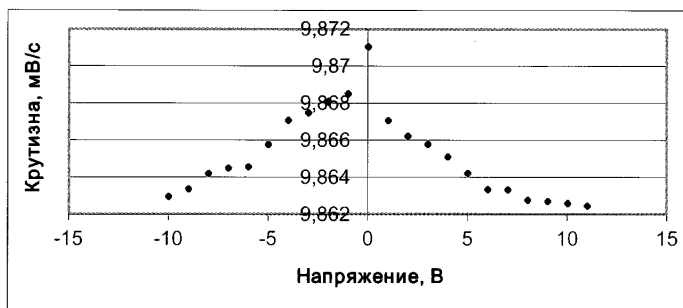


Рис. 6. Изменение крутизны ЛИН прибора ЕК1-6

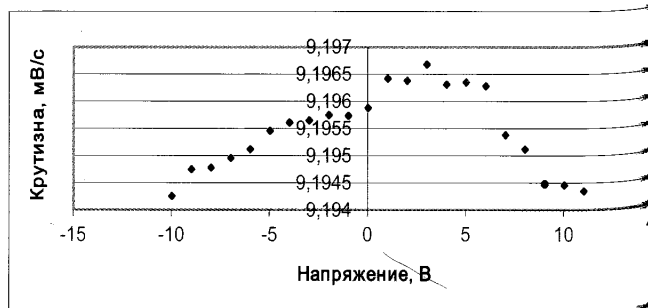


Рис. 7. Изменение крутизны ЛИН прибора НК4-1

повышения надежности предложен (и реализован) цифроаналоговый метод формирования квазилинейного преобразования [13]. Это принципиально новый вариант построения ГЛИН с применением широко импульсной модуляции. На рисунках 6 и 7 приведены диаграммы воспроизведения ЛИН калибраторов. Погрешность измерения крутизны ЛИН в приборе НК4-1 меньше чем в ЕК1-6. Поэтому в эталоне малых токов целесообразно использовать цифроаналоговый метод формирования ЛИН.

При экспериментальных исследованиях дифференциаторов было установлено, что фторопластовые конденсаторы генерируют «паразитные» токи порядка 1 фА и менее. Возникла необходимость создавать новые дифференцирующие конденсаторы (емкостью 100 пФ, 10 пФ и 1 пФ) для воспроизведения токов менее 1 пА. Общий вид созданных конденсаторов показан на рисунках 8 и 9. В качестве опорных в них используются изоляторы из лейкосапфира, паразитные токи которых весьма малы, а сопротивление изоляции велико. Такие же изоляторы используются и в выходном разьеме дифференциатора. Между пластинами конденсаторов находится воздух. Емкость этих конденсаторов с высокой точностью может измеряться при частоте 1 кГц.

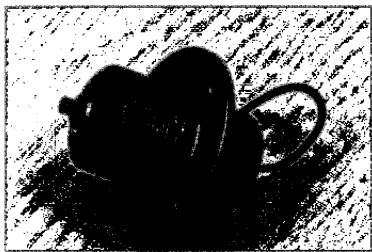


Рис. 8. Конденсатор емкостью 1 пФ

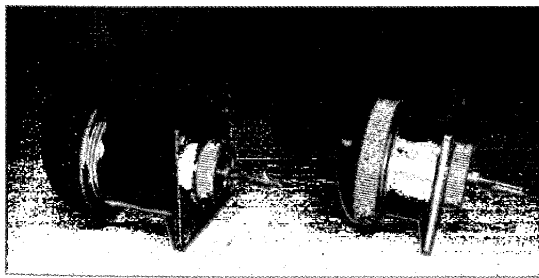


Рис. 9. Конденсаторы емкостью 100 пФ и 10 пФ

Длительные исследования этих конденсаторов привели к выводу, что они стабильны в диапазоне температур $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. Целесообразно их применение и в эталоне малых токов. Однако воздушная среда между пластинами может рассматриваться как ионизационная камера, которая реагирует на естественный радиоактивный фон. Дальнейшее снижение «паразитных» токов может быть реализовано при применении дифференцирующего конденсатора емкостью 1 пФ нестационарной конструкции (рис. 10). Здесь 1 и 2 – корпуса выходных узлов измерителя и калибратора,

3 и 4 – выходные электроды измерителя и калибратора. Использование такой емкостной схемы соединения измерителя и калибратора позволило уверенно воспроизвести и длительно измерить по обоим полярностям токи 10 аА и 20 аА (рис. 11). Наблюдаемые флуктуации обусловлены воздействием естественного радиоактивного фона излучения. Емкость конденсатора – 1 пФ, крутизна ЛИН – 10 и 20 мВ/с.

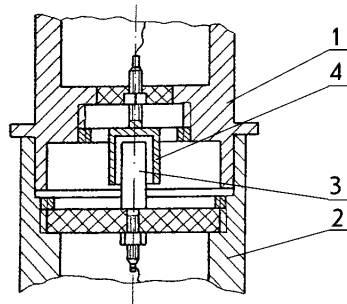


Рис. 10. Схема соединения узлов калибратора и измерителя

Исследование узлов калибраторов с целью использования их в настоящее время для эталона малых токов в диапазоне от 10 фА до 1 мкА производилось в экранированной лаборатории, расположенной на глубине около 6 метров от поверхности земли. В этом помещении находится национальный эталон единицы постоянного напряжения и необходимое для исследования оборудование: калибраторы ЕК1-6 и НК4-1, высокоточный вольтметр 3458А (фирмы Agilent), калибруемый по названному эталону для измерения 10 В и крутизны ЛИН с интервалами 50 и 100 секунд, вольтметр электрометрический В7-45 для измерения постоянного напряжения на высокоомных объектах и токов в диапазоне 1 фА – 1 мкА для контроля работы калибраторов тока, меры напряжения 732В (фирмы Fluke) и Н4-100 (МНИПИ) и др.

Вольтметр В7-45 (для измерения малых токов) кроме цифрового выхода информации имеет аналоговый выход для подключения более точного измерительного прибора (с большим числом разрядов). В качестве такого высокоточного прибора может быть использован названный вольтметр 3458А.

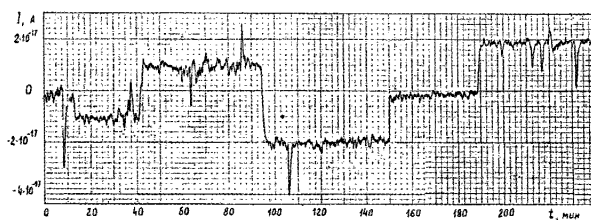


Рис. 11. Результаты измерений тока 10 аА и 20 аА

Наилучшая точность при измерении крутизны ЛИН ($S = 10 \text{ мВ/с}$) калибратора НК4-1 с помощью

вольтметра 3458А составила 0,02 %, а калибратора ЕК1-6 – 0,05 %. При проведении многократных измерений S замечена нестабильность, обусловленная влиянием резистивных делителей изменения крутизны.

Измерение емкостей дифференцирующих конденсаторов калибраторов осуществлялось с помощью прибора МНС – 1100 (RLC-meter) на частоте 1 кГц. Погрешность измерения емкости 1 пФ составляет 0,03 %, а в диапазоне емкостей (10 – 100000) пФ – 0,01 %. В эталоне малых токов необходимо учитывать особенности измерения емкостей фторопластовых конденсаторов [10]. Упрощенная схема замещения конденсатора с диэлектриком показана на рисунке 12. Здесь емкость C эквивалентна емкости диэлектрика, обусловленной мгновенной поляризацией, сопротивление R характеризует сквозную проводимость, а цепочка $R_i C_i$ (их может быть много) описывает медленно устанавливающуюся поляризацию, т.е. учитывает процесс абсорбции заряда. Поэтому емкости фторопластовых конденсаторов рекомендуется измерять с использованием эталона емкости в диапазоне инфранизких частот (лучше на частоте 0,1 Гц) [10]. При больших частотах необходимо увеличивать длительность измерений.

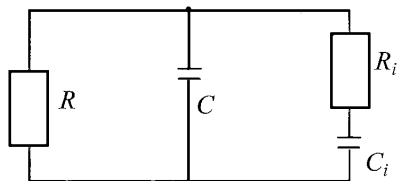


Рис. 12. Упрощенная схема замещения диэлектрика и конденсатора с диэлектриком

Создаваемые для эталона малых токов узлы с дифференцирующими конденсаторами и на основе высокоточных резисторов (10 МОм, 100 МОм и 1 ГОм) конструктивно должны быть выполнены независимыми и с унифицированными входными и выходными разъемами (рис. 5). ГЛИН должен воспроизводить линейно изменяющееся напряжение с номинальным значением крутизны, равной 10 мВ/с с погрешностью не более 0,025 %, иметь управляющие команды «Пуск», «Сброс», «Стоп», «Полярность» и индикатор изменения напряжения.

При этом достигается более высокоточное измерение сопротивлений резисторов (с помощью эталона сопротивления) и емкостей конденсаторов (с помощью эталона емкости) и обеспечивается высокоточное воспроизведение токов. Высокоточное измерение постоянного напряжения 10 В (для токов более 1 нА) и ЛИН с крутизной 10 мВ/с (для воспроизведения токов менее 1 нА) может обеспечиваться национальными эталонами единицы постоянного напряжения и частоты и времени.

Список используемой литературы

1. П. А. Черняев, Е. А. Казакова. Особенности аппаратуры для измерений сигналов в высоко-

омных цепях// Метрология и приборостроение, БелГИМ.– 2011.– №2. – С.35–39.

2. П. А. Черняев, Е. А. Казакова, В. В. Попко. О создании эталонного генератора линейно изменяющегося напряжения// Метрология и приборостроение. – 2012. – №1. С. 7–9.

3. В. П. Лобко, П. А. Черняев, Е. А. Казакова, А. А. Волкодатов. Исследование эталонного оборудования воспроизведения малых постоянных токов.//Метрология и приборостроение.– 2013.– №2. – С. 4 – 10.

4. П. А. Черняев, Е. А. Казакова, Д. В. Сентемова. Воспроизведение и измерение постоянного тока в аттоамперном диапазоне// Метрология и приборостроение. – 2013. – №4. – С.25 – 28.

5. Черняев П. А., Казакова Е. А. Результаты исследования аппаратуры для измерений сигналов в высокоомных цепях. Сборник научных трудов БелГИМ. – вып. 10. – С.49 – 55. Минск, 2012.

6. А. А. Арчаков, А. А. Володкевич, П. А. Черняев. Особенности калибровки электрометрических измерителей. Сборник научных трудов БелГИМ. Выпуск 2. – С.52 – 55. Минск, 2004.

7. О. М. Павлов, П. А. Черняев. Воспроизведение и измерение постоянного тока в аттоамперном диапазоне с наивысшей точностью. Измерительная техника №7. М., 2014.

8. А. М. Илюкович. Техника электрометрии. «Энергия», М., 1976.

9. G.-D. Willenberg. Supplementary Comparison of Small Current Sources. REPORT. EUROMET.EM-S24 (Euromet Project 830).

10. И. В. Дзюбенко, А. М. Илюкович. Применение высокоомных мостовых схем с питанием линейно изменяющимся напряжением для измерения характеристик диэлектриков и конденсаторов с диэлектриком. ВНИИФТРИ. Исследования в области электрометрии. ТРУДЫ. Вып. 1(31), часть 2. М., 1970.

11. Черняев П.А. Ковалев Л.С., Федчун Л. Н. Устройство для калибровки электрометров. Авторское свидетельство СССР № 1479903.

12. Калибратор больших сопротивлений и малых токов ЕК1-6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

13. Ковалев Л. С., Федчун Л. Н., Черняев П. А. Генератор ступенчатого напряжения. Авторское свидетельство СССР № 1479903.

Петр Андреевич Черняев, кандидат технических наук, ученый хранитель национального эталона единицы электрического напряжения – вольт, ведущий инженер отдела БелГИМ;

Елена Андреевна Казакова, начальник отдела БелГИМ;

Вадим Васильевич Попко, инженер I категории отдела БелГИМ;

Диана Валентиновна Сентемова, инженер I категории отдела БелГИМ

Дата поступления 16.04.2015 г.

УДК 621.317.7.089.6 (476)

П. А. Черняев,
Е. А. Казакова,
В. В. Попко,
Д. В. Сентемова

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ДИАПАЗОНЕ МАЛЫХ ТОКОВ ЭЛЕКТРОМЕТРОВ В7-45 (МНИПИ) И 6430 (KEITHLEY)

Приведены результаты исследований метрологических параметров в области измерения малых постоянных токов двух электрометров. Экспериментально показана невозможность использования электрометра 6430 фирмы Keithley для высокоточных измерений предельно малых уровней постоянного тока.

This article provides the results of examination of metrological parameters in the field of measurement of low direct currents of two electrometers. Authors experimentally demonstrate impossibility to use electrometer 6430 (Keithley) for high-accuracy measurements of extremely low direct current levels.

Минским научно-исследовательским приборостроительным институтом (МНИПИ) во второй половине минувшего столетия был разработан ряд электрометрических приборов (В7-29, В7-30, В7-42Э, Е7-45 и др.) для измерения постоянного тока (от 10 аА до 1 мкА), напряжения и сопротивления, а также калибраторов (ЕК1-6 и НК4-1) для воспроизведения малых токов [1, 2]. На заводе БелВАР была создана технологическая база для изготовления этой аппаратуры. К настоящему времени выпуск электрометрической аппаратуры (ЭМА) прекратился, изготовленные ранее приборы выработали ресурс и оказались неработоспособными. Имеющийся в БелГИМ электрометрический вольтметр В7-45 и калибраторы ЕК1-6 и НК4-1, широко используемые для калибровки и поверки ЭМА (сохранившейся в стране и закупленной за рубежом), были отремонтированы и восстановлены.

Учитывая широкую рекламу электрометрического измерителя модели 6430 (фирмы Keithley) как наиболее высокочувствительного по току (до 10 аА), используемого также для сличения эталонов токов в диапазоне 100 фА – 1 нА [3], БелГИМ приобретен один экземпляр названного прибора и проведены сравнительные исследования совместно с вольтметром В7-45. Вольтметр В7-45 кроме цифрового выхода информации имеет аналоговый выход для подключения более точного прибора. В качестве такого высокоточного прибора может быть использован вольтметр 3458 (Agilent). Общий вид сравниваемых приборов показан на рисунках 1 и 2.

Основными достоинствами электрометра 6430 являются: наличие малогабаритного выносного (входного) блока, возможность его использования в режимах измерения постоянного тока, напряжения и сопротивления, а также в режиме источника. Следует заметить, что в соответствии с его описанием [4] погрешность прибора в режиме источника значительно больше чем в режиме измерения. В рекламных данных электрометра указывается на возможность измерения в широком диапазоне постоянных токов (от 10 аА до 100 мкА) с использованием на входе блока триаксиального (трехзажимного) кабеля 6430-322-1А. По внешнему виду в качестве изоляционного материала в кабеле используется полиэтилен. В разъеме, обеспечивающем соединение кабеля с выносным блоком, используется (по внешнему виду) фторопласт. Паразитные токи этих материалов по нашим данным [5, 6] могут быть от 2 фА и менее. Общий вид кабеля приведен на рисунке 3. Длина кабеля составляет около 15 см.

В наших работах [7, 8] показана возможность измерений токов во всем аттоамперном диапазоне с помощью вольтметра В7-45, воспроизводимых калибраторами ЕК1-6 и НК4-1. При этом кабельные узлы не использовались (осуществлялось так называемое «непосредственное» соединение). С целью сравнения точностных возможностей этих приборов в диапазоне малых токов были проанализированы токовые шумы самих измерителей (входные клеммы блоков закрыты металли-

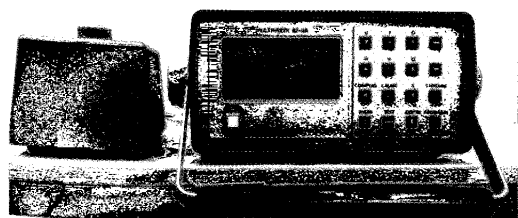


Рис. 1. Вольтметр электрометрический В7-45



Рис. 2. Электрометрический измеритель модели 6430

ческими колпачками (рис. 1 и 2). Исследование производилось в экранированной лаборатории, расположенной на глубине около 6 метров от поверхности земли, при температуре 22°C. Использовался также малогабаритный металлический экран для выносных блоков. Результаты измерений (без подачи токов) приведены на рисунках 4 и 5. Единичные отсчеты можно увидеть на табло приборов (рис. 1 и 2). Из них видно, что токовые шумы прибора 6430 значительно больше чем у вольтметра В7-45.

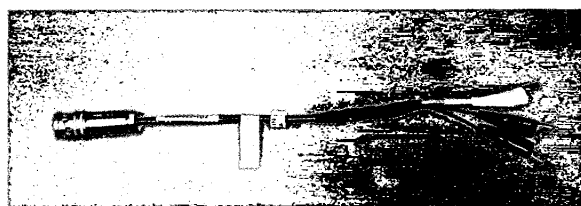


Рис. 3. Общий вид кабеля 6430 – 322 – 1А

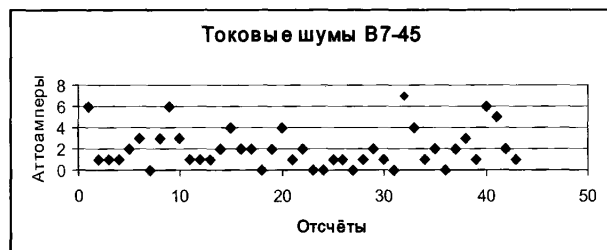


Рис. 4. Токовые шумы вольтметра В7-45



Рис. 5. Токовые шумы прибора 6430

После этого триаксиальный кабель типа 6430-322 -1А с помощью наконечников («крокодилов») был подсоединён к входу прибора В7-45 (противоположный конец кабеля был закрыт металлическим колпачком) и проведены измерения его токовых шумов при времени усреднения вольтметра 10 секунд. Результаты измерений показаны на рисунке 6. Видно, что среднее значение собственных шумов кабеля составляет около 1,5 фА (шумы вольтметра составляют единицы аттоампер). При времени усреднения 1 секунда размах шумов значительно увеличивается. Такое значение токовых шумов вероятно связано с влиянием естественного радиоактивного фона и наличием воздушного объема между «крокодилами», а также составляющей паразитного тока за счет изоляционного материала кабеля.

После оценки значений токовых шумов непосредственно вольтметров и триаксиального кабеля были проведены измерения шумов приборов при подсоединенных к их входам выходных узлов калибратора НК4-1. Электрометр 6430 подсоединялся к выходу калибратора с помощью исследованного кабеля, а В7-45 — непосредственно. Подача малых токов не производилась, калибратор устанавливался в режим «сброс» или «стоп». Результаты измерений приведены на рисунках 7 и 8. Токовые шумы прибора 6430 увеличились до 3 фА, а В7-45 — приблизительно на 1,5 аА.



Рис. 6. Токовые шумы кабеля 6430 – 322 – 1А



Рис. 7. Токовые шумы электрометра 6430 при соединении кабеля с калибратором НК4-1

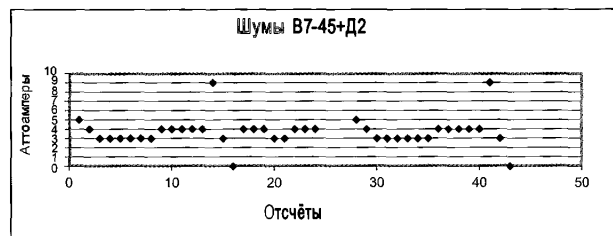


Рис. 8. Шумы прибора В7-45 при его соединении с калибратором НК4-1

После оценки возможных токовых шумов электрометров были проведены метрологические измерения воспроизводимых малых значений токов от калибратора НК4-1. На вход прибора 6430 были поданы токи 10 и 5 фА (рис. 9 и 10), 1 пА (рис. 11), а на В7-45 — токи 20 аА и 10 фА (рис. 12 и 13). При этом было установлено, что полярность измеряемых токов электрометром 6430 противоположна воспроизводимым сигналам калибратора. Среднее значение отклонения от воспроизводимых токов составляет от 0,5 до 1,3 фА и значительно меньше уровней ранее измеренных шумовых токов. Вероятная причина таких результатов связана с изменением полярности сигналов. Изменений полярности измеряемого тока у электрометра

В7-45 нет. Отклонения результатов измерений от заданных значений соответствуют нормативным данным (не превышают 0,025 фА при измерении 10 фА и не более 5 аА при измерении тока 20 аА) Измерения проводились при времени усреднения 10 секунд.

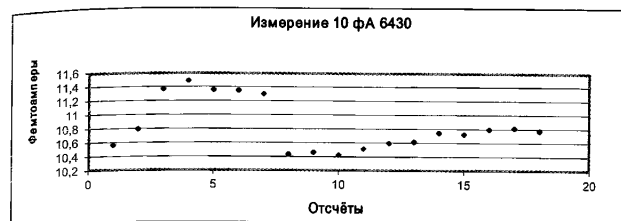


Рис. 9. Результаты измерения тока -10 фА электрометром 6430

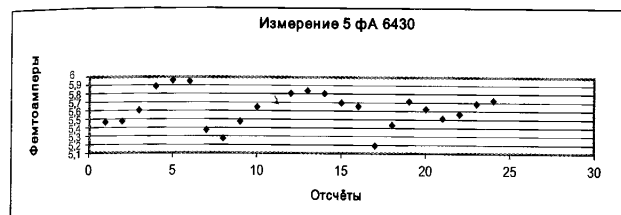


Рис. 10. Результаты измерения электрометром 6430 тока -5 фА

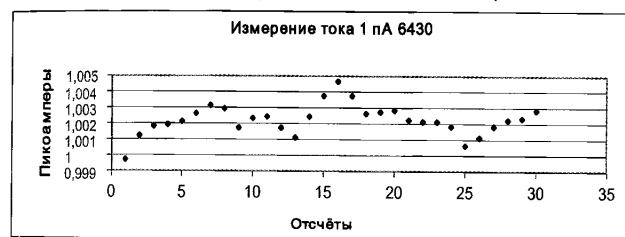


Рис. 11. Результат измерения тока -1 пА электрометром 6430

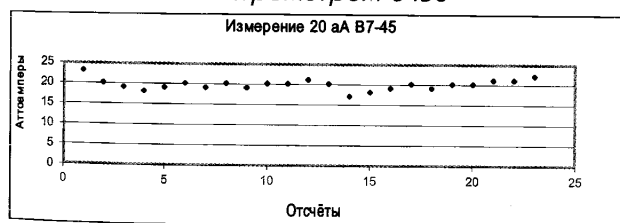


Рис. 12. Результаты измерения тока 20 аА электрометром В7-45

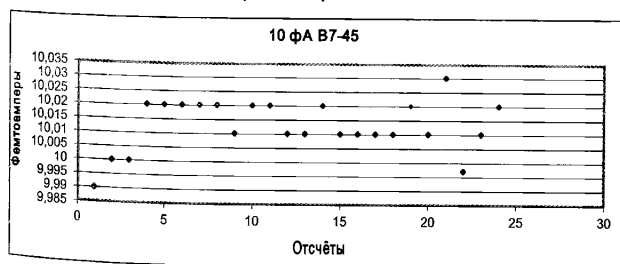


Рис. 13. Результаты измерения тока 10 фА электрометром В7-45

Полученные результаты сравнения двух электрометров свидетельствуют о необходимости унификации входных узлов электрометров и выходных узлов калибраторов с целью достижения высоких метрологических параметров в области измерения предельно малых значений постоянного тока.

Исследуемый электрометр 6430 не обеспечивает высокоточное измерение постоянных токов в диапазоне значений менее 10 фА. Этот электрометр из-за изменения полярности измеряемого тока может приводить к неопределенности оценки характеристик исследуемого объекта.

Список использованной литературы

1. Калибратор больших сопротивлений и малых токов ЕК1-6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
2. Калибратор постоянного тока образцовый НК4-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
3. G.-D. Willenberg. EUROMET.EM-S24 (EUROMET Project 830). Supplementary Comparison of Small Current Sources. REPORT.
4. Калибраторы – измерители напряжения и силы тока Keithley 6430. Краткое руководство пользователя. 2012.
5. П.А. Черняев, Е.А. Казакова. Особенности аппаратуры для измерений сигналов в высокоомных цепях// Метрология и приборостроение. – 2011. – № 2. – С. 35-39.
6. Черняев П.А., Казакова Е.А. Результаты исследования аппаратуры для измерений сигналов в высокоомных цепях. БелГИМ. Сборник научных трудов. 2012, вып. 10, С.49-55.
7. П.А. Черняев, Е.А. Казакова, Д.В. Сентемова. Воспроизведение и измерение постоянного тока в аттоамперном диапазоне// Метрология и приборостроение. – 2013. – №4. – С. 25-28.
8. Павлов О. М., Черняев П. А. Воспроизведение и измерение постоянного тока в аттоамперном диапазоне с наивысшей точностью// Измерительная техника. – № 7. – 2014.

Петр Андреевич Черняев, кандидат технических наук, ученый хранитель национального эталона единицы электрического напряжения – вольт, ведущий инженер отдела БелГИМ;

Елена Андреевна Казакова, начальник отдела БелГИМ;

Вадим Васильевич Попко, инженер I категории отдела БелГИМ;

Диана Валентиновна Сентемова, инженер I категории отдела БелГИМ

Дата поступления 16.04.2015 г.