

М.И. Баранов, В.В. Князев, С.В. Рудаков

КОАКСИАЛЬНЫЙ ДИСКОВЫЙ ШУНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ГРОВОВЫХ РАЗРЯДОВ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ С ИНТЕГРАЛОМ ДЕЙСТВИЯ ДО $15 \cdot 10^6$ ДЖ/ОМ

Описана конструкція розробленого і створеного вимірювального коаксіального дискового шунта типу ШК-300М2, що дозволяє за допомогою коаксіальної кабельної лінії зв'язку і цифрових осцилографів, що запам'ятовують, одночасно вимірювати амплітудно-часові параметри (АЧП) основних компонент струму штучної блискавки, що генеруються високовольтним генератором грозових розрядів відповідно до вимог нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013 і SAE ARP 5416: 2013. Приведені основні технічні характеристики вимірювального коаксіального дискового шунта типу ШК-300М2. Показано, що даний шунт дозволяє вимірювати і АЧП аперіодичного імпульсу струму часової форми 10 мкс/350 мкс, нормований інтеграл дії якого згідно вимог міжнародного стандарту IEC 62305-1: 2010 може чисельно складати до $13,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом. Бібл. 11, рис. 4.

Ключові слова: потужний високовольтний генератор струму блискавки, вимірювальний коаксіальний дисковий шунт, вимірювальний диск шунта з неіржавіючої сталі, розрахункова оцінка параметрів шунта.

Описана конструкция разработанного и созданного измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, позволяющего с помощью коаксиальной кабельной линии связи и цифровых запоминающих осциллографов одновременно измерять амплитудно-временные параметры (АВП) основных компонент тока искусственной молнии, генерируемых высоковольтным генератором грозовых разрядов в соответствии с требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013. Приведены основные технические характеристики измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2. Показано, что данный шунт позволяет измерять и АВП аперіодического импульса тока временной формы 10 мкс/350 мкс, нормированный интеграл действия которого согласно требований международного стандарта IEC 62305-1: 2010 может численно составлять до $13,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом. Библ. 11, рис. 4.

Ключевые слова: мощный высоковольтный генератор тока молнии, измерительный коаксиальный дисковий шунт, измерительный диск шунта из нержавеющей стали, расчетная оценка параметров шунта.

Введение. Нормативные документы США SAE ARP 5412: 2013 [1] и SAE ARP 5416: 2013 [2] определяют требования к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока искусственной молнии, генерируемых соответствующими высоковольтными генераторами грозовых разрядов, обычно называемых у нас высоковольтными генераторами тока молнии (ГТМ), на электрических нагрузках аэрокосмической техники, испытываемой на молниестойкость. Один из подобных типов мощного ГТМ, воспроизводящего по требованиям [1, 2] на активно-индуктивной нагрузке необходимые АВП импульсов тока имитированной молнии, был разработан и создан в 2007 г. сотрудниками отделов №3 высоковольтной импульсной техники и №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [3]. Согласно [1, 2] при указанных испытаниях устройств авиационной и ракетно-космической техники могут использоваться импульсная А- (или повторная импульсная D-), промежуточная В- и длительная С- (или укороченная длительная С*-) компоненты тока искусственной молнии. Причем, сочетания данных токовых компонент, следующих во времени друг за другом и резко отличающихся своими амплитудами (от сотен килоампер до десятков ампер) и длительностями протекания (от сотен микросекунд до одной тысячи миллисекунд), могут быть по [1, 2] различными. Наиболее часто в практике испытаний отдельных элементов таких летательных аппаратов как самолетов гражданского и военного назначения на молниестойкость применяются следующие комбинации указанных компонент тока молнии [1-4]: А-, В- и С- компоненты, А-, В- и С*-

компоненты и D-, В- и С*- компоненты. Для указанных компонент тока молнии такой важный параметр для электротермического нагружения в сильноточной разрядной цепи мощного ГТМ испытываемых объектов авиационной и ракетно-космической техники в соответствии с требованиями [1, 2] как интеграл их действия J_L численно не превышает значения $2 \cdot 10^6$ Дж/Ом ± 20 %. Заметим, что именно величина этого интеграла J_L определяет значение тепловой энергии, выделяющейся на испытываемом элементе того или иного объекта. Поэтому величина J_L зачастую определяет электротермическую молниестойкость такого объекта. Кроме того, при проведении натурных испытаний по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [5] объектов электроэнергетики на молниестойкость значения интеграла действия J_L аперіодического импульса тока искусственной молнии временной формы 10 мкс/350 мкс, генерируемого разработанным и созданным в 2012 г. в отделе №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» мощным ГТМ [6], для I уровня их защиты от молнии должны составлять $10 \cdot 10^6$ Дж/Ом ± 35 %. При электрическом токовом нагружении испытываемых объектов необходимо в оперативном режиме осуществлять регистрацию и контроль АВП используемых при этом компонент тока молнии. Обычно подобные электротехнологические процедуры выполняются при помощи измерительных средств, в качестве которых выступают высоковольтные сильноточные измерительные шунты (ВСИШ) с коаксиальными кабельными линиями связи, работающими в согласованном

© М.И. Баранов, В.В. Князев, С.В. Рудаков

волновом режиме [3, 4], и цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО). Как правило, ВСИШ являются специальными нестандартизованными измерительными средствами, которые промышленностью из-за своей незначительной количественной потребности и отсутствия у бизнесменов к такой продукции коммерческого интереса не выпускаются. Поэтому отечественным электротехникам-высоковольтникам вместе с инженерами-метрологами приходится самостоятельно решать возникающие инженерно-технические задачи по их разработке и изготовлению с последующей государственной метрологической аттестацией.

1. Состояние инженерно-технической задачи.

В [7] были описаны конструкция и технические характеристики измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 для определения АВП импульсов тока искусственной молнии, генерируемых в сильноточных разрядных цепях ГТМ в соответствии с требованиями нормативных документов [1, 2]. В состав конструкции данного шунта входит манганиновый измерительный диск толщиной $h_s \approx 0,3$ мм с наружным диаметром $D_{se} \approx 80$ мм, определяющий импульсное активное сопротивление шунта, равное примерно $R_s \approx 0,185$ мОм $\pm 1\%$ [3, 7]. Практика эксплуатации в лабораторных условиях шунта типа ШК-300 показала его недостаточную электротермическую и электродинамическую стойкость в сильноточной разрядной цепи ГТМ, воспроизводящего на активно-индуктивной нагрузке ($R \approx 0,1$ Ом; $L \approx 1$ мкГн) импульсный ток $i_L(t)$ искусственной молнии с интегралом действия, равным около $J_L \approx 2 \cdot 10^6$ Дж/Ом $\pm 20\%$ [1, 2]. После примерно 100 указанных сильноточных разрядов ГТМ на испытываемую нагрузку и измерительный шунт типа ШК-300 последний теряет свои метрологические характеристики и становится не пригодным к его дальнейшему использованию. При прохождении согласно [5] по токоведущим частям измерительного шунта типа ШК-300 аperiodического импульса тока 15 мкс/315 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{ml} \approx 184$ кА ($J_L \approx 7,88 \cdot 10^6$ Дж/Ом) указанный шунт был разрушен внутренним импульсным газодинамическим давлением в несколько сотен атмосфер из-за электрического взрыва (сублимации) части материала его тонкого измерительного манганинового диска [8]. Как видим, при использовании в области высоковольтной импульсной техники с разрядными токами конденсаторных батарей ГТМ в сотни килоампер к выбору конструкции соответствующего измерительного шунта должны предъявляться повышенные требования к его электротермической молниестойкости.

В [9] была приведена конструкция стержневого шунта для измерения импульсных токов микросекундной длительности с амплитудой до 75 кА. В качестве высокоомного измерительного элемента в этой конструкции шунта были использованы параллельно соединенные прямолинейные отрезки нихромовой проволоки, размещенные по окружности между двумя массивными коаксиальными цилиндрическими электродами шунта – внутренним латунным и наружным дюралюминиевым [9]. Концы каждого отрезка нихромовой проволоки, размещенного параллельно продольной оси шунта, были припаяны твердым при-

поем к двум параллельно расположенным массивным латунным дискам, между которыми находился цилиндрический керамический изолятор. При чувствительности шунта около 350 мВ/кА он позволял надежно измерять лишь большие микросекундные импульсы токи высоковольтной электрофизической установки (амплитудой не более 75 кА) и передавать без искажений фронт токового импульса до 0,6 мкс [9].

Целью статьи является разработка и создание в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, позволяющего надежно измерять АВП импульсов тока искусственной молнии в широких амплитудных и временных диапазонах с интегралом действия до $15 \cdot 10^6$ Дж/Ом.

2. Постановка задачи. Накопленный в отделе №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» опыт эксплуатации в составе мощного ГТМ [3] высоковольтного сильноточного измерительного шунта типа ШК-300 свидетельствует о том, что с учетом изложенного выше в разделе 1 состояния назревшей в области высоковольтной импульсной техники актуальной задачи метрологического обеспечения испытаний по [1, 2, 5] отечественной авиационной и ракетно-космической техники, а также объектов электроэнергетики на молниестойкость в указанной конструкции шунта усовершенствованию должны подлежать: во-первых, тонкий измерительный манганиновый диск; во-вторых, изоляция между массивным внутренним латунным и массивным наружным латунным цилиндрическими электродами. Именно эти две позиции являются «слабыми звеньями» в конструкции измерительного шунта типа ШК-300 при его предполагаемом применении в составе измерительных средств, предназначенных для реализации технических задач согласно жестких требований по [1, 2, 5].

Требуется в рамках прикладного инженерно-технического подхода рационально выбрать геометрию и материал измерительного диска, а также изоляцию между основными латунными электродами в измерительном коаксиальном шунте, приобретшем после усовершенствования название ШК-300М2. Кроме того, необходимо после модернизации измерительного коаксиального дискового шунта выполнить его практическую апробацию и проверку работоспособности в составе сильноточной разрядной цепи действующего мощного высоковольтного ГТМ по [3].

3. Расчетная оценка некоторых параметров измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2. В качестве материала измерительного диска коаксиального шунта типа ШК-300М2 нами была выбрана широко распространенная в технике и быту нержавеющей сталь марки 12Х18Н10Т отечественного производства [10]. Усредненная толщина h_{sm} стенок измерительного диска исследуемого сильноточного высоковольтного коаксиального шунта типа ШК-300М2 в адиабатическом режиме его работы на основании известных законов электро- и теплофизики может быть оценено по соотношению вида:

$$h_{sm} \approx (\pi D_{sm})^{-1} [(J_L \rho_s) / (c_s \Delta T_s d_s)]^{1/2}, \quad (1)$$

где $D_{sm} \approx D_{se}/2$; ρ_s , c_s , d_s – соответственно удельное электрическое сопротивление, удельная теплоемкость

и плотность материала диска при температуре окружающей среды T_0 , равной комнатной температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_s = (T_s - T_0)$ – допустимый кратковременный перегрев материала диска шунта с его текущей температурой T_s , вызванной протекающим по нему током.

Из конструктивных соображений принимаем, что наружный диаметр измерительного стального диска в шунте типа ШК-300М2 равен $D_{se} \approx 80\text{ мм}$, а его внутренний диаметр составляет $D_{si} \approx 10\text{ мм}$. Тогда из (1) при $D_{sm} \approx 40\text{ мм}$, $J_L \approx 15 \cdot 10^6\text{ Дж/Ом}$, $\Delta T_s \approx 100\text{ }^\circ\text{C}$ и известных согласно [10] исходных данных для нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т ($\rho_s \approx 72,5 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$; $c_s \approx 462\text{ Дж/(кг}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; $d_s \approx 7900\text{ кг/м}^3$) получаем, что усредненная по радиусу толщина стенки измерительного стального диска будет численно равной $h_{sm} \approx 1,4\text{ мм}$. С учетом определенного запаса по толщине h_{sm} и принимая во внимание наши весьма ограниченные технологические возможности в подборе материалов, выбираем толщину стенки измерительного диска из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т равной $h_{sm} \approx 2\text{ мм}$.

Отметим, что в (1) для исследуемого шунта типа ШК-300М2 величина кратковременного перегрева ΔT_s материала измерительного диска, происходящая за время действия тока $i_L(t)$ не более 1000 мс практически в адиабатическом режиме, лимитируется видом твердой изоляции, применяемой для его отделения от основных латунных электродов шунта. При использовании фторопластовой изоляции величину перегрева ΔT_s для надежной работы шунта ШК-300М2 в составе ГТМ целесообразно выбирать не более $100\text{ }^\circ\text{C}$ [3, 4]. При $\Delta T_s \approx 50\text{ }^\circ\text{C}$ и принятых выше исходных данных для интеграла действия J_L импульсного тока молнии, геометрических, электро- и теплофизических характеристик стального диска шунта из (1) следует, что толщина h_{sm} диска как раз и будет равной около 2 мм .

Активное сопротивление R_{S0} измерительного стального диска коаксиального шунта ШК-300М2 в квазистационарном режиме, практически соответствующем в рассматриваемом случае режиму протекания по нему постоянного тока, может быть в приближенном виде найдено по следующей формуле [11]:

$$R_{S0} \approx 0,5 (\pi h_{sm})^{-1} \rho_s \ln(D_{se} / D_{si}). \quad (2)$$

Из (2) при $h_{sm} \approx 2\text{ мм}$, $\rho_s \approx 72,5 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, $D_{se} \approx 80\text{ мм}$ и $D_{si} \approx 10\text{ мм}$ вытекает, что искомая величина R_{S0} оказывается примерно равной $0,12\text{ мОм}$. Измерение практически равного величине R_{S0} активного сопротивления шунта типа ШК-300М2 в сборе, проведенное специалистами-метрологами в высокостабильной схеме генератора постоянного тока силой 19 А , показало, что в этом экспериментальном случае $R_{S0} \approx 0,094\text{ мОм}$. Видно, что расхождение расчетных и опытных данных для R_{S0} в нашем случае не превышает 22% .

4. Практическая реализация измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2.

На рис. 1 и 2 приведены соответственно общий вид и схематическое устройство измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2. Масса этого измерительного шунта составляет около $3,2\text{ кг}$, а его габаритные размеры не превышают $90 \times 95\text{ мм}$.



Рис. 1. Общий вид коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, предназначенного для измерения на экранах ЦЗО в согласованном режиме работы его коаксиальной кабельной линии связи мощных импульсов тока искусственной молнии в силовоточной разрядной цепи высоковольтного ГТМ с интегралом их действия до $15 \cdot 10^6\text{ Дж/Ом}$

Из данных рис. 2 видно, что измерительный стальной диск 5 толщиной $h_{sm} \approx 2\text{ мм}$ на своем рабочем участке плотно зажат между массивными дисками 6 и 7 толщиной 10 мм , выполненными из листовой фторопластовой изоляции. Между массивными латунными цилиндрическими электродами 1 и 4 шунта, через которые от конденсаторов ГТМ протекает измеряемый импульс тока $i_L(t)$ искусственной молнии, установлены изоляционные втулки 2 и 3 толщиной 3 мм , изготовленные также из фторопластовой изоляции.

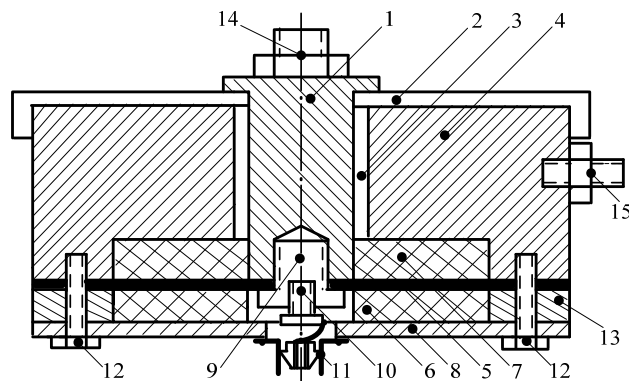


Рис. 2. Элементы конструкции коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 в его продольном осевом разрезе (1 – массивный внутренний цилиндрический электрод; 2,3 – изоляционные втулки; 4 – массивный наружный цилиндрический электрод; 5 – высокоомный стальной измерительный диск; 6,7 – массивные изоляционные диски; 8 – бандажный диск; 9,10,12 – винты крепления; 11 – выходной коаксиальный разъем типа СР-75; 13 – массивное прижимное кольцо; 14,15 – соответственно входные (потенциальные) и выходные (заземленные) элементы болтового подсоединения шунта к силовоточной разрядной цепи ГТМ)

Данные втулки существенно повышают электрическую прочность изоляционных зазоров между токоведущими частями высоковольтного силовоточного шунта типа ШК-300М2, что положительно сказывается на надежности его функционирования в составе мощного ГТМ. Повышенную электродинамическую

стойкость исследуемого шунта обеспечивают массивное прижимное латунное кольцо 13 толщиной 7 мм, бандажный латунный диск 8 толщиной 5 мм и стальные винты крепления 12 в количестве 8 шт., равномерно распределенные по наружному круговому периметру массивного латунного электрода 4 шунта.

Измерительный коаксиальный дисковый шунт типа ШК-300М2 включается в разрыв силовоточной высоковольтной разрядной цепи мощного ГТМ того или иного исполнения [3, 5]. Причем, внутренний цилиндрический латунный электрод 1 диаметром 29 мм шунта подсоединяется при помощи элементов 14 болтового соединения к потенциальной части силовоточной разрядной цепи ГТМ, а его наружный цилиндрический латунный электрод 4 диаметром 80 мм при помощи элементов 15 болтового соединения – к заземленной части разрядной цепи ГТМ (обычно к металлическому заземленному коллектору мощной высоковольтной конденсаторной батареи генератора).

5. Результаты экспериментальной апробации измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 в силовоточной цепи высоковольтного ГТМ. На рис. 3 приведена осциллограмма импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии, полученная при помощи измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, включенного в разрядную цепь мощного ГТМ [3], воспроизводящего по требованиям нормативных документов [1, 2] на активно-индуктивной нагрузке ($R_S \approx 0,1$ Ом; $L_S \approx 1,5$ мкГн) импульсы тока искусственной молнии.

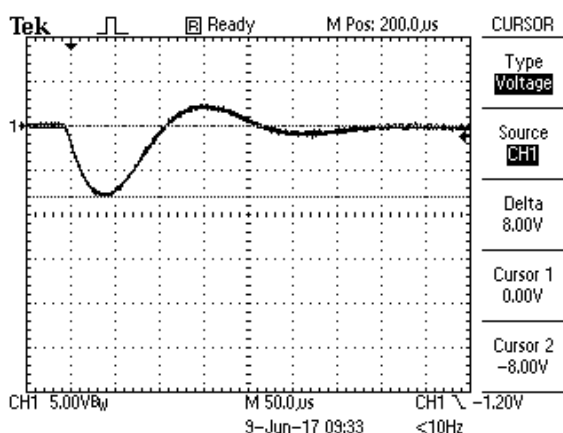


Рис. 3. Осциллограмма импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в силовоточной разрядной цепи ГТМ [3], полученная с помощью измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 ($I_{mA1} \approx 200$ кА; $t_{mA1} \approx 38$ мкс; $J_A \approx 2,39 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $U_{cA} \approx 29,7$ кВ; $S_{SA} \approx 25 \cdot 10^3$ А/В; масштаб по вертикали – 125 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

В ходе экспериментальных исследований поведения усовершенствованной конструкции и характеристик шунта типа ШК-300М2 в разрядной цепи ГТМ [3], конденсаторная батарея которого при формировании приведенной на рис. 3 компоненты тока молнии заряжалась до постоянного напряжения $U_{cA} \approx 29,7$ кВ, было установлено, что его импульсное активное сопротивление R_S принимает численное значение, равное около $R_S \approx 0,08$ мОм $\pm 1\%$. Данное опытное значе-

ние R_S в условиях протекания по измерительному стальному диску шунта приведенного на рис. 3 импульсного тока $i_L(t)$ искусственной молнии отличается от активного сопротивления $R_{S0} \approx 0,094$ мОм исследуемого шунта постоянному току не более, чем на 15 %. Следует заметить то, что указанные значения активных сопротивлений R_S и R_{S0} находятся в хорошем согласовании с результатами ранее выполненных исследований переходных электромагнитных процессов и глубин проникновения импульсного электромагнитного поля в проводящих немагнитных средах на участках трех первых полуволн воздействующего на них затухающего синусоидального импульса тока [4]. Из-за особенностей распределения в металле измерительного диска шунта импульсного электромагнитного поля от измеряемого импульсного тока $i_L(t)$ имитированной молнии его импульсное активное сопротивление R_S будет всегда меньше активного сопротивления R_{S0} диска, измеренного при постоянном токе [4].

Известно, что величина импульсного активного сопротивления R_S измерительного диска шунта в согласованном режиме подключения его коаксиальной кабельной линии связи к ЦЗО определяет его коэффициент преобразования S_S , имеющий размерность А/В и рассчитываемый по соотношению $S_S \approx 2/R_S$. В этом случае значение параметра S_S оказывается численно равным силе тока, протекающей по диску шунта при подаче на его вход напряжения, равного 1 В. В этой связи АВП измеряемого при помощи коаксиального шунта типа ШК-300М2 импульсного тока $i_L(t)$ искусственной молнии в разрядной цепи мощного ГТМ будут определяться следующим соотношением:

$$i_L(t) \approx S_S U_{LO}(t), \quad (3)$$

где $U_{LO}(t)$ – импульсное напряжение, регистрируемое при помощи измерительного шунта на экране ЦЗО.

С учетом представленных результатов находим, что коэффициент преобразования S_S рассматриваемого измерительного шунта типа ШК-300М2 для режима регистрации им согласно [1, 2] *A*- и *D*- компонент импульсного тока искусственной молнии, а также по [5] импульса тока временной формы 10 мкс/350 мкс будет составлять $S_{SA} \approx 2/R_S \approx 25 \cdot 10^3$ А/В. При использовании в конце коаксиальной кабельной линии связи шунта, выполненной на основе радиочастотного кабеля марки РК 75-7-11 с волновым сопротивлением 75 Ом, согласующего делителя напряжения (СДН) [3, 7] коэффициент преобразования S_S исследуемого измерительного шунта типа ШК-300М2 в режиме регистрации им промежуточной *B*-, длительной *C*- и укороченной длительной *C**- компонент тока искусственной молнии будет равным $S_{SC} \approx 1/R_S \approx 12,5 \cdot 10^3$ А/В. Указанный СДН выполняется с двумя выходными коаксиальными разъемами 1:1 (для S_{SA}) и 1:2 (для S_{SC}) на базе трех резисторов номиналом 110 Ом и размещается в отдельном экранированном корпусе [3, 7].

На рис. 4 приведена осциллограмма укороченной длительной *C**- компоненты тока искусственной молнии в силовоточной разрядной цепи ГТМ [3], следующей во времени сразу за импульсной *A*- токовой компонентой молнии и одновременно зафиксированной на экране ЦЗО при помощи измерительного коаксиального

дискового шунта типа ШК-300М2. Укажем, что в проведенных экспериментах были использованы ЦЗО серии Tektronix TDS 1012, размещенные в заглубленном измерительном бункере и удаленные от разрядных цепей ГТМ на расстоянии примерно 70 м.

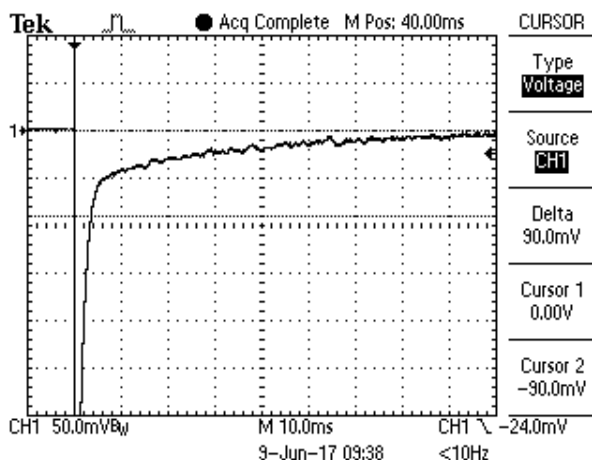


Рис. 4. Осциллограмма укороченной длительной C^* -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в разрядной цепи ГТМ [3], полученная одновременно с протекающей перед нею токовой A -компонентой при помощи измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2 ($I_{mC^*} \approx 750$ А; $t_{mC^*} \approx 5$ мс; $\tau_{pC^*} \approx 15$ мс; $q_{C^*} \approx 18,1$ Кл; $S_{SC^*} \approx 12,5 \cdot 10^3$ А/В; $U_{cC^*} \approx 4$ кВ; масштаб по вертикали – 625 А/клетка; масштаб по горизонтали – 10 мс/клетка)

Зарядное напряжение отрицательной полярности конденсаторной батареи ГТМ [3], формирующей на активно-индуктивной нагрузке ($R \approx 0,1$ Ом; $L \approx 1,5$ мкГн) укороченную длительную C^* -компоненту тока имитированной молнии, применительно к данным рис. 4 составляло $U_{cC^*} \approx 4$ кВ. Заметим, что приведенные на рис. 3 и 4 АВП импульсной A - и укороченной длительной C^* -компонент тока моделируемой в лабораторных условиях молнии соответствуют действующим требованиям нормативных документов [1, 2].

Выводы. 1. Разработанный и созданный в отделе №4 электромагнитных испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» усовершенствованный измерительный коаксиальный дисковый шунт типа ШК-300М2 позволяет при его прямом размещении в сильноточной высоковольтной разрядной цепи мощного ГТМ с помощью одной дополнительно экранированной коаксиальной кабельной линии связи длиной до 70 м и нескольких находящихся в удаленном от ГТМ заглубленном экранированном бункере ЦЗО в согласованном режиме их работы одновременно и многократно измерять на активно-индуктивной нагрузке испытываемого объекта основные компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП по требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 при их амплитуде до ± 220 кА и интеграле действия до $2,4 \cdot 10^6$ Дж/Ом.

2. Измерительный коаксиальный дисковый шунт типа ШК-300М2 способен многократно регистрировать на активно-индуктивной нагрузке и передавать в согласованном режиме по коаксиальной кабельной линии связи на ЦЗО формируемые в сильноточной

высоковольтной разрядной цепи мощного ГТМ аperiodические импульсы тока временной формы 10 мкс/350 мкс короткого удара искусственной молнии с нормированными АВП по требованиям международного стандарта IEC 62305-1: 2010 при их амплитуде до ± 220 кА и интеграле действия до $13,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом.

3. Проведенные в июне 2017 г. на экспериментально-испытательном полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сильноточные эксперименты на мощном высоковольтном ГТМ подтвердили согласно требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 работоспособность измерительного коаксиального дискового шунта типа ШК-300М2, прошедшего государственную метрологическую аттестацию в ГП «Харьковстандартметрология» (сертификат соответствия №06/0206 от 19.07.2017 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
3. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects // Instruments and Experimental Technique. – 2008. – no.3. – pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Точка, 2010. – 407 с.
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10 μ s/350 μ s with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – vol.58. – no.6. – pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.
7. Дныщенко В.Н., Еремеев В.О., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г. Измерительный шунт ШК-300 для определения амплитудно-временных параметров имитированного импульса тока молнии // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2007. – №20. – С. 75-79.
8. Баранов М.И., Князев В.В., Рудаков С.В. Расчетная и опытная оценка результатов электротермического воздействия нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 импульса тока короткого удара искусственной молнии на тонкостенное покрытие из нержавеющей стали // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №1. – С. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
9. Донец С.Е., Леденев В.В., Литвиненко В.В. Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2008. – №44. – С. 39-44.
10. <http://prom.ua/p19700265-pischevaya-nerzhavyuschaya-stal.html>.
11. Баранов М.И., Белый И.В., Хищенко Л.Т. Эквивалентные электрические параметры коаксиальных систем различной формы с однородным азимутальным магнитным полем в зазоре // Теоретическая электротехника. – 1976. – Вып. 20. – С. 67-74.

REFERENCES

1. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
2. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.

3. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
4. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
5. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator of aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10 μ s/350 μ s with an amplitude of $\pm(100-200)$ kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/s0020441215060032.
7. Dnyshchenko V.N., Ereemeev V.O., Nedzelsky O.S., Ponudzhaeva E.G. SC-300 measuring shunt for determining the amplitude-time parameters of the simulated lightning current pulse. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2007, no.20. pp. 75-79. (Rus).
8. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 31-38. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
9. Donets S.E., Ledenev V.V., Litvinenko V.V. Rod shunt to measure strong currents of microsecond duration. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Technique and electrophysics of high voltage*, 2008, no.44. pp. 34-44. (Rus).
10. Available at: <http://prom.ua/p19700265-pishevaya-nerzhavyuschaya-stal.html> (accessed 12 June 2014). (Rus).
11. Baranov M.I., Belyi I.V., Khimenko L.T. Equivalent electrical parameters of coaxial systems of various shapes with a homogeneous azimuthal magnetic field in the gap. *Theoretical electrical engineering*, 1976, no.20, pp. 67-74. (Rus).

Поступила (received) 09.08.2017

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Князев Владимир Владимирович¹, к.т.н., с.н.с.,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,
¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841,

e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua, knyaz2@i.ua

² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438,
e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, V.V. Kniaziev¹, S.V. Rudakov²

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² National University of Civil Protection of Ukraine,
94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Coaxial disk shunt for measuring in the heavy-current chain of high-voltage generator of storm discharges of impulses of current of artificial lightning with the integral of action to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm.

Purpose. Description of construction and basic technical descriptions developed and created in Research & Design Institute «Molniya» National Technical University «Kharkiv Polytechnic

*Institute» high-voltage heavy-current coaxial disk shunt of type of SC-300M2, allowing reliably to measure the peak-temporal parameters (PTP) of impulses of current of artificial lightning in wide peak and temporal ranges with the integral of their action to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm. **Methodology.** Electrophysics bases of high-voltage impulsive technique, scientific and technical bases of development and creation of high-voltage heavy-current impulsive electrical equipment, including the powerful generators of current of lightning (GCL), and also measuring methods in bit chains powerful high-voltage GCL AVP large impulsive currents of micro- and millisecond temporal ranges. **Results.** Offered and described new construction of measuring high-voltage heavy-current shunt, containing a measuring round disk from stainless steel easily soiled a 12X18H10T thickness 2 mm and external diameter 80 mm. Experimental a way impulsive active resistance of $R_S \approx 0,08$ mOhm of the indicated measuring disk and on his basis a calculation coefficient transformation is found of S_S of coaxial disk shunt of type of SC-300M2, numeral equal in the concerted mode of operations of his coaxial cable line (CCL) $S_S \approx 2/R_S \approx 25 \cdot 10^3$ A/V. It is rotined that it is expedient to use this value S_S for measuring in the heavy-current bit chain of GCL ATP impulsive A- and repeated impulsive D- component of current of artificial lightning, and also ATP of aperiodic impulse of current of artificial lightning of temporal form 10 μ s/350 μ s. It is set that taking into account application in the end CCL of shunt of a co-ordinate divisor of voltage with two output coaxial sockets 1:1 (for $S_{SA} \approx 25 \cdot 10^3$ A/V) and 1:2 ($S_{SC} \approx 12,5 \cdot 10^3$ A/V) at measuring of ATP intermediate B-, protracted C- and shortened protracted C*- component of current of artificial lightning in GCL it is expedient to utilize a numeral value S_S for the examined shunt, equal $12,5 \cdot 10^3$ A/V. Practical approbation and verification of capacity of the improved measuring coaxial disk shunt of type of SC-300M2 is executed in the high-voltage heavy-current bit chain of powerful GCL, forming on the actively-inductive loading of A- and C*- the components of current of artificial lightning with rationed ATP. **Originality.** Developed and created new high-voltage heavy-current measuring shunt of type of SC-300M2, allowing reliably to register rationed ATP of attenuation sinewave and aperiodic impulses of current of artificial lightning in the bit chains of powerful GCL with amplitude to ± 220 μ A and integral them action to $13,5 \cdot 10^6$ J/Ohm. On the measuring coaxial disk shunt of type of SC-300M2 from government metrology service of Ukraine the certificate of accordance of the set form is got. **Practical value.** Application of the created shunt of type of SC-300M2 in composition the high-voltage heavy-current bit chains of powerful GCL will allow in a certain measure to improve the metrology providing of tests of aviation and space-rocket technique, and also objects of electroenergy on stability to lightning. References 11, figures 4.*

Key words: powerful high-voltage generator of current of lightning, measuring coaxial disk shunt, measuring disk of shunt from stainless steel, calculation estimation of parameters of shunt.