

М.И. Баранов, В.И. Кравченко, М.А. Носенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА К ПРЯМОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ. ЧАСТЬ 2: СТОЙКОСТЬ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

Дослідним шляхом отримані результати електротермічної стійкості ряду коротких зразків мідних проводів і кабелів різних марок бортових електричних кіл літального апарату у разі прямої роздільної або сумісної дії на них імпульсної А- та тривалої С- компонент струму штучної блискавки з нормованими згідно міжнародних вимог амплітудно-тимчасовими параметрами.

Опытным путем получены результаты электротермической стойкости ряда коротких образцов медных проводов и кабелей различных марок бортовых электрических цепей летательного аппарата в случае прямого раздельного или совместного воздействия на них импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными согласно международных требований амплитудно-временными параметрами.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] авторами были представлены определенные результаты экспериментальных исследований электротермической стойкости к прямому воздействию в атмосферном воздухе импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии для ряда листовых образцов обшивки летательного аппарата (ЛА) различной толщины, выполненных из алюминиевых сплавов марок АМг2М, А0М и АД5М. Проведение подобных исследований в Украине стало возможным после создания в 2007 году на исследовательско-испытательном полигоне НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" уникального мощного генератора тока искусственной молнии (ГТМ) с суммарной запасаемой электрической энергией до 1 МДж (рис. 1) [2-5].

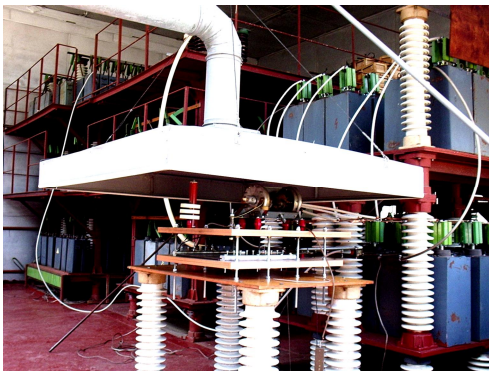


Рис. 1. Внешний вид мощного ГТМ на энергию в 1 МДж (на переднем плане находится рабочий стол с трехэлектродным воздушным разрядником F_1 , двухэлектродным воздушным разрядником F_2 и системой воздушной вытяжки, а на заднем плане – генераторы ГИТ-А и ГИТ-С для создания соответственно А- и С- компонент тока искусственной молнии)

Генераторы импульсных токов (ГИТ) данного ГТМ, построенные на основе высоковольтных малоиндуктивных импульсных конденсаторов (с номинальным зарядным напряжением ± 50 кВ и ± 5 кВ для ГИТ, имитирующих соответственно импульсную А- и длительную С- компоненты тока молнии), способны воспроизводить на электрической нагрузке (объекте испытаний) требуемые в соответствии с действующими в настоящее время международными нормативно-техническими документами [6-9] амплитудно-

временные параметры (АВП) пяти основных компонент тока молнии: импульсной А, промежуточной В, укороченной длительной С*, длительной С и повторной импульсной D. Расчеты результатов электротермического действия данных компонент тока молнии на различные марки проводов и кабелей ЛА и их экспериментальная проверка показывают, что наибольшей поражающей термической способностью для их проводящих жил и оболочек обладают импульсная А- и длительная С- компоненты тока искусственной молнии. АВП данных компонент тока молнии характеризуются следующими электрическими показателями [6-9]: для импульсной А- токовой компоненты – амплитудой тока $I_{mA}=200$ кА с допуском $\pm 10\%$; интегралом действия $J_{dA}=2 \cdot 10^6$ А²·с при допуске $\pm 20\%$; временем амплитуды тока $t_{mA} \leq 50$ мкс; длительностью протекания $\tau_A \leq 500$ мкс; для длительной С- токовой компоненты – амплитудой тока до $I_{mC}=0,8$ кА; количеством электричества $Q_C=200$ Кл при допуске $\pm 20\%$; длительностью протекания $0,25 \text{ с} \leq \tau_C \leq 1$ с.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРОВОДОВ (КАБЕЛЕЙ) БОРТОВЫХ ЦЕПЕЙ ЛА К ТОКУ ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Принимаем, что при электротермических испытаниях на молниестойкость в качестве испытываемых образцов (ИО) медных проводов и кабелей бортовых цепей ЛА будут выступать следующие марки кабельно-проводниковой продукции: 1) одиночный многожильный провод марки БПВЛ сечением расщепленной медной жилы 12 мм^2 ; 2) одиночный провод марки ПВ-2,5 сечением расщепленной медной жилы $2,5 \text{ мм}^2$; 3) кабель питания марки ПВС $3 \times 2,5$ с тремя медными жилами (каждая сечением $2,5 \text{ мм}^2$); 4) среднугабаритный коаксиальный радиочастотный кабель марки РК 75-4-11 сечением медной жилы $0,44 \text{ мм}^2$ и сечением медной оболочки (оплетки) $3,44 \text{ мм}^2$; 5) экранированный многожильный кабель марки UNITRONIC LYCY 20 \times 0,34 Pbf (20 медных жил сечением $0,34 \text{ мм}^2$ каждая); 6) витая неэкранированная пара марки UTP cat5 (8 медных жил сечением $0,2 \text{ мм}^2$ каждая); 7) крупногабаритный коаксиальный радиочастотный кабель марки РК 75-17-31 сечением сплошной медной жилы $10,2 \text{ мм}^2$ (без межэлектродной полиэтиленовой изоляции и с данной изоляцией). Пусть все испыты-

ваемые образцы ИО медных кабелей (проводов) ЛА имеют одинаковую длину, равную 0,55 м. Полагаем, что все ИО проводов (кабелей) ЛА закрепляются в разрыв разрядных цепей генератора ГИТ-А (генератор импульсной А- компоненты тока искусственной молнии) или генератора ГИТ-С (генератор длительной С- компоненты тока искусственной молнии) путем жесткого закрепления концов испытываемых медных токопроводов болтовыми соединениями на массивных прямоугольных алюминиевых электродах рабочего стола высоковольтного ГТМ, показанного на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид рабочего стола ГТМ, примененного при испытаниях коротких образцов медных проводов (кабелей) бортовых электрических цепей ЛА на электротермическую стойкость к импульсной А- и длительной С- компонентам тока искусственной молнии с нормированными АВП

На рис. 3 приведен общий вид ИО медного кабеля ЛА (на примере радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 длиной 0,55 м), закрепленного перед испытанием на видоизмененном рабочем столе ГТМ, содержащем в своем составе генераторы ГИТ-А и ГИТ-С.

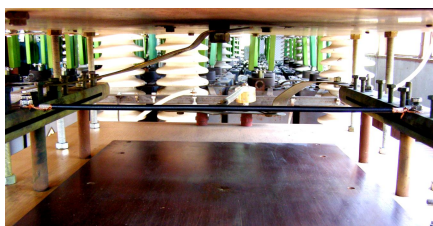


Рис. 3. Общий вид типового закрепления на рабочем столе ГТМ ИО проводов (кабелей) ЛА (сверху над центральной зоной образца, включенного в разрыв между горизонтально расположенными массивными алюминиевыми электродами, размещен круглый стальной электрод разрядных цепей ГТМ, соединенный плоской латунной шиной с одним из массивных алюминиевых электродов рабочего стола)

Считаем, что ИО медных проводов (кабелей) ЛА в разрядные цепи используемых при указанных испытаниях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С включены согласно электрической схеме, приведенной на рис. 4.

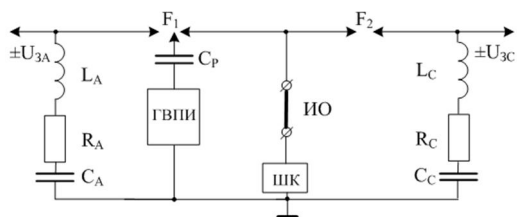


Рис. 4. Принципиальные электрические схемы разрядных цепей генераторов ГИТ-А и ГИТ-С для формирования в ИО медных проводов (кабелей) ЛА импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП

На рис. 4 приняты следующие обозначения: ИО – испытываемый образец провода (кабеля) ЛА; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой ± 100 кВ; ШК – измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300; F_1, F_2 – соответственно трех- и двухэлектродный воздушный разрядник; C_p – разделительная емкость на 100 кВ, равная 180 пФ; U_{3A}, U_{3C} – зарядные напряжения генераторов ГИТ-А и ГИТ-С; L_A, R_A, C_A – индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи генератора ГИТ-А; L_C, R_C, C_C – индуктивность, активное сопротивление и емкость разрядной цепи генератора ГИТ-С. Пусть отрицательное зарядное напряжение U_{3A} для ГИТ-А равно 27 кВ, а отрицательное зарядное напряжение U_{3C} для ГИТ-С – 4,2 кВ. Согласно данным схемы на рис. 4 основные электрические параметры разрядных цепей ГТМ, используемых при электротермических испытаниях образцов проводов (кабелей) ЛА, имели следующие значения [2-5]: для ГИТ-А – $C_A=333$ мкФ; $L_A=2,05$ мГн; $R_A=0,061$ Ом; для ГИТ-С – $C_C=45,36$ мФ; $L_C=11,43$ мГн; $R_C=4,74$ Ом. Считаем, что в соответствии с [2, 4] при измерении АВП импульсной А- компоненты тока молнии коэффициент преобразования $K_{шА}$ для шунта ШК-300 (рис. 5), соединенного экранированной триаксиальной кабельной линией длиной 60 м с размещенной в заглубленном экранированном измерительном бункере ГТМ регистрирующей аппаратурой (цифровыми осциллографами ЦО-1 и ЦО-2 типа ТЕКТРОНИХ TDS 1012), равен 11261 А/В, а при фиксации АВП длительной С- компоненты тока молнии коэффициент преобразования используемого нами шунта составляет $K_{шС}=5642$ А/В. Следует указать, что при расшифровке получаемых в испытательных электрических схемах генераторов ГИТ-А и ГИТ-С согласно рис. 4 амплитудных значений А- и С- компонент тока искусственной молнии, воздействующих на образцы медных проводов (кабелей) ЛА, зафиксированные на экранах осциллографов ЦО-1 и ЦО-2 величины электрических сигналов (в Вольтах) умножаются на соответствующие коэффициенты преобразования $K_{шА}$ и $K_{шС}$ шунта ШК-300 (с размерностью Ампер/Вольт).



Рис. 5. Общий вид измерительного коаксиального шунта ШК-300 с экранированной кабельной линией связи длиной 60 м и специальным делителем напряжения СД-300 [2, 4]

Отметим, что согласно рис. 4 при рассматриваемых электротермических испытаниях соответствующие импульсы тока искусственной молнии от генераторов ГИТ-А и ГИТ-С высоковольтного ГТМ подаются непосредственно на ИО медного кабеля (провода) ЛА. Между испытываемым образцом кабеля (прово-

да) ЛА прямолинейной формы и "землей" согласно рис. 4 включается измерительный шунт ШК-300, к которому с помощью кабельной линии связи и специального делителя напряжения СД-300 (см. рис. 5) параллельно подключаются сразу два цифровых запоминающих осциллографа типа TEKTRONIX TDS 1012 (по одному на каждую компоненту испытательного импульса тока молнии, так как эти токовые компоненты резко отличаются друг от друга как по амплитуде, так и по временным характеристикам). Требуется по результатам опытного электротермического действия на принятые испытываемые образцы медных проводов (кабелей) ЛА имитируемых с помощью генераторов ГИТ-А и ГИТ-С импульсной А- и длительной С- компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП определить их соответствующую реальную электротермическую стойкость.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДОВ (КАБЕЛЕЙ) ЛА К ОСНОВНЫМ КОМПОНЕНТАМ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

1. Осциллограммы испытательных компонент тока искусственной молнии. При подаче согласно рис. 4 от ГВПИ на управляющий электрод трехэлектродного воздушного разрядника F_1 каскадного типа импульса микросекундной длительности положительной полярности амплитудой 100 кВ предварительного заряженного до отрицательного напряжения $U_{3A} = -27$ кВ емкостный накопитель энергии (ЕНЭ) генератора ГИТ-А разряжается на ИО провода (кабеля) ЛА и формирует на нем требуемую в соответствии с [6-9] импульсную А- компоненту тока молнии. На рис. 6 приведена типовая осциллограмма такого тока, полученная с помощью измерительного шунта ШК-300 [2, 5] и цифрового запоминающего осциллографа типа TEKTRONIX TDS 1012 (масштаб по вертикали – 5 В/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка).

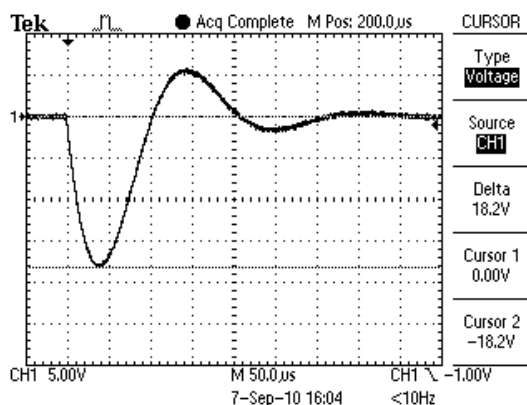


Рис. 6. Типовая осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-А на ИО длиной 0,55 м провода (кабеля) ЛА при $U_{3A} = -27$ кВ

Из приведенной на рис. 6 осциллограммы импульсной А- компоненты тока молнии видно, что при коэффициенте преобразования метрологически поверенного шунта ШК-300, численно равном $K_{шА} = 11261$ А/В [2, 5], ее первая отрицательная амплитуда I_{mA} бу-

дет примерно равной $18,2 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 205 \text{ кА}$. Данной амплитуде I_{mA} импульсного тока молнии соответствует время, равное $t_{mA} = 38 \text{ мкс}$ ($J_{dA} = 2,14 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$). Переход через ось абсцисс первой отрицательной полуволны данной А-компоненты тока молнии происходит при времени $t_{A1} = 100 \text{ мкс}$, а ее второй положительной полуволны – при времени около $t_{A2} = 200 \text{ мкс}$. Амплитуда второй положительной полуволны рассматриваемого тока не превышает 62 кА, а амплитуда третьей отрицательной полуволны – 16,9 кА. Импульсная А- компонента тока искусственной молнии характеризуется весьма сильным затуханием (логарифмический декремент колебаний составляет около 2,495 при коэффициенте затухания в разрядной цепи генератора ГИТ-А, примерно равном $12,47 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$).

На рис. 7 представлена типовая осциллограмма длительной С- компоненты тока искусственной молнии, полученной в электросхеме согласно рис. 4 от генератора ГИТ-С при помощи измерительного коаксиального шунта ШК-300 и цифрового осциллографа TEKTRONIX TDS 1012 (масштаб по вертикали – 50 мВ/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка).

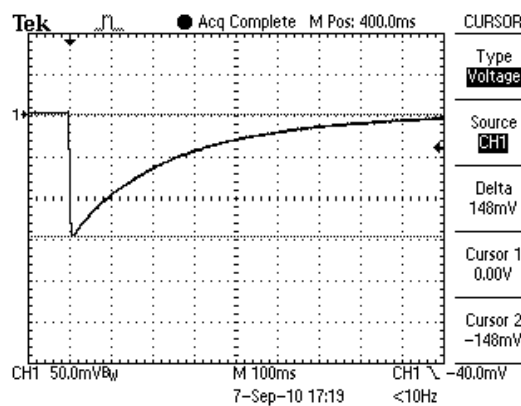


Рис. 7. Типовая осциллограмма длительной С- компоненты тока искусственной молнии при разряде генератора ГИТ-С на ИО длиной 0,55 м провода (кабеля) ЛА при $U_{3C} = -4,2$ кВ

Из данных рис. 7 следует, что амплитуда I_{mC} отрицательной аperiodической волны длительной С- компоненты имитированного тока молнии составляет значение, равное около $0,148 \text{ В} \times 5642 \text{ А/В} = 0,835 \text{ кА}$. Этой амплитуде I_{mC} тока соответствует время, равное примерно $t_{mC} = 11 \text{ мс}$. Длительность протекания по испытываемому образцу провода (кабеля) ЛА сформированной в разрядной цепи ГИТ-С длительной С- компоненты тока искусственной молнии равна около $\tau_C = 1000 \text{ мс}$, а переносимое ею через исследуемый ИО количество электричества (электрический заряд) составляет примерно величину, равную $Q_C = 203 \text{ Кл}$.

2. Особенности поведения образцов медных проводов (кабелей) ЛА при прямом действии на них тока искусственной молнии. На рис. 8 приведен внешний вид испытываемого в ГТМ образца **провода ПВ-2,5** с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ до протекания по нему импульсной А- компоненты тока искусственной молнии. Внизу под данным проводом, закрепленным своими концами с помощью болтового соединения на массивных прямоугольных алюминиевых электродах рабочего стола ГТМ, на горизонталь-

но размещенной гетинаксовой пластине толщиной 10 мм виден округлый след белого цвета от последствий сквозного проплавления имитированным в ГТМ током молнии листовых образцов алюминиевой обшивки ЛА с размером в плане $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ (см. рис. 2), ранее проходивших в разрядных цепях генераторов ГИТ-А и ГИТ-С испытания на молниестойкость [1].



Рис. 8. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца одиночного провода ПВ-2,5 с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с зарегистрированной амплитудой $I_{mA} = -166,7 \text{ кА}$

Требуется отметить, что в соответствии с расчетной методикой, приведенной в [10, 11], для импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с принятыми нормированными ее АВП минимально допустимое по условиям нормальной работы поперечное сечение S_{0mA} электрически незагруженной медной жилы провода ПВ-2,5 (без предварительного до воздействия тока молнии протекания по ней номинального рабочего тока) составляет величину, равную $9,4 \text{ мм}^2$. Для указанного режима загрузки жилы провода ПВ-2,5 и импульсной А-компоненты тока искусственной молнии критическое поперечное сечение S_{0kA} этого провода, при котором наступает явление сублимации его медной жилы из-за ее электрического взрыва (ЭВ), согласно [10, 11] составляет $3,4 \text{ мм}^2$. На рис. 9 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ после воздействия на испытываемый медный провод ПВ-2,5 от ГИТ-А импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП.

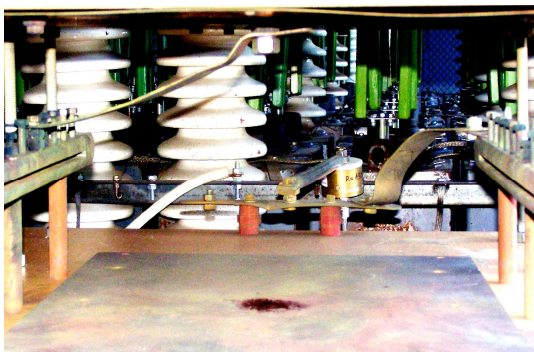


Рис. 9. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца одиночного провода ПВ-2,5 с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ после воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с зарегистрированной в процессе ее электровзрыва амплитудой $I_{mA} = -166,7 \text{ кА}$

Из рис. 9 видно, что твердая токонесущая часть расщепленной жилы провода ПВ-2,5 поперечным сечением $2,5 \text{ мм}^2$ на всей своей длине $0,55 \text{ м}$ подверглась полной сублимации (испарению и ее переходу в парообразное состояние минуя жидкое [12]), вызванной наступлением в ее меди явления ЭВ. Этого следовало и ожидать, так как поперечное сечение медной жилы провода ПВ-2,5 равно $2,5 \text{ мм}^2$ и меньше указанного критического значения $S_{0kA} = 3,4 \text{ мм}^2$. Поэтому эта марка медного провода и не могла выдержать электротермического воздействия на нее указанной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП. Определенный интерес представляет приведенная на рис. 10 осциллограмма разрядного тока ГИТ-А при ЭВ медного провода марки ПВ-2,5 с амплитудой I_{mA} , равной $14,8 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 166,7 \text{ кА}$.

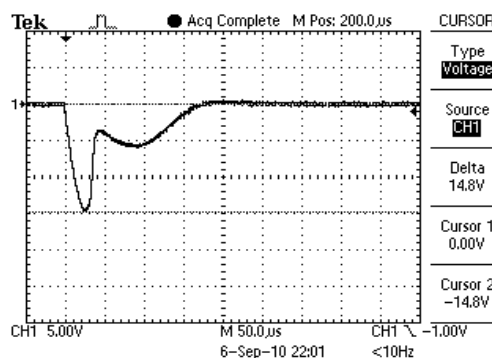


Рис. 10. Осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии при ЭВ в цепи ГИТ-А медной жилы сечением $2,5 \text{ мм}^2$ одиночного провода ПВ-2,5 ($U_{3A} = -27 \text{ кВ}$)

Из полученных для медного провода ПВ-2,5 с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией данных явствует, что после ЭВ его жилы от действия импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП ($I_{mA} = 166,7 \text{ кА}$) изоляционные и металлические элементы рабочего стола высоковольтного ГТМ подверглись активной металлизации парами меди буро-красного цвета (см. рис. 8 и 9).

На рис. 11 показан внешний вид закрепленного на алюминиевых электродах рабочего стола ГТМ радиочастотного кабеля РК 75-17-31 с оголенной (без изоляции) сплошной медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП.



Рис. 11. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А-компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$

В результате воздействия на образец оголенной медной жилы крупногабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-17-31 импульсной A -компоненты тока имитированной молнии твердая токонесущая часть медной жилы кабеля РК 75-17-31 поперечным сечением $10,2 \text{ мм}^2$ осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 12). Из-за действия на сплошную медную жилу данного кабеля больших электродинамических усилий (ЭДУ) отталкивания от соседних токоведущих частей силовоточной цепи разряда генератора ГИТ-А (от массивной плоской латунной шины с A - компонентой тока молнии, соединяющей центральный стальной электрод рабочего стола ГТМ с его массивной алюминиевой шиной для закрепления края жилы кабеля) она подверглась определенной механической деформации.



Рис. 12. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ после воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$

Полученные экспериментальные электротермические данные для кабеля РК 75-17-31 подтверждают результаты расчетного выбора согласно [10, 11] величин минимально допустимого $S_{0mA} = 9,4 \text{ мм}^2$ и критического $S_{0kA} = 3,4 \text{ мм}^2$ поперечных сечений для медных токопроводов, испытывающих воздействие импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с нормированными в соответствии с [6-9] АВП.

На рис. 13 представлен общий вид рабочего стола ГТМ с ИО длиной $0,55 \text{ м}$ сплошной медной жилы сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в полувоздушной полиэтиленовой (ПЭТ) изоляции наружным диаметром 17 мм радиочастотного кабеля РК 75-17-31 до протекания по нему от ГТМ импульсного тока искусственной молнии.

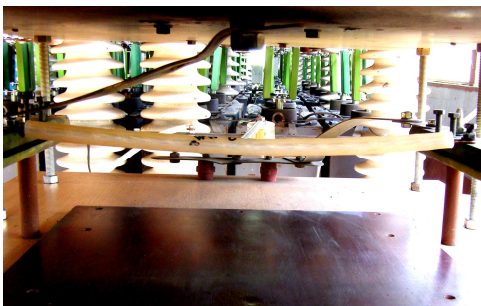


Рис. 13. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в ПЭТ изоляции до совместного воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,914 \text{ кА}$

Следует указать, что согласно [10, 11] расчетные величины минимально допустимого S_{0mC} и критического S_{0kC} поперечных сечений для медных токопроводов, испытывающих воздействие длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными по [6-9] АВП, составляют соответственно $1,8$ и $0,67 \text{ мм}^2$. В результате совместного воздействия на испытываемый образец сплошной медной жилы сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в полувоздушной ПЭТ изоляции кабеля РК 75-17-31 импульсной A - и длительной C -компонент тока искусственной молнии ($I_{mA} = -205 \text{ кА}$; $I_{mC} = -0,914 \text{ кА}$; $Q_C = 223 \text{ Кл}$) сплошная токонесущая часть медной жилы кабеля РК 75-17-31 сечением $10,2 \text{ мм}^2$ осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 14). В этом случае, аналогично, как и при электротермических испытаниях той же оголенной медной жилы данного кабеля (см. рис. 12), из-за действия на испытываемую жилу кабеля больших ЭДУ отталкивания от соседних токоведущих частей силовоточной разрядной цепи ГИТ-А она подверглась определенной механической деформации. Данная деформация твердой сплошной круглой медной жилы с полувоздушной ПЭТ изоляцией исследуемого образца радиочастотного кабеля длиной $0,55 \text{ м}$ происходит на нас (в сторону наблюдателя-пользователя фотографии на рис. 14) и она оказывается соизмеримой с той механической деформацией оголенной медной жилы этого же кабеля, которая показана выше на рис. 12.

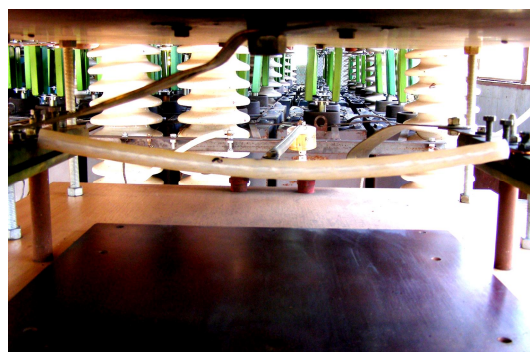


Рис. 14. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-17-31 с медной жилой сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в ПЭТ изоляции после совместного воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C - компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,914 \text{ кА}$

Поэтому можно заключить, что массивная полувоздушная ПЭТ изоляция сплошной круглой медной жилы коаксиального радиочастотного кабеля марки РК 75-17-31 мало влияет на ее электротермическое и электродинамическое поведение по отношению к используемым при проводимых испытаниях основным компонентам тока искусственной молнии с нормированными АВП. Так как поперечное сечение исследуемой сплошной медной жилы $10,2 \text{ мм}^2$ кабеля РК 75-17-31 превышает расчетные значения $S_{0mA} = 9,4 \text{ мм}^2$ и $S_{0mC} = 1,8 \text{ мм}^2$, а также расчетные значения $S_{0kA} = 3,4 \text{ мм}^2$ и $S_{0kC} = 0,67 \text{ мм}^2$, то испытываемая медная жила будет электротермически стойкой к совместному воздействию на нее импульсной A - и длительной C - компонент

тока искусственной молнии с нормированными АВП. Данный вывод, базирующийся на расчетных электро-термических данных согласно [10, 11], полностью подтверждают приведенные выше экспериментальные результаты для радиочастотного кабеля РК 75-17-31.

На рис. 15 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем образца среднегабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 со сплошной медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней на ее концах медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ до действия на него от ГИТ-А импульсной А- компоненты тока молнии.



Рис. 15. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной А- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA}=-205 \text{ кА}$

В результате воздействия импульсной А- компоненты тока имитированной молнии на данный образец кабеля РК 75-4-11 с медной сплошной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней его медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$, суммарное сечение которых оказывается соизмеримым с расчетной величиной критического сечения $S_{0kA}=3,4 \text{ мм}^2$ для медных токопроводов данному току молнии, твердые токонесущие части испытываемого образца кабеля с межэлектродной сплошной ПЭТ изоляцией наружным диаметром 4 мм из-за наступления в их меди явления ЭВ подверглись полной сублимации, то есть испарению и их переходу в парообразное состояние, минуя жидкое [12]. Из-за этого изоляционные и металлические элементы рабочего стола высоковольтного ГТМ подверглись, как и в случае испытания импульсной А- компонентой тока искусственной молнии одиночного провода ПВ-2,5 с расщепленной медной жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ (см. рис. 9), активной металлизации парами меди буро-красного цвета (рис. 16).

На рис. 17 для этого экстремального случая электро-термических испытаний при помощи ГТМ короткого образца среднегабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 длиной 0,55 м, сопровождающегося явлением ЭВ его токонесущих медных частей, приведена осциллограмма протекающего через него соответствующего разрядного тока высоковольтного генератора ГИТ-А ($U_{3A}=-27 \text{ кВ}$) амплитудой $I_{mA}=-184,7 \text{ кА}$, получаемой при расшифровке данной осциллограммы из произведения, равного $16,4 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В}$. Видно, что данная токовая осциллограмма имеет определенные отличия по форме и

амплитуде от приведенной на рис. 10 осциллограммы также импульсной А- компоненты тока искусственной молнии, полученной от того же высоковольтного генератора ГИТ-А и при том же зарядном напряжении его ЕНЭ ($U_{3A}=-27 \text{ кВ}$) и характерной для явления ЭВ медной жилы сечением $2,5 \text{ мм}^2$ одиночного провода ПВ-2,5 аналогичной длины 0,55 м. Из данных рис. 17 видно, что потеря при этом токонесущими медными частями кабеля РК 75-4-11 металлической проводимости из-за наступления явления их ЭВ приводит к разрыву цепи разряда генератора ГИТ-А и соответственно к прерыванию в течение порядка 150 мкс формируемой в ГТМ импульсной А- компоненты тока молнии. Без такого вынужденного прерывания цепи разряда ЕНЭ генератора ГИТ-А длительность протекания данного тока молнии составляет около $\tau_A=500 \text{ мкс}$.

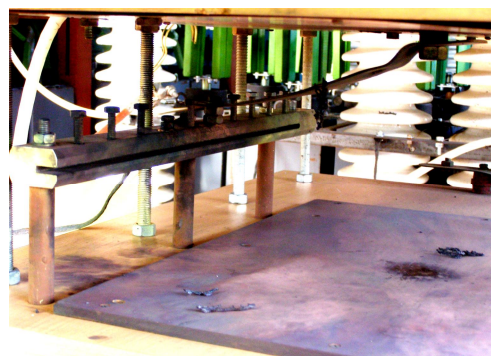


Рис. 16. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ после воздействия на него импульсной А- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mA}=-184,7 \text{ кА}$

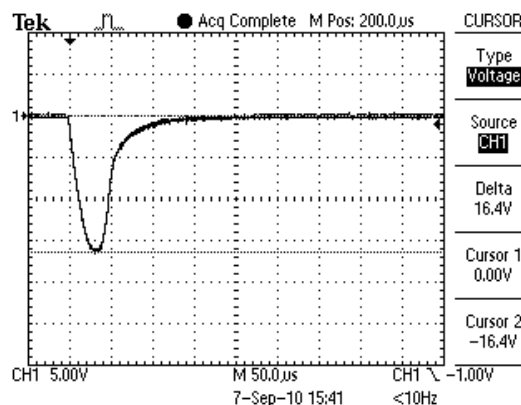


Рис. 17. Осциллограмма импульсной А- компоненты тока искусственной молнии при ЭВ в цепи разряда ГИТ-А медной жилы сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплетки сечением $3,44 \text{ мм}^2$ радиочастотного кабеля РК 75-4-11 ($U_{3A}=-27 \text{ кВ}$)

На рис. 18 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем образца среднегабаритного коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-4-11 со сплошной медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и параллельно подключенной к ней на ее обоих краях медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ до действия на него от генератора ГИТ-С длительной С- компоненты тока имитированной молнии с принятыми АВП.



Рис. 18. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ до воздействия на него длительной C -компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,891 \text{ кА}$

В результате воздействия от генератора ГИТ-С ($U_{3C} = -4,2 \text{ кВ}$) на данный образец радиочастотного кабеля РК 75-4-11 длительной C -компоненты тока искусственной молнии ($I_{mC} = -0,891 \text{ кА}$; $\tau_C = 1000 \text{ мс}$; $Q_C = 213 \text{ Кл}$) твердые токонесущие части сплошной медной жилы сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплетки сечением $3,44 \text{ мм}^2$ испытываемого кабеля остались целыми и электротермически не поврежденными (рис. 19). Этот опытный результат подтверждает расчетные оценки по [10, 11] электротермической стойкости медных проводов (кабелей) к рассматриваемому импульсному току молнии. Согласно этим расчетным оценкам так как суммарное сечение медной жилы и медной оплетки испытываемого кабеля РК 75-4-11 величиной $3,847 \text{ мм}^2$ является больше минимально допустимого $S_{0mC} = 1,8 \text{ мм}^2$ и тем более критического $S_{0kC} = 0,67 \text{ мм}^2$ для медного токопровода сечений, то данный кабель при параллельном подключении его медной жилы и медной оплетки должен быть электротермически стойким к воздействию длительной C -компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП. Это положение и было подтверждено экспериментальным путем на мощном ГТМ.



Рис. 19. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца радиочастотного кабеля РК 75-4-11 с медной жилой сечением $0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплеткой сечением $3,44 \text{ мм}^2$ после воздействия на него длительной C -компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,891 \text{ кА}$

На рис. 20 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца одиночного многожильного провода БПВЛ поперечным сечением расщепленной медной жилы 12 мм^2 до

комплексного действия на него основных компонент тока искусственной молнии с нормированными АВП.



Рис. 20. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца провода БПВЛ с медной жилой сечением 12 мм^2 до совместного воздействия на него импульсной A -компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C -компоненты тока молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,880 \text{ кА}$

В результате совместного воздействия на указанный образец медного провода БПВЛ одновременно (последовательно друг за другом) импульсной A - ($I_{mA} = -205 \text{ кА}$; $t_{mA} = 38 \text{ мкс}$; $\tau_A = 500 \text{ мкс}$; $U_{3A} = -27 \text{ кВ}$) и длительной C - ($I_{mC} = -0,880 \text{ кА}$; $\tau_C = 1000 \text{ мс}$; $Q_C = 210 \text{ Кл}$; $U_{3C} = -4,2 \text{ кВ}$) компонент тока искусственной молнии токонесущая часть расщепленной медной жилы сечением 12 мм^2 одиночного многожильного провода БПВЛ осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 21). Как и в случае испытания кабеля РК 75-17-31 с медной жилой поперечным сечением $10,2 \text{ мм}^2$ в полувоздушной ПЭТ изоляции (см. рис. 14) медный провод БПВЛ с ПВХ изоляцией из-за действия на него больших ЭДУ подвергся определенной механической деформации. Эта деформация оказывается соизмеримой с той деформацией сплошной медной жилы сечением $10,2 \text{ мм}^2$ радиочастотного кабеля РК 75-17-31, которая показана выше на рис. 12 и 14.

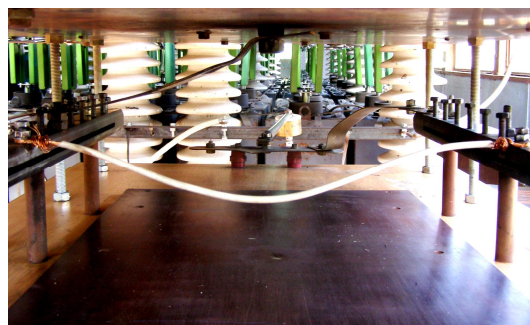


Рис. 21. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца провода БПВЛ с медной жилой сечением 12 мм^2 после совместного воздействия на него импульсной A -компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -205 \text{ кА}$ и длительной C -компоненты тока молнии амплитудой $I_{mC} = -0,880 \text{ кА}$

В связи с тем, что величина поперечного сечения расщепленной медной жилы провода БПВЛ составляет 12 мм^2 и соответственно превышает согласно [10, 11] расчетные значения минимально допустимых сечений $S_{0mA} = 9,4 \text{ мм}^2$ и $S_{0mC} = 1,8 \text{ мм}^2$ для медных токо-

проводов к основным компонентам тока искусственной молнии с нормированными по [6-9] АВП, то данный провод и оказывается электротермически стойким к рассматриваемому совместному воздействию на него импульсной *A*- и длительной *C*- компонент тока искусственной молнии с указанными АВП.

На рис. 22 представлен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца экранированного многожильного кабеля **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с шестью его параллельно включенными в разрядную цепь ГТМ медными жилами (поперечным сечением 0,34 мм² каждая) суммарным сечением 2,04 мм² до воздействия на него от генератора ГИТ-С длительной *C*- компоненты тока имитированной молнии с нормированными АВП ($I_{mC} = -0,857$ кА; $\tau_C = 1000$ мс; $Q_C = 207$ Кл; $U_{3C} = -4,2$ кВ). В результате воздействия на данный образец кабеля рассматриваемой компоненты имитированного в ГТМ тока молнии твердая токонесущая часть шести параллельно подключенных к генератору ГИТ-С медных жил экранированного многожильного кабеля марки **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с суммарным сечением 2,04 мм² осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 23). Из-за действия на испытываемые медные жилы данного кабеля повышенной температуры от джоулева нагрева они подверглись достаточно сильному электротермическому перегреву и получили незначительную дополнительную механическую деформацию прогиба (см. рис. 22 и 23). Одним из подтверждений тому является слипание между собой перегретой резиновой изоляции испытанных медных жил этого многожильного кабеля.



Рис. 22. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца экранированного многожильного кабеля **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с шестью его параллельно подключенными медными жилами общим сечением 2,04 мм² до воздействия на него длительной *C*- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,857$ кА

В связи с тем, что величина суммарного поперечного сечения шести параллельно включенных между собой медных жил испытываемого многожильного кабеля составляет 2,04 мм² и превышает значение указанного выше минимально допустимого для медного токопровода к этому току сечения $S_{0mC} = 1,8$ мм², то данный кабель и должен был быть электротермически стойким к рассматриваемому воздействию на него *C*- компоненты тока искусственной молнии.

На рис. 24 приведен внешний вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца кабеля **ПВС 3x2,5** с тремя параллельно включенными

между собой медными жилами (поперечным сечением 2,5 мм² каждая) суммарным сечением 7,5 мм² нормированной импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии ($I_{mA} = -200$ кА; $t_{mA} = 38$ мкс; $\tau_A = 500$ мкс; $J_{dA} = 2,03 \cdot 10^6$ А²·с; $U_{3A} = -27$ кВ). В результате воздействия на данный образец кабеля питания ПВС 3x2,5 длиной 0,55 м импульсной *A*- компоненты тока искусственной молнии с указанными АВП токонесущая часть медных жил кабеля ПВС 3x2,5 с суммарным поперечным сечением 7,5 мм² в местах крепления их краев на массивных прямоугольных алюминиевых электродах рабочего стола ГТМ из-за сильного джоулева нагрева перегорела, а по длине кабеля осталась целой, но термически перегретой (рис. 25).



Рис. 23. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца экранированного многожильного кабеля **UNITRONIC LIYCY 20x0,34 Pbf** с шестью его параллельно подключенными медными жилами общим сечением 2,04 мм² после воздействия на него длительной *C*- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,857$ кА



Рис. 24. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля **ПВС 3x2,5** с тремя медными жилами общим сечением 7,5 мм² до воздействия на него импульсной *A*- компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -200$ кА

В результате такого электротермического воздействия на испытываемый кабель ПВС 3x2,5 импульсной *A*- компоненты тока имитированной молнии с принятыми АВП он оторвался от мест своего крепления и упал на гетинаксовое покрытие толщиной 10 мм рабочего стола высоковольтного ГТМ (рис. 25).



Рис. 25. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца кабеля ПВС 3x2,5 с тремя медными жилами общим сечением 7,5 мм² после воздействия на него импульсной *A*-компоненты тока молнии амплитудой $I_{mA} = -200$ кА

Обследование ПВХ изоляции трех медных жил кабеля ПВС 3x2,5 после проведенного его электротермического испытания показало, что она в области краевых зон кабеля (шириной до 20 мм с находящимися внутри ПВХ оболочки целыми медными жилами) спеклась друг с другом без локальных трещин и иных видимых повреждений. Так как суммарное сечение трехжильного медного кабеля ПВС 3x2,5 составляет 7,5 мм² и оказывается близким к расчетному по [10, 11] минимально допустимому для него сечению $S_{0mA} = 9,4$ мм² и превышающим соответствующее расчетное критическое сечение $S_{0kA} = 3,4$ мм², то поэтому медные жилы данного кабеля электрически не взорвались, но на краях термически перегрелись.

На рис. 26 показан общий вид рабочего стола ГТМ и закрепленного на нем испытываемого образца неэкранированной витой пары UTP cat5 с восемью параллельно включенными между собой медными жилами (каждая сечением 0,2 мм²) при их суммарном поперечном сечении 1,6 мм² до прямого воздействия на нее от генератора ГИТ-С нормированной длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии ($I_{mC} = -0,835$ кА; $\tau_c = 1000$ мс; $Q_C = 203$ Кл; $U_{3C} = -4,2$ кВ).



Рис. 26. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца неэкранированной витой пары UTP cat5 с восемью медными жилами общим сечением 1,6 мм² до воздействия на нее длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,835$ кА

В результате воздействия на данный образец неэкранированной витой пары UTP cat5 указанной компоненты тока имитированной молнии твердая токонесящая часть восьми параллельно подключенных к

генератору ГИТ-С ее расщепленных медных жил с суммарным поперечным сечением 1,6 мм² осталась целой и электротермически не поврежденной (рис. 27). После протекания по испытываемой витой паре указанной компоненты тока молнии она подверглась определенной термомеханической деформации (см. рис. 27) из-за действия на нее большой тепловой нагрузки от протекающего по ней тока и ЭДУ, природа которых аналогично описанной выше при испытаниях радиочастотного кабеля РК 75-17-31 (см. рис. 14).

В связи с тем, что суммарное поперечное сечение 1,6 мм² восьми параллельно соединенных между собой медных жил исследуемой на электротермическую стойкость витой пары марки UTP cat5 практически соизмеримо с расчетным согласно [10, 11] минимально допустимым для нее сечением $S_{0mC} = 1,8$ мм², то испытываемая витая пара приложенное к ней электротермическое воздействие, вызванное протеканием по ее токонесящим частям нормированной длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии, выдержала практически без всяких нарушений.



Рис. 27. Внешний вид рабочего стола ГТМ и испытываемого образца неэкранированной витой пары UTP cat5 с восемью медными жилами общим сечением 1,6 мм² после воздействия на нее длительной *C*-компоненты тока искусственной молнии с амплитудой $I_{mC} = -0,835$ кА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные на уникальном отечественном мощном ГТМ натурные экспериментальные исследования позволили определить электротермическую стойкость семи марок с различной изоляцией и различного сечения медных проводов и кабелей бортовых электрических цепей ЛА к импульсной *A*- и длительной *C*-компонентам тока имитированной молнии с нормированными согласно действующим в авиационной и ракетно-космической отраслях ведущих стран мира международным требованиям [6-9] АВП.

2. Выполненные эксперименты подтвердили работоспособность расчетной методики согласно [10, 11] по оценке электротермической стойкости изолированных (оголенных) проводов и кабелей с медными жилами (оболочками) к прямому воздействию на них основных компонент больших и слабых по амплитуде импульсных токов молнии, отличающихся большим количеством протекающего от них по токонесящим частям проводов (кабелей) за время их действия электрического заряда.

3. Полученные результаты могут быть практиче-

ски использованы инженерно-техническим персоналом при испытаниях различной номенклатуры проводов (кабелей) ЛА на стойкость к прямому воздействию на них больших (слабых) импульсных токов молнии с заданными АВП и выборе для бортовых электрических цепей ЛА электротермически стойкой к наиболее опасным для ЛА прямым ударам линейной молнии кабельно-проводниковой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Кравченко В.И., Носенко М.А. Экспериментальные исследования электротермической стойкости металлических элементов летательного аппарата к прямому воздействию тока искусственной молнии. Часть 1: Стойкость алюминиевой обшивки // *Электротехника и электромеханика*. – 2011. – № 1. – С. 65-71.
2. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
3. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Высоковольтные высокопоточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 6. – С. 58-62.
4. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов // *Электротехника и электромеханика*. – 2008. – № 3. – С. 69-75.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощный импульсный генератор тока молнии: разработка и примеры применения / *Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы Международной научной конференции (17-21 августа 2009 г.)*. – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2009. – С. 113-115.
6. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока" (США), 1985. – С. 30-39.
7. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов" (США), 1997. – 145 с.
8. КТР-ВВФ/DO-160D/ED-14D. Квалификационные требования "Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний". Раздел 23.0. "Прямое воздействие молнии". – М.: Изд-во госстандартов Российской Федерации. – 2004. – С. 258-273.
9. MIL-STD-464A. Военный стандарт США "Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем". – 2002. – С. 1-162.
10. Баранов М.И. Электротермическая стойкость изолированных проводов и кабелей к воздействию больших импульсных токов молнии // *Электротехника и электромеханика*. – 2003. – № 2. – С. 67-74.
11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2010. – 407 с.
12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I., Kravchenko V.I., Nosenko M.A. Eksperimentaln'ie issledovaniya elektrottermicheskoj sto'kosti metallicheckih elementov letatel'nogo apparata k prjamomu vozde'ctviyu toka ickucctvenno' molnii. CHact 1: Sto'kost aljuminievo' obshivki // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2011. – № 1. – С. 65-71. 2. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka ickucctvenno' molnii dlja natur'nih icp'itani' tehnicheckih obektov // *Pribor'i i tehnika eksperimenta*. – 2008. – № 3. – С. 81-85. 3. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. V'icokovolt'n'ie cilnotochn'ie vozdušn'ie razrjadniki generatora toka ickucctvenno' molnii // *Pribor'i i tehnika eksperimenta*. – 2008. – № 6. – С. 58-62. 4. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Moschnaja v'icokovolt'naja elektrofizicheckaja uctanovka dlja imitatsii pol'nogo toka molnii i ee primenenie v oblacti molniezaschiti' tehnicheckih obektov // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2008. – № 3. – С. 69-75. 5. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Moschn'i' impulcn'i' generator toka molnii: razrabotka i primer'i primenenija / *Fizika impulcn'ih razrjadov v kondencirovann'ih credah: Material'i Mejdunarodno' nauchno' konferentsii (17-21 avgusta 2009 g.)*. – Nikolaev: KP "Mikolaivcka oblacna drukarnja", 2009. – С. 113-115. 6. SAE ARP 5412/ED-84. Normativni' dokument "Rekomenduemaja praktika aviatsionno-kosmicheckih rabot. Idealizirovann'ie soctavlajuschie vneshnego toka" (CSHA), 1985. – С. 30-39. 7. SAE ARP 5416/ED-84. Normativni' dokument "Rekomenduemaja praktika aviatsionno-kosmicheckih rabot. Uclovija vozde'ctviya molnii na letateln'ie apparat'i i sootvetstvujuschie form'i icp'itateln'ih signalov" (CSHA), 1997. – 145 c. 8. KTR-VVF/DO-160D/ED-14D. Kvalifikatsionn'ie trebovanija "Uclovija ekpluatatsii i okruvajusche' cred'i dlja bortovogo aviatsionnogo oborudovanija. Trebovanija, norm'i i metod'i icp'itani'". Razdel 23.0. "Prjamoe vozde'ctvie molnii". – M.: Izd-vo gosctandartov Rocci'cko' Federatsii. – 2004. – С. 258-273. 9. MIL-STD-464A. Voenn'i' ctandart CSHA "Elektromagnitn'ie i ekologiceckie effekt'i vozde'ctviya molnii. Trebovanija interfe'ca i kriterii proverki cictem". – 2002. – С. 1-162. 10. Baranov M.I. Elektrottermicheckaja sto'kost izolirovann'ih provodov i kabele' k vozde'ctviyu bolshih impulcn'ih tokov molnii // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2003. – № 2. – С. 67-74. 11. Baranov M.I. Izbrann'ie voproc'i elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 2: Teorija elektrofizicheckih effektov i zadach. – Harkov: Izd-vo NTU "HPI", 2010. – 407 c. 12. Knopfel G. Cverhciln'ie impulcn'ie magnitn'ie polja. – M.: Mir, 1972. – 391 c.

Поступила 27.11.2010

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.,
Кравченко Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
Носенко Марина Александровна, н.с.
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт"
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua*

Baranov M.I., Kravchenko V.I., Nosenko M.A.
**Experimental research into electrothermal stability
of aircraft metallic elements against direct action
of artificial lightning current. Part 2: stability of copper
wires and cables.**

Results of electrothermal stability are experimentally obtained for a number of short copper wires and cables specimens of various brands of air-borne electrical circuits under direct separate or joint action of pulse A or continuous C components of artificial lightning current with peak-time parameters rated according to international requirements.

Key words – artificial lightning current, air-borne copper wires and cables, electrothermal stability.