

Электротермическая стойкость проводов и кабелей электроэнергетических объектов к поражающему действию большого импульсного тока молнии

БАРАНОВ М.И., РУДАКОВ С.В.

Предложен инженерно-технический подход к расчетному определению электротермической стойкости неизолированных (оголенных) и изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной, резиновой и полиэтиленовой изоляцией электрических цепей электроэнергетических объектов (ЭЭО), испытывающих воздействие короткого удара линейной молнии с протеканием по ним аperiodического импульса тока 10/350 мкс грозового разряда с нормированными по международным и национальным стандартам амплитудно-временными параметрами (АВП) и допусками на них. Приведены расчетные соотношения для выбора предельно допустимых и критических поперечных сечений и соответствующих этим сечениям максимальных значений предельно допустимых и критических плотностей аperiodического импульса тока 10/350 мкс молнии с нормированными АВП в указанной кабельно-проводниковой продукции ЭЭО. С помощью мощного высоковольтного генератора импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них выполнена экспериментальная проверка работоспособности предложенных расчетных соотношений, применяемых при оценке электротермической молниестойкости проводов и кабелей ЭЭО к поражающему действию на нее указанного грозового импульса тока. Полученные результаты могут быть использованы при решении прикладных задач по обеспечению молниезащиты инженерных коммуникаций объектов промышленной электроэнергетики и повышению уровня их функциональной безопасности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнергетические объекты, провода, кабели, линейная молния, импульсный ток молнии, молниезащита, электротермическая молниестойкость

При поражении коротким ударом линейной молнии объектов электроэнергетики в их первичных электрических цепях в соответствии с данными ряда действующих международных и национальных стандартов [1–6] могут протекать импульсные токи $i_L(t)$ положительной полярности с нормированной аperiodической временной формой $t_f/t_p = 10$ мкс/350 мкс и амплитудой I_{mL} , где t_f , t_p – соответственно длительность фронта между уровнями $(0,1-0,9)I_{mL}$ и длительность импульса тока на уровне $0,5I_{mL}$. При этом согласно требованиям [1–6] для указанного импульса тока молнии его временной параметр t_f при допуске $\pm 20\%$ имеет второстепенный характер, что допускает использование для него на практике (при физическом моделировании данного импульса тока молнии и его использовании для испытаний устройств объектов электроэнергетики на молниестойкость) диапазон $10 \text{ мкс} \leq t_f \leq 15 \text{ мкс}$ [7, 8]. Кроме того, в этом случае время $t_m \gg 1,6t_f$, соответствующее амплитуде I_{mL} аperiodического импульса тока грозового разряда, по требованиям [1–5] не должно превышать 25 мкс. Что касается нормированных значений длительности t_p , амплитуды I_{mL} , интеграла действия (удельной энергии с раз-

мерностью Дж/Ом) $J_L = \int_0^{t_p} i_L^2(t) dt$ и протекшего за-

ряда $Q_L = \int_0^{t_p} i_L(t) dt$ для указанного импульса тока

искусственной молнии, то они для используемых на практике I–IV уровней молниезащиты электроэнергетических объектов (ЭЭО) характеризуются следующими численными показателями [1–6]: $t_p = 0,35$ мс при допуске $\pm 10\%$; $I_{mL} = (50, 200)$ кА при допуске $\pm 10\%$; $J_L = (0,63, 10) \cdot 10^6$ А²·с при допуске $\pm 35\%$; $Q_L = (25, 100)$ Кл при допуске $\pm 20\%$. В [9] были приведены расчетные и экспериментальные данные по выбору для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией летательных аппаратов (ЛА) предельно допустимых и критических поперечных сечений и плотностей импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии, амплитудно-временные параметры (АВП) которых для ЛА определяются требованиями нормативных документов [10–13]. Так как АВП для импульсной A - и длительной C -компоненты тока искусственной молнии применительно к ЛА со-

гласно [10–13] существенно отличаются от АВП апериодического импульса тока 10/350 мкс имитированной молнии для ЭЭО по [1–6], то актуальной задачей в области молниезащиты ЭЭО и их инженерных коммуникаций является та, которая связана с обоснованным выбором для неизолированных (оголенных) и изолированных проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией предельно допустимых и критических поперечных сечений их токонесущих частей и соответствующих им токовых плотностей в них в условиях действия на них такого апериодического импульса тока искусственной молнии.

Постановка задачи по определению электротермической стойкости проводов и кабелей ЭЭО к действию импульса тока 10/350 мкс молнии. Рассмотрим провода и кабели электрических цепей ЭЭО, по круглым сплошным (расщепленным) медным (алюминиевым) жилам и оболочкам (экранам) которых в продольном направлении протекает импульс тока молнии, описываемый апериодической временной формой 10/350 мкс с указанными допусками на его АВП. Примем, что рассматриваемые провода и кабели, находящиеся как в режиме длительно допустимой токовой загрузки, так и без нее (в режиме обесточивания), размещены в воздушной среде с температурой $q_0 = 20$ °С.

При приближенной расчетной оценке молниестойкости исследуемой кабельно-проводниковой продукции электрических цепей ЭЭО используем допущение, что рассматриваемый импульс тока молнии $i_L(t)$ практически равномерно распределяется по поперечному сечению S_1 жилы ($i=1$) и экрана ($i=2$) провода (кабеля). В пользу такого допущения может указывать то, что минимальная глубина проникновения азимутального магнитного поля на фронте импульса аксиального тока 10/350 мкс молнии (для области высоких частот в спектре импульса тока) в проводниковые материалы жил (экранов), определяемая в квазистационарном приближении из соотношения $D_i \gg 2[t_m / (\rho m_0 g_{0i})]^{1/2}$ [14], где $m_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [15], а g_{0i} – удельная электропроводность материалов жил (экранов) до протекания по ним тока молнии при температуре q_0 окружающего воздуха, составляет при $t_m \gg 24$ мкс ($t_f \gg 15$ мкс) для меди ($g_{0i} = 5,81 \times 10^7$ (Омж)⁻¹ [15]) около 0,65 мм, а для алюминия ($g_{0i} = 3,61 \times 10^7$ (Омж)⁻¹ [15]) – примерно 0,82 мм. Так как основное тепловыделение в материалах жил (экранов) исследуемых проводов (кабелей) происходит на спаде рассматриваемого импульса тока молнии (при $t^3 10 t_m$ для области низких частот в спектре

импульса тока), то максимальная глубина проникновения D_i магнитного поля согласно приведенной выше формуле для меди будет составлять не менее 2,1 мм, а для алюминия – не менее 2,6 мм.

Используем условие адиабатического характера протекающих при этом в материалах жил (экранов) проводов (кабелей) электротепловых процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токонесущих частей, имеющих текущую температуру $q_i \gg q_0$, и теплопроводности их проводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей жил (экранов) пренебрегаем. Считаем, что электротермическая стойкость проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО при воздействии на них указанного импульса 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 кратковременного нагрева грозовым импульсом тока, протекающим по их токонесущим частям. Принимаем, что в первом приближении значение q_{ik} соответствует известной предельно допустимой кратковременной температуре нагрева q_{ikd} проводов и кабелей токами короткого замыкания (КЗ) промышленной частоты [9, 16].

Использование величины q_{ikd} основывается на том, что, во-первых, природа нагрева материалов жил (экранов) проводов (кабелей) и соответственно их изоляции в обоих этих случаях одна – электрофизическая, обусловленная импульсными токами с амплитудами в десятки килоампер. Во-вторых, временной диапазон изменения микросекундного тока молнии соответствует лишь начальной стадии протекания миллисекундного тока КЗ, на которой более обоснованным является пренебрежение процессами теплоотдачи и теплопроводности в зонах нагрева исследуемых жил (экранов). Тогда для изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПВХ и Р изоляцией можно считать, что $q_{ik} \gg 150$ °С, а для проводов и кабелей с ПЭТ изоляцией $q_{ik} \gg 120$ °С [9, 16]. Что касается неизолированных проводов, то согласно [9, 16] 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.

Экспериментальную проверку достоверности полученных расчетных соотношений для приближенного выбора предельно допустимых S_{id} и критических S_{ik} поперечных сечений жил (экранов) рассматриваемых проводов (кабелей) и максимальных значений предельно допустимых d_{mid} и критических d_{mik} плотностей импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии в них осуществим с по-

мощью мощного генератора импульсного тока молнии (ГИТМ), содержащего четыре параллельно работающих высоковольтных генератора импульсных токов (ГИТ), предназначенных для имитации в лабораторных условиях принятого грозового импульса тока [7, 8]. Заметим, что при этом сечения S_{id} и плотности тока d_{mid} будут соответствовать указанным предельно допустимым кратковременным температурам нагрева q_{ik} рассматриваемых проводов (кабелей), а сечения S_{ik} и плотности тока d_{mik} – явлению электрического взрыва (ЭВ) их токонесущих частей и выходу из строя соответствующих цепей ЭЭО [9, 17].

Расчетная оценка электротермической стойкости проводов и кабелей ЭЭО к действию импульса тока 10/350 мкс молнии. Критериальное теплофизическое соотношение, определяющее электротермическую стойкость рассматриваемых проводов и кабелей ЭЭО к воздействию на их медные или алюминиевые жилы (экраны) нормированного по [1–6] аperiodического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии, будет иметь следующий вид [9]:

$$q_i \leq q_{ik}. \quad (1)$$

Для оценки в (1) текущей температуры нагрева q_i материалов жил (экранов) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с учетом нелинейного характера изменения по [17] из-за нагрева их удельной электропроводности $g_i = g_{0i} [1 + c_{0i} b_{0i} (q_i - q_0)]^{-1}$ в случае протекания по ним исследуемого аperiodического импульса тока молнии и соответственно определения по (1) их молниестойкости при известных значениях q_{ik} воспользуемся следующим соотношением [9]:

$$q_i \gg q_0 + (c_{0i} b_{0i})^{-1} \{ \exp[J_L b_{0i} / (g_{0i} S_i^2)] - 1 \}, \quad (2)$$

где c_{0i} , b_{0i} – соответственно удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материалов жил (экранов) проводов (кабелей), и тепловой коэффициент удельной электропроводности этих материалов [17] до воздействия на них импульса тока молнии при температуре q_0 .

В [9] с учетом [17] были приведены численные значения используемых в (2) постоянных тепло- и электрофизических параметров c_{0i} , b_{0i} и g_{0i} для меди и алюминия (при $q_0 = 20$ °C). Поэтому при заданных значениях поперечных сечений S_i медных или алюминиевых жил (экранов) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО определение по (2) температуры q_i их нагрева протекающим по ним импульсом тока 10/350 мкс имитируемой молнии будет сводиться к нахождению расчетных значений его интеграла действия J_L . Расчетную оценку чис-

ленных значений J_L в рассматриваемом случае можно выполнить по следующему выражению [9]:

$$J_L \gg k_L^2 I_{mL}^2 [0,14 t_m + 0,66 t_p + t_m t_p (1,52 t_m + 7,4 t_p)^{-1}], \quad (3)$$

где

$$k_L \gg [(0,21 t_m t_p^{-1})^{(3,7 t_p - 0,76 t_m)} - (0,21 t_m t_p^{-1})^{(3,7 t_p - 0,76 t_m)}]^{-1}$$

– нормирующий коэффициент для заданного по требованиям [1–6] аperiodического импульса тока искусственной молнии, введенный и полученный в аналитическом виде в [18].

Для предельно допустимых поперечных сечений S_{id} токонесущих жил (экранов) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с учетом критерия (1) их электротермической стойкости к действию на них импульса тока 10/350 мкс молнии имеем [9]:

$$S_{id} \gg \sqrt{J_L} / C_{id}, \quad (4)$$

где $C_{id} = (J_{ikd} - J_{id})^{1/2}$; J_{ikd} , J_{id} – соответственно интегралы импульса тока молнии согласно [17] для токонесущих жил (экранов) проводов и кабелей, предельные кратковременные и длительно допустимые температуры нагрева материала которых соответствуют q_{ik} и q_{id} [16].

Заметим, что для изолированных проводов (кабелей) исследуемых электрических цепей ЭЭО с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией значение q_{id} составляет 65 °C, а для неизолированных (оголенных) проводов – 70 °C [16]. Кроме того, укажем, что в режиме обесточивания проводов (кабелей) их текущая температура в принятом приближении составляет $q_i = q_0$, а в номинальном режиме их токовой загрузки $q_i = q_{id}$. Тогда с учетом [17] для искомых интегралов импульса тока 10/350 мкс молнии J_{ikd} и J_{id} в (4) можно записать расчетные соотношения [9]:

$$J_{ikd} \gg g_{0i} b_{0i}^{-1} \ln [c_{0i} b_{0i} (q_{ik} - q_0) + 1]; \quad (5)$$

$$J_{id} \gg g_{0i} b_{0i}^{-1} \ln [c_{0i} b_{0i} (q_{id} - q_0) + 1]. \quad (6)$$

Для критических поперечных сечений S_{ik} токонесущих жил (экранов) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО при действии на них импульса тока 10/350 мкс молнии с учетом известного из [17] условия ЭВ металлического проводника получаем [9]:

$$S_{ik} \gg \sqrt{J_L} / D_{ik}, \quad (7)$$

где $D_{ik} = (J_{ik} - J_{id})^{1/2}$; J_{ik} – критическое значение интеграла импульса тока молнии для токонесущих

жил (экранов) проводов и кабелей, при котором наступает их ЭВ и выход из строя.

Из (4) и (7) следует, что количественные показатели поперечных сечений S_{id} и S_{ik} медных и алюминиевых жил (экранов) исследуемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО при их поражении аperiodическим импульсом тока 10/350 мкс молнии будут зависеть лишь от численного значения интеграла действия J_L по (3) этого импульсного тока грозового разряда. При этом необходимо не забывать, что при отсутствии в указанных проводах (кабелях) до короткого удара молнии в них предварительной токовой загрузки ($q_i = q_0$) согласно (6) $J_{id} = 0$.

Для максимальных значений предельно допустимых плотностей d_{mid} импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии в токонесущих жилах (экранах) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО из (4)–(6) с учетом принятых допущений находим [9]:

$$d_{mid} \gg I_{mL} / S_{id}. \quad (8)$$

Для максимальных значений критической плотности d_{mik} импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии в жилах (экранах) исследуемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО из (6) и (7) с учетом используемых нами допущений получаем [9]:

$$d_{mik} \gg I_{mL} / S_{ik}. \quad (9)$$

Так как согласно (3), (4) и (7) $S_{id} \sim I_{mL}$ и $S_{ik} \sim I_{mL}$, то из (8) и (9) следует, что значения d_{mid} и d_{mik} для токонесущих частей рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО являются не зависимыми от амплитуды I_{mL} импульса тока 10/350 мкс молнии. Численные значения плотности тока d_{mid} и d_{mik} в них согласно (3)–(9) будут определяться указанными значениями временных параметров t_m , t_p для импульса тока 10/350 мкс молнии и значениями интегралов импульса тока молнии J_{ikd} , J_{id} и J_{ik} , рассчитанными

при $q_0 = 20$ °C по (5), (6), найденными для J_{ik} при $q_0 = 20$ °C в [17] экспериментально и приведенными в таблице.

Экспериментальная оценка электротермической стойкости проводов и кабелей ЭЭО к действию импульса тока 10/350 мкс молнии. Данная оценка сводится к проверке в условиях высоковольтной лаборатории с помощью мощного высоковольтного ГИТМ работоспособности используемого подхода к оценке по (1) и (2) электротермической молниестойкости проводов и кабелей ЭЭО, выбору по (4) и (7) предельно допустимых S_{id} и критических S_{ik} поперечных сечений для медных и алюминиевых сплошных (расщепленных) жил ряда проводов и кабелей с ПВХ и ПЭТ изоляцией, а также по выбору согласно (8) и (9) в подобных токонесущих частях кабельно-проводниковой продукции максимальных значений предельно допустимых d_{mid} и критических d_{mik} плотностей импульса тока 10/350 мкс имитированной молнии с нормированными АВП и допусками на них согласно требованиям [1–6]. С этой целью был использован уникальный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии типа ГИТМ-10/350 разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» [7, 8], формирующий на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке испытательные импульсы тока короткого грозового разряда с нормированными по [1–6] АВП и допусками на них.

На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема генератора типа ГИТМ-10/350, содержащего в своем составе четыре параллельно работающих ГИТ-1 – ГИТ-4 на общую электрическую нагрузку – испытываемые образцы (ИО) проводов и кабелей. При этом ГИТ-1 – ГИТ-3 были собраны на основе 171 параллельно включенного высоковольтного импульсного конденсатора типа ИК-50-3 (16 для ГИТ-1, 44 для ГИТ-2 и 111 для ГИТ-3) [19], а ГИТ-4 – на основе 288 высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140 [19], последовательно включенных по два в каждую из 144 его параллельно подключен-

Вид изоляции в проводах (кабелях)	Материал жилы (экрана) провода (кабеля)	Значения интегралов импульса тока молнии, $\cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{ж} \cdot \text{м}^{-4}$		
		J_{ikd}	J_{id}	J_{ik}
ПВХ, Р	Медь	0,227	0,092	1,950
	Алюминий	0,095	0,039	1,090
ПЭТ	Медь	0,183	0,092	1,950
	Алюминий	0,077	0,039	1,090
Провод без изоляции (оголенный)	Медь	0,395	0,101	1,950
	Алюминий	0,120	0,043	1,090

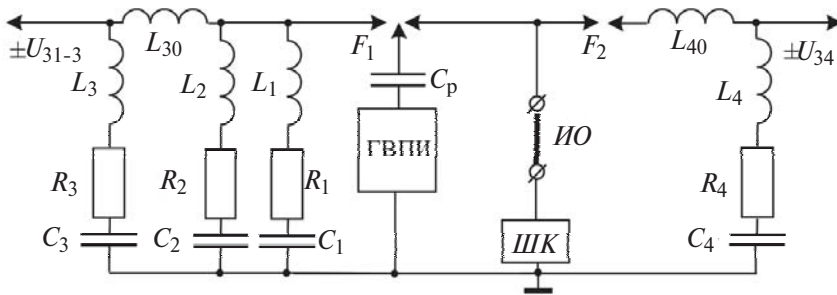


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема силовых разрядных цепей мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 [7, 8] для формирования в испытываемых образцах проводов (кабелей) электрических цепей ЭО аperiodического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения микросекундной длительности и амплитудой до ± 100 кВ; F_1, F_2 – соответственно трех- и двухэлектродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы ГИТ-1 – ГИТ-4; $C_p \gg 180$ пФ – разделительная емкость на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием искровых коммутаторов F_1 и F_2 ; $ИО$ – испытываемый образец провода (кабеля); $ШК$ – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения импульсных токов искусственной молнии амплитудой от ± 10 А до ± 300 кА; $\pm U_{31-3}, \pm U_{34}$ – зарядные напряжения ГИТ-1 – ГИТ-3 и ГИТ-4 соответственно; L_1-L_4, R_1-R_4 и C_1-C_4 – собственные индуктивности, активные сопротивления и емкости разрядных цепей ГИТ-1 – ГИТ-4 соответственно; L_{30}, L_{40} – формирующие индуктивности разрядных цепей ГИТ-3 и ГИТ-4)

ных секций. Собственные электрические параметры генератора типа ГИТМ-10/350 имели следующие численные значения [7, 8]:

$$\begin{aligned} \text{ГИТ-1} - R_1 &\gg 0,375 \text{ Ом}; L_1 \gg 1 \text{ мкГн}; C_1 \gg 48 \text{ мкФ}; \\ \text{ГИТ-2} - R_2 &\gg 0,136 \text{ Ом}; L_2 \gg 1,3 \text{ мкГн}; C_2 \gg 132 \text{ мкФ}; \\ \text{ГИТ-3} - R_3 &\gg 0,057 \text{ Ом}; L_3 \gg 2,5 \text{ мкГн}; C_3 \gg 333 \text{ мкФ}; \\ \text{ГИТ-4} - R_4 &\gg 0,083 \text{ Ом}; L_4 \gg 1,5 \text{ мкГн}; C_4 \gg 10,08 \text{ мФ}. \end{aligned}$$

Формирующая индуктивность L_{30} в разрядной цепи ГИТ-3 составляла около 40 мкГн, а формирующая индуктивность в разрядной цепи ГИТ-4 – примерно 7 мкГн [7, 8]. Номинальное значение запасаемой электрической энергии в генераторе типа ГИТМ-10/350 при зарядном напряжении U_{31-3} для конденсаторов ГИТ-1 – ГИТ-3 ± 50 кВ и зарядном напряжении U_{34} для конденсаторов ГИТ-4 ± 5 кВ составляет около 1145 кДж [7, 8], в том числе для ГИТ-1 – 60 кДж, для ГИТ-2 – 165 кДж, для ГИТ-3 – 416 кДж и для ГИТ-4 – 504 кДж. Во избежание разрушительных последствий в генераторе типа ГИТМ-10/350 и обеспечения безопасных условий труда для обслуживающего персонала при аварийном режиме его работы, вызванном электрическим пробоем на стадии заряда (разряда) внутренней (наружной) изоляции хотя бы одного из его 459 конденсаторов, на всех высоковольтных выводах конденсаторов в ГИТ-1 – ГИТ-4 были установлены защитные сопротивления, выполненные на основе параллельно соединенных высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом 24 Ом на напряжение до ± 25 кВ [20, 21].

Параллельная работа ГИТ-1 – ГИТ-4 в режиме силовых разряда высоковольтных конденсаторов генератора типа ГИТМ-10/350 обеспечивает

ся согласно рис. 1 синхронным срабатыванием их высоковольтного трехэлектродного управляемого воздушного коммутатора F_1 с графитовыми полусферическими электродами на номинальное напряжение ± 50 кВ [22] и высоковольтного двухэлектродного воздушного коммутатора F_2 с графитовыми прямоугольными электродами на номинальное напряжение ± 10 кВ [23]. Такое срабатывание коммутаторов F_1 и F_2 в приведенной на рис. 1 электрической схеме осуществляется за счет подачи через высоковольтную разделительную емкость C_p на средний графитовый электрод коммутатора F_1 от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) импульсного напряжения микросекундной длительности амплитудой до ± 100 кВ [20].

Возникающее при работе ГВПИ, электрическом пробое одного из двух воздушных промежутков коммутатора F_1 и его последующем срабатывании высокое импульсное напряжение на $ИО$ провода (кабеля) приводит к одновременному с F_1 срабатыванию коммутатора F_2 , разряду конденсаторов ГИТ-1 – ГИТ-4 и протеканию имитированного импульса тока молнии с требуемыми АВП через $ИО$ исследуемого провода (кабеля).

Электрический заряд, протекающий через $ИО$ проводов (кабелей) в испытательной схеме генератора типа ГИТМ-10/350, определяется по следующему расчетному соотношению [9]:

$$Q_L \gg k_L I_{mL} (1,32t_p + 0,27t_m). \quad (10)$$

Измерение АВП импульсного тока, протекающего через $ИО$ проводов (кабелей) согласно схеме рис. 1, выполнялось с помощью цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 и поверенного государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 с собственным активным сопротивлением 0,185 мОм, включенного в непотенциальную (заземленную) часть разрядных цепей генератора типа ГИТМ-10/350 (см. рис. 1) и имеющего коэффициент преобразования, равный около $11,26 \times 10^3$ А/В [20].

На рис. 2,а приведена осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии, протекающего в испытательной схеме генератора типа ГИТМ-10/350 через сплошную круглую медную жилу сечением $S_1 \gg 9,6$ мм² $ИО$ радиочастот-

ного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией [24] длиной 0,5 м и снятым витым медным экраном. При $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ и $U_{34} \approx 4,2$ кВ его АВП численно составляли: $I_{mL} \approx 85,6$ кА; $t_f \approx 15$ мкс; $t_m \approx 25$ мкс; $t_p \approx 335$ мкс. Этим АВП испытательного импульса тока 15/335 мкс имитированной молнии ($k_L \approx 1,093$) согласно (3) и (10) соответствовали значения интеграла действия тока молнии $J_L \approx 2 \times 10^6$ А²·с и заряда $Q_L \approx 42$ Кл, протекшего в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 через ИО кабеля. Заметим, что указанные АВП аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, значения J_L и Q_L , используемые при испытаниях на молниестойкость опытных образцов выбранной кабельно-проводниковой продукции, практически соответствуют жестким требованиям для III–IV уровней молниезащиты ЭЭО [1–6]. Данный ИО среднегоабаритного коаксиального кабеля после протекания по нему указанного большого импульсного тока (при его максимальной плотности около $d_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 8,9$ кА/мм²) оказался визуально целым и не поврежденным. Он выдержал оказанное на него сильное электротермическое и электродинамическое воздействие. Проведенная для этого случая ($J_L \approx 2 \times 10^6$ А²·с) расчетная оценка по (2) при $q_0 = 20$ °С превышения температуры нагрева ($q_1 - q_0$) его круглой сплошной медной жилы ($c_{01} \approx 3,92 \times 10^6$ Дж/(м³·°С); $b_{01} \approx 1,31 \times 10^{-9}$ м³/Дж; $g_{01} = 5,81 \times 10^7$ (Ом·ж)⁻¹ [9, 17]) диаметром 3,5 мм показывает, что оно составляло около 122 °С, что незначительно превышает известную предельно допустимую кратковременную температуру нагрева $q_{ik} \approx 120$ °С для кабелей с ПЭТ изоляцией [9, 16].

В первом приближении можно говорить о том, что в данном электротепловом случае критерий (1) для электротермической стойкости исследуемого опытного образца радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 практически выполняется. Кроме того, из (4) при $J_L \approx 2 \times 10^6$ А²·с, $J_{id} = 0$ и данных таблицы ($J_{ikd} \approx 1,83 \times 10^{16}$ А²·с·ж⁻⁴) следует, что для этого случая предельно допустимое поперечное сечение S_{1d} медной жилы указанного кабеля должно составлять около 10,5 мм². Видно, что полученное расчетное значение $S_{1d} \approx 10,5$ мм² немного превышает реальное значение поперечного сечения $S_1 \approx 9,6$ мм² жилы в ИО исследуемого кабеля. Именно тем, что $S_1 < S_{1d}$, обусловлено выполнение неравенства $q_1 > q_{ik}$. Из (8) при $J_{mL} \approx 85,6$ кА и $S_{1d} \approx 10,5$ мм² следует, что максимальное значение предельно допустимой плотности d_{m1d} импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в медной жиле радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 составляет около 8,2 кА/мм².

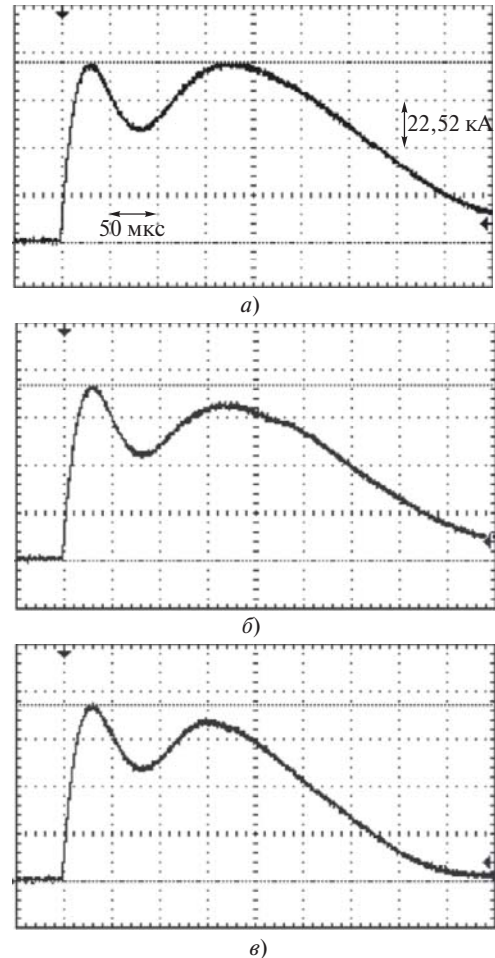


Рис. 2. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в сильноточной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4: а – на сплошную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 9,6$ мм² радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и снятыми защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном ($I_{mL} \approx 85,6$ кА; $d_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 8,9$ кА/мм²; $t_f \approx 15$ мкс; $t_m \approx 25$ мкс; $t_p \approx 335$ мкс; $J_L \approx 2 \times 10^6$ А²·с; $Q_L \approx 42$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ); б – на электрически взрывающуюся расщепленную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м без использования при испытаниях его медного экрана-оплетки ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $d_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 25,9$ кА/мм²; $t_f \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $t_p \approx 310$ мкс; $J_L \approx 1,76 \times 10^6$ А²·с; $Q_L \approx 37,9$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ); в – на электрически взрывающуюся сплошную круглую алюминиевую жилу сечением $S_1 \approx 6$ мм² провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $d_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 14$ кА/мм²; $t_f \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $t_p \approx 265$ мкс; $J_L \approx 1,58 \times 10^6$ А²·с; $Q_L \approx 33,3$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

Как видно, расчетное значение плотности тока $d_{m1d} \approx 8,2$ кА/мм² отличается от ее опытного значения $d_{m1} \approx 8,9$ кА/мм² примерно на 8%. Полученное применительно к требованиям [1–6] и медным жилам радиочастотных коаксиальных кабелей с ПЭТ изоляцией электрических цепей ЭЭО максимальное значение предельно допустимой плотности $d_{m1d} \approx 8,2$ кА/мм² импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии оказывается примерно в 2,3 раза меньше амплитудных значений предельно до-

пустимой плотности d_{midA} для импульсной A -компоненты тока искусственной молнии по [10–13] в медных жилах (экранах) радиочастотных коаксиальных кабелей с ПЭТ изоляцией, используемых в бортовых электрических цепях ЛА [9].

На рис. 3 приведен внешний вид ИО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией [23] длиной 0,5 м, закрепленного без использования его медного экрана-оплетки на рабочем столе генератора типа ГИТМ-10/350 до протекания по его расщепленной круглой медной жиле поперечным сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии.

На рис. 2,б представлена осциллограмма аperiodического импульса тока имитированной молнии, протекающего в испытательной схеме согласно рис. 1 и 3 через расщепленную медную жилу ИО данного кабеля. Из-за явления ЭВ медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ в исследуемом опытном образце кабеля, сопровождающегося полной сублимацией [15, 17] токонесущей меди жилы ИО кабеля и выходом наружу паров меди через образовавшиеся в процессе ее ЭВ боковые круглые центральные отверстия в его сплошной ПЭТ изоляции цилиндрической конфигурации, произошла определенная деформация в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 кривой испытательного аperiodического импульса тока искусственной молнии. Данное искажение формы испытательного импульса тока привело к незначительному увеличению его временных параметров на фронте и их заметному укорочению на спаде импульса (см. рис. 4). Поэтому при $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$ и $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$ его АВП стали численно составлять: $I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$; $t_f \approx 17 \text{ мкс}$; $t_m \approx 28 \text{ мкс}$; $t_p \approx 310 \text{ мкс}$. Этим АВП

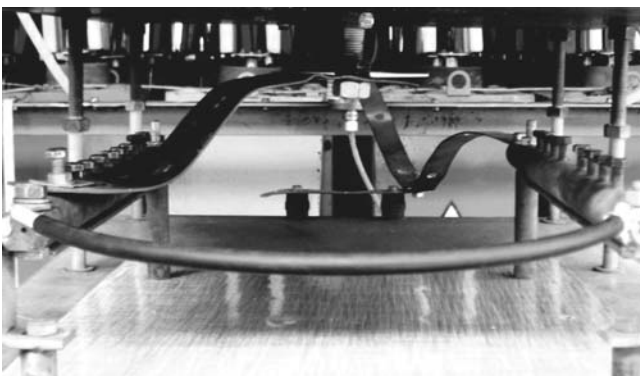


Рис. 3. Вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах расщепленной круглой медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ ИО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м без использования при испытаниях его медного экрана-оплетки до воздействия на него аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

протекшего через ИО указанного кабеля аperiodического импульса тока искусственной молнии ($k_L \approx 1,098$) соответствовали согласно (3) и (10) значения его интеграла действия $J_L \approx 1,76 \times 10^6 \text{ А}^2 \times$ и заряда $Q_L \approx 37,9 \text{ Кл}$.

Расчетная оценка по (7) при предварительно найденным опытным путем согласно рис. 2 исходных АВП испытательного импульса тока имитированной молнии ($J_L \approx 2 \times 10^6 \text{ А}^2 \times$) критического поперечного сечения S_{1k} для медной жилы данного кабеля приводит к тому, что в рассматриваемом электротермическом случае оно составляет около $3,2 \text{ мм}^2$. Полученное сечение $S_{1k} \approx 3,2 \text{ мм}^2$ оказалось практически соответствующим реальному сечению $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ расщепленной медной жилы радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11. По этой причине данная медная жила исследуемого в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 опытного образца кабеля подверглась полной сублимации [15, 17]. Испарение медной жилы этого кабеля, содержащего в своей средней части (см. рис. 3) защитную оболочку из ПЭТ изоляции и «заглушенный» медный экран-оплетку, привело лишь к частичной металлизации наружной поверхности уцелевшей поясной ПЭТ изоляции кабеля в зоне его концевой разделки. Выполненная при $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ и $S_{1k} \approx 3,2 \text{ мм}^2$ расчетная оценка по (9) максимального значения критической плотности d_{mik} импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в медной жиле радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11 показывает, что в рассматриваемом случае $d_{mik} \approx 26,7 \text{ кА/мм}^2$.

Согласно проведенным экспериментам на генераторе типа ГИТМ-10/350 эта плотность для импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии ($I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$) в электрически взрывающейся медной жиле ($S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$) указанного кабеля реально составляла около $I_{mL} / S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$, что всего на 3% (примерно) отличается от ее указанного ранее расчетного значения. Можно заметить, что найденные применительно к электрическим цепям ЭЭО расчетные ($26,7 \text{ кА/мм}^2$) и опытные ($25,9 \text{ кА/мм}^2$) численные значения для критической плотности d_{mik} аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии согласно требованиям [1–6] в медной жиле радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11 оказываются также примерно в 2,3 раза меньше соответствующих численных значений критической плотности d_{mik4} для импульсной A -компоненты тока искусственной молнии по [10–13] в медных жилах (экранах) кабельно-проводниковой продукции, применяемой в бортовых электрических цепях ЛА [9].

Результаты расчетной оценки по (4) при $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ и $J_L \approx 2 \times 10^6 \text{ А}^2 \times$ с учетом значения из

таблицы для $J_{ikd} \gg 0,95 \times 10^{16} \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$ ($J_{kd} = 0$) предельно допустимого поперечного сечения S_{1d} алюминиевой жилы провода с ПВХ изоляцией, испытывающей воздействие аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, свидетельствуют о том, что в этом случае $S_{1d} \gg 14,5 \text{ мм}^2$. Данному сечению S_{1d} согласно (8) при указанной амплитуде I_{mL} будет соответствовать максимальное значение предельно допустимой плотности d_{mld} импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в алюминиевой жиле рассматриваемого провода, составляющее около $I_{mL} / S_{1d} \gg 5,9 \text{ кА/мм}^2$. Выполненные эксперименты на генераторе типа ГИТМ-10/350 ($U_{31-3} \gg 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \gg 4,2 \text{ кВ}$) с использованием в качестве ИО провода марки АППВнг2'6 с ПВХ изоляцией [24] длиной 0,5 м и его двумя параллельно соединенными на рабочем столе данного генератора сплошными круглыми алюминиевыми жилами диаметром 2,75 мм общим поперечным сечением $S_1 \gg 12 \text{ мм}^2$ показали, что после протекания по этим жилам аperiodического импульса тока 17/335 мкс искусственной молнии ($I_{mL} \gg 83,8 \text{ кА}$; $t_m \gg 28 \text{ мкс}$; $t_p \gg 335 \text{ мкс}$; $k_L \gg 1,092$; $J_L \gg 1,91 \times 10^6 \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$) из-за перегрева его жил с реальной плотностью тока в них около $d_{ml} \gg I_{mL} / S_1 \gg 6,9 \text{ кА/мм}^2$ наблюдались незначительные локальные термические повреждения ПВХ изоляции этого провода. Временная форма испытательного импульса тока при этом практически повторяла кривую, приведенную на токовой осциллограмме рис. 2.

Значение q_1 , полученное по (2) при $q_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ для данного электротермического случая превышения температуры нагрева ($q_1 - q_0$) его алюминиевых жил ($c_{01} \gg 2,70 \times 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \times \text{ }^\circ\text{C)}$; $b_{01} \gg 2,14 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$; $g_{01} = 3,61 \times 10^7 \text{ (Ом} \times \text{мм)}^{-1}$ [9, 17]) составляло около $207 \text{ }^\circ\text{C}$. Из этих расчетных данных видно, что температура нагрева q_1 алюминиевых жил исследуемого в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 провода превышала предельно допустимую кратковременную температуру нагрева для провода марки АППВнг2'6 с ПВХ изоляцией, составляющую около $q_{ik} \gg 150 \text{ }^\circ\text{C}$ [9, 16]. В пользу таких результатов теплового расчета по (2) свидетельствует то, что $S_1 < S_{1d}$ и $d_{ml} > d_{mld}$. На это указывают и данные проведенных с применением рассматриваемого провода сильноточных экспериментов. Так как в этом случае $q_1 > q_{ik}$, то согласно (1) для указанных по [1–6] нормированных АВП испытательного аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии провод марки АППВнг2'6 с ПВХ изоляцией требованиям электротермической стойкости не удовлетворяет. Для обеспечения применительно к указанному проводу выполнения критерия (1) необходимо в электриче-

ских цепях ЭЭО осуществлять соответствующее ограничение по амплитуде I_{mL} и длительности t_p протекающих в них от грозовой деятельности в воздушной атмосфере аperiodических импульсов тока линейной молнии по [1–6].

На рис. 2,в приведена осциллограмма протекающего в электрически взрывающейся сплошной круглой алюминиевой жиле поперечным сечением $S_1 \gg 6 \text{ мм}^2$ ИО провода марки АППВнг2'6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м испытательного аperiodического импульса тока искусственной молнии. Явление ЭВ алюминиевой жилы этого провода и обусловленное им возрастание активного сопротивления токонесущей части ИО данного провода привели к определенной деформации кривой разрядного импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ($U_{31-3} \gg 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \gg 4,2 \text{ кВ}$). Амплитудно-временные параметры этого испытательного аperiodического импульса тока: $I_{mL} \gg 83,8 \text{ кА}$; $t_f \gg 17 \text{ мкс}$; $t_m \gg 28 \text{ мкс}$; $t_p \gg 265 \text{ мкс}$; $k_L \gg 1,112$. Данным АВП соответствовали по (3) и (10) значения интеграла действия тока $J_L \gg 1,58 \times 10^6 \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$ и протекшего заряда $Q_L \gg 33,3 \text{ Кл}$. Амплитудное значение плотности тока в указанной жиле реально составляло около $d_{ml} \gg I_{mL} / S_1 \gg 14 \text{ кА/мм}^2$. Из (7) с учетом данных таблицы при исходных АВП испытательного импульса тока имитированной молнии ($I_{mL} \gg 85,6 \text{ кА}$) и значениях $J_L \gg 2 \times 10^6 \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$, $J_{1k} \gg 1,09 \times 10^{17} \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$ и $J_{id} = 0$ находим, что для рассматриваемой алюминиевой жилы критическое поперечное сечение S_{1k} должно составлять около $4,3 \text{ мм}^2$. Этому сечению $S_{1k} \gg 4,3 \text{ мм}^2$ по (9) соответствует максимальное значение критической плотности d_{mlk} импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в алюминиевой жиле провода марки АППВнг2'6 с ПВХ изоляцией, равное примерно $I_{mL} / S_{1k} \gg 19,9 \text{ кА/мм}^2$. Видно, что в данном случае расчетное значение $d_{ml} \gg 19,9 \text{ кА/мм}^2$ примерно на 29% превышает опытное значение плотности тока $d_{ml} \gg 14 \text{ кА/мм}^2$. Одной из причин такого расхождения между полученными значениями плотностей импульсного тока может служить грубое количественное определение опытным путем при комнатной температуре ($q_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) в [17] значения критического интеграла импульса тока $J_{1k} \gg 1,09 \times 10^{17} \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$ для алюминия при его ЭВ. Согласно [25] уточненное расчетное значение рассматриваемого интеграла тока численно составляет около $J_{1k} \gg 0,82 \times 10^{17} \text{ А}^2 \times \text{мм}^{-4}$. С учетом такого уточнения значения J_{1k} критическое поперечное сечение S_{1k} для алюминиевой жилы провода марки АППВнг2'6 с ПВХ изоляцией, испытывающей действие аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, окажется по (7) рав-

ным примерно 5 мм^2 . Тогда расчетное по (9) максимальное значение критической плотности d_{mlk} для данного импульсного тока в алюминиевой жиле этого провода составит около $17,1 \text{ кА/мм}^2$, что лишь примерно на 18% превышает ее опытное значение $d_{ml} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$. В сравнении с амплитудными значениями критической плотности d_{mikA} для импульсной А-компоненты тока искусственной молнии по [10–13] в алюминиевых жилах (экранах) проводов с ПВХ изоляцией, применяемых в бортовых электрических цепях ЛА, полученное для них значение критической плотности $d_{mlk} \approx 17,1 \text{ кА/мм}^2$ аperiodического импульса тока искусственной молнии по [1–6] оказывается примерно в 2,6 раза меньше значений d_{mikA} [9].

Выводы. 1. Основными показателями электротермической стойкости проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО к поражающему действию аperiodического импульса тока 10/350 мкс линейной молнии с нормированными АВП и допусками на них могут служить расчетные значения температуры нагрева q_i по (2) их токонесущих частей, а также максимальные значения предельно допустимых d_{mid} по (8) и критических d_{mik} по (9) плотностей этого импульсного тока в материалах жил (экранов) соответствующей кабельно-проводниковой продукции.

2. Экспериментальная апробация на мощном высоковольтном генераторе типа ГИТМ-10/350 разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», воспроизводящем на низкоомной и малоиндуктивной нагрузке аperiodические импульсы тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными по требованиям ряда международных и национальных стандартов АВП и допусками на них, предложенного подхода к оценке электротермической молниестойкости неизолированных проводов, а также проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с медными и алюминиевыми жилами (экранами), ПВХ и ПЭТ изоляцией подтвердила его работоспособность.

3. В ходе проведенных оценочных расчетов и выполненных экспериментов было установлено, что предельно допустимая плотность импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в медных токоведущих частях проводов (кабелей) объектов электроэнергетики с ПЭТ и ПВХ изоляцией численно составляет примерно $d_{mid} \approx 9 \text{ кА/мм}^2$, а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией — около $d_{mid} \approx 6 \text{ кА/мм}^2$. При этом критическая плотность импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в медных токоведущих частях проводов (кабелей) ЭЭО с ПЭТ и ПВХ изоляцией составляет примерно $d_{mlk} \approx 26 \text{ кА/мм}^2$, а в алюминиевых токоведущих частях про-

водов и кабелей с ПВХ изоляцией — около $d_{mlk} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$.

4. Полученные расчетные и экспериментальные электротехнические результаты могут быть использованы при выборе для первичных электрических цепей ЭЭО кабельно-проводниковой продукции, отвечающей действующим на сегодня требованиям по ее молниестойкости, а также при решении на практике инженерно-технических задач по обеспечению молниезащиты инженерных коммуникаций объектов промышленной электроэнергетики и повышению уровня их функциональной безопасности в условиях активной грозовой деятельности в воздушной атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **IEC 62305-1: 2010.** Protection against lightning. Part 1: General principles, Geneva, 2010.
2. **IEC 62305-2: 2010.** Protection against lightning. Part 2: Risk management, Geneva, 2010.
3. **IEC 62305-3: 2010.** Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard, Geneva, 2010.
4. **IEC 62305-4: 2010.** Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures, Geneva, 2010.
5. **Национальный стандарт РФ ГОСТ Р МЭК 62305-1–2010.** Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы.— М.: Стандартинформ, 2011, 46 с.
6. **Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001).** Blitzschutzbauteile. Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile.— Berlin, 2008, 16 p.
7. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В.** Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1–2010 амплитудно-временными параметрами. — Электротехника і електромеханіка (Харьков), 2015, № 1, с. 51–56.
8. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Рудаков С.В.** Генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированной временной формой 10/350 мкс и амплитудой $\pm(100-200) \text{ кА}$. — Приборы и техника эксперимента, 2015, № 6, с. 39–44.
9. **Баранов М.И., Кравченко В.И.** Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии. — Электричество, 2013, № 10, с. 7–13.
10. **SAE ARP 5412/ED-84.** Нормативный документ США «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока», 1985, с. 56.
11. **SAE ARP 5416/ED-84.** Нормативный документ США «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов», 2005, с. 145.
12. **MIL-STD-464A.** Военный стандарт США «Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем».— Изд-во Минобороны, 2002, с. 162.
13. **КТ-ВВФ/ДО-160D.** Квалификационные требования РФ «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний».— М.: Госстандарт РФ, 2004, с. 273.
14. **Баранов М.И.** Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током. — Электричество, 2014, № 4, с. 34–42.
15. **Кухлинг Х.** Справочник по физике/Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.— М.: Мир, 1982, 520 с.

16. **Электротехнический справочник.** Производство и распределение электрической энергии, т. 3, кн. 1/Под ред. И.Н. Орлова.— М.: Энергоатомиздат, 1988, 880 с.

17. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972, 391 с.

18. **Баранов М.И.** Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения. — Электричество, 1992, № 4, с. 6–10.

19. **Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермурацкий В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И.** Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник/Под ред. Г.С. Кучинского.— М.: Энергоатомиздат, 1987, 656 с.

20. **Баранов М.И., Колишко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н.** Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 3, с. 81–85.

21. **Баранов М.И.** Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии. — Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг», 2014, № 50 (1092), с. 13–20.

22. **Баранов М.И., Колишко Г.М., Недзельский О.С., Пличко А.В., Понуждаева Е.Г.** Высоковольтный управляемый сильноточный искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50. — Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг», 2014, № 50 (1092), с. 28–37.

23. **Баранов М.И., Колишко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С.** Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 6, с. 58–62.

24. **Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И.** Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник/Под ред. Н.И. Белоруссова. — М.: Энергоатомиздат, 1988, 536 с.

25. **Баранов М.И.** Аналитический расчет критических значений интеграла тока для основных металлов, применяемых в технике больших импульсных токов при электрическом взрыве проводников. — Технічна електродинаміка (Київ), 2008, № 6, с. 14–17.

[31.08.15]

Авторы: Баранов Михаил Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) — ныне Национальный технический университет «ХПИ» — НТУ «ХПИ». В 1999 г. в 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 «Молния» НТУ «ХПИ». Профессор НТУ «ХПИ».

Рудаков Сергей Валерьевич окончил в 1996 г. факультет энергетического и специального обеспечения Харьковского военного университета. В 2002 г. в НТУ «ХПИ» защитил кандидатскую диссертацию «Электрический совместный двухпараметрический контроль состояния изоляции многожильных кабелей». Доцент Национального университета гражданской защиты Украины.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 3, pp. 12–22.

Electric Thermal Resistibility of Wires and Cables of Electric Power Objects to Striking Action of Large Impulsive Current of Lightning

BARANOV Mikhail Ivanovich (National Technical University «Charkov Politechnical Institute» (NTU «ChPI», Charkov, Ukraine) — Head of the Department of NTU «ChPI», Dr. Sci. (Eng.)

RUDAKOV Sergei Valer'yevich (National University of Civil Defense of Ukraine, Charkov, Ukraine) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The engineering-technical going is offered near calculation determination of electro-thermal resistibility of the lightning of the unisolated (bare) and isolated send-offs and cables with copper (aluminium) tendons (by screens), polivinil-khlорide, by rubber and polyethylene isolation of electric chains of electroenergy objects (EEO), testing action of short blow of linear lightning with flowing to on by him aperiodic impulse of current 10/350 ms of a storm discharge with the amplitude-temporal parameters (ATP) and admittances rationed on international and national standards on them. Calculation correlations are resulted for a choice maximum of possible and critical crossrunners and proper these sections of maximal values maximum of possible and critical closenesses of aperiodic impulse of current 10/350 ms of lightning with rationed ATP in the indicated cable-explorer products of EEO. By a powerful high-voltage pulser current 10/350 ms of artificial lightning with rationed ATP and admittances on them experimental verification of capacity of the offered calculation correlations, applied at an estimation electro-thermal resistibility of the lightning send-offs and cables of EEO to the striking operating on it of the indicated storm impulse of current is executed. Can be drawn on the got results at the decision of the applied tasks on providing of

protecting from lightning of engineering communications of objects of industrial electroenergy and increase of their functional strength security.

Key words: *electroenergy objects, wires, cables, linear lightning, impulsive current of lightning, protecting from lightning, electro-thermal resistibility*

REFERENCES

1. **IEC 62305-1: 2010.** Protection against lightning. Part 1: General principles, Geneva, 2010.
2. **IEC 62305-2: 2010.** Protection against lightning. Part 2: Risk management, Geneva, 2010.
3. **IEC 62305-3: 2010.** Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard, Geneva, 2010.
4. **IEC 62305-4: 2010.** Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures, Geneva, 2010.
5. **Natsionalnyi Standart RF GOST R MEC 62305-1– 2010.** Menedzhment riska. Zashchita ot molnii. Chast' 1: Obshchiye printsipy (National standard. Risk management. Protection against lightning. Part. 1. General principles). Moscow, Publ. Standartinform, 2011, 46 p.
6. **Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001).** Blitzschutzbauteile. Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile.– Berlin, 2008, 16 p.
7. **Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V.** *Elektrotehnika i elektromekhanika (Khar'kov) – in Ukrainian (Power Engineering and Electromechanics)*, 2015, No. 1, pp. 51–56.
8. **Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V.** *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instruments and Experimental Techniques)*, 2015, No. 6, pp. 39–44.
9. **Baranov M.I., Kravchenko V.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2013, No. 10, pp. 7–13.
10. **SAE ARP 5412/ED-84.** *Normativnyi dokument SShA «Rekomenduyemaya praktika aviatsionno-kosmicheskikh rabot. Idealizirovannye sostavlyayushchiye vneshnego toka»* (US Regulatory document «Recommended practice aviation and cosmic works. Idealized current external components»), 1985, 56 p.
11. **SAE ARP 5416/ED-84.** *Normativnyi dokument SShA. «Rekomenduyemaya praktika aviatsionno-kosmicheskikh rabot. Usloviya vozdeistviya molnii na letatel'nye apparaty i sootvetstvuyushchiye formy ispytatel'nykh signalov»* (US regulatory document «Recommended practice aviation and cosmic works. Terms of the effects of lightning on aircraft and appropriate forms of test signals»), 2005, 145 p.
12. **MIL-STD-464A.** *Voennyi standart SShA «Elektromagnitnye i ekologicheskiye efekty vozdeistviya molnii. Trebovaniya interfeisa i kriterii proverki sistem»* (US Military standard «Electromagnetic and environmental effects of lightning. Interface requirements and criteria for verification systems»). Publ. Ministry of Defence, 2002, 162 p.
13. **KT-VVF/DO-160D.** *Kvalifikatsionnye trebovaniya RF «Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchei sredy dlya bortovogo aviatsionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniya»* (The qualification requirements of the Russian Federation «Operating conditions and environment for the avionics. The requirements, standards and test methods»). Moscow, Publ. Gosstandart, 2004, 273 p.
14. **Baranov M.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 4, pp. 34–42.
15. **Kukhling Kh.** *Spravochnik po fizike* (Perev. s nem. pod red. Ye.M. Leikina (Handbook to physics/Trans. from German, by edit. Ye.M. Leikin). Moscow, Publ. «Mir», 1982, 520 p.
16. **Elektrotekhnicheskii spravochnik. Proizvodstvo i raspredeleniye elektricheskoi energii, t. 3, kn. 1/Pod red. I.N. Orlova** (Electrical Engineering Handbook. Production and distribution of electric energy, vol. 3, book 1/Edit. by I.N. Orlov). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 880 p.
17. **Knopfel' G.** *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polya* (Superstrong pulsed magnetic fields). Moscow, Publ. «Mir», 1972, 391 p.
18. **Baranov M.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1992, No. 4, pp. 6–10.
19. **Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Gurayevskii M.N., Yermuratskii V.V., Kuchinskii G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregodova Ye.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I.** *Elektricheskkiye kondensatory i kondensatornye ustanovki. Spravochnik/Pod red. G.S. Kuchinskogo* (Power capacitors and capacitor banks/ Edit. by. G.S. Kuchinskii). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1987, 656 p.
20. **Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N.** *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instruments and Experimental Techniques)*, 2008, No. 3, pp. 81–85.
21. **Baranov M.I.** *Visnik Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta (NTU) «Kharkovskii Politehnicheskii Institut» (KPI) «Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug» – in Ukrainian (Bulletin of the National Technical University (NTU) «Charkov Polytechnical Institute» (ChPI) «Technique and electrophysics of high voltages»)*, 2014, No. 50 (1092), pp. 13–20.
22. **Baranov M.I., Koliushko G.M., Nedzel'skii O.S., Plichko A.V., Ponuzhdayeva Ye.G.** *Visnik NTU «KPI» «Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug» – in Ukrainian (Bulletin of the NTU ChPI «Technique and electrophysics of high voltages»)*, 2014, No. 50 (1092), pp. 28–37.
23. **Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S.** *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instrument and Experimental Techniques)*, 2008, No. 6, pp. 58–62.
24. **Belorussov N.I., Saakyan A.Ye., Yakovleva A.I.** *Elektricheskkiye kabeli, provoda i shnury. Spravochnik/Pod red. N.I. Belorussova* (Electrical cables, wires and cords. Handbook/Edit. by N.I. Belorussov). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1988, 536 p.
25. **Baranov M.I.** *Tekhnichna elektrodinamika (Kiev) – in Ukrainian (Technical electrodynamics)*, 2008, No. 6, pp. 14–17.