

* * *

Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии

БАРАНОВ М.И., КРАВЧЕНКО В.И.

Предложен метод расчетной оценки электротермической стойкости проводов и кабелей с различной изоляцией бортовых электрических цепей летательных аппаратов, испытывающих воздействие на них импульсного тока молнии. Приведены формулы для выбора минимально допустимых и критических поперечных сечений металлических жил и экранов исследуемых проводов и кабелей при протекании по ним импульсной А- и длительной С-компонент тока молнии. Выполнены приближенные расчеты предельно допустимой и критической плотностей импульсного тока молнии в токонесущих частях проводов и кабелей. С помощью мощного высоковольтного генератора искусственной молнии осуществлена экспериментальная проверка работоспособности полученных расчетных соотношений, используемых при оценке электротермической молниестойкости кабельно-проводниковой продукции. Полученные результаты могут быть использованы при решении прикладных задач по обеспечению электротермической молниестойкости электрических цепей авиационной и ракетно-космической техники.

Ключевые слова: летательный аппарат, поражающее воздействие молнии, импульсный ток молнии, кабели, провода, электротермическая молниестойкость

При поражении линейной молнией летательных аппаратов (ЛА) в полете или на стоянке в случае ее прорыва через систему грозозащиты и затекания различными путями (например, через их антен-

A method is proposed for numerically estimating the electrothermal withstandability of wires and cables in different kinds of insulation used in on-board electric circuits of aircrafts and experiencing the effect of impulse lightning current. Formulas are presented for selecting the minimal permissible and critical cross-section areas of the metal cores and shields of the wires and cables under study with respect to the impulse (A) and continuous (C) components of lightning current flowing through them. Approximate calculations of the maximum permissible and critical densities of impulse lightning current in the live parts of wires and cables are carried out. The validity of the obtained calculation relations intended for estimating the electrothermal lightning withstandability of cable and conductor products is experimentally checked using a high-capacity high-voltage generator of artificial lightning current. The obtained results can be used in solving application tasks concerned with ensuring electrothermal lightning withstandability of electric circuits used in aircraft and rocket-and-spacecraft engineering.

Key words: flying vehicle, striking effect of lightning, impulse lightning current, cables, electrothermal lightning withstandability

но-фидерные устройства, корпуса, внешние цепи электропитания и связи или за счет индуктирования мощных электрических наводок в их элементах) ее импульсных токов в их первичные и вторичные

электрические цепи для надежного функционирования и безопасного полета ЛА актуальную значимость приобретают вопросы молниестойкости токопроводящих жил и оболочек (экранов) проводов и кабелей, используемых в слабо- и сильноточных контурах цепей авиационной и ракетно-космической техники. При этом под электротермической стойкостью проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА к току молнии понимается их способность противостоять кратковременному действию температуры нагрева проводниковых и изоляционных материалов рассматриваемой кабельно-проводниковой продукции от протекания по ним или вблизи них данного тока без нарушения работоспособного состояния этой продукции [1].

Известные данные [2] по выбору поперечных сечений S_0 токопроводов электроэнергетического оборудования для аварийных режимов их работы в силовых цепях с токами короткого замыкания (КЗ) промышленной частоты, а также приведенные в [3] приближенные расчетные соотношения для определения значений сечений токопроводов S_0 при протекании по ним тока молнии с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП) позволяют выполнить только весьма грубую оценку рассматриваемой стойкости проводов и кабелей к грозовым электрическим разрядам. В данном случае электротепловой нагрев токонесущих частей проводов (кабелей) бортовых электрических цепей ЛА, испытывающих прямое или косвенное воздействие импульсного тока молнии, оказывается существенно заниженным и не отражающим их реального теплового состояния. В этой связи для условий протекания по токонесущим частям проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА импульсного тока молнии требуется как уточнение инженерно-технических подходов к расчетному выбору значений их сечений S_0 , так и экспериментальная проверка рекомендуемых расчетных соотношений по выбору этих значений в зависимости от АВП протекающих по токопроводящим жилам и оболочкам (экранам) указанных проводов (кабелей) соответствующих компонент тока молнии. Что касается обоснованности выбора при этом расчетных АВП тока молнии, то согласно приведенным в [4] результатам наземных натуральных испытаний ЛА на молниестойкость с применением соответствующего генератора тока искусственной молнии в электрических цепях бортового оборудования ЛА наводимые импульсы напряжения (тока) имеют сложную форму, в которой можно выделить три основные составляющие: повторяющую воздействующую импульсную компоненту тока молнии, описываемую ее производной по времени и высокочастотную компоненту. Кроме того, представленные в [5] результаты приближенных расчетов наведенных им-

пульсных напряжений и токов в нагруженных на обоих концах экранированных коаксиальных кабелях связи, испытывающих прямое воздействие на их металлический экран импульсного тока молнии, которые были получены с учетом влияния нестационарного поверхностного эффекта в стенке их цилиндрического экрана, показывают, что в этом случае импульсные токи наводки в указанных кабелях практически повторяют форму воздействующего на них импульсного тока молнии.

Постановка задачи по расчетному и опытному определению молниестойкости проводов и кабелей в условиях действия на них импульсного тока молнии. Ограничимся рассмотрением в составе продольно протекающего по медным или алюминиевым жилам и оболочкам (экранам) проводов (кабелей) бортовых электрических цепей ЛА импульсного тока молнии $i_M(t)$ таких временных форм, которые могут содержать в соответствии с [6–8] его основные токовые компоненты, представленные импульсной A - и длительной C -компонентами тока искусственной молнии. Данный режим воздействия тока молнии на провода и кабели цепей указанных аппаратов, размещенных в окружающей воздушной среде с температурой ϱ_0 , будем рассматривать как предельный по электротепловым нагрузкам на их токонесущие части. Примем, что указанные формы тока искусственной молнии (обычно отрицательной полярности) по модулю характеризуются следующими основными нормированными АВП [6–8]:

импульсная A-компонента тока молнии – амплитуда тока $I_{mA} = (200 \pm 20)$ кА; интеграл действия $J_{dA} = (2 \pm 0,4) \times 10^6$ А²·с; время достижения амплитуды тока $t_{mA} \leq 50$ мкс; длительность протекания $t_{иА} \leq 500$ мкс;

длительная C-компонента тока молнии – амплитуда тока $I_{mC} = (0,2, 0,8)$ кА; количество протекающего электрического заряда $Q_C = (200 \pm 40)$ Кл; длительность протекания $0,25 \leq t_{иC} \leq 1$ с.

При расчетной оценке молниестойкости кабельно-проводниковой продукции бортовых электрических цепей ЛА допускаем, что ток молнии $i_M(t)$ практически равномерно распределяется по поперечному сечению S_{0i} жилы ($i=1$) и экрана ($i=2$) провода или кабеля. В пользу данного допущения говорит то, что минимальная глубина проникновения магнитного поля от принятого импульсного тока молнии в рассматриваемые нами проводниковые материалы жил (экранов), определяемая в квазистационарном приближении из соотношения [1],

$$Di = [6t_{mA} / (\rho_m \varrho_0)]^{1/2},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; g_{0i} – первоначальная удельная электропроводность материала жилы (экрана) при температуре q_0 окружающего воздуха составляет при $t_{mA} = 50$ мкс не менее 1,2 мм.

Используем условие адиабатического характера протекающих при этом в материалах жил (экранов) исследуемых проводов (кабелей) электротепловых процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей токопроводов, имеющих текущую температуру q_i , и теплопроводности их проводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев жил (экранов) пренебрегаем. Считаем, что электротермическая стойкость проводов и кабелей электрических цепей ЛА при воздействии на них импульсного тока молнии лимитируется их предельно допустимой кратковременной температурой нагрева q_{ik} , зависящей от степени снижения механической прочности материала жилы (экрана) и тепловых условий работы изоляции проводов (кабелей) в режиме ее импульсного кратковременного нагрева на границе «металл–изоляция» током молнии. Принимаем, что значение q_{ik} соответствует известной предельно допустимой кратковременной температуре нагрева q_{ikd} изолированных (оголенных) проводов и кабелей токами КЗ промышленной частоты [2]. Тогда для изолированных проводов (кабелей) указанных аппаратов с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и поливинилхлоридной (ПВХ) и резиновой (Р) изоляцией можно считать, что $q_{ik} \gg 150$ °С, а для проводов и кабелей с полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией – $q_{ik} \gg 120$ °С [2]. Что касается неизолированных (оголенных) проводов, то при тяжениях в них не более 10 Н/мм² для медной жилы $q_{ik} \gg 300$ °С, а для алюминиевой жилы – $q_{ik} \gg 200$ °С [2]. Экспериментальную проверку полученных расчетных соотношений для выбора значений поперечных сечений S_{0i} жилы (экрана) рассматриваемых проводов (кабелей), испытывающих воздействие на них указанных компонент тока молнии, осуществим с помощью мощного генератора тока искусственной молнии (ГТМ), содержащего в своем составе ряд высоковольтных генераторов импульсных токов (ГИТ), предназначенных для имитации в лабораторных условиях основных токовых компонент молнии [9].

Результаты расчетной оценки электротермической стойкости проводов и кабелей к действию на них импульсного тока молнии. С учетом изложенного в качестве критерия, определяющего электротермическую стойкость изолированных (оголенных) проводов и кабелей электрических цепей ЛА к воздействию на их металлические жилы (экраны) импульсного тока молнии $i_M(t)$, выбираем следующее теплофизическое условие: $q_i \leq q_{ik}$. Для определения текущей температуры q_i токопроводящего мате-

риала жилы (экрана) необходимо знать изменение его удельной электропроводности g_i , обусловленное электротепловым нагревом токонесущих частей проводов (кабелей) импульсным током молнии. В соответствии с [1, 10] для величины g_i будет справедлива следующая нелинейная зависимость:

$$g_i = g_{0i} [1 + c_{0i} b_{0i} (q_i - q_0)]^{-1}, \quad (1)$$

где c_{0i} , b_{0i} – удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материала жилы (экрана) провода (кабеля), и тепловой коэффициент удельной электропроводности данного токопроводящего материала до воздействия на него импульсного тока молнии соответственно.

Следует заметить, что согласно опытным данным из [10] соотношение (1) в интервале температур от 0 до температуры плавления материала жилы (экрана) аппроксимирует температурную зависимость величины g_i для меди и алюминия с погрешностью не более 5%. Учитывая (1) и импульсный характер протекания тока молнии $i_M(t)$, решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка для текущей температуры нагрева q_i материала жилы (экрана) проводов и кабелей электрических цепей ЛА при начальном условии $[q_i(0) - q_0] = 0$ (математическая задача Коши) в рассматриваемом случае может быть приближенно записано в следующем аналитическом виде [1]:

$$q_i = q_0 + (c_{0i} b_{0i})^{-1} \{ \exp[2J_d / (\mu_0 g_{0i} h_{0i}^2 S_{0i}^2)] - 1 \}, \quad (2)$$

где $J_d = \int_0^{t_0} i_M^2(t) dt$ – интеграл действия импульсного тока молнии $i_M(t)$, протекающего в течение времени t_0 по материалу жилы (экрана) провода (кабеля) поперечным сечением S_{0i} ; $h_{0i} = [2 / (\mu_0 b_{0i})]^{1/2}$ – характеристическая напряженность магнитного поля тока молнии [10].

Основные теплофизические характеристики материала жил (экранов) проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА при $q_0 = 20$ °С [1, 10]:

Материал жилы (экрана)	g_{0i}	$c_{0i} \cdot 10^6$	b_{0i}	h_{0i}
Медь	10^7 (Омж) ⁻¹	Дж/(м ³ °С)	10^{-9} м ³ /Дж	10^7 А/м
Медь	5,81	3,92	1,31	3,42
Алюминий	3,61	2,70	2,14	2,47

Из условия $q_i \leq q_{ik}$ и (2) видно, что для расчетного определения электротермической стойкости проводов (кабелей) электрических цепей ЛА с заданными теплофизическими характеристиками материала их жилы и экрана (см. g_{0i} , c_{0i} , b_{0i} и h_{0i} , приведенные выше) и сечениями S_{0i} к воздействию на них импульсного тока молнии $i_M(t)$ требует-

ся знать лишь значения интеграла действия его соответствующих компонент J_d .

Далее остановимся на выборе минимально допустимых S_{0im} и критических S_{0ik} поперечных сечений жил (экранов) проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА при их поражении импульсным током молнии $i_M(t)$. При этом сечения S_{0im} будут соответствовать указанным ранее предельно допустимым кратковременным температурам нагрева q_{ik} рассматриваемых проводов (кабелей), а сечения S_{0ik} – явлению электрического взрыва (ЭВ) их токонесущих частей [1, 10] и выходу из строя соответствующих электрических цепей указанных технических объектов. Считаем, что при нахождении расчетных значений сечений S_{0im} и S_{0ik} провода и кабели рассматриваемых цепей до воздействия на них импульсного тока молнии $i_M(t)$ могут быть как обесточены ($q_i = q_0$), так и электрически загружены токовой нагрузкой ($q_i = q_{id}$, где q_{id} – длительно допустимая температура нагрева жил (экранов), равная для изолированных проводов (кабелей) исследуемых электрических цепей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией 65 °С, а для неизолированных (оголенных) проводов – 70 °С [2]). Тогда с учетом [1] для минимально допустимого поперечного сечения S_{0im} жил (экранов) проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА по условию $q_i \leq q_{ik}$ их электротермической стойкости к воздействию на них импульсного тока молнии $i_M(t)$ получаем следующее приближенное расчетное соотношение:

$$S_{0im} = \sqrt{J_d} / C_{im}, \quad (3)$$

где $C_{im} = (J_{ikd} - J_{id})^{1/2}$; J_{ikd} , J_{id} – интегралы тока молнии для токонесущих частей проводов и кабелей электрических цепей, предельная кратковременная и длительно допустимая температура нагрева материала которых соответствует q_{ik} и q_{id} соответственно [1].

С учетом принятых допущений и (2) для нахождения численных значений входящих в (3) интегралов тока молнии могут быть использованы следующие приближенные расчетные выражения:

$$J_{ikd} = g_{0i} b_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} b_{0i} (q_{ik} - q_0) + 1]; \quad (4)$$

$$J_{id} = g_{0i} b_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} b_{0i} (q_{id} - q_0) + 1]. \quad (4a)$$

На основании (4) и (4a) и приведенных ранее характеристик материала жил (экранов) проводов и кабелей в таблице приведены значения расчетных коэффициентов C_{im} и C_{im}^* при $q_i(0) = q_0 = 20$ °С и $J_{id} = 0$, используемых в (3) при нахождении значений сечений S_{0im} , для основных проводниковых и изоляционных материалов, применяемых в проводах (кабелях) слабо- и сильноточных бортовых электрических цепей ЛА. С учетом адиабатического характера последовательного электротеплового действия используемых компонент тока молнии на проводящие структуры кабельно-проводниковой продукции выбираемое разработчиком бортовой электроаппаратуры ЛА результирующее значение S_{0im} для применяемых в ней проводов (кабелей) должно соответствовать сумме минимальных сечений, определяемых по (3) в отдельности для каждой из воздействующих на них компонент тока молнии $i_M(t)$.

Используя условие ЭВ металлического проводника [1, 10], для критического поперечного сечения S_{0ik} жил (экранов) проводов и кабелей рассматриваемых цепей при воздействии на них импульсного тока молнии $i_M(t)$ запишем следующее расчетное соотношение:

$$S_{0ik} = \sqrt{J_d} / D_{ik}, \quad (5)$$

где $D_{ik} = (J_{ik} - J_{id})^{1/2}$; J_{ik} – критическое значение интеграла тока молнии для токонесущих частей проводов и кабелей электрических цепей ЛА и аппаратов наземных технических объектов (при $q_0 = 20$ °С для алюминия $J_{ik} = 1,09 \times 10^{17} \text{ А}^2 \text{ мм}^{-4}$, а для меди $J_{ik} = 1,95 \times 10^{17} \text{ А}^2 \text{ мм}^{-4}$ [10]).

В таблице с учетом (4a), (5) и ранее приведенных характеристик материалов приведены численные значения расчетных коэффициентов D_{ik} и D_{ik}^* при $q_i(0) = q_0 = 20$ °С и $J_{id} = 0$, необходимых для определения значений критических сечений S_{0ik} . Из (5) и данных таблицы следует, что для нахождения значений критического поперечного сечения S_{0ik} жил (экранов) рассматриваемых нами проводов и кабелей, подвергаемых действию на них импульс-

Вид изоляции в проводах (кабелях)	Материал жилы (экрана)	Значения расчетных коэффициентов, $10^8 \text{ А}^2 \text{ мм}^{-2}$			
		C_{im}	C_{im}^*	D_{ik}	D_{ik}^*
ПВХ, Р	Медь	1,16	1,51	4,31	4,41
	Алюминий	0,74	0,97	3,16	3,30
ПЭТ	Медь	0,96	1,35	4,31	4,41
	Алюминий	0,62	0,87	3,16	3,30

ного тока молнии $i_m(t)$, требуется также знать только численные значения интеграла действия J_d для его соответствующих компонент. Для нашего случая, когда используются лишь две основные компоненты импульсного тока линейной молнии (импульсная A -компонента, изменяющаяся во времени по закону резко затухающей синусоиды, и длительная C -компонента, имеющая аperiodическую временную форму [1, 9]), при расчетном определении значений его интеграла действия J_d могут быть применены следующие приближенные аналитические соотношения:

для импульсной A -компоненты тока молнии

$$J_{dA} = k_A^2 I_{mA1}^2 [T_A (4D_A)^{-1} - D_A T_A (4D_A^2 + 16\rho^2)^{-1}]; \quad (6)$$

для длительной C -компоненты тока молнии

$$J_{dC} = k_C^2 I_{mC}^2 [0,14t_{mC} + 0,66t_{иC} + t_{mC} t_{иC} \cdot (1,52t_{mC} + 7,4t_{иC})^{-1}], \quad (6a)$$

где I_{mA1} , I_{mA3} , T_A , D_A – первая и третья амплитуды, период и логарифмический декремент колебаний для импульсной A -компоненты тока искусственной молнии соответственно;

$D_A = \ln(I_{mA1} / I_{mA3})$;

$k_A = \left[\exp\left\{ \frac{\pi D_A}{2\rho} \operatorname{arctg} \frac{D_A}{2\rho} \right\} \sin\left\{ \frac{\pi D_A}{2\rho} \right\} \right]^{-1}$ – нор-

мирующий коэффициент для импульсной A -компоненты тока молнии [11]; t_{mC} – время, соответствующее амплитуде I_{mC} длительной C -компоненты тока молнии, имеющей на уровне $0,5I_{mC}$ длительность протекания, равную $t_{иC}$;

$k_C = \left[(0,2t_{mC} t_{иC}^{-1}) \frac{0,76t_{mC}}{(3,7t_{иC} - 0,76t_{mC})} - \right.$

$\left. - (0,2t_{mC} t_{иC}^{-1}) \frac{3,7t_{иC}}{(3,7t_{иC} - 0,76t_{mC})} \right]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для длительной C -компоненты тока искусственной молнии [11].

Следует заметить, что формула (6a) может быть применена и для расчетного определения интеграла действия J_d импульсного тока молнии, АВП которого характеризуются согласно требованиям международного стандарта [12] аperiodической временной формой $t_m / t_{и} = 10/350$ мкс, где t_m , $t_{и}$ – соответственно время достижения импульсом тока своей нормированной амплитуды $I_m = (200 \pm 20)$ кА и длительность импульса тока на уровне $0,5I_m$.

Определив с помощью (3)–(6a) и приведенных данных значения сечений S_{0im} и S_{0ik} , для максимальных значений предельно допустимых d_{mid} и критических d_{mik} плотностей импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной мол-

нии в токонесущих частях рассматриваемой кабельно-проводниковой продукции получаем следующие расчетные выражения:

для импульсной A -компоненты тока молнии

$$d_{midA} = I_{mA1} / S_{0imA}; \quad (7)$$

$$d_{mikA} = I_{mA1} / S_{0ikA}; \quad (7a)$$

для длительной C -компоненты тока молнии

$$d_{midC} = I_{mC} / S_{0imC}; \quad (8)$$

$$d_{mikC} = I_{mC} / S_{0ikC}. \quad (8a)$$

Результаты экспериментальной проверки электротермической стойкости опытных образцов проводов и кабелей к действию импульсного тока искусственной молнии. Для экспериментальной оценки с помощью генераторов ГИТ- A и ГИТ- C , моделирующих в разрядных цепях ГТМ (рис. 1) соответственно импульсную A - и длительную C -компоненты тока искусственной молнии, работоспособности расчетных соотношений (3a)–(6a) по выбору минимально допустимых S_{0im} и критических S_{0ik} поперечных сечений жил (экранов) проводов и кабелей цепей ЛА были выбраны следующие опытные образцы кабельно-проводниковой продукции: провода низкого напряжения ПВ с ПВХ изоляцией и расщепленной медной жилой сечением $S_{01} \gg 2,5$ мм²; среднугабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией, сплошной медной жилой сечением $S_{01} \gg 0,407$ мм² и медным экраном-оплеткой сечением $S_{02} \gg 2,44$ мм²; провода низкого напряжения БПВЛ с ПВХ изоляцией и расщепленной медной жилой сечением $S_{01} \gg 12$ мм². Указанные прямолинейные опытные образцы проводов и кабеля длиной 0,55 м размещались в атмосферном воздухе (при его давлении около $p_0 \gg 1,087 \cdot 10^5$ Па, относительной влажности 70% и температуре $\vartheta_0 \gg 20$ °С) и жестко закреплялись на рабочем столе ГТМ своими концами с помощью болтового соединения на массивных алюминиевых электродах, включенных в разрядные цепи генераторов ГИТ- A и ГИТ- C . Генераторы ГИТ- A и ГИТ- C согласно схеме на рис. 1 имели следующие собственные электрические параметры [9]: $C_A \gg 333$ мкФ; $L_A \gg 5$ мкГн; $R_A \gg 0,057$ Ом; $C_C \gg 45,36$ мФ; $L_C \gg 11,43$ мГн; $R_C \gg 4,74$ Ом. После параллельного заряда конденсаторов генераторов ГИТ- A и ГИТ- C до напряжений $U_{3A} \gg -27$ кВ и $U_{3C} \gg -4,2$ кВ соответственно и последующего срабатывания их высоковольтных воздушных искровых коммутаторов F_1 и F_2 (см. рис. 1) через испытываемый образец провода (кабеля) в случае его испытания на электротермическую стойкость к со-

вместному действию импульсной A - и длительной C -токовых компонент грозового разряда друг за другом протекают требуемые компоненты импульсного тока искусственной молнии с нормированными АВП.

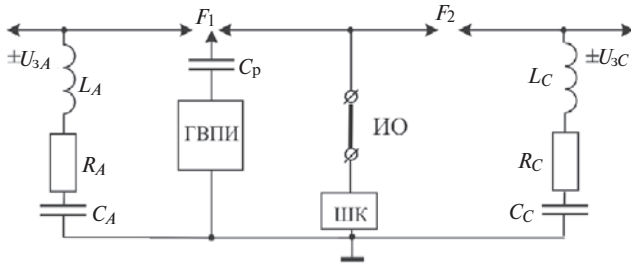


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы сильноточных разрядных цепей высоковольтных генераторов ГИТ-А и ГИТ-С [9] для отдельного и совместного формирования в испытываемых образцах медных проводов (кабелей) электрических цепей технических объектов импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП: ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; F_1, F_2 – трех- и двухэлектродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы генераторов ГИТ-А и ГИТ-С соответственно; C_p – разделительная емкость 180 пФ на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи генератора ГВПИ, управляющего срабатыванием искровых коммутаторов F_1 и F_2 ; ИО – испытываемый образец провода (кабеля); ШК – коаксиальный шунт типа ШК-300 для измерения импульсных токов искусственной линейной молнии амплитудой от ± 10 А до ± 300 кА; U_{3A}, U_{3C} – зарядные напряжения генераторов ГИТ-А и ГИТ-С; L_A, R_A, C_A – индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи генератора ГИТ-А; L_C, R_C, C_C – индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи генератора ГИТ-С

В случае испытания указанных опытных образцов проводов и кабеля на электротермическую стойкость к отдельному действию на них рассматриваемых токовых компонент тока искусственной молнии в ГТМ производился заряд и разряд высоковольтных импульсных конденсаторов только либо генератора ГИТ-А (подача на образец импульсной A -компоненты тока молнии), либо генератора ГИТ-С (подача на образец длительной C -компоненты тока молнии). Измерение АВП протекающих при этом через испытываемые образцы проводов (кабелей) компонент импульсного тока искусственной молнии выполнялось с помощью цифровых запоминающих осциллографов типа Tektronix TDS 1012 и метрологически поверенного измерительного коаксиального шунта ШК-300 с собственным активным сопротивлением 0,185 мОм, включенного в непотенциальную (заземленную) часть разрядных цепей ГТМ (см. рис. 1) и имеющего специальный делитель напряжения с двумя коаксиальными выходами с коэффициентами преобразования около $11,26 \times 10^3$ А/В (для фиксации импульсной A -компоненты тока молнии) и около $56,42 \times 10^2$ А/В (для фиксации длительной C -компоненты тока молнии) [9].

Случай типовых компонент тока искусственной молнии в разрядной цепи ГТМ. Прежде чем указать

результаты экспериментальной оценки электротермической стойкости испытываемых в ГТМ опытных образцов выбранной кабельно-проводниковой продукции к прямому действию на них принятых временных форм тока молнии, нам следует остановиться на расчетном выборе их сечений S_{0im} и S_{0ik} для типовых импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии, воспроизводимых генераторами ГИТ-А и ГИТ-С на массивном токопроводящем элементе (эквиваленте нагрузки, выполненном из плоской латунной шины сечением 60 мм^2 и длиной 0,55 м), включенном в разрядные цепи ГТМ согласно рис. 1 вместо испытываемых опытных образцов проводов и кабелей. На рис. 2, а и б приведены типовые осциллограммы используемых нами при электротермических испытаниях проводов (кабелей) импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП.

Из приведенной на рис. 2, а осциллограммы импульсной A -компоненты тока видно, что модуль ее первой амплитуды $I_{mA1} \gg 205$ кА ($t_{mA} \gg 38$ мкс), а третьей – $I_{mA3} \gg 16,9$ кА. Период колебаний данной компоненты имитированного тока молнии составляет $T_A \gg 200$ мкс, а логарифмический декре-

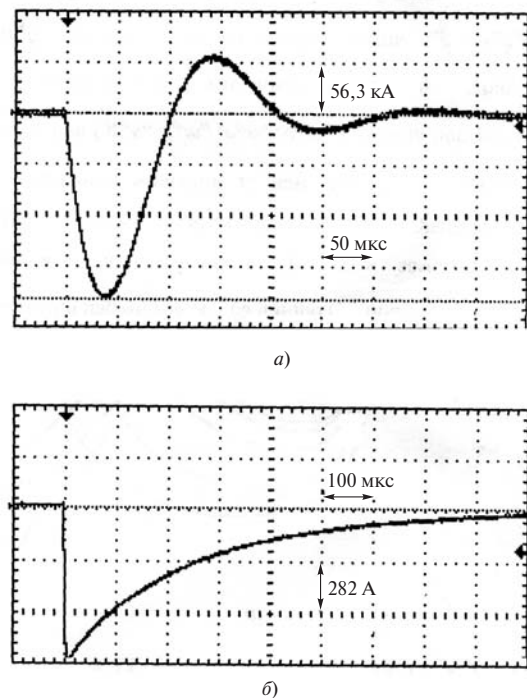


Рис. 2. Типовая осциллограмма: а – импульсной A -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в сильноточной цепи ГТМ [9] при разряде его генератора ГИТ-А на массивный плоский токопроводящий эквивалент нагрузки длиной 0,55 м ($U_{3A} \gg 27$ кВ; $I_{mA1} \gg 205$ кА; $I_{mA3} \gg 16,9$ кА; $t_{mA} \gg 38$ мкс; $T_A \gg 200$ мкс; $D_A \gg 2,495$; $t_{иА} \gg t_{0А} \gg 500$ мкс; $J_{dА} \gg 2,17 \times 10^6 \text{ А}^2 \times \text{с}$; б – длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в сильноточной цепи ГТМ [9] при разряде его генератора ГИТ-С на массивный плоский токопроводящий эквивалент нагрузки длиной 0,55 м ($U_{3C} \gg 4,2$ кВ; $I_{mC} \gg 0,835$ кА; $t_{mC} \gg 11$ мс; $t_{иC} \gg 160$ мс; $t_{0C} \gg 1000$ мс; $Q_C \gg 193$ Кл)

мент ее колебаний равен $D_A \gg 2,495$. Тогда согласно (6) при $k_A \gg 1,728$ данному импульсному току будет соответствовать интеграл действия, примерно равный $J_{dA} \gg 2,17 \times 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{ж}$. При таком нормированном численном значении J_{dA} в соответствии с (3) при $J_{id} = 0$ и $C_{im}^* = 1,51 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$ для провода с ПВХ изоляцией и медной жилой значение минимально допустимого поперечного сечения S_{01mA} примерно равно $9,75 \text{ мм}^2$. Для этого значения интеграла действия J_{dA} импульсной A -компоненты тока искусственной молнии и указанного медного провода при $J_{id} = 0$ и $D_{ik}^* = 4,41 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$ значение критического поперечного сечения S_{01kA} по (5) будет примерно равно $3,34 \text{ мм}^2$. При $J_{dA} \gg 2,17 \times 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{ж}$ для радиочастотного кабеля с ПЭТ изоляцией, медной жилой и медным экраном-оплеткой при $J_{id} = 0$ и $C_{im}^* = 1,35 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$ его минимально допустимое по (3) поперечное сечение S_{01mA} или S_{02mA} должно быть примерно равно $10,9 \text{ мм}^2$. Для данного радиочастотного кабеля ($J_{id} = 0$; $D_{ik}^* = 4,41 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$) и рассматриваемого токового воздействия ($J_{dA} \gg 2,17 \times 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{ж}$) значения его критических поперечных сечений S_{01kA} и S_{02kA} , определяемых по (5) с учетом данных таблицы, останутся прежними и равными примерно $3,34 \text{ мм}^2$. В результате с учетом приведенных расчетных значений сечений S_{01mA} и S_{01kA} из (7) и (7а) находим, что для используемых при электротермических испытаниях опытных образцов с медными жилами (экранами) проводов марок ПВ и БПВЛ с ПВХ изоляцией и радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией в первом приближении расчетные наибольшие амплитудные значения предельно допустимой d_{midA} и критической d_{mikA} плотности импульсной A -компоненты тока искусственной молнии будут примерно равными 21 (для проводов), 18,8 (для кабеля) и $61,4 \text{ кА/мм}^2$ (для проводов и кабеля).

Из данных осциллограммы рис. 2,б следует, что амплитуда I_{mC} апериодического импульса отрицательной полярности длительной C -компоненты имитированного тока молнии в разрядной цепи ГТМ примерно 835 А. Данной токовой амплитуде I_{mC} соответствует время $t_{mC} \gg 11 \text{ мс}$. Длительность протекания по испытываемому образцу провода (кабеля) сформированной в разрядной цепи генератора ГИТ-С длительной C -компоненты тока искусственной молнии на уровне $0,5I_{mC}$ равна $t_{иC} \gg 160 \text{ мс}$, а полное время разряда его конденсаторов составляет $t_{0C} \gg 1000 \text{ мс}$. Тогда согласно (9) при $k_C \gg 1,078$ значение интеграла действия для данной составляющей имитированного тока молнии равно $J_{dC} \gg 0,88 \times 10^5 \text{ А}^2 \cdot \text{ж}$. Из (3) для этого значения J_{dC} при $J_{id} = 0$ и $C_{im}^* = 1,51 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$ для

испытываемых образцов проводов с ПВХ изоляцией и медными жилами расчетное минимально допустимое поперечное сечение $S_{01mC} \gg 1,96 \text{ мм}^2$. При $J_{dC} \gg 0,88 \times 10^5 \text{ А}^2 \cdot \text{ж}$, $J_{id} = 0$ и $D_{ik}^* = 4,41 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$ для опытных образцов данных проводов критическое поперечное сечение их медной жилы по (5) $S_{01kC} \gg 0,67 \text{ мм}^2$. Для опытного образца радиочастотного кабеля с ПЭТ изоляцией и медными жилой и экраном, испытывающего воздействие используемой длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП $I_{mC} \gg 835 \text{ А}$; $J_{dC} \gg 0,88 \times 10^5 \text{ А}^2 \cdot \text{ж}$; $Q_C \gg k_C I_{mC} (t_{иC} + 0,27 t_{mC}) \gg 193 \text{ Кл}$, оценочные минимально допустимые поперечные сечения S_{01mC} и S_{02mC} его токопроводов согласно (3) будут примерно равны $2,19 \text{ мм}^2$. Расчетные критические поперечные сечения S_{01kC} и S_{02kC} для токонесущих частей этой марки кабеля при $J_{id} = 0$ и $D_{ik}^* = 4,41 \times 10^8 \text{ Аж}^{1/2} \cdot \text{ж}^{-2}$ в соответствии с (5) будут, как и для проводов ПВ и БПВЛ, равны около $0,67 \text{ мм}^2$. Что касается наибольших амплитудных значений предельно допустимой d_{midC} и критической d_{mikC} плотности для длительной C -компоненты тока искусственной молнии в указанных образцах проводов с ПВХ изоляцией и радиочастотного кабеля с ПЭТ изоляцией, то с учетом найденных значений S_{01mC} и S_{01kC} их расчетная оценка по (8) и (8а) при $I_{mC} \gg 835 \text{ А}$ показывает, что они будут примерно равными $0,43$ (для проводов), $0,38$ (для кабеля) и $1,25 \text{ кА/мм}^2$ (для проводов и кабеля).

Случай реальных компонент тока искусственной молнии в разрядной цепи ГТМ. Рассмотрим особенности поведения опытных образцов испытываемой в ГТМ кабельно-проводниковой продукции от прямого действия на них импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП, воспроизводимых в силовых цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С [9]. Начнем с результатов воздействия импульсной A -компоненты тока имитированной молнии на опытный образец медного провода ПВ с ПВХ изоляцией ($S_{01} \gg 2,5 \text{ мм}^2$; $S_{01mA} \gg 9,75 \text{ мм}^2$; $S_{01kA} \gg 3,34 \text{ мм}^2$). Этот провод с расщепленной медной жилой не выдержал оказанного на него электротермического воздействия, приведшего к явлению ЭВ его жилы, в результате которого наступила сублимация твердой жилы испытываемого провода на всей ее длине $0,55 \text{ м}$, а изоляционные и металлические элементы рабочего стола ГТМ из-за этого подверглись активной металлизации парами меди буро-красного цвета. С учетом расчетных соотношений (3)–(6) и следовало ожидать подобные последствия электротеплового воздействия импульсной A -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП на токонесущую часть провода ПВ, для которой $S_{01} < S_{01kA}$. Из приведенной на рис. 3,а осциллограммы следует,

что в процессе ЭВ медной жилы провода ПВ кривая разрядного тока генератора ГИТ-А в этом случае по сравнению с данными рис. 2,а испытывает значительную деформацию. С ее помощью может быть осуществлена экспериментальная оценка наибольшего амплитудного значения критической плотности d_{mlkA} импульсной А-компоненты тока молнии в медной жиле этого провода при ее ЭВ. Опытное значение $d_{mlkA} \gg I_{mA} / S_{01}$ в описываемом случае согласно данным рис. 3,а равно примерно $66,7 \text{ кА/мм}^2$ (при расчете по (11) $d_{mlkA} \gg 61,4 \text{ кА/мм}^2$ и отличается от соответствующего опытного значения не более чем на 8%).

В ходе экспериментов было установлено, что в результате совместного воздействия в ГТМ на опытный образец провода БПВЛ длиной 0,55 м с ПВХ изоляцией и расщепленной медной жилой поперечным сечением $S_{01} \gg 12 \text{ мм}^2$ вначале импульсной А-компоненты ($U_{3A} \gg -27 \text{ кВ}$; $I_{mA1} \gg -205 \text{ кА}$; $t_{mA} \gg 38 \text{ мкс}$; $T_A \gg 200 \text{ мкс}$; $t_{иА} \gg 500 \text{ мкс}$), а затем сразу длительной С-компоненты ($U_{3C} \gg -4,2 \text{ кВ}$; $I_{mC} \gg -0,855 \text{ кА}$; $t_{mC} \gg 11 \text{ мс}$; $t_{иС} \gg 160 \text{ мс}$) тока искусственной молнии токонесящая часть его расщепленной медной жилы ($S_{01} \gg (S_{01mA} + S_{01mC}) > (S_{01kA} + S_{01kC})$) осталась целой и электротермически неповрежденной. Из-за действия на медную

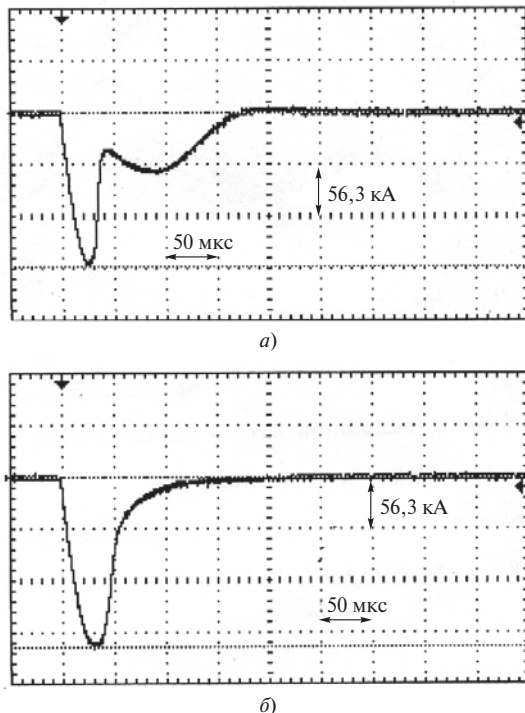


Рис. 3. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии при ЭВ в силовоточной разрядной цепи генератора ГИТ-А [9]: а — расщепленной медной жилы сечением $S_{01} \gg 2,5 \text{ мм}^2$ испытываемого опытного образца провода марки ПВ длиной 0,55 м с ПВХ изоляцией ($U_{3A} \gg -27 \text{ кВ}$; $I_{mA} \gg -166,7 \text{ кА}$; $d_{mlkA} \gg I_{mA} / S_{01} \gg 66,7 \text{ кА/мм}^2$; $t_{иА} \gg t_{0A} \gg -300 \text{ мкс}$); б — сплошной медной жилы сечением $S_{01} \gg 0,407 \text{ мм}^2$ и медного экрана-оплетки сечением $S_{02} \gg 2,44 \text{ мм}^2$ испытываемого опытного образца длиной 0,55 м радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией ($U_{3A} \gg -27 \text{ кВ}$; $I_{mA} \gg -184,7 \text{ кА}$; $d_{mlkA} \gg I_{mA} / (S_{01} + S_{02}) \gg 64,8 \text{ кА/мм}^2$; $t_{иА} \gg t_{0A} \gg 300 \text{ мкс}$)

жилу этого провода больших электродинамических усилий последняя подверглась лишь определенной механической деформации. Проведенный эксперимент с опытным образцом провода низкого напряжения БПВЛ подтвердил работоспособность расчетных соотношений (3)–(4а) и (6) по выбору минимально допустимых поперечных сечений S_{0imA} и S_{0imC} медных жил (экранов) проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА при протекании по ним рассматриваемых компонент импульсного тока искусственной молнии с нормированными АВП. Данный эксперимент позволил определить опытное наибольшее амплитудное значение плотности тока в жиле этого провода $d_{mldA} \gg I_{mA1} / S_{01} \gg 17,1 \text{ кА/мм}^2$ (при расчетном по (7) максимальном значении предельно допустимой плотности тока в проводе около 21 кА/мм^2 , превышающем в данном случае соответствующее опытное значение примерно на 18%). Что касается опытного максимального значения плотности тока $d_{mldC} \gg I_{mC} / S_{01}$ в жиле провода, то в этом случае оно было равно $\sim 71,2 \text{ А/мм}^2$ (при расчетном по (8) максимальном значении предельно допустимой плотности данного тока в проводе около 426 А/мм^2).

Дальнейшие эксперименты показали, что опытный образец радиочастотного кабеля РК 75-4-11 длиной 0,55 м с ПЭТ изоляцией, сплошной медной жилой сечением $S_{01} \gg 0,407 \text{ мм}^2$ и медным экраном-оплеткой сечением $S_{02} \gg 2,44 \text{ мм}^2$ при параллельном подключении его жилы и экрана к массивным алюминиевым электродам силовоточной разрядной цепи генератора ГИТ-А не выдержал приложенной к нему токовой нагрузки в виде импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП, приведшей к ЭВ и сублимации его токонесящих частей на всей его длине. На подобный характер поведения испытываемого опытного образца данного кабеля указывают и полученные расчетные соотношения (5) и (6), когда для этого случая имеет место неравенство $(S_{01} + S_{02}) < S_{01kA}$, согласно которому выполненный эксперимент при $S_{0ikA} \gg 3,34 \text{ мм}^2$ и должен был закончиться явлением ЭВ исследуемого кабеля. Сублимация меди испытываемого кабеля привела к активной металлизации ее парами бурно-красного цвета изоляционных и токопроводящих элементов рабочего стола ГТМ, на гетинаксовом основании которого оказались обугленные фрагменты защитной полиэтиленовой оболочки и ПЭТ изоляции данного кабеля. На рис. 3,а приведена осциллограмма разрядного тока генератора ГИТ-А, характерная для ЭВ испытываемого в ГТМ радиочастотного кабеля РК 75-4-11. Явление ЭВ его медных токонесящих частей и обусловленное им резкое возрастание активного сопротивления жилы и экрана испытываемого образца кабеля привели к существенной деформации кривой импульсной А-компоненты тока искусственной молнии ($I_{mA} \gg -184,7 \text{ кА}$). Для испытываемого в силь-

ноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А образца радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 при параллельном подключении его медной жилы и оплетки ($S_{01} + S_{02} \approx 2,85 \text{ мм}^2$) к массивным алюминиевым электродам рабочего стола ГТМ опытное значение критической плотности тока $d_{mikA} \approx I_{mA} / (S_{01} + S_{02})$ согласно данным рис. 3, б составила примерно $64,8 \text{ кА/мм}^2$ (при расчете по (11) $d_{mikA} \approx 61,4 \text{ кА/мм}^2$). В этом случае расхождение между расчетными и экспериментальными результатами для d_{mikA} не превышает 6%.

Воздействие на новый опытный образец радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 длиной 0,55 м с ПЭТ изоляцией, сплошной медной жилой $S_{01} \approx 0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней на ее обоих концах медной оплеткой сечением $S_{02} \approx 2,44 \text{ мм}^2$ от генератора ГИТ-С ($U_{3C} \approx -4,2 \text{ кВ}$) длительной С-компоненты тока имитированной молнии с нормированными АВП ($I_{mC} \approx -0,855 \text{ кА}$; $t_{mC} \approx 11 \text{ мс}$; $t_{иC} \approx 160 \text{ мс}$; $t_{0C} \approx 1000 \text{ мс}$; $Q_C \approx 197 \text{ Кл}$) показало, что его токонесущие части остались целыми и электротермически неповрежденными. На такое поведение испытываемого кабеля указывают и расчетные соотношения (5) и (6а), согласно которым $S_{0ikC} \approx 67 \text{ мм}^2$. В этом случае выполняется неравенство $(S_{01} + S_{02}) > S_{0ikC}$, и поэтому опытный образец радиочастотного кабеля РК 75-4-11 оказался электротермически стойким к действию на него длительной С-компоненты тока искусственной молнии. Опытное значение максимальной плотности этой компоненты импульсного тока молнии в токонесущих частях испытываемого кабеля $d_{midC} \approx I_{mC} / (S_{01} + S_{02}) \approx 300 \text{ А/мм}^2$ (при расчете по (8) предельно допустимая плотность данного тока в кабеле равна $\sim 426 \text{ А/мм}^2$).

Выводы. Экспериментальная апробация на мощных высоковольтных генераторах ГИТ-А и ГИТ-С, имитирующих соответственно импульсную А- и длительную С-компоненты тока молнии с нормированными АВП, результатов оценочных расчетов по (3)–(6а) поперечных сечений S_{0imA} , S_{0imC} , S_{0ikA} и S_{0ikC} исследуемых проводов и кабелей с ПВХ и ПЭТ изоляцией, а также по (7)–(8б) предельно допустимых d_{midA} , d_{midC} и критических d_{mikA} , d_{mikC} плотностей соответствующих компонент импульсного тока молнии в их токопроводящих жилах и экранах подтвердила работоспособность предложенных расчетных выражений.

2. Результаты проведенных экспериментов на генераторе тока искусственной молнии подтвердили основные положения предложенного инженерно-технического подхода по расчетной оценке электротермической стойкости проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА к поражающему действию на них применяемых в практике авиационно-космических работ основных компонент импульсного тока молнии. Полученные расчетные и опытные данные могут быть использованы при проектировании бортовых электрических цепей ЛА

на этапе выбора для них необходимой кабельно-проводниковой продукции, отвечающей требованиям по молниестойкости для разрабатываемой авиационной и ракетно-космической техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач.— Харьков: Изд-во «Точка», 2010.
2. Электротехнический справочник: Производство и распределение электрической энергии / Под ред. И.Н. Орлова и др.— М.: Энергоатомиздат, 1988, том 3, кн. 1.
3. Техника высоких напряжений/Под ред. Д.В. Разевига.— М.: Энергия, 1976.
4. Борисов Р.К., Григорьев О.А., Ларионов В.П. Методы испытания бортового оборудования летательных аппаратов на молниестойкость. — Электричество, 1993, № 7.
5. Баранов М.И., Бондина Н.Н., Кравченко В.И. Расчет наведенных напряжений и токов в кабелях связи при прямом ударе молнии в их оболочку. — Технічна електродинаміка (Київ), 2000, № 1.
6. SAE ARP 5412/ED—84. Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока» (США), 1985.
7. SAE ARP 5416/ED—84. Нормативный документ «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов» (США), 2005.
8. КТ-ВВФ/ДО-160D. Квалификационные требования «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний».— М.: Госстандарт РФ, 2004.
9. Баранов М.И., Колишко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 3.
10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.— М.: Мир, 1972.
11. Баранов М.И. Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения. — Электричество, 1992, № 4.
12. IEC 62305-1. Международный стандарт «Молниезащита. Ч. 1».— Женева: МЭК, 2002.

[04.03.13]

Авторы: Баранов Михаил Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». В 1999 г. в Национальном политехническом университете (НТУ) «ХПИ» защитил докторскую диссертацию «Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты». Заведующий отделом электромагнитных испытаний в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте (НИПКИ) «Молния» НТУ «ХПИ», профессор кафедры инженерной электрофизики НТУ «ХПИ».

Кравченко Владимир Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет ХПИ по специальности «Инженерная электрофизика». В 1977 г. в НТУ «ХПИ» защитил докторскую диссертацию «Научно-технические основы обеспечения электромагнитной стойкости технических средств к поражающему действию грозových разрядов». Директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».