

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ НОРМИРОВАННОГО ПО МЕЖДУНАРОДНОМУ СТАНДАРТУ IEC 62305-1-2010 АПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

*Приведені результати експериментальних досліджень електротермічної стійкості зразків ряду дротів і кабелів електричних кіл об'єктів промислової електроенергетики з мідними (алюмінієвими) жилами (екранами), полівінілхлоридною і поліетиленовою ізоляцією до дії короткого удару великого імпульсного струму штучної блискавки з нормованими за міжнародним стандартом IEC 62305-1-2010 амплітудно-часовими параметрами і допусками на них. Бібл. 16, рис. 13.*

*Ключові слова:* великий імпульсний струм блискавки, дроти і кабелі електричних кіл об'єктів електроенергетики, генератор великого імпульсного струму штучної блискавки, електротермічна блискавкостійкість кабельно-провідникової продукції.

*Приведены результаты экспериментальных исследований электротермической стойкости образцов ряда проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией к действию короткого удара большого импульсного тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами и допусками на них. Библ. 16, рис. 13.*

*Ключевые слова:* большой импульсный ток молнии, провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики, генератор большого импульсного тока искусственной молнии, электротермическая молниестойкость кабельно-проводниковой продукции.

**Введение.** Одним из путей для надежной электротермической и противопожарной защиты от прямого (косвенного) удара молнии электроэнергетических объектов (ЭЭО) и их инженерных сетей является обоснованный выбор кабельно-проводниковой продукции, устанавливаемой в их первичные и вторичные электрические цепи и отвечающей жестким условиям молниестойкости. Согласно требованиям действующих международных и национальных стандартов [1-6] при коротком ударе молнии в проводах и кабелях силовых цепей ЭЭО могут протекать импульсные токи положительной полярности амплитудой  $I_{mL}$ , имеющие аперидическую временную форму  $\tau_f/\tau_p=10$  мкс/350 мкс, где  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта между уровнями  $(0,1 - 0,9)I_{mL}$  и длительность импульса тока на уровне  $0,5I_{mL}$ . В [1-6] приведены нормированные амплитудно-временные параметры (АВП) и допуски на них для указанного аперидического импульса тока молнии, соответствующие I-IV уровням защиты от молнии ЭЭО и их инженерных коммуникаций. При этом, например, для низшего IV уровня защиты от молнии ЭЭО набор АВП и иных характеристик воздействующего на них аперидического импульса тока 10/350 мкс молнии характеризуется следующими нормированными количественными значениями [1-7]:  $\tau_p=350$  мкс (с допуском  $\pm 10\%$ );  $I_{mL}=100$  кА (с допуском  $\pm 10\%$ ); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J_L=2,5 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35\%$ ); протекший заряд  $q_L=\pm 50$  Кл (с допуском  $\pm 20\%$ ). Что касается численного значения  $\tau_f$ , то оно при допуске  $\pm 20\%$  носит согласно [1-7] второстепенный характер и может находиться в диапазоне  $10 \text{ мкс} \leq \tau_f \leq 15 \text{ мкс}$ . Кроме того, время  $t_m \approx 1,6\tau_f$ , соответствующее токовой амплитуде  $I_{mL}$ , по требованиям [1-5] не должно превышать 25 мкс, а по [6] – 50 мкс.

В настоящее время отсутствуют методические и иные данные, которые можно использовать для указанного выбора проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО, отвечающего существующим требованиям [1-6]. В этой связи проведение на высоковольтном сильноточном оборудовании экспериментальных исследований по определению электротермической молниестойкости кабельно-проводниковой продукции ЭЭО является актуальной научно-технической задачей.

**Постановка задачи.** Рассмотрим широко используемые в силовых электрических цепях ЭЭО провода и кабели с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной (ПВХ) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией. Для их электротермических испытаний на молниестойкость используем прямолинейные опытные образцы (ОО) данных проводов (кабелей) длиной 0,5 м, жестко закрепляемые в сильноточной разрядной цепи генератора импульсного тока молнии (ГИТМ). В качестве ГИТМ выбираем созданный в 2014 г. в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» мощный высоковольтный генератор типа ГИТМ-10/350 [7], воспроизводящий на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке аперидические импульсы тока 10/350 мкс искусственной молнии положительной полярности с нормированными АВП и допусками на них, удовлетворяющие требованиям действующих международных и национальных стандартов [1-6]. В ходе рассматриваемых экспериментальных исследований на генераторе ГИТМ-10/350, содержащем в своем составе четыре параллельно работающих высоковольтных генератора импульсных токов (ГИТ), требуется в первом приближении определить при комнатной температуре  $\theta_0 = 20$  °С максимальные значения предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и кри-

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

тических  $\delta_{m1k}$  плотностей аperiodического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП [1-6] в токоведущих частях указанных ОО проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО.

### Электрическая схема и параметры мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350.

На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема генератора типа ГИТМ-10/350, используемого при электротермических испытаниях на молниестойкость ОО выбранных проводов и кабелей силовых цепей ЭЭО. Видно, что его четыре отдельных ГИТ (ГИТ-1 – ГИТ-4) параллельно работают на общую электрическую нагрузку – испытываемые ОО проводов и кабелей. Отметим, что 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), а ГИТ-4 – на основе 288 высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140, последовательно включенных по два в каждую из 144 его параллельно подключенных секций [7, 8]. Собственные электрические параметры генератора типа ГИТМ-10/350 имели следующие численные значения [7]: для ГИТ-1 –  $R_1 \approx 0,375$  Ом;  $L_1 \approx 1$  мкГн;  $C_1 \approx 48$  мкФ; для ГИТ-2 –  $R_2 \approx 0,136$  Ом;  $L_2 \approx 1,3$  мкГн;  $C_2 \approx 132$  мкФ; для ГИТ-3 –  $R_3 \approx 0,057$  Ом;  $L_3 \approx 2,5$  мкГн;  $C_3 \approx 333$  мкФ; для ГИТ-4 –  $R_4 \approx 0,083$  Ом;  $L_4 \approx 1,5$  мкГн;  $C_4 \approx 10,08$  мФ. Формирующая индуктивность  $L_{30}$  в разрядной цепи ГИТ-3 составляла около 40 мкГн, а формирующая индуктивность  $L_{40}$  в разрядной цепи ГИТ-4 – примерно 7 мкГн.

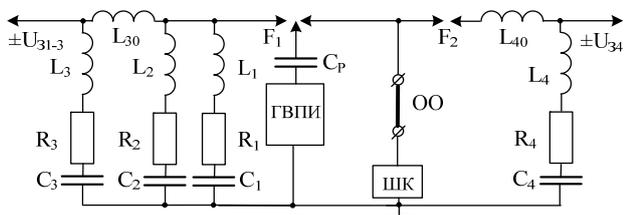


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сильноточных разрядных цепей генератора типа ГИТМ-10/350 для формирования в ОО проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО аperiodических импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих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

Номинальное значение запасаемой электрической энергии в генераторе типа ГИТМ-10/350 при зарядном напряжении  $U_{31-3}$  для конденсаторов ГИТ-1 – ГИТ-3 в  $\pm 50$  кВ и зарядном напряжении  $U_{34}$  для конденсаторов ГИТ-4 в  $\pm 5$  кВ составляет около 1145

кДж [7]. Причем, для ГИТ-1 – 60 кДж, для ГИТ-2 – 165 кДж, для ГИТ-3 – 416 кДж и для ГИТ-4 – 504 кДж. Эти данные подчеркивают высокие уровни энергоемкости конденсаторных батарей генератора типа ГИТМ-10/350 и указывают на «скрытые» от читателя трудности работы для обслуживающего персонала с такими мощными накопителями энергии [9, 10]. Для избегания разрушительных последствий в конденсаторных батареях генератора типа ГИТМ-10/350 и обеспечения безопасных условий труда для обслуживающего их персонала при аварийном режиме его работы, вызванном электрическим пробоем на стадии заряда (разряда) внутренней или наружной изоляции хотя бы одного из его 459 конденсаторов, на всех высоковольтных выводах импульсных 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 постоянное напряжение до  $\pm 25$  кВ [10, 11]. Параллельная работа ГИТ-1 – ГИТ-4 в режиме сильноточного разряда высоковольтных конденсаторов генератора типа ГИТМ-10/350 на ОО проводов (кабелей) обеспечивается согласно рис. 1 синхронным срабатыванием их высоковольтного трехэлектродного управляемого воздушного коммутатора  $F_1$  с графитовыми основными электродами, имеющими полусферические рабочие поверхности, на номинальное напряжение  $\pm 50$  кВ [12] и высоковольтного двухэлектродного воздушного коммутатора  $F_2$  с графитовыми прямоугольными электродами, содержащими плоские рабочие поверхности, на номинальное напряжение  $\pm 10$  кВ [13]. Синхронное 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 сферический электрод коммутатора  $F_1$  от генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) импульсного напряжения микросекундной длительности амплитудой до  $\pm 100$  кВ [7, 10]. При электрическом пробое за счет работы ГВПИ одного из двух воздушных промежутков коммутатора  $F_1$  и его последующем срабатывании возникающее импульсное перенапряжение на ОО провода (кабеля) приводит к одновременному с  $F_1$  срабатыванию и коммутатора  $F_2$ , последующему разряду на нагрузку (ОО) заряженных конденсаторов ГИТ-1 – ГИТ-4 и протеканию имитированного импульса тока молнии с требуемыми АВП через образцы исследуемых проводов (кабелей).

**Результаты испытаний проводов и кабелей ЭЭО на стойкость к импульсу тока 10/350 мкс искусственной молнии.** На рис. 2 показан общий вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной в его сильноточной разрядной цепи сплошной круглой медной жилой диаметром 3,5 мм и сечением  $S_1 \approx 9,6$  мм<sup>2</sup> ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 [14] до протекания по ней аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около  $I_{mL} \approx 85,6$  кА.

На рис. 3 приведена зафиксированная с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного шунта типа ШК-300 [7, 10]

и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 осциллограмма аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, протекающего в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 через медную жилу ОО указанного кабеля длиной 0,5 м. После воздействия на нее данного импульса тока амплитудой  $I_{mL} \approx 85,6$  кА ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 остался визуально целым и соответственно как электродинамически, так и электротермически не поврежденным.

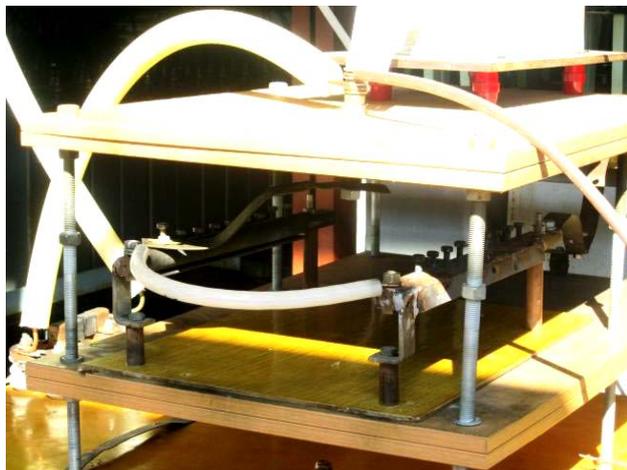


Рис. 2. Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой медной жилой сечением  $S_1 \approx 9,6$  мм<sup>2</sup> ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м снятыми защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой  $I_{mL} \approx 85,6$  кА ( $U_{31-3} \approx 16,5$  кВ;  $U_{34} \approx 4,2$  кВ)

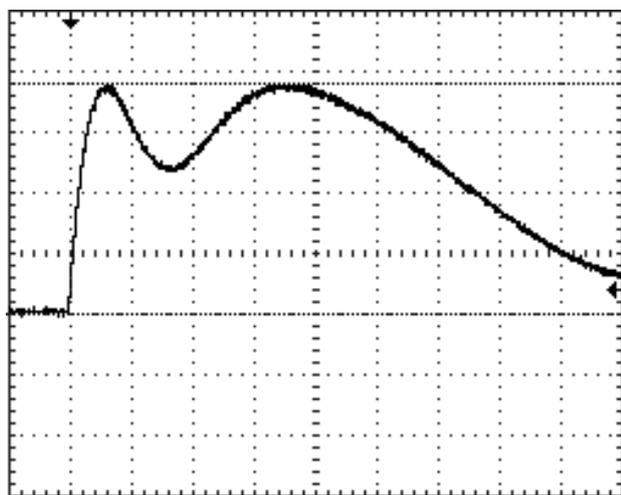


Рис. 3. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4 на сплошную круглую медную жилу сечением  $S_1 \approx 9,6$  мм<sup>2</sup> радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и удаленными защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном ( $I_{mL} \approx 85,6$  кА;  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9$  кА/мм<sup>2</sup>;  $\tau_f \approx 15$  мкс;  $t_m \approx 25$  мкс;  $\tau_p \approx 335$  мкс;  $J_L \approx 2 \cdot 10^8$  А<sup>2</sup>·с;  $q_L \approx 42$  Кл;  $U_{31-3} \approx 16,5$  кВ;  $U_{34} \approx 4,2$  кВ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Максимальное значение плотности тока в медной жиле ОО рассматриваемого кабеля составляло примерно  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9$  кА/мм<sup>2</sup>. Найденное в медной жиле радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с ПЭТ изоляцией для этого случая ( $I_{mL} \approx 85,6$  кА;  $J_L \approx 2 \cdot 10^8$  А<sup>2</sup>·с) расчетным путем с учетом [15] амплитудное значение предельно допустимой плотности  $\delta_{m1d}$  импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии из соотношения  $\delta_{m1d} \approx 1,353 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$  оказывается примерно равным  $\delta_{m1d} \approx 8,2$  кА/мм<sup>2</sup>. Известно, что при такой усредненной плотности  $\delta_{m1d}$  импульсного тока в медной жиле указанного кабеля предельно допустимая кратковременная температура  $\theta_{1k}$  ее нагрева не будет превышать 120 °С [15, 16]. Из полученных нами приближенных данных следует, что расчетное значение плотности тока  $\delta_{m1d} \approx 8,2$  кА/мм<sup>2</sup> отличается от ее опытного значения  $\delta_{m1d} \approx 8,9$  кА/мм<sup>2</sup> примерно на 8 %.

На рис. 4 показан рабочий стол генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его электродах расщепленной круглой медной жилой сечением  $S_1 \approx 3,2$  мм<sup>2</sup> ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией [14] длиной 0,5 м до воздействия на нее импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой до  $I_{mL} \approx 85,6$  кА.

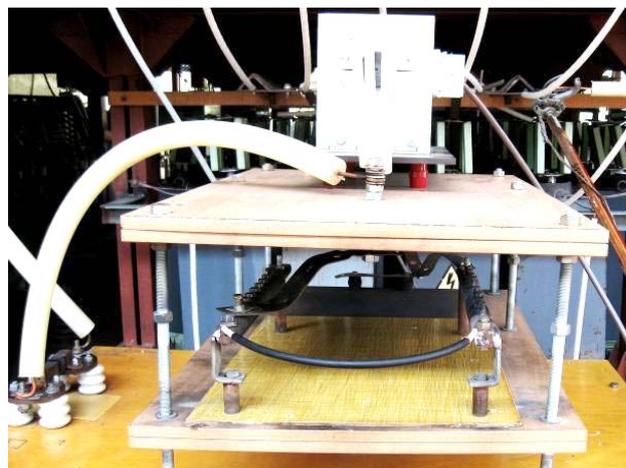


Рис. 4. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах расщепленной круглой медной жилой сечением  $S_1 \approx 3,2$  мм<sup>2</sup> ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и «заглушенным» при электротермических испытаниях его медным экраном-оплеткой до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около  $I_{mL} \approx 85,6$  кА ( $U_{31-3} \approx 16,5$  кВ;  $U_{34} \approx 4,2$  кВ)

На рис. 5 представлена начальная стадия электрического взрыва (ЭВ) медной жилы сечением  $S_1 \approx 3,2$  мм<sup>2</sup> испытываемого в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м. Съемка процесса ЭВ указанной медной жилы производилась при помощи цифровой видеокамеры типа Canon M307E с последующей ее раскадровкой. Обследование исследуемого ОО после его электротермического испытания указывает на полную сублимацию его меди из внутренней области поясной ПЭТ изоляции цилиндрической конфигурации радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11.



Рис. 5. Начальная стадия ЭВ медной жилы сечением  $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$  ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350

На рис. 6 в укрупненном виде показана концевая разделка ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м после воздействия на него испытательного импульса тока 17/310 мкс амплитудой  $I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$  согласно осциллограмме, приведенной на рис. 7, и ЭВ его расщепленной круглой медной жилы сечением  $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ . Усредненное амплитудное значение плотности импульсного тока в электрически взрывающейся медной жиле составляло при этом  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$ .

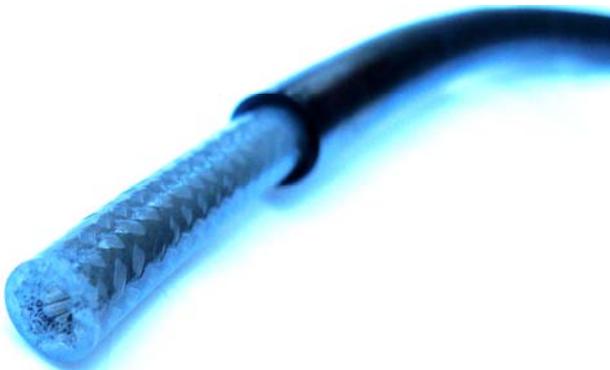


Рис. 6. Внешний вид зоны концевой разделки ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м после прохождения по его расщепленной круглой медной жиле сечением  $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$  испытательного импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии от генератора ГИТМ-10/350 и ее ЭВ с полной сублимацией меди ( $I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$ ;  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$ ;  $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$ ;  $t_m \approx 28 \text{ мкс}$ ;  $\tau_p \approx 310 \text{ мкс}$ ;  $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ ;  $q_L \approx 37,9 \text{ Кл}$ )

Расчетная оценка для данного электротермического случая ( $I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$ ;  $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ ) максимального значения критической плотности импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии по соотношению  $\delta_{m1k} \approx 4,416 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$  [15] указывает на то, что  $\delta_{m1k} \approx 27,6 \text{ кА/мм}^2$ . Можно заключить, что для медной жилы кабеля марки РК 50-7-11 расчетное значение плотности тока  $\delta_{m1k} \approx 27,6 \text{ кА/мм}^2$  от ее опытного значения  $\delta_{m1} \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$  отличается примерно на 6%.

Укажем, что используемая на рис. 3, 6 и 7 величина прошедшего через токоведущие части ОО проводов

и кабелей в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 электрического заряда  $q_L$  определялась по соотношению  $q_L \approx k_L I_{mL} (1,32\tau_p + 0,27t_m)$  [15], где  $k_L$  – нормирующий коэффициент, изменяющийся для проведенных нами испытаний в диапазоне (1,092 – 1,112).

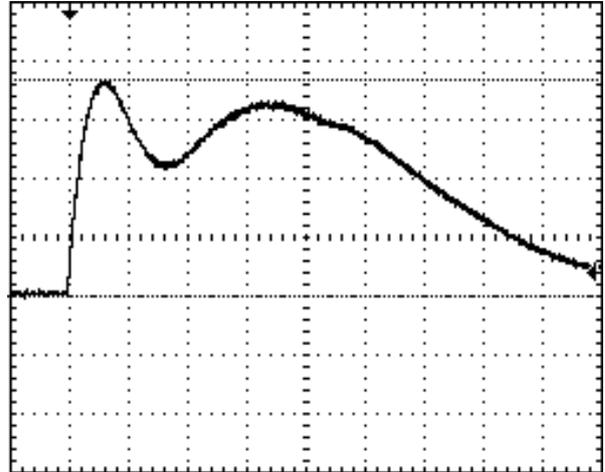


Рис. 7. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся расщепленную круглую медную жилу сечением  $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$  радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м без использования при испытаниях его медного экраноплетки ( $I_{mL} \approx 82,9 \text{ кА}$ ;  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$ ;  $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$ ;  $t_m \approx 28 \text{ мкс}$ ;  $\tau_p \approx 310 \text{ мкс}$ ;  $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ ;  $q_L \approx 37,9 \text{ Кл}$ ;  $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$ ;  $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$ ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

На рис. 8 запечатлен момент подготовки к электротермическим испытаниям в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м, содержащего две параллельно подключенные к массивным стальным электродам рабочего стола используемого высоковольтного источника импульсного тока сплошные круглые медные жилы сечением  $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$ .



Рис. 8. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленными на его массивных стальных электродах сплошными круглыми медными жилами общим сечением  $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$  ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на них аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около  $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$  ( $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$ ;  $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$ )

На рис. 9 приведен внешний вид провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией, испытавший воздействие на его две параллельно включенные в разрядную цепь генератора типа ГИТМ-10/350 сплошные круглые медные жилы общим сечением  $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$  аperiodического импульса тока 17/335 мкс искусственной молнии амплитудой  $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ . Усредненное амплитудное значение плотности большого импульсного тока в медных жилах исследуемого провода в этом случае было равным около  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$ .



Рис. 9. Внешний вид фрагмента ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией с двумя параллельно соединенными в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 круглыми медными жилами общим сечением  $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$  после протекания по ним испытательного аperiodического импульса тока 17/335 мкс искусственной линейной молнии ( $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ ;  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$ ;  $\tau_r \approx 17 \text{ мкс}$ ;  $t_m \approx 28 \text{ мкс}$ ;  $\tau_p \approx 335 \text{ мкс}$ ;  $J_L \approx 1,91 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ ;  $q_L \approx 41,2 \text{ Кл}$ ;  $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$ ;  $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$ )

Осциллограмма воздействующего на сплошные круглые медные жилы ОО провода марки ПНП 2×2,5 с ПВХ изоляцией аperiodического импульса тока искусственной молнии в этом случае практически повторяла осциллограмму, приведенную на рис. 3. Медные жилы данного провода выдержали оказанное на них сильное электротермическое и электродинамическое воздействие, а его ПВХ изоляция – нет. В этом случае имело место локальное разрушение его ПВХ изоляции из-за ее перегрева от протекающего по медным жилам рассматриваемого провода аperiodического импульса 17/335 мкс тока искусственной молнии амплитудой  $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ .

На значительный нагрев ПВХ изоляции при этом виде испытаний указывает также то, что усредненное максимальное значение плотности импульсного тока  $\delta_{m1} \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$  в медных жилах провода марки ПНП 2×2,5 примерно в 1,8 раза превышало расчетное амплитудное значение предельно допустимой в них плотности используемого импульса тока, равное  $\delta_{m1d} \approx 1,506 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2} \approx 9,1 \text{ кА/мм}^2$  [15]. Кроме того, оценка температуры  $\theta_1$  импульсного джоулевого нагрева протекающим импульсом 17/335 мкс тока медных жил указанного провода по расчетному соотношению (2) из [15] показывает, что она составляла около  $\theta_1 \approx 912 \text{ }^\circ\text{C}$ . Разумеется, что такое значение  $\theta_1$  значительно превышает предельно допустимую кратковременную температуру  $\theta_{1k}$  нагрева проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией, составляющую примерно  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  [15, 16]. Эти данные косвенно подтверждают достоверность экспериментально найденного нами максимального значения предельно допустимой плотности

импульса 15/335 мкс тока искусственной линейной молнии в медных токоведущих частях проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией, численно составляющего примерно  $\delta_{m1d} \approx 9 \text{ кА/мм}^2$ .

На рис. 10 приведен внешний вид закрепленной на электродах рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 сплошной круглой алюминиевой жилы сечением  $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$  ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м (вторая алюминиевая жила испытываемого провода была нами «заглушена»).



Рис. 10. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой алюминиевой жилой сечением  $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$  ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около  $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$  ( $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$ ;  $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$ )

На рис. 11 изображена осциллограмма испытательного импульса 17/265 мкс тока искусственной молнии амплитудой  $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ , протекающего через электрически взрывающуюся в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 алюминиевую жилу сечением  $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$  провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией ( $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14 \text{ кА/мм}^2$ ).

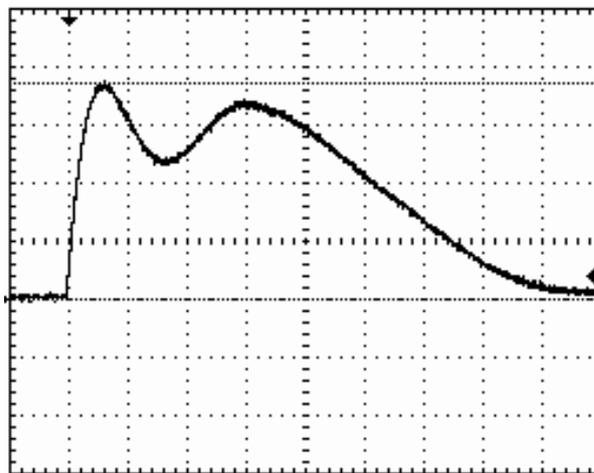


Рис. 11. Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде его ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся сплошную круглую алюминиевую жилу сечением  $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$  провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ( $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ ;  $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14 \text{ кА/мм}^2$ ;  $\tau_r \approx 17 \text{ мкс}$ ;  $t_m \approx 28 \text{ мкс}$ ;  $\tau_p \approx 265 \text{ мкс}$ ;  $J_L \approx 1,58 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ ;  $q_L \approx 33,3 \text{ Кл}$ ;  $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$ ;  $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$ ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

На рис. 12 показана промежуточная стадия ЭВ испытываемой в силовоточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 [7] алюминиевой жилы сечением  $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$  ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ( $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$ ;  $\delta_{m1k} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$ ).



Рис. 12. Промежуточная стадия ЭВ сплошной круглой алюминиевой жилы сечением  $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$  ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м в силовоточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350

Расчетная оценка максимального значения критической плотности импульса тока 17/265 мкс искусственной линейной молнии для алюминиевой жилы провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией по приближенному соотношению  $\delta_{m1k} \approx 2,863 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2}$  [15] свидетельствует о том, что в данном электротермическом случае оно численно составляет около 19 кА/мм<sup>2</sup>. Полученное опытным путем для алюминиевой жилы значение  $\delta_{m1k} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$  отличается от указанного расчетного значения  $\delta_{m1k} \approx 19 \text{ кА/мм}^2$  примерно на 26 %. Выполненный в дальнейшем эксперимент на генераторе типа ГИТМ-10/350 с ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м и его двумя параллельно подключенными к электродам разрядной цепи указанного силовоточного генератора импульсного тока искусственной молнии алюминиевыми жилами общим сечением  $S_1 \approx 12 \text{ мм}^2$  (рис. 13) показал, что испытываемый провод при этом практически выдержал оказанное на него сильное электротермическое и электродинамическое воздействие.

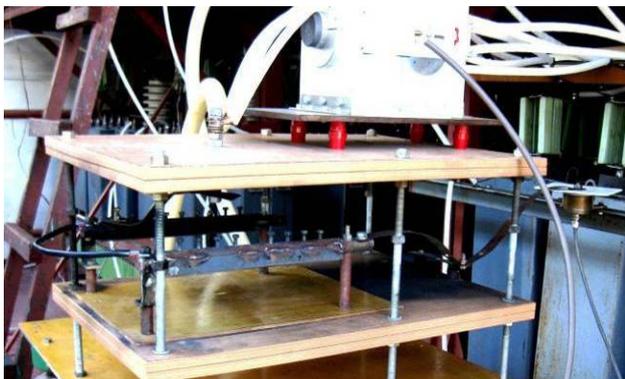


Рис. 13. Внешний вид провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м с его параллельно подключенными к электродам рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 двумя алюминиевыми жилами общим сечением  $S_1 \approx 12 \text{ мм}^2$  до воздействия на них импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой  $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$  (справа отчетливо виден измерительный шунт типа ШК-300 [7, 10], включенный в силовоточную разрядную цепь данного генератора)

Осциллограмма испытательного импульса 15/335 мкс тока имитированной молнии амплитудой  $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$  в этом случае практически повторяла осциллограмму, показанную нами ранее на рис. 3. Амплитудное значение плотности импульсного тока в алюминиевых жилах ОО указанного провода составляло около  $\delta_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 6,9 \text{ кА/мм}^2$ . Оценка максимального значения предельно допустимой в алюминиевых жилах ОО провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией плотности импульса тока 15/335 мкс по расчетному соотношению  $\delta_{m1d} \approx 0,975 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2}$  [15] приводит нас к тому, что в данном случае  $\delta_{m1d} \approx 5,9 \text{ кА/мм}^2$ . Видно, что полученное при электротермических испытаниях опытное амплитудное значение предельно допустимой плотности  $\delta_{m1d} \approx 6,9 \text{ кА/мм}^2$  используемого импульса 15/335 мкс тока искусственной молнии в алюминиевых жилах провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией от соответствующего расчетного значения  $\delta_{m1d} \approx 5,9 \text{ кА/мм}^2$  отличается примерно на 14 %.

#### Выводы.

1. Впервые экспериментальным путем установлено, что при решении актуальных прикладных задач молниезащиты электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики к короткому удару грозовых разрядов в соответствии с требованиями ряда действующих в настоящее время международных и национальных стандартов необходимо исходить из того, что предельно допустимая плотность импульса 15/335 мкс тока молнии в медных токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией численно составляет около  $\delta_{m1d} \approx 9 \text{ кА/мм}^2$ , а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – около  $\delta_{m1d} \approx 6 \text{ кА/мм}^2$ .

2. Из результатов, выполненных в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» экспериментальных исследований молниестойкости образцов кабельно-проводниковой продукции ЭЭО на уникальном высоковольтном генераторе импульсов тока искусственной молнии типа ГИТМ-10/350 следует, что критическая плотность ее импульса 15/335 мкс тока в медных токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией составляет примерно  $\delta_{m1k} \approx 26 \text{ кА/мм}^2$ , а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – примерно  $\delta_{m1k} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$ . При достижении в медных (алюминиевых) жилах (экранах) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО таких плотностей указанного импульса тока молнии последние будут подвергаться ЭВ и выходу из строя.

3. Найденные опытные значения плотностей  $\delta_{m1d}$  и  $\delta_{m1k}$  нормированного согласно требований действующих международных и национальных стандартов импульса 15/335 мкс тока искусственной молнии в медных и алюминиевых токоведущих частях кабельно-проводниковой продукции электрических цепей ЭЭО будут при соответствующем выборе и обоснованной установке с их учетом подобной продукции в силовых электрических цепях ЭЭО способствовать повышению уровня их функциональной и противопожарной безопасности в условиях активной грозовой деятельности в постоянно окружающей объекты промышленной электроэнергетики воздушной атмосфере.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. Part 2: Risk management». Geneva, IEC Publ., 2010.
3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, IEC Publ., 2010.
5. Национальный стандарт Российской Федерации 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, Buchverlag DS, 2008. – 16 [.
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*. – 2015. – №1. – С. 51-56.
8. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский 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. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
9. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
10. Баранов М.И., Колиушко 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.
11. Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2014. – №50(1092). – С. 13-20.
12. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Недзельский О.С., Пличко А.В., Понуждаева Е.Г. Высоковольтный управляемый сильноточный искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50 // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2014. – № 50(1092). – С. 28-37.
13. Баранов М.И., Колиушко 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.
14. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
15. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии // *Электричество*. – 2013. – №10. – С. 7-15.
16. *Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, кн. 1 / Под ред. И.Н. Орлова и др.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning.– Part 2: Risk management». Geneva, IEC Publ., 2010.
3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning.– Part 3: Physical damage to structures and life hazard». Geneva, IEC Publ., 2010.
4. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning.– Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, IEC Publ., 2010.
5. *GOST R MEK 62305-1-2010. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii «Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy»* [GOST R IEC 62305-1-2010. National Standard of the Russian Federation. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).
6. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbauteile. – Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile [German Norms DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Protecting from Lightning of Buildings and their Parts. Part 1: Requirements on Parts Buildings and of Connection]. Berlin, Publ. DS, 2008. 16 p. (Ger).
7. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A powerful high-voltage generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters rated on an International Standard IEC 62305-1-2010. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 51-56. (Rus).
8. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevsky M.N., Ermuratsky V.V., Kuchinsky G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Spravochnik* [The electrical capacitors and condenser options. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 656 p. (Rus).
9. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskiy O.S., Dnyschenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of technical objects. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*, 2008, no.3, pp. 81-85. (Rus).
11. Baranov M.I. Selection and installation of high-voltage ceramic protective resistors in the charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp. 13-20. (Rus).
12. Baranov M.I., Koliushko G.M., Nedzelskiy O.S., Plichko A.V., Ponuzhdaeva E.G. High voltage-controlled high-current spark gap with graphite electrodes RVGU-50. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.50(1092), pp. 28-37. (Rus).
13. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskiy O.S. High-voltage high-current generator air gaps of the current artificial lightning. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*, 2008, no.6, pp. 58-62 (Rus).
14. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).
15. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance wire and cable to the aircraft to the striking action pulsed current lightning. *Elektrichestvo – Electricity*, 2013, no.10, pp. 7-15. (Rus).
16. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, kn. 1* [Electrical Engineering Handbook. Production and distribution of electric

## REFERENCES

1. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.

energy. Vol. 3, book 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 880 p. (Rus).

Поступила (received) 11.09.2015

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., гл.н.с.,

Рудаков Сергей Валерьевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,  
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg\_73@i.ua

M.I. Baranov<sup>1</sup>, S.V. Rudakov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> National University of Civil Protection of Ukraine,  
94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

**Experimental researches of electro-thermal resistibility of send-offs and cables to action rationed on the International Standard of IEC 62305-1-2010 of aperiodic impulse of current of artificial lightning.**

**Purpose.** Experimental researches of electro-thermal resistibility of cable-explorer products, applied in the power electric circuits of objects of electric-power industry, to action on its

copper and aluminum parts bearings a current rationed on the International Standard of IEC 62305-1-2010 aperiodic impulse 10/350  $\mu$ s of current of artificial lightning. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high tensions and high pulsed currents (HPC), and also scientific and technical bases of planning of devices of high-voltage impulsive technique and measuring HPC in them. **Results.** Experimental a way the quantitative levels of maximal values maximum of possible and critical closenesses of aperiodic impulse 10/350  $\mu$ s of current of artificial lightning with rationed on the international standard of IEC 62305-1-2010 peak-temporal parameters and admittances on them in copper (aluminum) parts bearings a current of send-offs and cables with a polyethylene (PET) and polyvinylchloride (PVCH) isolation. **Originality.** First in world practice on the unique powerful high-voltage generator of HPC of artificial lightning experimental researches of resistibility to lightning of pre-production models of send-offs (cables) are conducted with copper (aluminum) tendons, PET and PVCH by an isolation, in-use in power electric circuits of electric-power industry objects. **Practical value.** The use in practice of protecting from lightning of the got results will allow substantially to promote functional and fire-prevention safety of engineering communications of objects of industrial electroenergy in the conditions of action on them of short shots of linear lightning. References 16, figures 12.

**Key words:** high impulsive current of lightning, wires and cables of electric chains of objects of electric-power industry, generator of high pulsed current of artificial lightning, electro-thermal resistibility to lightning of cable-explorer products.