

М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, Е.В. Кузьминский, Ю.И. Мысюк, С.В. Рудаков

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МОЛНИЕОТВОДОВ С УНИВЕРСАЛЬНЫМИ ЗАЖИМАМИ АПЕРИОДИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ С НОРМИРОВАННЫМИ ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Приведені результати прямої дії на круглі мідні і оцинковані сталеві блискавковідводи з плоскими мідними, оцинкованими сталевими і нержавіючими сталевими універсальними затискачами спеціального профілю аперіодичних імпульсів струму штучної блискавки нормованою за міжнародним IEC 62305-1:2010, російським національним ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 і німецьким національним DIN EN 50164-1:2008 стандартами часовою формою 10 мкс/350 мкс і амплітудою (50-100) кА із заданими цими стандартами допусками. Бібл. 12, табл. 1, рис. 12.*

*Ключові слова:* металеві блискавковідводи з металевими універсальними затискачами, генератор аперіодичних імпульсів струму штучної блискавки, випробування на блискавкостійкості.

*Приведены результаты прямого воздействия на круглые медные и оцинкованные стальные молниеотводы с плоскими медными, оцинкованными стальными и нержавеющей стали стальными универсальными зажимами специального профиля аперіодических импульсов тока искусственной молнии нормированной по международному IEC 62305-1: 2010, российскому национальному ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 и немецкому национальному DIN EN 50164-1:2008 стандартам временной формы 10 мкс/350 мкс и амплитуды (50-100) кА с заданными этими стандартами допусками. Библ. 12, табл. 1, рис. 12.*

*Ключевые слова:* металлические молниеотводы с металлическими универсальными зажимами, генератор аперіодических импульсов тока искусственной молнии, испытание на молниестойкость.

**Введение.** В соответствии с требованиями ряда действующих международных и национальных нормативных документов (стандартов) [1-6] при испытаниях на молниестойкость и пожаровзрывобезопасность зданий (сооружений) и находящихся внутри них различных инженерных сетей используются аперіодические импульсы тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП). При этом определяющими характеристиками испытательных импульсов тока искусственной молнии положительной полярности являются [1, 6]: амплитуда  $I_m$  импульсов тока, изменяющаяся в диапазоне (50–200) кА при допуске  $\pm 10\%$ ; длительность  $\tau_p$  импульсов тока на уровне  $0,5 \cdot I_m$ , равная (0,35–2) мс при допуске  $\pm 10\%$ ; интеграл действия  $J_a$  импульсов тока, изменяющийся в диапазоне  $(0,63–10) \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$  при допуске  $\pm 35\%$ ; протекающий электрический заряд  $q$ , изменяющийся в диапазоне (25–100) Кл при допуске  $\pm 20\%$ . Время  $t_m$ , соответствующее амплитуде  $I_m$  аперіодического импульса тока, согласно [6] не должно превышать 50 мкс, а по требованиям [1-5] – 25 мкс. В этой связи указанным временным параметрам испытательного аперіодического импульса тока искусственной молнии удовлетворяет его временная форма  $\tau_f/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$  [1-5], где  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта (с допуском  $\pm 20\%$ ) между уровнями  $(0,1–0,9) \cdot I_m$  и длительность импульса (на уровне  $0,5 \cdot I_m$  с допуском  $\pm 10\%$ ) тока, воздействующего на испытываемый технический объект. В 2014 году в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был разработан и введен в опытную эксплуатацию мощный высоковольтный генератор импульсов тока искусственной линейной молнии ГИТМ-10/350 [7], воспроизводящий на низкоомной и малоиндуктивной электрической нагрузке (с активным сопротивлением не более 0,1 Ом и индуктивностью до 1,5 мкГн) импульсный ток искусственной молнии временной фор-

мы 10/350 мкс с амплитудой от  $\pm 10$  кА до  $\pm 200$  кА и допусками, соответствующими требованиям указанных стандартов [1-6].

**1. Постановка задачи исследований.** Одним из основных способов защиты от линейной молнии зданий (сооружений) и их инженерных коммуникаций является применение на них молниеприемников и молниеотводов, ориентирующих в воздушной атмосфере на себя сильноточные каналы грозозовых разрядов и направляющих движущиеся в плазменном канале грозозового разряда электрические заряды в землю [1-6]. Как правило, по существующим техническим нормам молниеотводы выполняются из круглого металлического (чаще всего стального) провода диаметром до 8 мм при своем поперечном сечении до  $50 \text{ мм}^2$  [8, 9]. Обычно такие молниеотводы прокладываются вдоль наружной части защищаемых объектов. При своей прокладке определенные части молниеотводов из-за технологических причин (например, для обхода выступающих конструктивных элементов сооружения) приходится изгибать между собой под прямым углом. При этом сварные соединения в местах стыка частей молниеотводов оказываются трудновыполнимыми и ненадежными. Поэтому в этом случае наиболее технологичными оказались болтовые соединения, использующие для гальванического контакта соединяемых частей круглых металлических молниеотводов плоские универсальные металлические зажимы специального профиля (рис. 1, 2). Разъемные части таких зажимов из-за их размещения на открытом воздухе приходится выполнять из металлов, стойких к воздействию атмосферных факторов (меди, оцинкованной стали и нержавеющей стали). Прохождение большого импульсного тока (БИТ) молнии с указанными АВП по молниеотводам и их универсальным зажимам сопровождается протеканием интенсивных

как электродинамических, так и электротермических процессов. Эти процессы из-за контактных явлений в зоне взаимного соединения частей молниеотвода с БИТ наиболее ярко будут проявляться в области его универсального зажима. Поэтому требуется прогнозировать поведение молниеотводов с универсальными зажимами при вероятном действии на них БИТ линейной молнии. Наиболее надежным способом для этих целей является проведение натурных испытаний рассматриваемых молниеотводов на стойкость к воздействию импульсов тока искусственной молнии с АВП, определяемыми указанными выше международными и национальными стандартами.

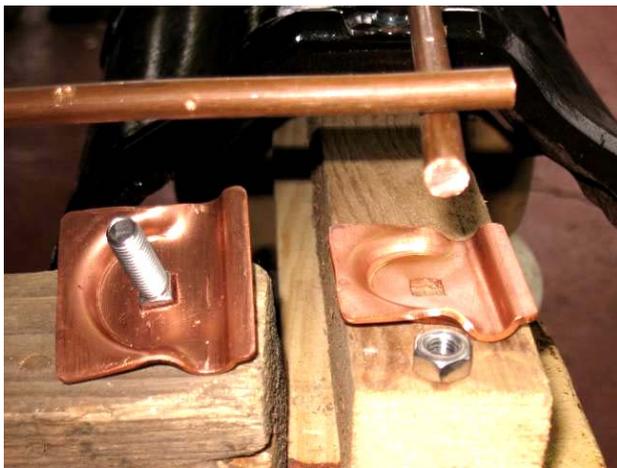


Рис. 1. Внешний вид перпендикулярно устанавливаемых под прямым углом друг к другу круглых частей медных молниеотводов диаметром 8 мм и двух разъемных частей плоского медного универсального зажима специальной конструкции с центральным болтовым соединением

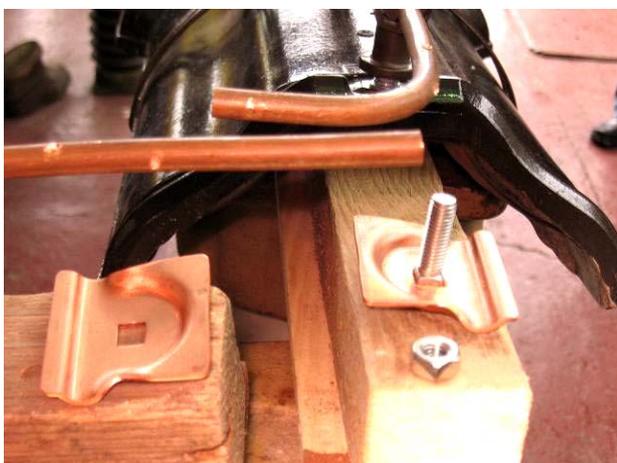


Рис. 2. Внешний вид параллельно устанавливаемых друг относительно друга круглых частей медных молниеотводов диаметром 8 мм и двух разъемных частей плоского медного универсального зажима специального конструкционного исполнения с центральным болтовым соединением

Для выполнения согласно требований стандартов [1-6] испытаний на молниестойкость к прямому воздействию БИТ молнии с амплитудой  $I_m$  в 50 кА ( $N$ -класс по [6]) и 100 кА ( $H$ -класс по [6]) круглых медных и оцинкованных стальных молниеотводов (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м каждой из расположенной под прямым углом друг к другу их соединяемой части) с медными, оцинкованными стальными и не-

ржавеющими стальными универсальными зажимами с центральным болтовым соединением используем мощный высоковольтный генератор ГИТМ-10/350, обеспечивающий протекание по испытываемым частям указанных молниеотводов импульсов тока временной формы 10/350 мкс с требуемой амплитудой.

Для количественной оценки результатов воздействия импульсов тока временной формы 10/350 мкс с амплитудой  $I_m$  от 50 до 100 кА на указанные круглые металлические молниеотводы с плоскими универсальными металлическими зажимами будем осуществлять измерение активного сопротивления  $R_k$  при постоянном токе между соединяемыми частями молниеотводов в контактной зоне их зажимов как до, так и после действия на них принятых импульсов тока. С целью приближения проводимых испытаний на молниестойкость указанных молниеотводов с зажимами к реальным условиям выполним их закрепление с помощью изоляционных держателей на керамических элементах «конька» крыши здания согласно рис. 3.

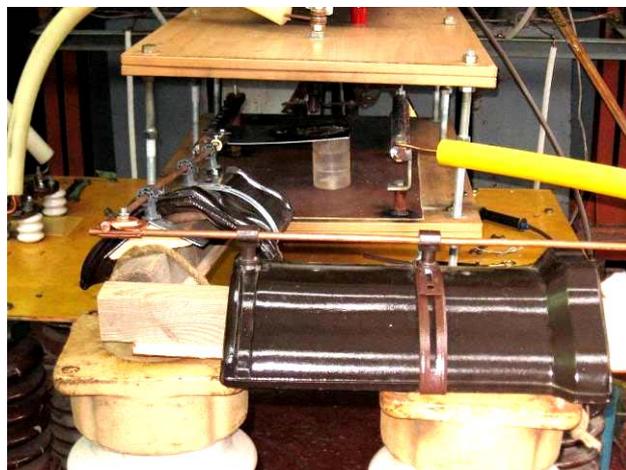


Рис. 3. Внешний вид двух частей круглого медного молниеотвода (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м) с медным универсальным зажимом специального профиля, закрепленных в зажиме между собой под прямым углом и посредством изоляционных держателей на двух керамических элементах «конька» крыши здания и подсоединенных к силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТМ-10/350

**2. Основные характеристики электрической схемы испытаний молниеотводов и генератора ГИТМ-10/350.** На рис. 4 приведена схема испытаний металлических молниеотводов с универсальными зажимами в силовоточной цепи разряда генератора ГИТМ-10/350.

Собранный согласно данным рис. 3 испытываемый молниеотвод, состоящий из двух частей медной или оцинкованной стальной катанки (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м), вместе с медным, оцинкованным стальным или нержавеющей стальным универсальным зажимом подсоединялся на рабочем столе генератора ГИТМ-10/350 к его массивным прямоугольным стальным электродам (рис. 5). Для этой цели нами были использованы специальные латунные переходники-зажимы диаметром 20 мм и сплошная медная жила диаметром 6,6 мм с полиэтиленовой изоляцией крупногабаритного радиочастотного кабеля марки РК-75-44-17 со снятой снаружи медной оболочкой.

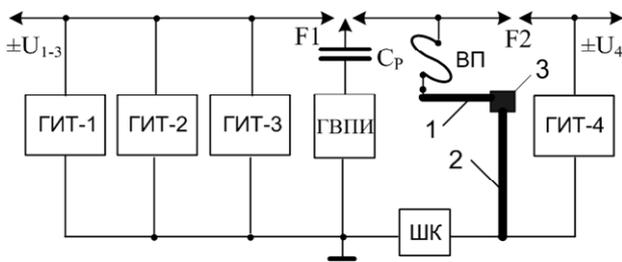


Рис. 4. Упрощенная схема испытаний молниеотводов с универсальным зажимом в силовоточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 [7] (ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 – отдельные генераторы импульсных токов; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения на  $\pm 100$  кВ; F1, F2 – высоковольтные трех- и двухэлектродный коммутаторы с графитовыми электродами; ВП – взрывающаяся тонкая медная проволочка;  $C_p$  – разделительный конденсатор емкостью 180 пФ на напряжение  $\pm 120$  кВ; ШК – коаксиальный шунт типа ШК-300; 1, 2 и 3 – соответственно отдельные части молниеотвода и универсальный зажим)

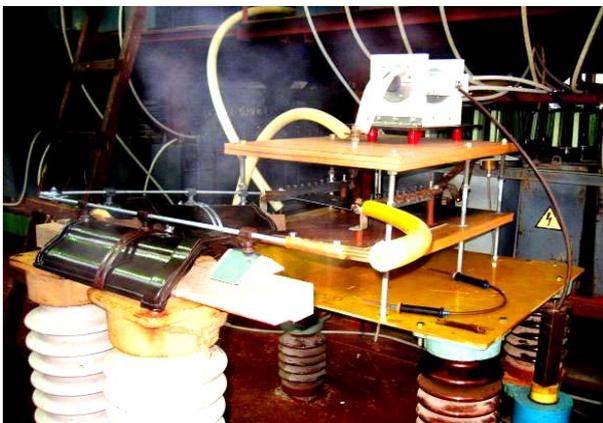


Рис. 5. Общий вид собранной схемы испытаний стального оцинкованного молниеотвода, составные две части которого закреплены под прямым углом друг к другу, с оцинкованным стальным универсальным зажимом в силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТМ-10/350

Медная жила кабеля марки РК-75-44-17 гальванически подключала удаленный край молниеотвода к заземленному стальному электроду той части силовоточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350, в которой размещался метрологически поверенный измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300 [10]. Данный шунт (рис. 6) имел коэффициент преобразования  $K_{ш}$ , равный  $11,26 \cdot 10^3$  А/В. Используемый шунт с помощью радиочастотного коаксиального кабеля марки РК-50-9-11 длиной около 70 м и специального делителя напряжения СД-300 на одном из его краев подключался к цифровому запоминающему осциллографу типа Tektronix TDS-1012. При испытаниях регистрирующая импульсы тока аппаратура размещалась в экранированном заглубленном в грунт бункере.

В схеме проводимых испытаний для имитации плазменного канала искусственного грозового разряда вблизи одной из частей металлического молниеотвода с универсальным металлическим зажимом была использована электрически взрывающаяся в атмосферном воздухе (при его температуре от +2 до +4 °С; относительной влажности от 46 до 49 %; давлении от 748 до 751 мм рт.ст.) тонкая медная проволочка (ВП) диаметром 0,2 мм и длиной 50 мм [11, 12].



Рис. 6. Внешний вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 с кабелем РК-50-9-11 и делителем СД-300 [10]

Данная ВП закреплялась на верхнем стальном электроде двухэлектродной воздушной системы, подключенном к непотенциальному электроду управляемого трехэлектродного воздушного коммутатора F1 с графитовыми электродами [7], и размещалась с обеспечением воздушного зазора (0,5–1) мм перпендикулярно плоскости прямоугольной алюминиевой пластины толщиной 2 мм (см. рис. 3), жестко соединенной своим одним краем с одной из частей испытываемого молниеотвода. При подаче на вход генератора ГВПИ-100 (см. рис. 4) от генератора пусковых импульсов микросекундного импульса напряжения амплитудой до  $\pm 10$  кВ на его выходе появляется микросекундный импульс напряжения амплитудой до  $\pm 100$  кВ, который передается через разделительную емкость  $C_p = 100$  пФ на управляющий электрод коммутатора F1. В результате при соответствующей предварительной регулировке воздушных зазоров  $l_1$  и  $l_2$  в коммутаторе F1 происходит его срабатывание и соответственно разряд согласно схеме на рис. 4 предварительно заряженных до постоянного напряжения  $U_{1-3}$  высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3 трех отдельных генераторов импульсных токов ГИТ-1, ГИТ-2 и ГИТ-3 общего генератора ГИТМ-10/350 на ВП и отдельные части молниеотвода с универсальным зажимом. Импульс перенапряжения, возникающий при электрическом взрыве медной ВП, вызывает срабатывание двухэлектродного коммутатора F2 с графитовыми электродами [7] и воздушным зазором  $l_3$ . В результате будет происходить разряд на испытываемый молниеотвод предварительно заряженных до постоянного напряжения  $U_4$  высоковольтных конденсаторов типа ИМ2-5-140 генератора импульсных токов ГИТ-4. Проведенные исследования показали, что для получения с заданными по [1-6] допусками на АВП в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 с испытываемыми молниеотводами импульсов тока требуемой формы 10/350 мкс амплитудой до  $I_m = 50$  кА уровни зарядных напряжений  $U_{1-3}$  и  $U_4$  должны соответственно составлять около 10 и 1,25 кВ, а с амплитудой до  $I_m = 100$  кА – соответственно 17 и 2,5 кВ. При этом воздушные зазоры в коммутаторах F1 и F2 называются равными  $l_1 \approx 2$  мм,  $l_2 \approx 5$  мм, а  $l_3 \approx 3$  мм. Поэтому с учетом [7] уровни запасаемых энергий в указанных конденсаторах генератора ГИТМ-10/350 для данных режимов токового нагружения (при  $I_m \approx 50$  кА и  $I_m \approx 100$  кА) испытываемых нами молниеотводов будут составлять соответственно примерно 57,2 и 200,2 кДж.

**3. Амплитудно-временные параметры испытательных импульсов тока искусственной молнии.** На рис. 7 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока формы 10/350 мкс искусственной молнии, полученная в случае разряда генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 (при зарядном постоянном напряжении их конденсаторов ИК-50-3, равном  $U_{1,3} \approx 16$  кВ) и ГИТ-4 (при зарядном постоянном напряжении их конденсаторов ИМ2-5-140, равном  $U_4 \approx 2,5$  кВ) используемой высоковольтной испытательной установки ГИТМ-10/350 на эквивалент электрической нагрузки. В нашем случае данный эквивалент нагрузки представлял собой квадратный алюминиевый лист толщиной 2 мм и размером в плане 350 мм × 350 мм, горизонтально и жестко закрепленный а пазах на рабочем столе генератора ГИТМ-10/350 между его массивными прямоугольными стальными электродами.

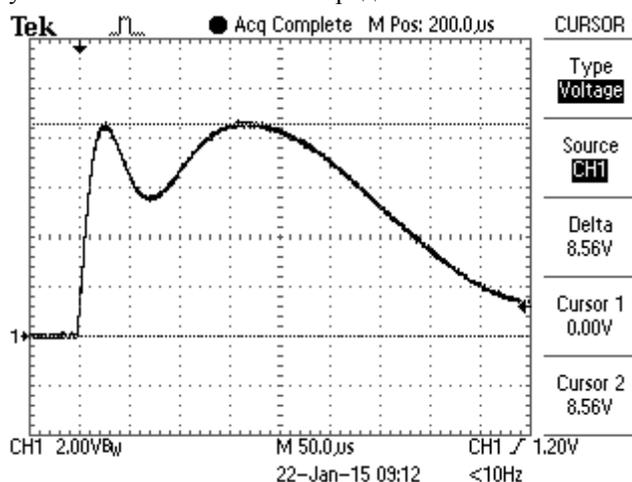


Рис. 7. Осциллограмма аperiodического импульса тока 10/350 мкс положительной полярности при разряде генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 на эквивалент электрической нагрузки (масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка;  $I_m \approx 96,4$  кА;  $\tau_p \approx 325$  мкс;  $t_m \approx 24$  мкс;  $J_a \approx 2,43 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с;  $q_f \approx 45,7$  Кл)

На рис. 8 приведена осциллограмма импульса тока в цепи генератора ГИТМ-10/350 амплитудой  $I_m$  до 100 кА, протекающего через оцинкованный молниеотвод с оцинкованным универсальным зажимом.

При этом составные части молниеотвода были подключены к сильноточной разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 (при зарядных постоянных напряжениях его конденсаторов  $U_{1,3} \approx 17$  кВ и  $U_4 \approx 2,5$  кВ) согласно данным рис. 5. Из рис. 7, 8 видно, что подключение к низкоомной и малоиндуктивной цепи разряда конденсаторов генератора ГИТМ-10/350 [7] испытываемых молниеотводов из-за внесения в нее дополнительного внешнего индуктивного и активного сопротивлений вызывает определенную деформацию импульса тока временной формы 10/350 мкс. Несмотря на такую деформацию, получаемые в этом случае АВП испытательного импульса тока искусственной молнии продолжают удовлетворять жестким требованиям международного ИЕС 62305-1: 2010 [1], российского национального ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 [5] и немецкого национального DIN EN 50164-1:2008 [6] стандартов.

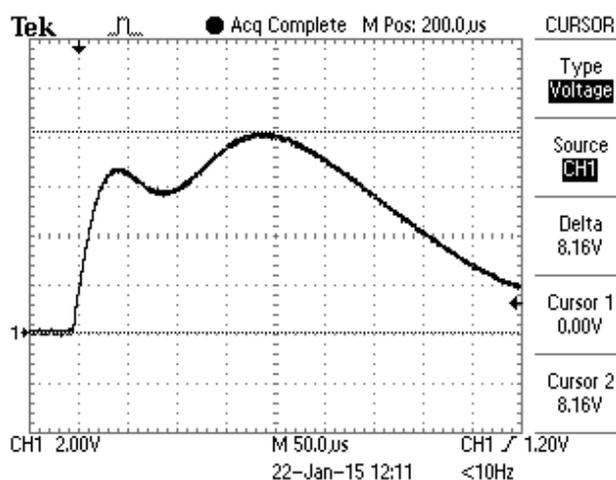


Рис. 8. Осциллограмма испытательного аperiodического импульса тока положительной полярности при одновременном разряде генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 на оцинкованный стальной молниеотвод с оцинкованным стальным универсальным зажимом (масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка;  $I_m \approx 91,9$  кА;  $\tau_p \approx 345$  мкс;  $J_a \approx 2,34 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с;  $q_f \approx 46,2$  Кл)

На рис. 9 представлена осциллограмма импульса тока искусственной молнии в цепи генератора ГИТМ-10/350 амплитудой  $I_m$  до 50 кА, протекающего через оцинкованный стальной молниеотвод с оцинкованным стальным универсальным зажимом.

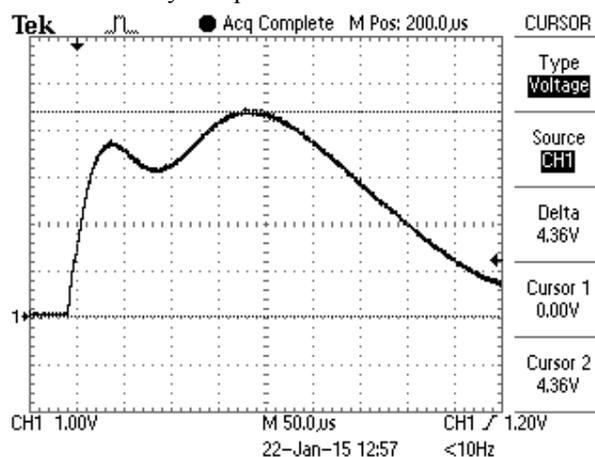


Рис. 9. Осциллограмма испытательного аperiodического импульса тока положительной полярности при одновременном разряде генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4 на оцинкованный стальной молниеотвод с оцинкованным стальным универсальным зажимом (масштаб по вертикали – 11,26 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка;  $I_m \approx 49,1$  кА;  $\tau_p \approx 340$  мкс;  $J_a \approx 0,66 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с;  $q_f \approx 24,7$  Кл)

В табл. 1 приведены основные АВП, значения  $J_a$  и  $q_f$  для испытательных импульсов тока временной формы 10/350 мкс, использованных нами при исследовании поведения рассматриваемых металлических молниеотводов с указанными металлическими универсальными зажимами в условиях прямого воздействия на них принятых импульсов тока искусственной молнии. Сравнение численных значений АВП, интеграла действия  $J_a$  и протекшего заряда  $q_f$  для фактически примененных нами испытательных импульсов тока имитированной молнии с их соответствующими количественными показателями согласно требований

основных действующих зарубежных нормативных документов (например, международного IEC 62305-1-2010 [1], российского национального ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 [5] и немецкого национального DIN EN 50164-1 стандартов [6]) показывает, что они удовлетворяют необходимым количественным характеристикам импульсов тока искусственной линейной молнии, приведенным в указанных стандартах и применяемым при испытаниях на молниестойкость технических сооружений и их инженерных коммуникаций.

Таблица 1

Количественные характеристики основных параметров испытательных импульсов тока искусственной линейной молнии в разрядной цепи мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 [7]

Наименование параметра	Требования зарубежных стандартов IEC 62305-1-2010, ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010, DIN EN 50164-1	Фактически при испытаниях молниеотводов с универсальными зажимами
Амплитуда импульса тока $I_m$ , кА	50±5	45,1-49,1
	100±10	91,9-96,4
Длительность импульса тока $t_p$ , мкс	350±35	325-345
Интеграл действия импульса тока $J_a$ , А <sup>2</sup> ·с	$(0,63 \pm 0,22) \cdot 10^6$ (для $I_m=50$ кА)	$0,66 \cdot 10^6$ (для $I_m \approx 49,1$ кА)
	$(2,5 \pm 0,875) \cdot 10^6$ (для $I_m=100$ кА)	$2,43 \cdot 10^6$ (для $I_m \approx 96,4$ кА)
Количество протекшего по молниеотводам электрического заряда $q_i$ , Кл	25±10 (для $I_m=50$ кА)	24,7 (для $I_m=49,1$ кА)
	50±10 (для $I_m=100$ кА)	45,7 (для $I_m \approx 96,4$ кА)

**4. Результаты испытаний молниеотводов с универсальными зажимами на стойкость к воздействию импульсов тока искусственной молнии.** В процессе высоковольтных испытаний на генераторе ГИТМ-10/350, формирующем аperiodические импульсы тока 10/350 мкс искусственной молнии на металлических молниеотводах с универсальными металлическими зажимами, на стойкость последних к прямому воздействию таких токовых импульсов нами были использованы следующие конфигурации и материалы молниеотводов и универсальных зажимов:

- оцинкованные перпендикулярно подключенные в универсальном оцинкованном стальном зажиме стальные молниеотводы (см. рис. 5);
- медные перпендикулярно подключенные в универсальном медном зажиме молниеотводы (см. рис. 1);
- медные перпендикулярно подключенные в универсальном нержавеющей стальном зажиме молниеотводы;
- медные параллельно подключенные в универсальном медном зажиме молниеотводы (см. рис. 2);
- оцинкованные параллельно подключенные в универсальном оцинкованном стальном зажиме стальные молниеотводы;
- медные и оцинкованные части перпендикулярно подключенных в универсальном нержавеющей стальном зажиме молниеотводы.

На рис. 10, 11 показаны типовые виды испытываемых частей оцинкованного стального молниеотвода с универсальным оцинкованным стальным зажимом в разобранном состоянии соответственно до и после воздействия на них аperiodического импульса тока 10/350 мкс амплитудой  $I_m \approx 91,9$  кА (см. рис. 8).



Рис. 10. Внешний вид параллельно устанавливаемых в зажиме друг относительно друга круглых частей оцинкованного стального молниеотвода и двух разъемных частей универсального оцинкованного стального зажима специального профиля с центральным болтовым соединением до воздействия на них импульса тока 10/350 мкс амплитудой  $I_m \approx 91,9$  кА

При этом виде испытаний ( $H$ - класс по [6]) указанных частей круглого молниеотвода с плоским универсальным зажимом было установлено следующее:



Рис. 11. Внешний вид параллельно устанавливаемых в зажиме друг относительно друга круглых частей оцинкованного стального молниеотвода и двух разъемных частей универсального оцинкованного стального зажима специального профиля с центральным болтовым соединением после воздействия на них импульса тока 10/350 мкс амплитудой  $I_m \approx 91,9$  кА ( $t_p \approx 345$  мкс;  $J_a \approx 2,34 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с;  $q_i \approx 46,2$  Кл)

- электродинамического повреждения как круглых оцинкованных стальных стержней молниеотвода, так и его плоского универсального оцинкованного стального зажима не наблюдается. Никакого повреждения изоляционных держателей молниеотвода и используемых совместно с ними керамических элементов «конька» крыши здания также не происходит;

- в контактной зоне плоского оцинкованного стального универсального зажима специального профиля с центральным болтовым соединением его двух разъемных частей после прохождения по нему и двум соединяемым им частям круглого оцинкованного стального молниеотвода испытательного аperiodического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии имеет место незначительное электротермическое повреждение наружных поверхностей стержней молниеотвода и внутренних поверхностей разъемных частей зажима в виде локальных прижогов диаметром до 5 мм с наличием в их области очагов сажи;

- активное сопротивление  $R_k$  в контактной зоне универсального оцинкованного стального зажима как до, так и после воздействия испытательного импульса тока искусственной молнии составляло около 1 мОм.

Необходимо отметить, что результаты испытаний на молниестойкость в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 с импульсами тока 10/350 мкс искусственной молнии амплитудой  $I_m$  в 50 кА ( $N$ - класс по [6]) и 100 кА ( $H$ - класс по [6]) всех остальных конфигураций и материалов жестко закрепляемых между собой частей молниеотводов и универсальных зажимов, указанных в начале раздела 4, свидетельствуют об их аналогичных локальных повреждениях в зоне универсального зажима и численных значениях  $R_k$ .

Следует заметить, что контроль активного сопротивления  $R_k$  в контактной зоне испытываемых металлических молниеотводов с универсальными металлическими зажимами проводился на постоянном токе до 200 мА с помощью метрологически поверенного французского измерителя сопротивления заземления типа СА6470N (рис. 12) как до протекания по ним от высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 соответствующих импульсов тока формы 10/350 мкс с заданными по [1-6] амплитудами  $I_m$  (см. рис. 8, 9 и данные табл. 1), так и сразу после их протекания.



Рис. 12. Общий вид момента измерения активного сопротивления  $R_k$  для медных молниеотводов в контактной зоне нержавеющей стального универсального зажима с помощью измерителя сопротивления заземления типа СА6470N

#### Выводы.

1. Проведенные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на генераторе импульсов тока искусственной молнии ГИТМ-10/350 испытания круглых металлических молниеотводов (диаметром 8 мм и длиной 0,8 м)

с двумя соединяемыми под прямым углом частями и плоскими металлическими универсальными зажимами специального профиля при центральном болтовом соединении их разъемных частей на молниестойкость к прямому воздействию на них аperiodических импульсов тока временной формы 10/350 мкс амплитудой  $I_m$  в 50 и 100 кА с нормированными по действующим зарубежным стандартам допусками показали, что все испытанные в сборе молниеотводы с изоляционными держателями и керамическими элементами «конька» крыши здания выдержали электродинамические и электротермические воздействия короткого удара искусственного грозового разряда.

2. При испытаниях значения АВП импульсов тока грозового разряда, интеграла действия тока искусственной линейной молнии или удельной энергии (с размерностью Дж/Ом)  $J_a$  и протекавшего по молниеотводам электрического заряда  $q_l$  соответствовали международным требованиям.

3. Активное сопротивление  $R_k$  в контактной зоне медного, оцинкованного стального и нержавеющей стального разъемных универсальных зажимов примененного профиля с центральным болтовым соединением их двух частей как до, так и после прямого воздействия для используемых  $N$ - и  $H$ - классов токового нагружения с АВП согласно действующих требований зарубежных стандартов на все испытанные молниеотводы с подобными зажимами оказывается равным примерно 1 мОм. Данный результат может свидетельствовать об отсутствии каких-либо механических нарушений в контактной зоне универсального зажима после прохождения по ней указанных токов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning.– Part 1: General principles».
2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning.– Part 2: Risk management».
3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning.– Part 3: Physical damage to structures and life hazard».
4. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning.– Part 4: Electrical and electronic systems within structures».
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. – 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 електроμηχανіка. – 2015. – №1. – С. 51-56.
8. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, кн. 1 / Под ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
9. Баранов М.И. Термическая стойкость неизолированных проводов при прямом ударе молнии // Технічна електродинаміка. – 1997. – №6. – С. 9-15.
10. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85.

11. MIL-STD-464A. Военный стандарт США «Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем». – Изд-во Минобороны, 2002. – С. 1-162.

12. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость металлической обшивки летательного аппарата к прямому воздействию импульсного тока молнии // *Электричество*. – 2012. – №12. – С. 18-26.

#### REFERENCES

1. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles».
2. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. Part 2: Risk management».
3. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard».
4. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures».
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]. 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. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravocnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, kn. 1* [Electrical Engineering Handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, book 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 880 p. (Rus).
9. Baranov M.I. Thermal stability bare wires for direct lightning strikes. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 1997, no.6, pp. 9-15. (Rus).
10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskyi 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. MIL-STD-464A. Voennyj standart USA. «Elektromagnitnye i ekologicheskie efekty vozdeystviya molnii. Trebovanija interfejsa i kriterii proverki sistem» [USA military standard. Electromagnetic and ecological effects of lightning. Requirements interface and testing criteria systems]. Ministry of Defense Publ., 2002, pp. 1-162. (Rus).
12. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance of the metal skin of an aircraft to the direct effects of lightning impulse current. *Elektrichestvo – Electricity*, 2012, no.12, pp. 18-26. (Rus).

Поступила (received) 23.02.2015

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., г.л.н.с.,  
Колушко Георгий Михайлович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.,  
Кузьминский Евгений Викторович<sup>2</sup>, коммерческий директор,  
Мысьюк Юрий Игоревич<sup>3</sup>, директор,  
Рудаков Сергей Валерьевич<sup>4</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> НИПК «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> ООО «ЕФ-ЕР-ТИ-ГРУП».  
02660, Киев, ул. Магнитогорская, 1, оф. 316,  
тел/phone +38 050 9167205, e-mail: e.kuzminskiy@gmail.com

<sup>3</sup> ООО «ГРОМОВИК»,  
79066, Львов, ул. Кавалеридзе, 17, кв. 9,  
тел/phone +38 067 9234645, e-mail: gromovyklviv@gmail.com

<sup>4</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>, G.M. Koliushko<sup>1</sup>, E.V. Kuzminskiy<sup>2</sup>,  
Yu.I. Mysyuk<sup>3</sup>, S.V. Rudakov<sup>4</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> Company Limited Liability «EF-EP-TI-GRUP»,  
1, Magnitogorskaya Str., office 316, Kiev, 02660, Ukraine.

<sup>3</sup> Company Limited Liability «GROMOVIK»,  
17, Kavaleridze Str., ap. 9, Lviv, 79066, Ukraine.

<sup>4</sup> National University of Civil Protection of Ukraine,  
94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

#### Results of tests of lightning-rods with universal clamps by the aperiodic impulses of current of artificial lightning with the peak-temporal parameters rationed on foreign standards.

**Purpose.** Test in obedience to the requirements of row of operating foreign standards of round metallic lightning-rods with the flat metallic universal clamps of the special type on firmness to direct action of aperiodic impulses of current of temporal form 10/350  $\mu$ s by amplitude of 50 kA (N– class) and 100 kA (H– class). **Methodology.** The order of leadthrough of these tests is certain the followings normative documents: International IEC 62305-1: 2010, Russian national GOST R IEC 62305-1-2010 and German national DIN EN 50164-1:2008 Standards. **Results.** Conducted on a powerful high-voltage pulsed current of artificial linear lightning with the peak-temporal parameters and admittances of test rationed on the indicated foreign standards rationed that all of the lightning-rods tested in collection with universal clamps, isolating holders and ceramic elements of roof of technical building were survive electrodynamic and electrothermal action of in-use single short blow of an artificial storm digit. **Originality.** First in domestic practice the similar model tests of lightning-rods are conducted with universal clamps, executed from different explorer materials, on firmness to flowing to on by it the indicated large impulsive currents of artificial lightning. **Practical value.** Real firmness to lightning of round copper and zincked steel lightning-rods is certain with the flat copper, zincked steel and non-rusting steel universal clamps of the special execution. References 12, table 1, figures 12.

**Key words:** metallic lightning-rods with metallic universal clamps, generator of aperiodic impulses of current of artificial lightning, test on firmness to lightning.