

## КОАКСИАЛЬНЫЙ ШУНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ АМПЛИТУДОЙ ДО $\pm 220$ кА

© 2018 г. М. И. Баранов<sup>а</sup>, \*, В. В. Князев<sup>а</sup>, С. В. Рудаков<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт “Молния”  
Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47

<sup>б</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины  
Украина, 61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94

\* e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

Поступила в редакцию 02.08.2017 г.

После доработки 15.09.2017 г.

Описана усовершенствованная конструкция коаксиального шунта, предназначенного для измерения затухающих синусоидальных и апериодических импульсов тока искусственной молнии амплитудой до  $\pm 220$  кА. Приведены результаты испытаний измерительного шунта в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора тока при импульсной А-компоненте с первой амплитудой – 198 кА, соответствующей времени  $\approx 35$  мкс, и интегралом действия имитированного импульса тока грозового разряда, равным  $\approx 2.38 \cdot 10^6$  Дж/Ом. Количество электричества при одно-разовом воздействии на шунт импульса тока искусственной молнии с логарифмическим декрементом колебаний  $\approx 2.06$  через токоведущие элементы его конструкции составляло –9.9 Кл. Показано, что одновременно с регистрацией импульсной А-компоненты тока молнии шунт благодаря применению на конце его кабельной линии связи согласующего делителя напряжения позволяет измерять в разрядной цепи генератора и нормированные амплитудно-временные параметры формируемой в ней апериодической укороченной длительной С\*-компоненты тока искусственной молнии (–568 А;  $\approx 5$  мс;  $\tau_{C^*} \approx 18$  мс; –16 Кл).

DOI: 10.1134/S0032816218030175

### ВВЕДЕНИЕ

При испытаниях объектов аэрокосмической техники на молниестойкость согласно требований нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 [1] и SAE ARP 5416: 2013 [2] используются мощные высоковольтные генераторы тока молнии (далее “генераторы”) [3], базирующиеся, как правило, на емкостных накопителях энергии и воспроизводящие на соответствующих электрических нагрузках испытываемых объектов нормированные амплитудно-временные параметры (далее “параметры”) импульсной (А), промежуточной (В), длительной (С), укороченной длительной (С\*) и повторной импульсной (D) компонент тока искусственной молнии. Для контроля и регистрации параметров указанных компонент тока искусственной молнии в исследуемых электрических цепях испытываемых на молниестойкость объектов требуются соответствующие средства измерительной техники (далее “измерители”).

Одним из таких обязательных измерителей для высоковольтных испытательных лабораторий

мира является измерительный шунт, предназначенный совместно с цифровыми запоминающими осциллографами (далее “осциллографами”) для определения параметров генерируемых компонент тока искусственной молнии. Причем персоналу, обслуживающему мощный генератор (при запасаемой в его высоковольтных конденсаторных батареях электрической энергии порядка 1 МДж [3]), для удобства в работе и обеспечения требуемых при подобных испытаниях высоких показателей надежности и точности измерений целесообразно иметь один измерительный шунт, размещенный в разрядной цепи генератора и способный одновременно измерять по нескольким каналам кабельных линий связи формируемые в одной электрической нагрузке следующие друг за другом затухающие синусоидальные и апериодические импульсы тока микро- и миллисекундной длительности (например, А-, В- и С-компонент тока молнии) амплитудой от сотен килоампер до десятков ампер.

В НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” подобная задача при создании в 2007 г. одного из типов мощного генератора согласно требований [1, 2]

была частично решена путем использования коаксиального шунта типа ШК-300 [3], построенного на основе высокоомного измерительного манганинового диска толщиной  $h_d = 0.3$  мм и наружным диаметром  $D_e = 80$  мм, рассчитанного на протекание по нему одновременно как затухающей синусоидальной импульсной  $A$ -компоненты, так и апериодической длительной  $C$ -компоненты импульсного тока  $i(t)$  искусственной молнии соответственно с амплитудой до  $I_{mA} = \pm 220$  кА, интегралом действия  $J_A = \int_0^{\tau_A} i^2(t) dt$  ( $\tau_A$  – длительность протекания импульсной  $A$ -компоненты тока), численно не превышающим  $J_A = 2.4 \cdot 10^6$  Дж/Ом и переносимым  $C$ -компонентой тока зарядом до  $q_C = \pm 240$  Кл [1, 2].

Многokратное применение этого шунта в практике испытаний по [1, 2] на указанном генераторе [3] элементов летательных аппаратов на молниестойкость показало его электротермическую и электродинамическую нестойкость, приводящую после примерно 100 сильноточных разрядов на нагрузку ( $J_A = 2 \cdot 10^6$  Дж/Ом) к разрушению конструкции шунта с тонким манганиновым измерительным диском (при его импульсном активном сопротивлении  $R_S \approx 0.185$  мОм  $\pm 1\%$ ) из-за возникающего в центральной зоне измерительного диска сильного искрения и избыточного давления в несколько сотен атмосфер [4].

Важной особенностью при выборе геометрических, тепло- и электрофизических характеристик (соответственно и значения  $R_S$ ) для измерительного диска шунта является то, что при его применении в разрядной цепи генератора на экранах осциллографов должны помещаться характерные осциллограммы указанных компонент тока искусственной молнии с резко различающимися параметрами (прежде всего, по своим амплитудам). Возможности современных осциллографов и известных схем измерения в согласованном режиме импульсных токов молнии в этом плане ограничены. Поэтому разработка и создание удобных и надежных в работе измерительных шунтов для одновременной регистрации параметров указанных компонент тока искусственной молнии, генерируемых в разрядных цепях мощных высоковольтных генераторов и изменяющихся в широких амплитудно-временных диапазонах, является актуальной прикладной задачей в области высоковольтной сильноточной импульсной техники.

Кроме того, при проведении испытаний с помощью мощного высоковольтного генератора [5] по требованиям международного стандарта IEC 62305-1:2010 [6] объектов электроэнергетики на стойкость к прямому воздействию апериодического импульса тока искусственной молнии вре-

менной формы 10 мкс/350 мкс необходимы измерительные шунты для регистрации нормированных параметров указанного импульса тока с амплитудой до  $I_m = \pm 220$  кА и интегралом действия до  $J_i = 10 \cdot 10^6$  Дж/Ом  $\pm 35\%$ .

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСИАЛЬНОГО ШУНТА ШК-300М

В коаксиальном шунте ШК-300 [3] усовершенствованию подвергся, прежде всего, его измерительный высокоомный диск, определяющий значение импульсного активного сопротивления  $R_S$  шунта и его коэффициент преобразования  $K_S$ , численно равный измеряемому в согласованном режиме току, протекающему по шунту, при подаче на его вход импульса напряжения амплитудой 1 В. В этой связи рассматриваемый коэффициент преобразования шунта, имеющий размерность А/В, будет в режиме согласованного подключения его измерительного коаксиального кабеля (далее “кабеля”) в конце линии связи, подходящей к осциллографам, численно равным  $K_S = 2/R_S$ . Тогда параметры измеряемого с помощью шунта в разрядной цепи высоковольтного генератора импульсного тока  $i(t)$  молнии будут определяться соотношением  $i(t) = K_S U_0(t)$ , где  $U_0(t)$  – импульсное напряжение, снимаемое с измерительного высокоомного диска шунта и регистрируемое на экране применяемого осциллографа.

В качестве измерительного высокоомного диска в шунте ШК-300М (рис. 1) был использован диск из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной  $h_d = 1$  мм, внутренним диаметром  $D_i = 10$  мм и наружным диаметром  $D_e = 80$  мм, обладающий в составе усовершенствованного шунта импульсным активным сопротивлением  $R_S \approx 0.158$  мОм  $\pm 1\%$ . Значение толщины  $h_d$  стального диска шунта выбиралось из условия его электротермической стойкости в зоне наименьшего диаметра  $D_m$  внутреннего электрода шунта с максимальной плотностью радиально растекающегося по диску нормированного импульса тока молнии по соотношению [7]:

$$h_d = (\pi D_m)^{-1} [(J_i \rho_d) / (c_d \Delta T_d d_d)]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\rho_d$ ,  $c_d$ ,  $d_d$  – соответственно удельное электрическое сопротивление, удельная теплоемкость и плотность материала диска при температуре окружающей среды  $T_0$ , равной комнатной температуре 20°C;  $\Delta T_d = (T_d - T_0)$  – допустимый кратковременный перегрев материала диска шунта с текущей температурой  $T_d$ , вызванный радиальным протеканием по нему импульсного тока  $i(t)$  искусственной молнии.

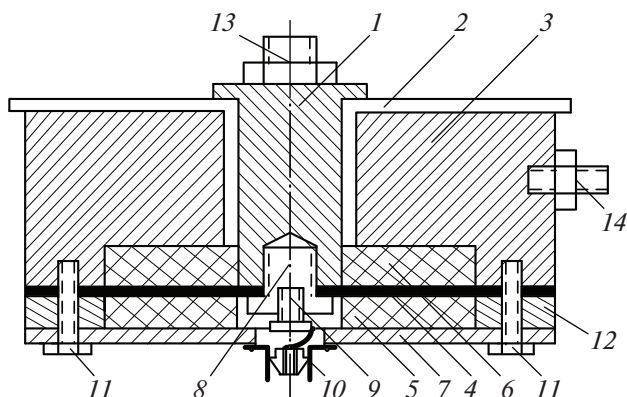


**Рис. 1.** Внешний вид измерительного коаксиального шунта ШК-300М, предназначенного для измерения затухающих синусоидальных и апериодических импульсов тока искусственной молнии амплитудой  $\pm 220$  кА в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора.

Из (1) при  $D_m = 29$  мм,  $J_i = 10^7$  Дж/Ом,  $\Delta T_d = 200^\circ\text{C}$  и принятых согласно [8] исходных данных для нержавеющей стали 12Х18Н10Т ( $\rho_d = 72.5 \cdot 10^{-8}$  Ом м,  $c_d = 462$  Дж/(кг  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ ),  $d_d = 7900$  кг/м<sup>3</sup>) измерительного диска, продольный осевой разрез которого с используемой в его конструкции и лимитирующей перегрев  $\Delta T_d$  фторопластовой изоляции 4ДТ приведен на рис. 2, следует, что для рассматриваемого случая значение толщины стального диска исследуемого шунта будет равным  $h_d \approx 1.09$  мм. Видно, что полученное по (1) расчетное значение толщины  $h_d$  измерительного диска в пределах 9% отличается от ее реально используемого в шунте значения.

Согласно конструкционным данным рис. 2 стальной измерительный диск 4 шунта размещается между массивными дисками 5 и 6 толщиной 10 мм (их внутреннем 29 мм и наружном 60 мм диаметрах), выполненными из листового фторопласта 4ДТ, и при помощи бандажного латунного диска 7 толщиной 5 мм, прижимного алюминиевого кольца 12 толщиной 10 мм, стальных винтов 8 (1 шт.) и 11 (8 шт.) жестко закрепляется на массивных внутреннем  $\varnothing 29$  мм (1) и наружном  $\varnothing 80$  мм (3) латунных электродах шунта. В шунте ШК-300М, в отличие от ранее использовавшегося шунта ШК-300 [3], между этими электродами вместо воздушной изоляции использован твердый фторопластовый (4ДТ) изолятор в виде цельной тонкостенной втулки 2 толщиной 3 мм. Ее применение существенно повышает электрическую прочность изоляционного зазора между токоведущими электродами высоковольтного шунта.

Шунт включается в разрыв силовоточной разрядной цепи генератора. При этом внутренний электрод 1 шунта при помощи болтового соединения 13 подсоединяется к ее потенциальной части, а наружный электрод 3 при помощи болтового соединения 14 – к ее заземленной части.

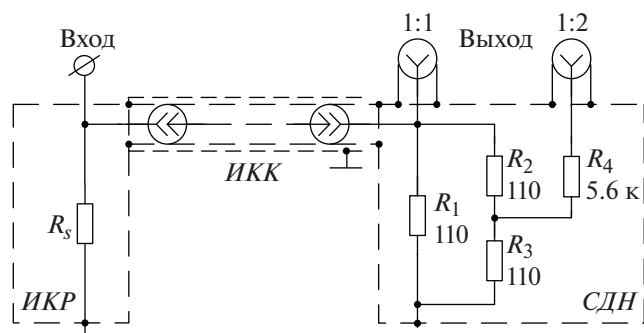


**Рис. 2.** Схематическое устройство конструкции измерительного коаксиального шунта ШК-300М в его продольном осевом разрезе. 1 – массивный внутренний цилиндрический электрод; 2 – изоляционная втулка; 3 – массивный наружный цилиндрический электрод; 4 – высокоомный стальной измерительный диск; 5, 6 – массивные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

Стальной винт крепления 9 с гибким медным токопроводом обеспечивает гальваническую связь потенциального электрода 1 с внутренним электродом выходного коаксиального разъема 10 типа СР-75, корпус которого электрически подключается к заземленному бандажному диску 7. Масса шунта ШК-300М в сборе составляет до 3.2 кг, а его габаритные размеры не превышают 95  $\times$  90 мм.

На рис. 3 приведена принципиальная схема согласованного подключения шунта со своим измерительным резистором  $R_S \approx 0.158$  мОм к кабелю и осциллографам. На выходе кабеля РК 75-7-11 подсоединяется согласующий делитель напряжения (далее “делитель”), выполненный из сосредоточенных резисторов  $R_1 - R_3$  номиналом 110 Ом с суммарным активным сопротивлением, практически равным волновому сопротивлению кабеля 75 Ом. Задача делителя – обеспечение не только согласованного режима работы измерительной цепи шунта, но и одновременной регистрации в разрядной цепи генератора сразу несколькими осциллографами соответствующих компонент тока искусственной молнии микро- и миллисекундной длительности с резко отличающимися значениями своих амплитуд.

С этой целью делитель снабжен двумя выходными коаксиальными разъемами 1 : 1 и 1 : 2, для которых значения коэффициента преобразования  $K_S$  рассматриваемого шунта составляют соответственно  $K_{SA} \approx 12.62 \cdot 10^3$  А/В (для измерения



**Рис. 3.** Принципиальная схема подключения коаксиального шунта ШК-300М к низковольтной измерительной цепи кабельной линии связи и осциллографам. ИКР – измерительный коаксиальный резистор шунта с импульсным активным сопротивлением  $R_s \approx 0.158$  мОм, подключаемый к входу кабеля линии связи; ИКК – измерительный коаксиальный кабель РК 75-7-11 триаксиальной линии связи длиной до 70 м; СДН – согласующий делитель напряжения, подключаемый к выходу кабеля линии связи, передающей снимаемый с диска шунта полезный сигнал и входам осциллографов.

в разрядной цепи генератора по [1, 2] синусоидальной импульсной *A*-компоненты, повторной импульсной *D*-компоненты и по [6] аperiodического импульса 10 мкс/350 мкс тока молнии) и  $K_{SC^*} \approx 63.12 \cdot 10^2$  А/В (для измерения в разрядной цепи генератора по [1, 2] промежуточной *B*-, длительной *C*- и укороченной длительной *C*\*-компонент тока молнии). Для усиления взаимной развязки коаксиальных разъемов 1 : 1 и 1 : 2 путем увеличения входного сопротивления выходного разъема 1 : 2 в его потенциальный электрод включен дополнительный сосредоточенный резистор  $R_4$  номиналом 5.6 кОм.

Делитель заключен в свой экранирующий корпус и подсоединяется к выходу измерительного кабеля. Для ослабления влияния на процесс измерения мощных внешних электромагнитных помех от силовых цепей генератора используемый кабель на всей своей длине, составляющей до 70 м, был дополнительно помещен в заземленную наружную медную оплетку, конец которой в зоне размещения делителя требуется изолировать от металлического корпуса последнего и отдельно заземлять (см. рис. 3). Подобное электрическое подсоединение металлических элементов триаксиального кабеля необходимо для исключения попадания высокого наведенного электрического потенциала в измерительные каналы осциллографов и предотвращения их выхода из строя.

Выбор длины кабеля в описываемом случае был обусловлен достаточно большим пространствен-

ным разнесением мест размещения на испытательном поле электротехнического оборудования генератора и измерительного заглубленного металлического бункера, в котором были установлены соответствующие осциллографы. В описываемых ниже результатах силовых экспериментов были использованы осциллографы типа Tektronix TDS 1012.

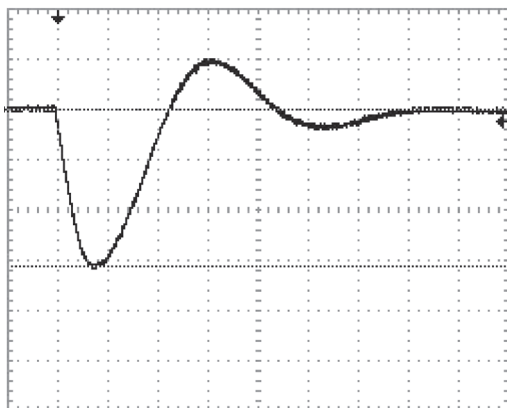
На рис. 4 приведена осциллограмма измеренного при помощи коаксиального шунта ШК-300М в силовоточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора [3] затухающего синусоидального импульса *A*-компоненты тока искусственной молнии, параметры которого характеризовались первой амплитудой  $I_{mA1} \approx -198$  кА, соответствующей времени  $t_{mA1} \approx 35$  мкс, и интегралом действия, равным  $J_A \approx 2.38 \cdot 10^6$  Дж/Ом. Расчетная оценка численных значений  $J_A$  и протекающего при этом по измерительному стальному диску шунта электрического заряда  $q_A$  была проведена путем интегрирования соответствующих аналитических временных зависимостей для разрядного тока  $i(t)$  генератора с расчетно-экспериментальными параметрами по следующим приближенным соотношениям [7]:

$$J_A = \int_0^{\tau_A} i^2(t) dt, \quad (2)$$

$$q_A = \int_0^{\tau_A} i(t) dt. \quad (3)$$

Укажем, что в рассматриваемом случае, характеризующемся протеком по (3) через стальной диск шунта зарядом  $q_A \approx -9.9$  Кл, зарядное напряжение высоковольтной конденсаторной батареи генератора [3], формирующего на активно-индуктивной нагрузке ( $R_l \approx 0.1$  Ом,  $L_l \approx 1.5$  мкГн) импульсную *A*-компоненту тока молнии, составляло  $U_{cA} \approx -29.7$  кВ.

На рис. 5 приведена осциллограмма укороченной длительной *C*\*-компоненты тока искусственной молнии, измеренной одновременно с импульсной *A*-компонентой моделируемого тока молнии шунтом ШК-300М. Конденсаторная батарея генератора была заряжена до напряжения  $U_{cC^*} \approx -2.5$  кВ. Амплитуда аperiodического импульса данной компоненты тока имитированной молнии длительностью  $\tau_{C^*} \approx 18$  мс на уровне  $0.5 I_{mC^*}$  составляла  $I_{mC^*} \approx -568$  А, а время, ей соответствующее,  $t_{mC^*} \approx 5$  мс. Протекающий через измерительный диск шунта электрический заряд в этом случае составил  $q_{C^*} \approx -16$  Кл.



**Рис. 4.** Осциллограмма импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии, полученная при помощи измерительного коаксиального шунта ШК-300М в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора [3] ( $I_{mA1} \approx -198$  кА,  $t_{mA1} \approx 35$  мкс,  $\Delta_A \approx 2.06$ ,  $J_A \approx 2.38 \cdot 10^6$  Дж/Ом,  $q_A \approx -9.9$  Кл,  $K_{SA} \approx 12.62 \cdot 10^3$  А/В). Масштаб по вертикали 63.1 кА/клетка, по горизонтали – 50 мкс/клетка.

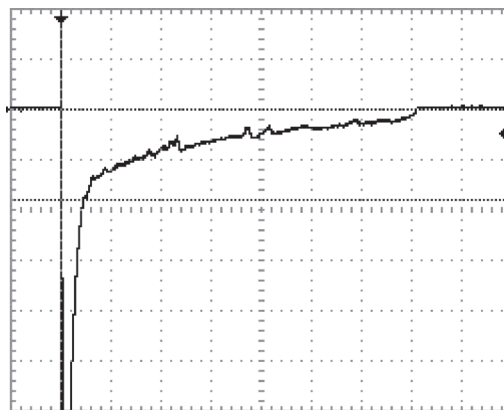
Расчетная оценка численного значения заряда  $q_{C^*}$ , протекающего в разрядной цепи высоковольтного генератора и шунта, проводилась по приближенному соотношению [9]:

$$q_{C^*} = \int_0^{\tau_{C^*}} i(t) dt. \quad (4)$$

Укажем, что приведенные выше согласно данным рис. 4 и 5, а также формулам (2)–(4) значения параметров  $J_A$ ,  $q_A$  и  $q_{C^*}$  для импульсной *A*- и укороченной длительной *C\**-компонент тока искусственной молнии соответствуют действующим требованиям нормативных документов [1, 2].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан прошедший государственную метрологическую аттестацию и апробирован в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора [3] усовершенствованный коаксиальный шунт типа ШК-300М, содержащий измерительный диск из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (толщиной  $h_d = 1$  мм, диаметрами: внутренним  $D_i = 10$  мм и наружным  $D_e = 80$  мм) и позволяющий благодаря использованию на конце его работающей в согласованном режиме кабельной линии связи делителя напряжения с двумя выходными коаксиальными разъемами 1 : 1 ( $K_{SA} \approx 12.62 \cdot 10^3$  А/В) и 1 : 2 ( $K_{SC^*} \approx 63.12 \cdot 10^2$  А/В) и нескольких параллельно



**Рис. 5.** Осциллограмма укороченной длительной *C\**-компоненты тока искусственной молнии, следующей за токовой импульсной *A*-компонентой и полученной при помощи измерительного коаксиального шунта ШК-300М в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора [3] ( $I_{mC^*} \approx -568$  А,  $t_{mC^*} \approx 5$  мс,  $\tau_{C^*} \approx 18$  мс,  $q_{C^*} \approx -16$  Кл,  $K_{SC^*} \approx 63.12 \cdot 10^2$  А/В). Масштаб по вертикали 316 А/клетка, по горизонтали – 10 мкс/клетка.

работающих в заглубленном экранированном бункере осциллографов осуществлять одновременное измерение параметров импульсной *A*- (или повторной импульсной *D*-), промежуточной *B*-, длительной *C*- (или укороченной длительной *C\**) компонент тока искусственной молнии, генерируемых на открытом воздухе для испытаний объектов аэрокосмической техники на молниестойкость согласно требований нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 ( $I_{mA} = \pm 220$  кА,  $t_{mA} \leq 50$  мкс,  $J_A = 2.4 \cdot 10^6$  Дж/Ом,  $q_C = \pm 240$  Кл). Данный шунт позволяет также измерять в сильноточной разрядной цепи другого типа мощного высоковольтного генератора [5] с испытываемой электрической нагрузкой параметры апериодического импульса тока временной формы 10 мкс/350 мкс короткого удара искусственной молнии, удовлетворяющих в соответствии с требованиями международного стандарта IEC 62305-1:2010 ( $I_m = \pm 220$  кА;  $J_i = 10 \cdot 10^6$  Дж/Ом,  $q_i = \pm 120$  Кл) I–IV уровням защиты от молнии объектов промышленной электроэнергетики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SAE ARP 5412:2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms/ SAE Aerospace. USA. 2013.
2. SAE ARP 5416:2013. Aircraft Lightning Test Methods / SAE Aerospace. USA. 2013.

3. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. // ПТЭ. 2008. № 3. С. 81.
4. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. // Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. № 1. P. 31. doi 10.20998/2074-272X.2017.1.06
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудakov С.В. // ПТЭ. 2015. № 6. С. 39. doi 10.7868/S0032816215060038
6. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva: IEC Publ., 2010.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Т. 3. Теория и практика электрофизических задач. Харьков: Точка, 2014.
8. <http://prom.ua/p19700265-pishevaya-nerzhaveyuschaya-stal.html>
9. Баранов М.И., Кравченко В.И. // Электричество. 2013. № 10. С. 7.