

Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного тока молниевых разрядов в диапазоне 1—100 кА

К. Ю. САХАРОВ, В. А. ТУРКИН, О. В. МИХЕЕВ, А. В. СУХОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

Рассмотрены принципы создания государственного первичного специального эталона единицы импульсного тока молниевых разрядов в диапазоне 1—100 кА, его состав, устройство и порядок работы. Исследованы метрологические характеристики, определены составляющие неопределенности и рассчитана расширенная неопределенность воспроизведения единицы эталоном, составившая 2,6 %.

Ключевые слова: эталон, молния, импульсный ток, метрологические характеристики, неопределенность воспроизведения.

The principles of development, the components, structure and functioning of the national primary special standard of lightning discharge pulse current unit at the range from 1 to 100 kA have been considered. The metrological characteristics have been studied, the uncertainty components were determined and the expanded uncertainty of unit reproduction by the standard equal to 2,6 % has been calculated.

Key words: standard, lightning, pulse current, metrological characteristics, reproduction uncertainty.

Одним из наиболее распространенных источников электромагнитных помех является молния. Источник молнии — грозовое облако, несущее скопление объемных положительных и отрицательных зарядов. Предполагается, что в земную поверхность каждую секунду ударяет около ста молний [1]. Атмосферное электричество вообще и молнии, в частности, представляют значительную угрозу для авиации. Попадание молнии в летательный аппарат вызывает растекание тока большой силы по его конструкционным элементам, что может вызвать их разрушение, пожар в топливных баках, отказы оборудования, гибель людей. Особую опасность молния представляет для низколетящего самолета или вертолета, так как в этом случае летательный аппарат может сыграть роль проводника тока молнии из облака в землю [2].

Обеспечение стойкости и повышение надежности работы объектов авиационной и космической техники, электроэнергетических систем, связи и транспорта в условиях воздействия на них прямого удара молнии, сопровождающегося интенсивными электромагнитными, электродинамическими и тепловыми дестабилизирующими и разрушающими процессами, является актуальной задачей современной электрофизики [3]. Производители технических средств гражданского, военного и специального назначения обязаны подтверждать соответствие своей продукции требованиям по стойкости к воздействию токов молнии. Общие технические требования, нормы и методы испытаний оборудования на стойкость к воздействию тока молнии изложены в международных и национальных стандартах [4, 5], а также в нормах для испытаний объектов военной и специальной техники. Параметры испытательных импульсов тока молнии для летательных аппаратов устанавливают авиационными правилами [6] и квалификационными требованиями [7].

В России основными центрами испытаний на устойчивость технических средств и объектов к воздействию разряда молнии являются экспериментально-испытательные базы Министерства обороны РФ, Государственная корпора-

ция по атомной энергии «Росатом», Летно-испытательный институт им. М. М. Громова и высоковольтный научно-исследовательский центр Всероссийского электротехнического института им. В. И. Ленина (ВНИЦ ВЭИ). При испытаниях применяют имитаторы тока молнии. Из-за особенностей их конструкции расчет разрядного тока не представляется возможным, поэтому исключительное значение приобретает измерение параметров тока в разрядном контуре.

В испытательных центрах сложился парк рабочих средств измерений (СИ) параметров импульсных токов молниевых разрядов в количестве нескольких сотен единиц. Для их калибровки и поверки в начале 1990-х гг. был создан ряд поверочных установок, прошедших метрологическую аттестацию в качестве нестандартизованных СИ. Однако к настоящему времени эти установки технически и морально устарели, кроме того, они расположены на различных полигонах страны, и нет возможности сличать их между собой.

Для обеспечения единства измерений параметров импульсов тока молнии и достоверности проведения испытаний во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) в 2010—2012 гг. был разработан государственный первичный специальный эталон единицы импульсного тока молниевых разрядов в диапазоне 1—100 кА (далее ГПСЭ).

Принципы создания эталона. Форма импульсного тока при испытаниях в имитаторах молниевых разрядов устанавливается нормативными документами [1, 4—7]; максимальная амплитуда импульса составляет 200 кА, а длительность фронта не превышает 5 мкс [6, 7]. В стандартах [4, 5] нормируется максимальное нарастание тока для первой составляющей, равное $1,4 \cdot 10^{11}$ А/с. Это означает, что при амплитуде тока 200 кА длительность фронта импульса составит около 1,4 мкс [4, 5]. Соответственно, СИ должны обеспечивать измерения импульсов тока амплитудой до 200 кА с длительностью фронта $T_{ф.и} = 1,5$ мкс.

Эталонные для калибровки и поверки указанных СИ должны воспроизводить импульсы с формой близкой к ступенчатой и длительностью фронта $T_{ф.э} \leq T_{ф.и} / 3$. С целью гальванической развязки преобразователей и регистрирующей аппаратуры в СИ, как правило, используют волоконно-оптические линии связи. Так как фотоэлектрические преобразователи функционируют в заданных диапазонах уровней рабочих сигналов, в эталонных установках характеристики СИ при поверке или калибровке должны исследоваться в амплитудном диапазоне измеряемых параметров тока молниевых разряда.

Технически сложно реализовать воспроизведение эталонных ступенчатых импульсов тока амплитудой 200 кА с длительностью фронта в сотни наносекунд. Следует отметить, что для волоконно-оптических СИ импульсных токов верхний предел измерений превышает нижний более чем в 2 раза. Следовательно, если верхний предел измерений СИ составляет 200 кА, то эталонный импульс амплитудой 100 кА всегда будет находиться в одном из его поддиапазонов. Поэтому при разработке ГПСЭ было принято решение реализовать два режима воспроизведения импульса тока. В первом — воспроизводится импульс тока невысокой амплитуды, но с короткой длительностью фронта, чтобы определить переходную характеристику СИ. Во втором — воспроизводимый импульс тока с амплитудой до 100 кА и большой длительностью служит для определения коэффициента преобразования СИ.

**Нормируемые метрологические характеристики
первичного специального эталона**

Амплитуда импульсов тока	1—100 кА
Длительность фронта импульсов тока	0,15—10 нс
Длительность импульсов тока	10—30 мкс
Расширенная неопределенность воспроизведения единицы	не более 5 %

В качестве основной составной части эталона выбран генератор высоковольтных импульсов (ГВИ) в виде емкостного накопителя энергии, разряжающегося на нагрузку при помощи управляемого высоковольтного разрядника. Он обеспечивает воспроизведение импульса тока с короткой дли-

тельностью фронта в сотни наносекунд. Аналогичный ГВИ используется для возбуждения полеобразующих систем в эталоне ГЭТ 148—2009 [8, 9].

Для воспроизведения импульса тока большой амплитуды (до 100 кА) во втором режиме емкостный накопитель предложено разряжать на нагрузку через одновитковый импульсный трансформатор тока, принцип действия которого был предложен в [10, 11]. Применение импульсного трансформатора тока избавляет от необходимости создания сложных, малонадежных и крупногабаритных схем умножения напряжения ГВИ, создает благоприятные возможности для передачи максимальной мощности в нагрузку [10—12].

Для определения параметров воспроизводимых импульсов тока был выбран способ измерения при помощи безындуктивного (коаксиального) токового измерительного шунта, который хорошо поддается расчету. Применение соответствующих материалов и конструкций позволяет выполнить требования по максимальной мощности, тепловой нагрузке и стабильности. Кроме того, конструкция таких шунтов отвечает требованиям по времени нарастания переходной характеристики, точности и помехоустойчивости.

Устройство и работа первичного специального эталона. Структурная схема ГПСЭ показана на рис. 1. Генератор высоковольтных импульсов ГВИ состоит из блока емкостного накопителя БЕН (конденсатор типа ИК50-3У4 емкостью 3 мкФ с максимальным рабочим напряжением 50 кВ); высоковольтного газового разрядника ВГР, заполненного азотом под давлением 1 МПа; узла разрядного сопротивления УРС (резисторы ТВО-60, активное сопротивление 8 Ом, максимальное рабочее напряжение 50 кВ); токосъемных выводов ТСВ для закрепления контрольных измерительных преобразователей КИП. Трансформатор Т импульсов тока большой амплитуды представляет собой одновитковый воздушный импульсный трансформатор ТТ-100, выполненный на основе радиочастотного коаксиального кабеля РК 50-9-11. Первичной обмоткой служит центральная жила кабеля, а вторичной — его оплетка. При протекании тока по первичной обмотке во вторичной возникает ток, пропорциональный количеству витков первичной. Ко вторичной обмотке трансформатора подключены токосъемные выводы.

Контрольный измерительный преобразователь (КИП) — это коаксиальный измерительный шунт, выполненный из манганиновой фольги толщиной 0,25 мм, свернутой в трубу внешним диаметром 20 мм и длиной активной части 39 мм. Внутри трубы находится диэлектрическая вставка, предназначенная для усиления конструкции при измерениях токов порядка 100 кА. Сигнал с шунта снимается при помощи выходного коаксиального разъема СР 50—150 ФВ.

Регистрацию, запоминание и определение амплитудно-временных параметров импульсных сигналов осуществляют цифровые регистраторы импульсов ЦРИ (см. рис. 1); запоминающие осциллографы Tektronix DPO 71604 и TDS 1012 с полосой частот соответственно 16 ГГц и 100 МГц.

Порядок работы ГПСЭ следующий. После подачи управляющего сигнала с пульта управления ПУ на привод высоковольтного газового разрядника генератора высоковольтных импульсов емкостный накопитель через узел разрядного сопротивления разряжается непосредственно (первый режим работы) или через трансформатор (второй режим работы) на токосъемные выводы, в которых закреплены ка-

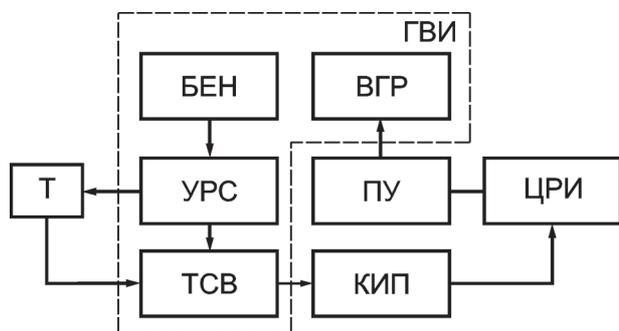


Рис. 1. Структурная схема эталона:

БЕН — блок емкостного накопителя; ВГР — высоковольтный газовый разрядник; УРС — узел разрядного сопротивления; ГВИ — генератор высоковольтных импульсов; ПУ — пульт управления; Т — трансформатор импульсов тока большой амплитуды ТТ-100; ТСВ — токосъемные выводы; КИП — контрольные измерительные преобразователи КИП-100; ЦРИ — цифровые регистраторы импульсов

либруемое или поверяемое СИ и контрольный измерительный преобразователь, сигнал с выхода которого регистрируется цифровым осциллографом.

Исследование метрологических характеристик. Амплитуду I_a воспроизводимой единицы импульсного тока молниевых разряда вычисляют по формуле

$$I_a = U_{\text{КИП}} / R_{\text{КИП}},$$

где $U_{\text{КИП}}$ — амплитуда напряжения на выходе контрольного измерительного преобразователя силы импульсного тока, $R_{\text{КИП}}$ — его сопротивление.

В ходе исследований находили следующие метрологические характеристики ГПСЭ при двух режимах работы: диапазоны значений амплитуды I_a воспроизводимых импульсов тока, длительности фронта $T_{\text{ф.и}}$ импульсов между уровнями 0,1—0,9 и длительности $T_{\text{и}}$ импульсов тока на уровне 0,5 от установившегося значения амплитуды, а также неопределенность воспроизведения единицы.

Характеристики определяли по 50 импульсам тока на различных фиксированных уровнях зарядного напряжения U_3 блока емкостного накопителя ГВИ в диапазоне 3—50 кВ. Нижнюю и верхнюю границы выбирали из условия, что при $U_3 = 3$ кВ обеспечивается устойчивое срабатывание высоковольтного газового разрядника, а $U_3 = 50$ кВ является предельным допустимым напряжением для емкостного накопителя.

Амплитудно-временные параметры воспроизводимых импульсов тока получали при помощи контрольных измерительных преобразователей, которые были откалиброваны во ВНИИМС на постоянном токе 10 А с использованием эталонов ВЭТ 13-12-04 и ГВЭТ 14-30-08 [13]. Для компенсации термоЭДС при калибровке КИП показания снимали при разных полярностях тока. Номинальные значения сопротивления шунтов для первого и второго режимов: $R_{\text{КИП}1} = 1,139$ мОм и $R_{\text{КИП}2} = 0,9703$ мОм. Расширенные неопределенности измерения сопротивлений при доверительной вероятности $P = 0,99$ и коэффициенте охвата $k = 1,71$ составили $U_{B,R1} = 0,5\%$ и $U_{B,R2} = 0,05\%$. Были оформлены сертификаты калибровки RU-04-206.3-41-12 и RU-04-206.3-40-12.

Время нарастания переходных характеристик КИП между уровнями 0,1—0,9 от установившегося значения амплитуды определяли при использовании генератора ступенчатых повторяющихся импульсов ($T_{\text{ф.и}} = 1$ нс) из состава эталона ГЭТ 148—2009 [8]. Для шунтов в первом и втором режимах получили $T_{\text{НПХ}1} = 20,6$ нс и $T_{\text{НПХ}2} = 21,7$ нс. На выходе КИП цифровым запоминающим осциллографом Tektronix DPO 71604 регистрировали импульсы напряжения. При перерасчете напряжения в ток с учетом коэффициента преобразования КИП были получены типовые осциллограммы импульсов тока, воспроизводимых в эталоне, приведенные на рис. 2, а, б — в первом, и рис. 2, в, г — во втором режимах работы эталона.

По результатам воспроизведения импульсов тока молниевых разряда и измерений сигналов на выходе КИП получены следующие амплитудно-временные характеристики эталона для двух режимов:

диапазоны амплитуд импульсов тока составляли 1,0—8,0 кА в первом и 6,0—100 кА во втором режимах;

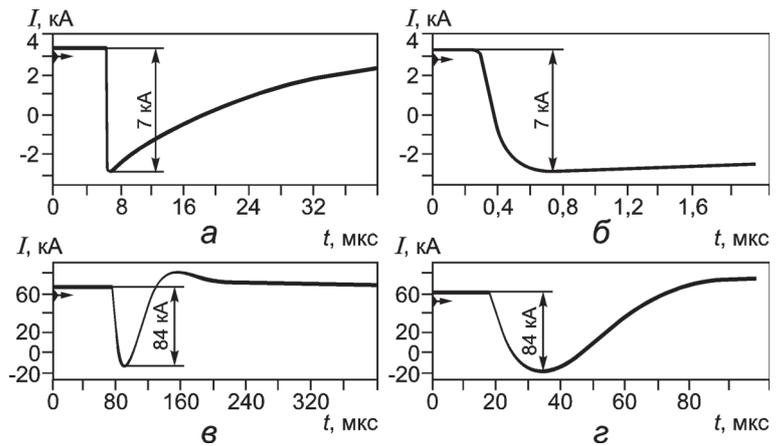


Рис. 2. Осциллограммы импульса тока и его фронтальной части в первом (а, б) и втором (в, г) режимах работы ГПСЭ:

а — $I_a = 7$ кА, $T_{\text{и}} = 12$ мкс, $K_p = 4$ мкс/дел.; б — $I_a = 7$ кА, $T_{\text{ф.и}} = 250$ нс, $K_p = 200$ нс/дел.; в — $I_a = 84$ кА, $T_{\text{и}} = 35$ мкс, $K_p = 40$ мкс/дел.; г — $I_a = 84$ кА, $T_{\text{ф.и}} = 9,7$ мс, $K_p = 10$ мкс/дел.

диапазоны длительности фронта воспроизводимых импульсов тока между уровнями 0,1—0,9 от установившегося значения равны 0,14—0,4 мкс в первом и 9,2—10,0 мкс во втором режимах;

диапазоны длительности воспроизводимых импульсов тока на уровне 0,5 от установившегося значения составляют 10—12 мкс в первом и 35—36 мкс во втором режимах.

Анализ неопределенности воспроизведения единицы.

В соответствии с [14—17] неопределенность ГПСЭ должна быть выражена по типам А и В. Оценка неопределенности по типу А при 50 независимых наблюдениях составила 0,3 % в обоих режимах работы эталона. При вычислении стандартной неопределенности по типу В учитывали следующие границы отклонения входных величин: $\Theta_{U_{\text{НН}}}$, $\Theta_{U_{\text{НВ}}}$ — при измерении амплитуды, обусловленные установкой нулевого уровня и паразитными колебаниями на вершине импульса; $\Theta_{U_{\text{ОСЦ}}}$ — при измерении амплитудно-временных параметров осциллографом; $\Theta_{U_{\text{T}}}$ — границы отклонения при измерении сопротивления, обусловленные тепловым действием тока; $\Theta_{U_{\text{СЭ}}}$ — при измерении напряжения, обусловленные влиянием скин-эффекта. Они составили: $\Theta_{U_{\text{НН}}} = \Theta_{U_{\text{НВ}}} = 0,5\%$; $\Theta_{U_{\text{ОСЦ}}} = 2\%$ для вертикального отклонения по паспортным данным и при проверке.

При действии импульсов тока перегрев шунта ϑ пропорционален введенной в него энергии W [18]. Следовательно, повышение температуры шунта из-за теплового действия тока можно рассчитать по формуле

$$\vartheta = W / (mc) = \frac{1}{mc} \int_0^{\infty} R_{\text{КИП}} I_a^2(t) dt, \quad (1)$$

где m — масса шунта; c — удельная теплоемкость материала шунта (манганина); $R_{\text{КИП}}$ — номинальное значение сопротивления шунта; $I_a(t)$ — мгновенное значение тока.

При расчете по (1) перегрев определяли исходя из времени достижения максимума амплитуды импульса. С учетом температурного коэффициента сопротивления α манганина были вычислены границы отклонения номинального

значения сопротивления шунта, обусловленные тепловым действием тока:

$$\Theta_{U_T} = 100\Delta R_{\text{КИП}} / R_{\text{КИП}} = 100\alpha\delta,$$

причем $\Theta_{U_T1} = 4 \cdot 10^{-5} \%$ и $\Theta_{U_T2} = 0,2 \%$ для двух режимов работы ГПСЭ. Очевидно, что в первом режиме работы при воспроизведении импульса тока с короткой длительностью и небольшой амплитудой данная составляющая пренебрежимо мала.

Явление скин-эффекта приводит к тому, что нарастающий ток $I_a(t)$ распределяется по толщине стенки шунта неравномерно, это ведет к увеличению его сопротивления [18—20]. Расчеты показали, что границы отклонения при измерении амплитуды напряжения на выходе шунта вследствие влияния скин-эффекта $\Theta_{U_CЭ} \leq 1 \%$.

Стандартная неопределенность измерений при воспроизведении единицы импульсного тока молниевых разрядов, оцениваемая по типу В, вычислена по формуле

$$u_B = \sqrt{u_{B_OCЦ}^2 + u_{B_HВ}^2 + u_{B_HН}^2 + u_{B_CЭ}^2 + u_{B_R}^2 + u_{B_T}^2},$$

входящие в нее источники неопределенности определены как

$$u_{B_OCЦ} = \Theta_{U_OCЦ} / \sqrt{3}; u_{B_HВ} = \Theta_{U_HВ} / \sqrt{3}; u_{B_HН} = \Theta_{U_HН} / \sqrt{3};$$

$$u_{B_CЭ} = \Theta_{U_CЭ} / \sqrt{3}; u_{B_T} = \Theta_{U_T} / \sqrt{3} \quad (2)$$

При подстановке в (2) указанных выше значений получили стандартную неопределенность, оцененную по типу В, $u_B = 1,5 \%$. Расширенная неопределенность воспроизведения единицы импульсного тока молниевых разрядов в предположении о равномерности закона распределения возможных значений измеряемых величин при $P = 0,99$ и $k = 1,71$ составила $U = 2,6 \%$.

Выводы. Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного тока молниевых разрядов в диапазоне 1—100 кА обеспечивает единство измерений параметров импульсов тока молнии в приоритетных направлениях науки и техники, таких как энергетика, авиа- и ракетостроение, атомная промышленность, связь и транспорт. По своим метрологическим характеристикам он не уступает зарубежным аналогам. Планируются международные сличения разработанного ГПСЭ с исходным эталоном Украины при помощи эталона сравнения — измерительного коаксиального токового шунта.

Л и т е р а т у р а

1. **Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В.** Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
2. **Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М.** Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1971.
3. **Баранов М.И. и др.** Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии при натуральных испытаниях и проверке средств молниезащиты и технических объектов // Электротехника и Электромеханика. 2008. № 3. С. 69—75.

4. **Квалификационные** требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы — ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. М.: Изд-во АРМАК, 2004.

5. **Авиационные** правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). М.: Изд-во Летно-исследовательского института им. М. М. Громова, 1994.

6. **МЭК 61000-4-5—95.** Электромагнитная совместимость (ЭМС). Ч. 4. Методы испытаний и измерений. Разд. 5. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии.

7. **ГОСТ Р 51317.4.5—99.** Совместимость технических средств. Электромагнитная устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний.

8. **ГОСТ 8.540—2011.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного поля.

9. **Сахаров К. Ю. и др.** Эталонные и испытательные источники электромагнитных импульсов // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 55—57; **Sakharov K. Yu. e. a.** Standard and Test Sources of Electromagnetic Pulses // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 11. P. 1120—1124.

10. **Месяц Г. А.** Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.

11. **Месяц Г. А.** Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.

12. **Вдовин С. С.** Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

13. **Семенчинский С. Г., Чробок П., Свобода П.** Сличение размеров единиц электрического сопротивления, поддерживаемых на основе квантового эффекта Холла, во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы и Чешском метрологическом институте // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 58—61; **Semenchinsky S. G., Chrobok P., Svoboda P.** Comparison of the dimensions of electrical resistance units, supported on the basis of the hall quantum effect, in the All-Russia Research Institute of Metrological Service and the Czech Metrological Institute // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 12. P. 1351—1356.

14. **ГОСТ 8.381—2009.** ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

15. **Руководство** по выражению неопределенности измерения / Под ред. В. А. Слаева. СПб.: Изд-во ВНИИМ, 1999.

16. **РМГ 43—2001.** ГСИ. Применение Руководства по выражению неопределенности измерений.

17. **РМГ 29—99.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

18. **Шваб А.** Измерения на высоком напряжении: измерительные приборы и способы измерения. М.: Энергоатомиздат, 1983.

19. **Болотин И. Б., Эйдель Л. З.** Измерения в переходных режимах короткого замыкания. Л.: Энергия, 1981.

20. **Базелян Э. М., Райзер Ю. П.** Искровой разряд. М.: Изд-во МФТИ, 1997.

Дата принятия 12.08.2013 г.