

М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, С.В. Рудаков

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В УКРАИНЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ, АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Викладено сучасне положення інструментального забезпечення в Україні натурних випробувань об'єктів промислової енергетики, авіаційної і ракетно-космічної техніки на стійкість до прямої (непрямої) дії на них імпульсного струму штучної блискавки. Показано, що подібні випробування технічних об'єктів на блискавкостійкість можуть проводитися в польових умовах на унікальному вітчизняному високовольтному сильнострумному електроустановці відповідно до вимог нормативних документів США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013 і міжнародного стандарту IEC 62305-1: 2010. Описані основні технічні характеристики розроблених і створених в Україні для цілей натурних випробувань відмічених вище технічних об'єктів на блискавкостійкість двох потужних високовольтних генераторів струму блискавки (ГСБ) типу УИТОМ-1 і ГТМ-10/350, відтворюючих на випробовуваних об'єктах імпульси струму штучної блискавки з нормованими амплітудно-часовими параметрами згідно вказаних технічних документів. Приведені приклади і вказані результати натурних випробувань на описаних ГСБ деяких пристроїв технічних об'єктів на стійкість до прямої дії на них імпульсного струму штучної блискавки. Бібл. 20, табл. 2, рис. 15.

Ключові слова: вітчизняні потужні високовольтні сильнострумні генератори струму блискавки, об'єкти енергетики, авіаційної і ракетно-космічної техніки, результати натурних випробувань деяких технічних об'єктів на стійкість до прямої дії імпульсного струму штучної блискавки.

Изложено современное состояние инструментального обеспечения в Украине натурных испытаний объектов промышленной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к прямому (косвенному) воздействию на них импульсного тока искусственной молнии. Показано, что подобные испытания технических объектов на молниестойкость могут проводиться в полевых условиях на уникальном отечественном высоковольтном сильноточном электрооборудовании в соответствии с требованиями нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013 и международного стандарта IEC 62305-1: 2010. Описаны основные технические характеристики разработанных и созданных в Украине для целей натурных испытаний отмеченных выше технических объектов на молниестойкость двух мощных высоковольтных генераторов тока молнии (ГТМ) типа УИТОМ-1 и ГТМ-10/350, воспроизводящих на испытываемых объектах импульсы тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами согласно указанных технических документов. Приведены примеры и указаны результаты натурных испытаний на описанных ГТМ некоторых устройств технических объектов на стойкость к прямому воздействию на них импульсного тока искусственной молнии. Библ. 20, табл. 2, рис. 15.

Ключевые слова: отечественные мощные высоковольтные сильноточные генераторы тока молнии, объекты энергетики, авиационной и ракетно-космической техники, результаты натурных испытаний некоторых технических объектов на стойкость к прямому действию импульсного тока искусственной молнии.

Введение. Технический прогресс в современном обществе объективно приводит к усложнению используемой людьми разнообразной техники и активному применению в ней слаботочной электроники, чувствительной к действию на нее внешних мощных электромагнитных помех (МЭМП) [1]. Одним из источников таких МЭМП является длинный искровой разряд в воздушной атмосфере Земли грозового облака (молния) в землю, соседнее облако, защищаемый летательный аппарат или наземный объект [2-4]. Частота таких разрядов в земной тропосфере численно составляет в среднем около 100 с^{-1} [2, 3]. Накопленный в грозовом облаке за счет процессов биполярной электризации в теплых восходящих воздушных потоках его мелкодисперсных включений (например, мелких капель и паров воды, мелких твердых диэлектрических частиц, мелких гранул и кристаллов льда [5, 6]) суммарный электрический заряд величины $\pm(50-200)$ Кл при указанном разряде грозового облака вызывает протекание в его плазменном канале мощного импульсного тока сложной временной формы амплитудой до $\pm(30-200)$ кА [2, 3]. Так, руководящие технические документы США SAE ARP 5412: 2013 [7] и SAE ARP 5416: 2013 [8] определяют требования к нормированным амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока искусственной молнии,

генерируемых мощными высоковольтными генераторами тока молнии (ГТМ) и используемых при натурных испытаниях объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость. Международный стандарт IEC 62305-1: 2010 [9] регламентирует действующие требования к нормированным АВП генерируемого мощным высоковольтным ГТМ аperiodического импульса тока искусственной молнии временной формы 10/350 мкс, характерного для короткого грозового удара в защищаемый наземный объект и применяемого при натурных испытаниях многих объектов промышленной энергетики на молниестойкость. Разработка, создание и практическое применение указанных ГТМ являются актуальными в мире задачами.

Целью статьи является изложение и анализ современного состояния инструментального обеспечения в Украине испытаний объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к действию импульсного тока искусственной молнии.

1. Общие сведения и основные АВП для импульсного тока искусственной молнии. Согласно [10] при анализе рассматриваемых нами научно-технических задач понятие «стойкости» объекта к молнии включает в себя следующие три определения:

© М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, С.В. Рудаков

- «электромагнитную стойкость» объекта, под которой понимается способность исследуемого объекта противостоять действию наведенных от протекания импульсного тока линейной молнии в электрических цепях его составных элементов импульсных напряжений и токов до их определенного уровня с сохранением своего работоспособного состояния;

- «электротермическую стойкость» объекта, под которой понимается способность исследуемого объекта противостоять действию возникающей в динамическом режиме от протекания тока линейной молнии температуры нагрева материалов его конструктивных элементов до ее определенного уровня с сохранением своего работоспособного состояния;

- «электромеханическую стойкость» объекта, под которой понимается способность исследуемого объекта противостоять динамическому действию возникающих от протекания тока линейной молнии механических напряжений в материалах его конструктивных элементов до их определенного уровня с сохранением своего работоспособного состояния.

В этой связи при проведении мощных высоковольтных силовоточных ГТМ соответствующих комплексных испытаний технических объектов на молниестойкость приходится с соблюдением всех технических требований нормативных документов [7-9] для вынесения по результатам данных испытаний мотивированного заключения определять их указанные выше стойкости. Иногда программой и методикой испытаний технических объектов на молниестойкость бригада испытателей может ограничиваться и опытным определением их наиболее критичной стойкости к действию тока искусственной молнии с заданными нормированными АВП [10]. Как правило, испытания на молниестойкость технических объектов согласно [7-9] проводятся путем прямого воздействия плазменного канала имитированного грозового разряда на испытываемые элементы объекта. Возможны и испытания объектов путем косвенного воздействия указанного канала разряда на элементы объекта, размещенного вблизи прохождения молнии.

Согласно действующих технических требований [7, 8] при испытаниях устройств авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость могут использоваться следующие компоненты тока искусственной молнии, генерируемые в высоковольтных силовоточных цепях ГТМ: импульсная *A*- (или повторная импульсная *D*-), промежуточная *B*- и длительная *C*- (или укороченная длительная *C*^{*}-) компоненты тока искусственной молнии. В практике испытаний на молниестойкость различных устройств и систем самолетов гражданского и военного назначения наиболее часто применяются следующие комбинации указанных компонент тока молнии [7, 8, 11]: *A*- , *B*- и *C*- компоненты; *A*- , *B*- и *C*^{*}- компоненты; *D*- , *B*- и *C*^{*}- компоненты. Основные нормированные по [7, 8] АВП, характерные для таких компонент тока искусственной молнии в цепях ГТМ, сведены ниже в табл. 1.

Из данных табл. 1 и практики испытаний технических объектов на молниестойкость следует, что значения I_m и τ_f определяют электромагнитную и электромеханическую стойкости испытываемых элементов объекта в условиях воздействия на них рас-

сматриваемых компонент тока искусственной молнии. В тоже время значения q_0 , τ_p и J_a определяют тепловую энергию, выделяющуюся на испытываемом элементе технического объекта, и соответственно его электротермическую стойкость току молнии. Видно, что импульсная *A*- компонента и длительная *C*- компонента тока молнии являются основными составляющими в составе полного тока грозового разряда. Именно от них зависит молниестойкость объекта, испытываемого в разрядных цепях мощного ГТМ. Следует заметить, что при практической реализации мощного ГТМ на основе высоковольтных емкостных накопителей энергии (конденсаторных батарей) каждая из указанных в табл. 1 компонент тока искусственной молнии формируется на электрической нагрузке испытываемого элемента объекта отдельными конденсаторными батареями различной энергоемкости, имеющими различные зарядные напряжения. В этой связи задача синхронизации работы таких батарей в составе одного ГТМ выступает на первый план.

Таблица 1
Нормированные АВП основных компонент тока искусственной молнии [7, 8]

Компонента тока молнии	I_m , кА	I_c , кА	q_0 , Кл	J_a , 10 ⁶ Дж/Ом	τ_f , мкс	τ_p , мс
<i>A</i>	200±20	–	–	2±0,4	≤50	≤0,5
<i>B</i>	–	2±0,4	10±1	–	–	5±0,5
<i>C</i>	0,2÷0,8	–	200±40	–	–	(0,25÷1)·10 ³
<i>C</i> [*]	–	0,4	6÷18	–	–	15÷45
<i>D</i>	100±10	–	–	0,25±0,05	≤25	≤0,5

Примечание. I_m – амплитуда импульса тока; I_c – среднее значение тока; q_0 – количество протекшего заряда; J_a – интеграл действия импульса тока; τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта импульса между уровнями (0,1-0,9) I_m и импульса тока на уровне ≤0,1 I_m .

В соответствии с требованиями действующих стандартов [9, 12] объекты энергетики на молниестойкость испытываются аperiodическим импульсом тока временной формы 10/350 мкс обеих полярностей, генерируемым специальным мощным ГТМ. Нормированные АВП данного испытательного импульса тока искусственной молнии, соответствующего короткому удару грозового разряда в защищаемый технический объект, приведены в табл. 2.

Таблица 2
Нормированные АВП аperiodического импульса тока временной формы 10/350 мкс [9, 12]

Наименование параметра импульса тока	Уровень молниезащиты объекта по стандарту IEC 62305-1: 2010		
	I	II	III-IV
Длительность фронта τ_f , мкс	10±2	10±2	10±2
Длительность импульса на полупаде τ_p (на уровне 0,5 I_m), мкс	350±35	350±35	350±35
Амплитуда тока I_m , кА	200±20	150±15	100±10
Интеграл действия J_a , 10 ⁶ Дж/Ом	10±3,5	5,6±1,96	2,5±0,875
Заряд q_0 , Кл	100±20	75±15	50±10

Из данных табл. 1 и 2 следует, что испытательный импульс тока 10/350 мкс по энергетическим показателям (прежде всего по значению интеграла его действия J_a) существенно превышает соответствующие показатели для импульсной A - и повторной импульсной D - компонент тока искусственной молнии, применяемых при испытаниях летательных аппаратов на молниестойкость. Так, для I уровня молниезащиты наземного объекта при одних и тех же значениях амплитуды тока $I_m = \pm(200 \pm 20)$ кА это отличие применительно к импульсной A - компоненте полного тока искусственной молнии составляет для интеграла действия тока J_a в пределах пяти раз.

В этой связи испытания технических объектов на молниестойкость с применением вместо импульсной A -компоненты тока искусственной молнии апериодического импульса тока временной формы 10/350 мкс (случай короткого удара грозового разряда по [9, 12]) следует считать как более жесткие по сравнению с их испытаниями на молниестойкость согласно только требований [7, 8]. При этом не следует упускать из виду сильное электротермическое действие на металлические и композиционные элементы испытываемого объекта длительной C - компоненты тока искусственной молнии по [7, 8], переносимой через свою круглую опорную зону на объекте сравнительно небольшого наружного диаметра (до 6 мм [10]) огромные значения электрического заряда q_0 (до ± 200 Кл).

2. Генератор тока искусственной молнии типа УИТОМ-1. В 2007 г. сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» на его экспериментальном полигоне (с. Андреевка, Харьковской обл.) был создан уникальный мощный высоковольтный сильноточный ГТМ типа УИТОМ-1 [11], способный в полевых условиях проводить испытания объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость в соответствии с жесткими требованиями [7, 8]. Общий вид данного ГТМ приведен на рис. 1, а его принципиальная электрическая схема – на рис. 2. Из данной схемы видно, что мощный генератор типа УИТОМ-1 в своем составе содержит пять отдельных высоковольтных генераторов импульсного тока (ГИТ), формирующих на общей электрической (как правило, активно-индуктивной) нагрузке требуемые нормированные компоненты тока искусственной молнии. При этом виды компонент тока определяют название этих генераторов: ГИТ- A , ГИТ- B , ГИТ- D , ГИТ- C и ГИТ- C^* .

Использование электрических переключателей в схеме на рис. 2 позволяет получать на общей нагрузке (ОИ) требуемую по [7, 8] комбинацию рассматриваемых токовых компонент. Генераторы ГИТ- A и ГИТ- D укомплектованы параллельно подключенными высоковольтными малоиндуктивными конденсаторами типа ИК-50-3 (номинальное напряжение ± 50 кВ; номинальная емкость 3 мкФ) соответственно в количестве 111 и 36 шт. При этом ГИТ- A характеризуется номинальной запасаемой энергией 416 кДж, а ГИТ- D – 135 кДж. Генераторы ГИТ- B , ГИТ- C и ГИТ- C^* укомплектованы параллельно подсоединенными высоковольтными малоиндуктивными конденсаторами типа ИМ-5-140 (номинальное напряжение ± 5 кВ; номинальная емкость 140 мкФ) в количестве 18, 324 и 34 шт. соответственно.



Рис. 1. Общий вид мощного высоковольтного сильноточного генератора тока искусственной молнии типа УИТОМ-1 (на переднем плане находится рабочий стол с высоковольтным трехэлектродным воздушным управляемым коммутатором со стальными электродами на напряжение ± 50 кВ и импульсный синусоидальный ток молнии амплитудой до ± 220 кА, испытываемым образцом обшивки летательного аппарата и системой воздушной вытяжки, а на заднем плане – отдельные высоковольтные генераторы импульсных токов для соответствующих компонент тока A , B , C , C^* и D) [11]

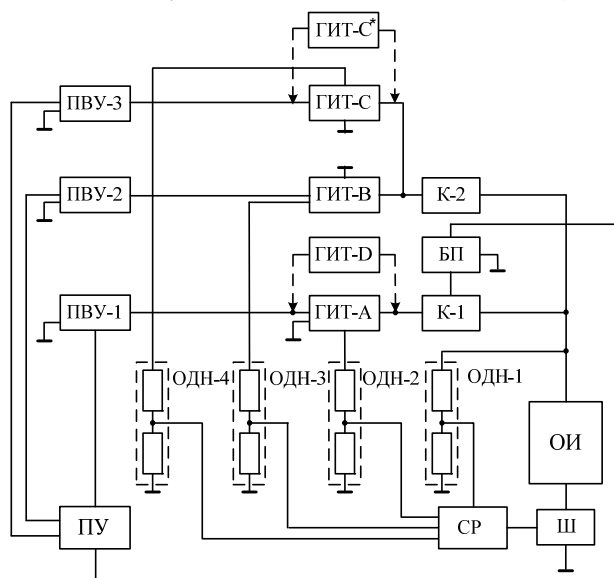


Рис. 2. Принципиальная блочная электрическая схема построения мощного генератора тока искусственной молнии типа УИТОМ-1, содержащего отдельные генераторы импульсного тока ГИТ- A , ГИТ- B , ГИТ- D , ГИТ- C и ГИТ- C^* (К-1, К-2 – высоковольтные воздушные коммутаторы на ± 50 и ± 5 кВ; БП – блок поджига на ± 100 кВ; ПВУ-1, ПВУ-2 и ПВУ-3 – повысительно-выпрямительные устройства для заряда высоковольтных конденсаторов генераторов ГИТ- A , ГИТ- B , ГИТ- D , ГИТ- C и ГИТ- C^* ; ПУ – пульт управления; ОДН-1, ОДН-2, ОДН-3 и ОДН-4 – омические делители напряжения для измерения напряжения на конденсаторах генераторов ГИТ- A , ГИТ- B , ГИТ- D , ГИТ- C и ГИТ- C^* ; СР – система регистрации измеряемых напряжений и токов в цепях генераторов ГИТ- A , ГИТ- B , ГИТ- D , ГИТ- C и ГИТ- C^* ; Ш – измерительный шунт; ОИ – объект испытаний) [11]

В этой связи они имеют номинальную энергоемкость 31,5, 567 и 59,5 кДж. В итоге номинальная энергоемкость мощного ГТМ типа УИТОМ-1 составляет примерно 1,21 МДж [11]. Каждый конденсатор гене-

раторов ГИТ-А, ГИТ-В, ГИТ-Д, ГИТ-С и ГИТ-С* (при их общем количестве в 523 шт.) от аварийных режимов работы указанных конденсаторных батарей (например, электрической пробой изоляции одного из конденсаторов на стадии заряда или разряда) снабжен защитным устройством, установленном на его высоковольтном выводе и выполненном из нескольких параллельно подсоединенных защитных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом 24 или 100 Ом [13].

Коммутация в силовых разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-Д осуществляется управляемым высоковольтным воздушным трехэлектродным разрядником каскадного типа К-1 (см. рис. 2) на номинальное напряжение ± 50 кВ [11, 14]. Данный разрядник управляется путем подачи на его средний электрод высоковольтного микросекундного импульса напряжения затухающей синусоидальной формы амплитудой до ± 100 кВ от специального пускового генератора типа ГВПИ-100 (БП на рис. 2). Для коммутации силовых разрядных цепей генераторов ГИТ-В, ГИТ-С и ГИТ-С* используется высоковольтный воздушный двухэлектродный разрядник К-2 (см. рис. 2) на напряжение ± 5 кВ, прямоугольные электроды которого выполнены из эрозийноустойчивых графитовых щеток от мощной электрической машины [11, 14]. Разрядник К-2 срабатывает от пускового импульса напряжения, подаваемого от БП на разрядник К-1.

Измерение АВП формируемых А-, D-, В-, С- и С*-компонент тока искусственной молнии выполняется одновременно при помощи одного специального силовоточного шунта (Ш) типа ШК-300, прошедшего государственную метрологическую аттестацию [11, 15]. ГТМ типа УИТОМ-1 укомплектован несколькими такими измерительными шунтами, имеющими различные коэффициенты преобразования S_p . Так, для измерения АВП А- и D- компонент тока искусственной молнии применяются шунты, имеющие данные коэффициенты примерно равными $S_{iA} \approx 11,26 \cdot 10^3$ А/В и $S_{iD} \approx 25 \cdot 10^3$ А/В. При измерении АВП В-, С- и С*-компонент тока искусственной молнии используются те же шунты, но с коэффициентами преобразования, составляющими $S_{iC} \approx 5,64 \cdot 10^3$ А/В и $S_{iC^*} \approx 12,5 \cdot 10^3$ А/В.

На рис. 3 и 4 приведены типичные осциллограммы импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП, зарегистрированные в силовоточных разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С мощного ГТМ типа УИТОМ-1 с помощью указанных выше измерительных шунтов и цифровых запоминающих осциллографов серии Tektronix TDS 1012, размещенных вдали от данного ГТМ в заглубленном измерительном бункере.

Отметим, что при получении приведенных на рис. 3 и 4 токовых осциллограмм зарядное напряжение конденсаторов в мощном высоковольтном генераторе ГИТ-А составляло примерно $U_{3A} \approx 29,7$ кВ, а в мощном высоковольтном генераторе ГИТ-С – $U_{3C} \approx 4$ кВ. Сосредоточенная активно-индуктивная нагрузка в этом экспериментальном случае имела следующие электрические параметры: активное сопротивление около 0,1 Ом, а индуктивность примерно 1 мкГн [10].

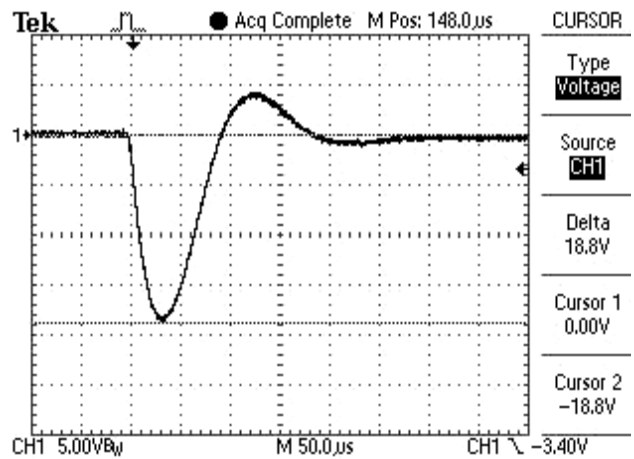


Рис. 3. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А мощного отечественного ГТМ типа УИТОМ-1 ($U_{3A} \approx 29,7$ кВ; $I_{mA} \approx 212$ кА; $J_{aA} \approx 2,09 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $\tau_f \approx 32$ мкс; $\tau_p \approx 500$ мкс; масштаб по вертикали – 56,3 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление)

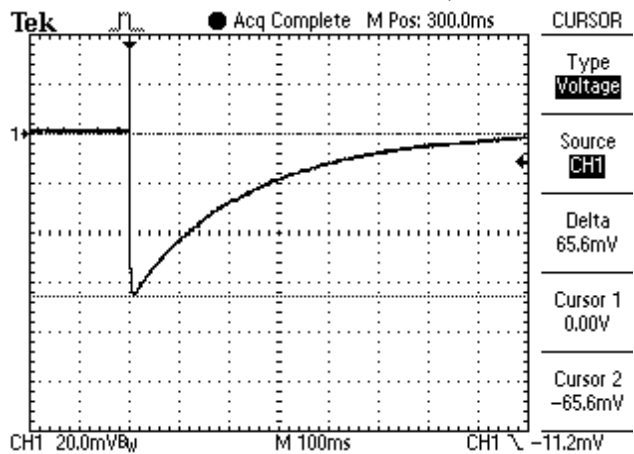


Рис. 4. Осциллограмма длительной С-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-С* мощного ГТМ типа УИТОМ-1 ($U_{3C} \approx 4$ кВ; $I_{mC} \approx 738$ А; $q_{0C} \approx 182$ Кл; $\tau_f \approx 9$ мс; $\tau_p \approx 1000$ мс; масштаб по вертикали – 225 А/деление; масштаб по горизонтали – 100 мс/деление)

2.1. Некоторые примеры и результаты натурных испытаний технических объектов на мощном ГТМ типа УИТОМ-1. На рис. 5 и 6 показаны результаты прямого действия на опытную модель приемно-передающей антенны самолета отечественного производства импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, нормированные по [7, 8] АВП которой соответствовали данным, указанным на рис. 3 ($I_{mA} \approx 212$ кА; $J_{aA} \approx 2,09 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $\tau_f \approx 32$ мкс; $\tau_p \approx 500$ мкс).

Из экспериментальных данных рис. 5 и 6 следует, что разработанная и созданная без учета требований по молниезащите опытная модель приемно-передающей антенны авиационной техники натурных испытаний согласно нормативных документов США SAE ARP 5416: 2013 [7] и SAE ARP 5416: 2013 [8] не выдержала: была разрушена и выведена из строя [10].

На рис. 7 приведены результаты прямого одновременного воздействия в силовоточных разрядных цепях ГТМ типа УИТОМ-1 на опытный листовой образец

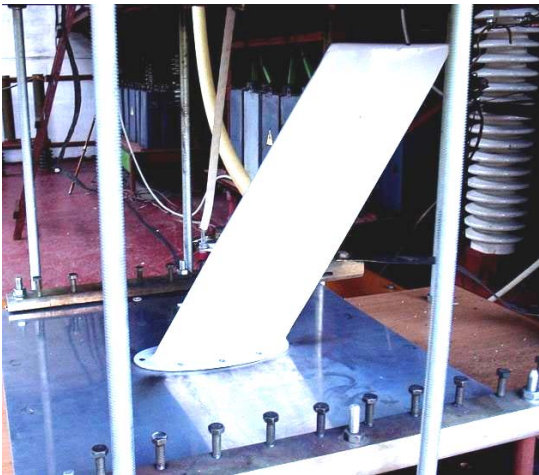


Рис. 5. Внешний вид опытной модели авиационной приемно-передающей антенны до прямого воздействия на нее в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А мощного ГТМ типа УИТОМ-1 импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии с нормированными по [7, 8] АВП [10]

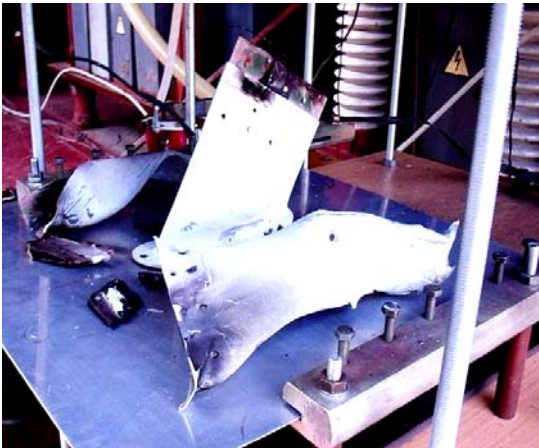


Рис. 6. Внешний вид опытной модели авиационной приемно-передающей антенны после прямого воздействия на нее в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А мощного ГТМ типа УИТОМ-1 импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии с нормированными по [7, 8] АВП [10]

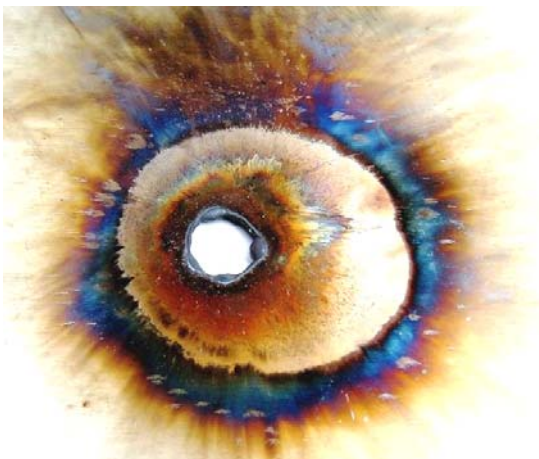


Рис. 7. Общий вид зоны поражения в опытном листовом образце из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мм от прямого одновременного воздействия на него импульсной *A*-компоненты ($I_{mA} \approx 192$ кА; $J_{aA} \approx 1,9 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $\tau \approx 34$ мкс; $\tau_p \approx 500$ мкс) и длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии ($I_{mC} \approx 804$ А; $q_{0C} \approx 165$ Кл; $\tau \approx 9$ мс; $\tau_p \approx 448$ мс), формируемых в сильноточных разрядных цепях мощного высоковольтного ГТМ типа УИТОМ-1 [16]

кровли технического сооружения из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мм нормированных по [7, 8] вначале импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии ($I_{mA} \approx 192$ кА; $J_{aA} \approx 1,9 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $\tau \approx 34$ мкс; $\tau_p \approx 500$ мкс) и сразу за ней длительной *C*-компоненты тока имитированного грозового разряда ($I_{mC} \approx 804$ А; $q_{0C} \approx 165$ Кл; $\tau \approx 9$ мс; $\tau_p \approx 448$ мс).

Из данных рис. 7 видно, что при указанном токовом нагружении опытного стального листового образца происходит его округлое сквозное проплавление диаметром до 12 мм, обусловленное электротермическим действием используемой в эксперименте длительной *C*-компоненты тока имитированного грозового разряда [16, 17]. Из-за действия на рассматриваемый опытный образец из указанной нержавеющей стали импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии в округлой зоне диаметром до 58 мм наступает его поверхностное оплавление (на глубину до 50 мкм) с характерными цветами побежалости [16, 17].

На рис. 8 представлены результаты поражающего воздействия импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии с нормированными по [7, 8] АВП, указанными на рис. 3 ($I_{mA} \approx 212$ кА; $J_{aA} \approx 2,09 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $\tau \approx 32$ мкс; $\tau_p \approx 500$ мкс), на опытный листовый образец композиционной обшивки самолета толщиной 3 мм и размером в плане 500×500 мм. В этом случае многослойный композит испытываемого образца в своем составе имел стеклопластик с эпоксидной матрицей, углепластик с эпоксифенольной матрицей и несколько тонких планарных металлических сеточек, выполняющих роль упрочнителя исследуемого композиционного материала [10, 18]. Видно, что рассматриваемого воздействия плазменного канала искусственной молнии данный образец не выдерживает.



Рис. 8. Общий вид зоны повреждения диаметром до 100 мм со сквозным прожогом в опытном листовом образце толщиной 3 мм композиционной обшивки самолета, испытываемого в сильноточной цепи мощного ГТМ типа УИТОМ-1, при прямом воздействии на него нормированной по [7, 8] импульсной *A*-компоненты тока искусственной молнии [10]

3. Генератор тока искусственной молнии типа ГТМ-10/350. В 2014 г. на указанном в разделе 2 экспериментальном полигоне НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был создан уникальный мощный высоковольтный сильноточный генератор тока короткого удара грозового разряда типа ГТМ-10/350 [19], на

котором в полевых условиях могут проводиться натурные испытания наземных объектов промышленной энергетики на молниестойкость в соответствии с жесткими требованиями [9, 12]. Общий вид этого ГТМ приведен на рис. 9, а на рис. 10 представлена его принципиальная электрическая схема. Видно, что в состав указанного ГТМ входят четыре мощных высоковольтных генератора импульсных токов: ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4. Генераторы ГИТ-1 – ГИТ-3 укомплектованы высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИК-50-3 (номинальное напряжение ± 50 кВ; номинальная емкость 3 мкФ), а генератор ГИТ-4 – высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИМ2-5-140 (номинальное напряжение ± 5 кВ; номинальная емкость 140 мкФ) [19]. В генераторах ГИТ-1 – ГИТ-3 их конденсаторы (соответственно в количестве 16, 44 и 111 шт.) включены параллельно на номинальное напряжение ± 50 кВ, а в генераторе конденсаторы ГИТ-4 (288 шт.) – последовательно-параллельно (по два последовательно соединенных конденсатора в каждой из 144 параллельно включенных секций) на номинальное напряжение ± 10 кВ. В этой связи номинальная энергоемкость для указанных генераторов составляет для: ГИТ-1 – 60 кДж; ГИТ-2 – 165 кДж; ГИТ-3 – 416 кДж; ГИТ-4 – 504 кДж. В результате суммарная номинальная энергоемкость мощного генератора тока искусственной молнии типа ГТМ-10/350 оказывается примерно равной 1,15 МДж [19]. Сосредоточенные емкости $C1 – C4$ для генераторов ГИТ-1 – ГИТ-4 составляют соответственно (см. рис. 10) 48, 132, 333 и 10080 мкФ. Собственные активные сопротивления $R1 – R4$ низкоомных разрядных цепей для данных генераторов примерно равны соответственно 375, 136, 57 и 83 мОм. Собственные индуктивности $L1 – L4$ для низкоиндуктивных разрядных цепей указанных генераторов ГИТ-1 – ГИТ-4 соответственно составляют около 1, 1,3, 2,5 и 1,5 мкГн. Формирующие индуктивности $L31$ и $L41$ (см. рис. 10) выбраны примерно равными 40 и 7 мкГн.



Рис. 9. Общий вид мощного высоковольтного сильноточного генератора тока искусственной молнии типа ГТМ-10/350 (на переднем плане находится его рабочий стол с размещенным сверху на нем управляемым высоковольтным трехэлектродным воздушным коммутатором с графитовыми электродами на напряжение ± 50 кВ и импульсный аперидический ток молнии амплитудой до ± 220 кА и испытываемым образцом кабельно-проводниковой продукции, а на заднем плане – электротехнические элементы зарядно-разрядных цепей его отдельных высоковольтных генераторов импульсных токов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 и ГИТ-4) [19]

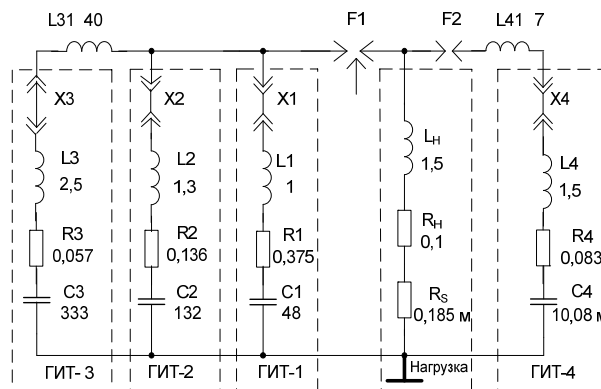


Рис. 10. Принципиальная электрическая схема замещения сильноточных разрядных цепей четырех отдельных высоковольтных генераторов ГИТ-1 – ГИТ-4 в составе мощного генератора импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии типа ГТМ-10/350 ($X1–X4$ – токопроводящие перемычки разрядных цепей генераторов ГИТ-1 – ГИТ-4) [19]

Активно-индуктивная нагрузка в схеме на рис. 10 содержит сосредоточенное активное сопротивление $R_n \approx 0,1$ Ом и сосредоточенную индуктивность $L_n \approx 1,5$ мкГн. Последовательно с электрическими параметрами нагрузки включено собственное активное сопротивление R_s измерительного шунта типа ШК-300, численно составляющее около 0,185 мОм [11, 15]. Такое значение R_s практически не влияет на электромагнитные процессы в разрядных цепях ГТМ и электрических цепях испытываемого наземного объекта.

Коммутация сильноточных разрядных цепей генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3 в составе мощного генератора тока короткого грозового удара типа ГТМ-10/350 осуществляется специально созданным для этих целей трехэлектродным воздушным управляемым коммутатором с графитовыми электродами (рис. 11) [19].

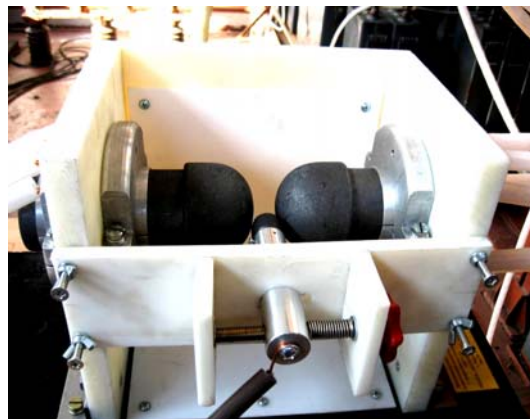


Рис. 11. Внешний вид высоковольтного трехэлектродного воздушного управляемого коммутатора $F1$ с графитовыми электродами на номинальное постоянное напряжение ± 50 кВ и импульсный ток искусственной молнии временной формы 10/350 мкс амплитудой до ± 220 кА в цепи ГТМ [19]

Что касается коммутации разрядной цепи генератора ГИТ-4, то выполняется она с помощью двухэлектродного воздушного коммутатора $F2$ с графитовыми электродами на номинальное напряжение ± 10 кВ и импульсный ток до ± 100 кА. Запускается коммутатор $F2$ импульсным перенапряжением, возникающим на электрической нагрузке при срабатывании коммутатора $F1$ и начале протекания в ней импульсного разрядного тока от генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3.

На рис. 12 приведена осциллограмма полученного в разрядной цепи генератора ГТМ-10/350 с низкоомной активно-индуктивной нагрузкой ($R_H \approx 0,1 \text{ Ом}$; $L_H \approx 1,5 \text{ мкГн}$) апериодического импульса тока искусственной молнии с нормированными по [9, 12] АВП.

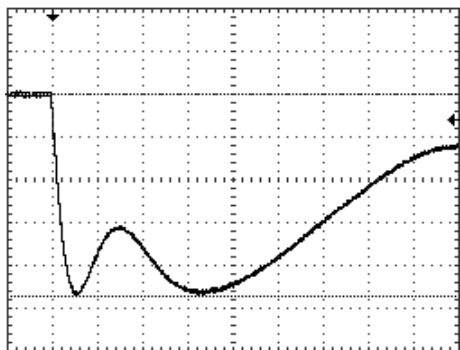


Рис. 12. Осциллограмма апериодического импульса тока временной формы 15/340 мкс в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора тока искусственной молнии типа ГТМ-10/350 с низкоомной RL -нагрузкой ($U_{C1-3} \approx 15 \text{ кВ}$; $U_{C4} \approx 2,25 \text{ кВ}$; $I_m \approx 106 \text{ кА}$; $J_a \approx 3,03 \cdot 10^6 \text{ Дж/Ом}$; $q_0 \approx 52,2 \text{ Кл}$; $\tau_f \approx 15 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 340 \text{ мкс}$; $R_H \approx 0,1 \text{ Ом}$; $L_H \approx 1,5 \text{ мкГн}$; масштаб по вертикали – 22,52 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление) [19]

Зарядное напряжение U_{C1-3} отрицательной полярности всех конденсаторов для генераторов ГИТ-1 – ГИТ-3 в этом случае составляло около 15 кВ, а зарядное напряжение U_{C4} той же полярности отдельных конденсаторов для генератора ГИТ-4 – около 2,25 кВ.

3.1. Некоторые примеры и результаты натуральных испытаний объектов энергетики на мощном генераторе тока искусственной молнии типа ГТМ-10/350. На рис. 13 показан рабочий стол генератора типа ГТМ-10/350 с подготовленным по требованиям [9, 12] до испытаний на электротермическую стойкость к прямому действию импульса тока искусственной молнии 10/350 мкс опытным образцом радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 с поясной полиэтиленовой изоляцией (ПЭТ), имеющего расщепленную медную жилу сечением $S \approx 3,2 \text{ мм}^2$.

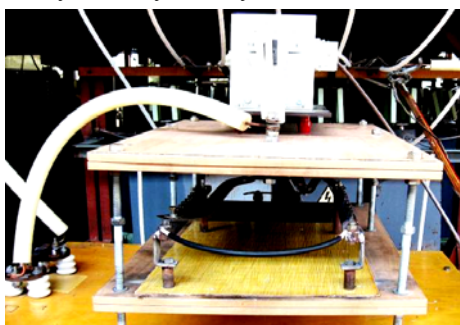


Рис. 13. Внешний вид рабочего стола генератора тока искусственной молнии типа ГТМ-10/350 с закрепленной на его стальных электродах расщепленной круглой медной жилы сечением $3,2 \text{ мм}^2$ и длиной 0,5 м радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией и его «заглушенной» наружной медной оплеткой до воздействия на него апериодического импульса тока 17/310 мкс грозового разряда амплитудой $\sim 82,9 \text{ кА}$ [20]

Прямого воздействия в сильноточной разрядной цепи мощного генератора типа ГТМ-10/350 апериодического импульса тока 17/310 мкс ($I_m \approx 82,9 \text{ кА}$; $J_a \approx 1,59 \cdot 10^6$

Дж/Ом; $q_0 \approx 36,3 \text{ Кл}$; $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 310 \text{ мкс}$) на свою медную жилу данный кабель не выдержал. При плотности тока в медной жиле около $\delta_m \approx I_m/S \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$ произошел ее электрический взрыв (ЭВ), приведший к разрушению кабеля и его выходу из строя.

На рис. 14 приведена наглядная демонстрация явления ЭВ сплошной алюминиевой жилы сечением 6 мм^2 сетевого провода марки АППВнг2×6 с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией, наступившего при подаче на нее в разрядной цепи мощного генератора типа ГТМ-10/350 апериодического импульса тока временной формы 17/265 мкс положительной полярности ($I_m \approx 83,8 \text{ кА}$; $J_a \approx 1,41 \cdot 10^6 \text{ Дж/Ом}$; $q_0 \approx 31,7 \text{ Кл}$; $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 265 \text{ мкс}$) [20]. Укажем, что плотность тока в алюминиевой жиле провода при этом составляла $\delta_m \approx I_m/S \approx 14 \text{ кА/мм}^2$. На рис. 15 представлена осциллограмма этого испытательного импульса тока короткого удара грозового разряда. Из сравнения данных рис. 12 и 15 следует, что протекающие при испытаниях на молниестойкость согласно требований [9, 12] электрофизические процессы в элементах испытываемого объекта могут существенно деформировать прежде всего спадающую часть импульса тока искусственной молнии. Особенно явно это проявляется при ЭВ токопроводящих элементов объекта, прерывающих протекание в нем импульса тока имитированного грозового разряда от генератора типа ГТМ-10/350.

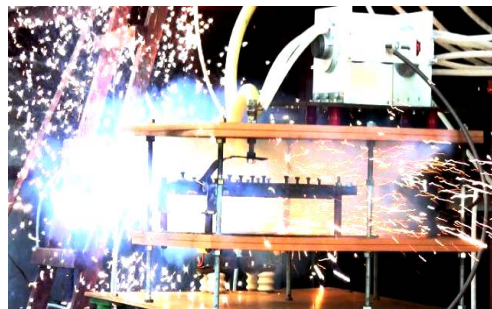


Рис. 14. Общий вид явления ЭВ сплошной круглой алюминиевой жилы сечением 6 мм^2 сетевого провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора типа ГТМ-10/350 ($U_{C1-3} \approx 15 \text{ кВ}$; $U_{C4} \approx 2,1 \text{ кВ}$; $I_m \approx 83,8 \text{ кА}$; $J_a \approx 1,41 \cdot 10^6 \text{ Дж/Ом}$; $q_0 \approx 31,7 \text{ Кл}$; $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 265 \text{ мкс}$) [20]

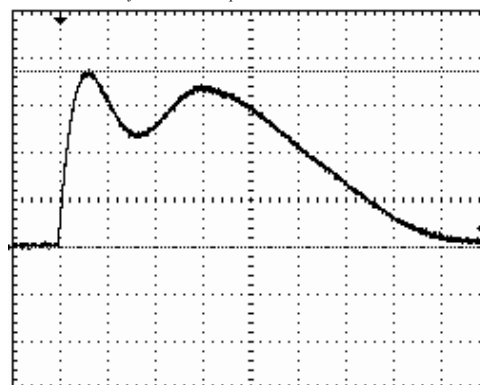


Рис. 15. Осциллограмма апериодического импульса тока 17/265 мкс искусственной молнии в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора ГТМ-10/350 при ЭВ сплошной круглой алюминиевой жилы сечением 6 мм^2 и длиной 0,5 м сетевого провода марки АППВнг2×6 с ПВХ изоляцией ($U_{C1-3} \approx 15 \text{ кВ}$; $U_{C4} \approx 2,1 \text{ кВ}$; $I_m \approx 83,8 \text{ кА}$; $J_a \approx 1,41 \cdot 10^6 \text{ Дж/Ом}$; $q_0 \approx 31,7 \text{ Кл}$; $\tau_f \approx 17 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 265 \text{ мкс}$; масштаб по вертикали – 22,52 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление) [20]

Выводы.

1. Анализ современного состояния в Украине инструментального обеспечения натуральных испытаний объектов промышленной энергетики, авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость показывает, что на отечественном высоковольтном сильноточном электрооборудовании, включающем уникальные мощные генераторы типа УИТОМ-1 и ГТМ-10/350, разработанные и созданные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», могут проводиться в полевых условиях сертификационные электромагнитные испытания элементов и систем указанных объектов на прямое или косвенное воздействие импульсного тока искусственной молнии, соответствующие требованиям действующих нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013 и международного стандарта IEC 62305-1: 2010.

2. Приведенные результаты и мировой опыт поражающего действия на технические и биологические объекты линейной молнии, развивающейся и протекающей в воздушной тропосфере нашей планеты, однозначно указывают на необходимость проведения рассматриваемых натуральных испытаний элементов конструкций и инженерных сетей летательных аппаратов и наземных энергообъектов на комплексную стойкость к воздействию импульсного тока молнии.

3. Проведенные в последние годы на мощных генераторах типа УИТОМ-1 и ГТМ-10/350 реальные натурные испытания на молниестойкость и пожарную безопасность объектов отечественной и зарубежной авиационной техники (например, бортовых приемно-передающих радиотехнических устройств, металлических и композиционных элементов обшивок самолетов предприятия «Антонов» и корпорации «Boeing») и промышленной энергетики (например, опытных образцов многослойных панелей с наружным слоем из тонкой листовой нержавеющей стали дорогостоящего крупногабаритного защитного контейнера 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС) свидетельствуют о полном соответствии технических характеристик отечественных генераторов тока искусственной молнии высоким требованиям действующих в ведущих странах мира нормативных документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 42: Electronics: retrospective view, successes and prospects of its development // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2018. – no.1. – pp. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.01.
2. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards // *Proceedings of the IEEE*. – 1988. – vol.76. – no.12. – pp. 1548-1565. doi: 10.1109/5.16349.
3. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
4. Дьяков А.Ф., Кужекин И.П., Максимов Б.К., Темников А.Г. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 455 с.
5. Бортник И.М., Белоголовский А.А., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н., Калинин А.В., Кучинский Г.С., Ларионов В.П., Монастырский А.Е., Орлов А.В., Темников А.Г., Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г., Соколова М.В. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / Под общей ред. проф. И.П. Верещагина. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 704 с.
6. Baranov M.I. New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2018. – no.1. – pp. 46-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.

7. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
8. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
9. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
10. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3 томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.
11. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects // *Instruments and Experimental Technique*. – 2008. – no.3. – pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
12. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
13. Baranov M.I. Improvement of resistance protection of high-voltage capacitors of powerful capacitive energy storage systems from emergency overcurrent // *Russian Electrical Engineering*. – 2017. – vol.88. – no.1. – pp. 19-22. doi: 10.3103/S1068371217010060.
14. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Nosenko M.A. High-voltage high-current air-filled spark gaps of an artificial-lightning-current generator // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2008. – vol.51. – no.6. – pp. 833-837. doi: 10.1134/s0020441208060109.
15. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. A coaxial disk shunt for measurement in the high-current circuit of high-voltage generator of storm discharges of pulses of current of artificial lightning with the integral of action up to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.5. – pp. 45-50. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.
16. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Results of calculation-experimental investigations of electro-thermal resistibility of sheet steel samples to action of rational components of pulsed current of artificial lightning // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2016. – no.3. – pp. 40-49. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.07.
17. Baranov M.I., Nosenko M.A. Influence of the thermal action of artificially-initiated lightning current on specimens of the metal skin of an aircraft // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2009. – vol.82. – no.5. – pp. 978-987. doi: 10.1007/S10891-009-0272-z.
18. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 41: Composite materials: their classification, technologies of making, properties and application domains in modern technique // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – no.6. – pp. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.01.
19. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350 μ s with an amplitude of \pm (100-200) kA // *Instruments and Experimental Techniques*. 2015. – vol.58. – no.6. – pp. 745-750. doi: 10.1134/S0020441215060032.
20. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal action of the pulse of the current of a short artificial-lightning stroke on test specimens of wires and cables of electric power objects // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2018. – vol.91. – no.2. – pp. 544-555. doi: 10.1007/s10891-018-1775-2.

REFERENCES

1. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 42: Electronics: retrospective view, successes and prospects of its development. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 3-16. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.01.
2. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol.76, no.12, pp. 1548-1565. doi: 10.1109/5.16349.
3. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. *Molnija i molnieszashchita* [Lightning and protection from lightning]. Moscow, Znack Publ., 2003. 330 p. (Rus).
4. Dyakov A.F., Kuzhekin I.P., Maksimov B.K., Temnikov A.G. *Elektromagnitnaya sovmestimost' i molnieszashchita v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility and lightning protection in the power]. Moscow, MEI Publishing House, 2009. 455 p. (Rus).

5. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Vershinin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pital' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokih napryazhenij* [Electrophysics bases of technique of high voltage]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010. 704 p. (Rus).
6. Baranov M.I. New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 46-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.07.
7. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
8. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
9. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010.
10. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3kh tomakh. Tom 2, Kn. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 Vols. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
11. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
12. GOST R MEK 62305-1-2010. *Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy* [GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).
13. Baranov M.I. Improvement of resistance protection of high-voltage capacitors of powerful capacitive energy storage systems from emergency overcurrent. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol.88, no.1, pp. 19-22. doi: 10.3103/S1068371217010060.
14. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Nosenko M.A. High-voltage high-current air-filled spark gaps of an artificial-lightning-current generator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol.51, no.6, pp. 833-837. doi: 10.1134/s0020441208060109.
15. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. A coaxial disk shunt for measurement in the high-current circuit of high-voltage generator of storm discharges of pulses of current of artificial lightning with the integral of action up to $15 \cdot 10^6$ J/Ohm. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 45-50. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.
16. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Results of calculation-experimental investigations of electro-thermal resistibility of sheet steel samples to action of rationed components of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.3, pp. 40-49. doi: 10.20998/2074-272X.2016.3.07.
17. Baranov M.I., Nosenko M.A. Influence of the thermal action of artificially-initiated lightning current on specimens of the metal skin of an aircraft. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol.82, no.5, pp. 978-987. doi: 10.1007/S10891-009-0272-z.
18. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 41: Composite materials: their classification, technologies of making, properties and application domains in modern technique. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.6, pp. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.01.
19. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350 μ s with an amplitude of \pm (100-200) kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol.58, no.6, pp. 745-750. doi: 10.1134/S0020441215060032.
20. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal action of the pulse of the current of a short artificial-lightning stroke on test specimens of wires and cables of electric power objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol.91, no.2, pp. 544-555. doi: 10.1007/s10891-018-1775-2.

Поступила (received) 10.05.2018

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Буряковский Сергей Геннадиевич¹, д.т.н., директор,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,
¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua, sergbyr@i.ua

² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438,
e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, S.G. Buriakovskiy¹, S.V. Rudakov²
¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.
² National University of Civil Protection of Ukraine,
94, Chernyshevskaya Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning.

Purpose. Presentation and analysis of the modern state of the tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to the action of pulsed current of artificial lightning. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high-voltage and high pulsed currents, theoretical bases of electrical engineering, engineering of high electric and magnetic fields. **Scientific methods of analysis of research and technical information.** **Results.** Information regarding the modern consisting of Ukraine of high-voltage high-current pulsed engineering intended for the leadthrough of model tests of aircrafts and power objects on resistibility to the direct or indirect action on them of pulsed current of artificial lightning in accordance with the requirements of normative documents of the USA SAE ARP 5412: 2013, SAE ARP 5416: 2013 and International Standard IEC 62305-1: 2010. Basic technical descriptions are presented of developed and created in Ukraine for the aims of model tests of the technical objects marked higher on resistibility to lightning of two powerful high-voltage generators of current of lightning (GCL) of type of UITOM-1 and GTM-10/350, playback on the tested objects the pulses of current of artificial lightning with the rationed peak-temporal parameters in obedience to the indicated normatively-technical documents. Examples are resulted and the results of model tests are indicated on described domestic GCL of some elements and devices of the tested technical objects on resistibility to direct action on them of pulsed current of artificial lightning. It is shown that technical descriptions indicated domestic powerful GCL conform to the high requirements of operating in the leading countries of the world of normative documents to on resistibility to lightning objects of industrial energy, aviation and space-rocket engineering. **Originality.** First in the summarizing concentrated kind possibilities are shown developed and created domestic scientists and specialists of unique high-voltage high-current electrophysics equipment for the aims of leadthrough of integration model tests on resistibility and fire safety of aircrafts and power objects at lightning strike. **Practical value.** Application in practice of model tests of objects of industrial energy, aviation and space-rocket engineering on complex resistibility and fire safety to the striking action on them of pulsed current of artificial lightning, generated in discharge circuits of two described powerful domestic GCL, will be instrumental in the successful decision of global in the world problem of protecting from lightning of air and surface technical objects and being in them personnel. References 20, tables 2, figures 15.

Key words: domestic powerful high-voltage high-current generators of current of lightning, objects of energy, aviation and space-rocket engineering, results of model tests of some technical objects on resistibility to the direct action of pulsed current of artificial lightning.