

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА МАССИВНЫХ ОДНОРОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИСКРОВЫХ ВОЗДУШНЫХ КОММУТАТОРОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Приведено результати наближеної розрахункової кількісної оцінки маси викинутого матеріалу за один іскровий розряд і питомого електричного зносу для масивних сталевих електродів-анодів високовольтних іскрових повітряних коммутаторів атмосферного тиску, що випробують дію великих імпульсних загасаючих синусоїдальних струмів мікросекундного тимчасового діапазону.

Приведены результаты приближенной расчетной количественной оценки массы выброшенного материала за один искровой разряд и удельного электрического износа для массивных стальных электродов-анодов высоковольтных искровых воздушных коммутаторов атмосферного давления, испытывающих воздействие больших импульсных затухающих синусоидальных токов микросекундного временного диапазона.

ВВЕДЕНИЕ

Управляемые (неуправляемые) высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы (ВСИК) с газовой (воздушной) изоляцией повышенного или атмосферного давления в рабочем промежутке между их основными массивными металлическими электродами нашли широкое практическое применение в составе высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ), используемых в технике высоких напряжений, больших импульсных токов (БИТ), сильных электрических и магнитных полей для решения многих научных и технологических задач [1-7]. Импульсные искровые разряды, происходящие между основными металлическими электродами данных сильноточных газовых разрядников, многократно коммутирующих в разрядных цепях ВЭФУ микро- и миллисекундные импульсы тока амплитудой от единиц до сотен килоампер, вызывают активную электрическую эрозию электродов ВСИК [8-11]. Данная эрозия разрушает рабочие поверхности металлических электродов, выполняемых из разных материалов с различными температурами их кипения (например, из тугоплавких металлов, вольфрамово-медных композиций и других материалов), и приводит к ухудшению коммутационных характеристик ВСИК (например, к изменению статического напряжения их срабатывания, изменению времени коммутации и снижению показателей надежности их работы в составе ВЭФУ) [1, 2, 12, 14]. Исследованию процессов электрической эрозии металлических электродов ВСИК посвящен многочисленный ряд работ [12-15]. Несмотря на это, слабоосвещенной с расчетных и экспериментальных позиций областью при изучении электрической эрозии металлических электродов ВСИК остается инженерная оценка электроэрозионного износа их рабочих поверхностей при воздействии на электроды БИТ различных амплитудно-временных параметров (АВП) и вытекающие из нее практические рекомендации по продлению срока службы указанных ВСИК.

Целью данной статьи является расчетная оценка потери массы и удельного износа для массивных металлических электродов ВСИК, применяемых в разрядных цепях мощных ВЭФУ с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ) в режиме их затухающего синусоидального разряда на электрическую нагрузку.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим массивные металлические однородные электроды ВСИК, через которые при коммутации сильноточных цепей ВЭФУ с ЕНЭ протекает БИТ с АВП, характерными для колебательного разряда ЕНЭ на активно-индуктивную нагрузку. Ограничимся исследованием случая, когда габаритные размеры (наружный радиус R_k или толщина h_k) электродов ВСИК значительно превышают глубины проникновения в них электромагнитного и теплового полей, создаваемых каналом искрового разряда в зонах его привязки на их рабочих поверхностях (рис. 1). Считаем, что рассматриваемые электроды могут быть выполнены из различных материалов, характеризующихся соответствующими уровнями приэлектродного падения напряжения U_k , практически не зависящими от АВП протекающего через них БИТ [16]. Полагаем, что значения U_k определяются видом материала электрода и полярностью приложенного к нему электрического напряжения (потенциала) от ЕНЭ ВЭФУ [16]. В этой связи принимаем, что исследуемые основные электроды ВСИК, расположенные на расстоянии l_k друг от друга при нормальных условиях в окружающей их воздушной среде атмосферного давления (воздушное давление составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а температура воздуха равна 0 °С [17]), образуют двухэлектродную систему (ДЭС), состоящую из катода (отрицательно заряженного электрода, имеющего избыток свободных электронов) и анода (положительно заряженного электрода, имеющего недостаток свободных электронов). Пусть при приложении к воздушной ДЭС исследуемого разрядника электрического напряжения U_{ok} катоду соответствует приэлектродное падение напряжения U_{kk} , а аноду – напряжение U_{ka} . Считаем, что после электрического пробоя воздушного промежутка между основными электродами ВСИК и воздействия образующейся в искровом канале низкотемпературной плазмы с усредненной в нем по поперечному сечению амплитудной плотностью затухающего синусоидального тока δ_{om} на их рабочие поверхности в воздушной ДЭС коммутатора на атомарном уровне происходит перенос испарившейся массы материала с анода на катод. На аноде от воздействия на него интенсивного теплового потока (с усредненной амплитудной плотностью q_{om}) плаз-

менного канала искрового разряда и последующей локальной сублимации его материала образуются лунки (кратеры) [10], геометрическая форма которых близка к форме шарового сегмента [11, 15].

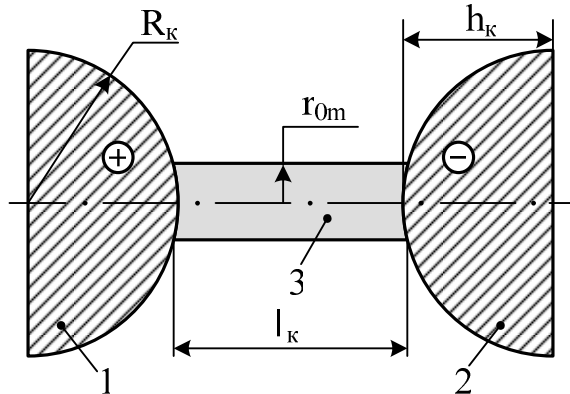


Рис. 1. Схематическое изображение массивных металлических электродов воздушного ВСИК, испытывающих воздействие БИТ (1,2 – основные электроды коммутатора, являющиеся анодом и катодом ДЭС; 3 – канал искрового сильноточного воздушного разряда радиусом r_{0m} и длиной l_k)

Количество испарившегося вещества из лунки анода, которое осело после прохождения искрового разряда на его наружной поверхности, пренебрегаем. В обоснование такого приближенного механизма электрической эрозии электродов ВСИК укажем, что после локального испарения в круговой опорной зоне на аноде радиусом, примерно равным максимальному радиусу r_{0m} канала искрового разряда между электродами ВСИК [15], и ионизации выброшенных микрочастиц материала с электрода-анода, интенсивно бомбардируемого ускоренными электронами в рабочем воздушном промежутке ДЭС с усредненной напряженностью электрического поля $E_{0k} = U_{0k} / l_k$, испарившиеся атомы материала с анода ВСИК из-за протекания в них активной термоэлектронной эмиссии [18] приобретают положительный потенциал и начинают движение в сторону электрода-катода коммутатора. Достигнув катода, они образуют на его рабочей поверхности "рельефообразные наслоения" (в случае $R_k > r_{0m}$) или "конусообразные наросты" с вершиной в сторону анода (в случае $R_k < r_{0m}$), характеризующиеся высокой температурой плавления и механической прочностью. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, наблюдаемые как автором на действующих ВЭФУ с воздушными ВСИК, так и описанные ранее в научно-технической литературе другими исследователями электрической эрозии металлических электродов ВСИК [1, 13]. Требуется с учетом принятых допущений и изложенных положений выполнить расчетную оценку удельного электрического износа F_k однородного металлического электрода-анода ВСИК, равного отношению массы M_k выброшенного из лунки анода материала за один затухающий колебательный разряд ЕНЭ в сильноточной цепи ВЭФУ к количеству Q_k протекшего при этом через металлические электроды ВСИК электричества (электрического заряда).

2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Оценка потери массы M_k электродом коммутатора от действия сильноточной искры. Массу M_k сублимируемого металла из электрода-анода ВСИК за один электрический разряд через него мощного ЕНЭ в сильноточной цепи ВЭФУ определим, как и в [15], из следующего приближенного соотношения:

$$M_k = U_{ka} Q_k d_{ka} / W_{ca}, \quad (1)$$

где d_{ka} – плотность материала электрода-анода ВСИК; W_{ca} – удельная энергия (теплота) сублимации для материала электрода-анода ВСИК.

Численные значения для приэлектродного падения напряжения U_{ka} и вероятных минимальных уровней усредненной плотности теплового потока q_{0m} в канале искрового разряда радиусом r_{0m} на основании данных работ [16, 19] применительно к используемому на практике ряду материалов электрода-анода ВСИК сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения U_{ka} и q_{0m} для ряда металлов и сплавов, используемых при изготовлении электродов-анодов ВСИК [16,19]

| Наименование материала анода | Величина U_{ka} , В | Величина q_{0m} , Вт/м ² |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Сталь 3 | 6,1 | $1,8 \cdot 10^8$ |
| Алюминий | 8,2 | $2,1 \cdot 10^8$ |
| Латунь Л62 | 8,0 | $2,6 \cdot 10^8$ |
| Медь | 8,6 | $3,3 \cdot 10^8$ |

Что касается численных значений для удельной энергии сублимации W_{ca} и вероятных минимальных уровней усредненной плотности импульсного тока δ_{0m} в канале воздушного искрового разряда радиусом r_0 для электрода-анода ВСИК, то они с учетом результатов работ [3, 15, 16] для некоторых металлов и сплавов могут быть представлены в виде табл. 2.

Таблица 2

Значения W_{ca} и δ_{0m} для ряда металлов и сплавов, используемых при изготовлении электродов-анодов ВСИК [3, 15, 16]

| Наименование материала анода | Величина W_{ca} , Дж/м ³ | Величина δ_{0m} , А/м ² |
|------------------------------|---------------------------------------|---|
| Сталь 3 | $5,56 \cdot 10^{10}$ | $28 \cdot 10^6$ |
| Алюминий | $2,29 \cdot 10^{10}$ | $25 \cdot 10^6$ |
| Латунь Л62 | $2,98 \cdot 10^{10}$ | $32 \cdot 10^6$ |
| Медь | $4,68 \cdot 10^{10}$ | $38 \cdot 10^6$ |

Указанные в табл. 1 и 2 ориентировочные минимальные значения для плотности теплового потока q_{0m} и плотности импульсного тока δ_{0m} в искровом канале ВСИК, характерные для длительной аperiodической составляющей тока молнии амплитудой $I_{mC} \leq 1$ кА при ее длительности τ_{uc} в сотни миллисекунд [7, 16], с целью своих необходимых уточнений в дальнейшем применительно к рассматриваемому здесь случаю (биполярные токи амплитудой $I_{mA} \geq 100$ кА при их длительности τ_{uA} в сотни микросекунд, характерные для импульсной составляющей тока молнии [7, 11]) требуют приведения ниже расчетного соотношения для радиуса r_{0m} канала сильноточной искры в разряд-

ном воздушном промежутке длиной l_k ВСИК при принятом затухающем синусоидальном разряде мощного ЕНЭ через металлические электроды рассматриваемого воздушного коммутатора в цепи ВЭФУ [15]:

$$r_{0m} = 0,093(I_{mA})^{1/3}(t_{mA})^{1/2}, \quad (2)$$

где t_{mA} – время, соответствующее амплитуде I_{mA} разрядного затухающего синусоидального тока ЕНЭ в силовоточной цепи ВЭФУ.

Согласно выражения (2), полученного на основе известной формулы Брагинского для радиуса сильнооточной искры [7, 11], при $I_{mA} = 212$ кА и $t_{mA} = 34$ мкс, отвечающим реальным условиям работы ВСИК со стальными основными электродами при натурных испытаниях технических объектов на молниестойкость [7, 11], величина радиуса r_{0m} искрового канала составляет значение, примерно равное 32,3 мм. Тогда для усредненной амплитудной плотности импульсного тока δ_{0m} , воздействующей на стальной электрод-анод ВСИК, из соотношения вида $\delta_{0m} = I_{mA} / \pi r_{0m}^2$ получаем величину, численно равную около $64,7 \cdot 10^6$ А/м². Видно, что полученное нами численное значение для δ_{0m} более чем в два раза превышает плотность тока, указанную в табл. 2 для рассматриваемого электрода ВСИК. Данный результат для δ_{0m} позволяет уточнить и численное значение для усредненной плотности теплового потока q_{0m} , воздействующей в исследуемом случае на рабочую поверхность стального электрода-анода ВСИК и рассчитываемой по следующему выражению [16, 20]:

$$q_{0m} = \delta_{0m} U_{ka}. \quad (3)$$

Воспользовавшись численными данными табл. 1 для U_{ka} , при $\delta_{0m} = 64,7 \cdot 10^6$ А/м² ($I_{mA} = 212$ кА; $t_{mA} = 34$ мкс; $r_{0m} = 32,3$ мм) из (3) для q_{0m} находим, что усредненная амплитудная плотность теплового потока в опорной зоне канала искрового разряда на рабочей поверхности стального анода ВСИК в нашем случае оказывается равной $3,95 \cdot 10^8$ Вт/м². Полученный количественный результат для q_{0m} примерно в 2,2 раза больше соответствующей величины, приведенной в табл. 1 для стального электрода.

Определившись с такими важными для анализа процесса электрической эрозии и износа металлических электродов ВСИК параметрами как максимальный радиус r_{0m} канала искрового воздушного разряда в опорной зоне на аноде, усредненная амплитудная плотность импульсного тока δ_{0m} в канале разряда, усредненная амплитудная плотность теплового потока q_{0m} в канале искрового разряда, приэлектродное падение напряжения вблизи анода U_{ka} и удельная энергия сублимации W_{ca} для материала электрода-анода, остановимся на определении для (1) количества электричества Q_k , протекшего через рассматриваемые электроды ВСИК. С этой целью используем классическое выражение для нахождения величины электрического заряда Q_k , коммутируемого в импульсном режиме в разрядной цепи мощного ЕНЭ рассматриваемым нами ВСИК, в следующем виде [1]:

$$Q_k = \int_0^{\tau_{uA}} i_k(t) dt, \quad (4)$$

где $i_k(t) = k_A I_{mA} \exp(-\delta_A t) \sin(\omega_A t)$ – затухающий синусоидальный ток в разрядной цепи ЕНЭ [15, 18]; $k_A = [\exp(-\delta_A \omega_A^{-1} \text{arcctg } \delta_A \omega_A^{-1}) \sin(\text{arcctg } \delta_A \omega_A^{-1})]^{-1}$ – нормирующий коэффициент [18]; δ_A, ω_A – соответственно коэффициент затухания и круговая частота тока, протекающего через электроды коммутатора; τ_{uA} – длительность протекания через электроды коммутатора импульсного тока; t – текущее время.

Пример расчета удаленной искровой массы M_k для стального электрода коммутатора. Остановимся на реальной конструкции управляемого трехэлектродного каскадного воздушного разрядника на 50 кВ типа ТКВР-50, созданного сотрудниками НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" с участием автора в 2007 году и применяемого сейчас при формировании нормированной импульсной А компоненты тока молнии, АВП которой были ранее указаны в [7, 21]. Внешний вид данного воздушного ВСИК, содержащего аналогично схеме рис. 1 массивные полусферические стальные (Ст. 3) основные электроды, приведен на рис. 2.

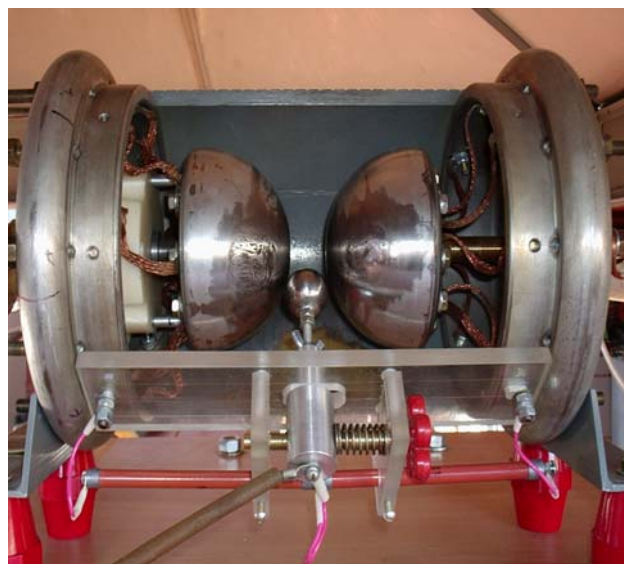


Рис. 2. Внешний вид ВСИК на 50 кВ типа ТКВР-50, содержащего два полусферических основных $\varnothing 123$ мм и один шаровой управляющий $\varnothing 30$ мм стальные электроды

На рис. 3 показана типичная осциллограмма затухающего синусоидального разрядного тока $i_k(t)$ в силовоточной цепи мощного ЕНЭ (при его зарядном напряжении $U_{3A} = -27,4$ кВ; емкости $C_A = 336$ мкФ; индуктивности $L_A = 2,05$ мкГн; активном сопротивлении $R_A = 0,061$ Ом [7, 21]), имитирующего с помощью ВСИК типа ТКВР-50 импульсную А составляющую тока молнии на эквиваленте электрической RL-нагрузки ($R_H = 0,05$ Ом; $L_H = 1$ мкГн [7, 21]). Измерение АВП приведенного на рис. 3 импульсного тока $i_k(t)$ было выполнено при помощи аттестованного шунта типа ШК-300, имеющего при этом на выходе коэффициент преобразования, равный 11261 А/В [7, 21].

Расшифровка АВП токовой осциллограммы на рис. 3 и использование соотношения (4) показывают, что в данном конкретном случае колебательного разряда ($\omega_A = 34,15 \cdot 10^3$ с⁻¹; $\delta_A = 1,495 \cdot 10^4$ с⁻¹; $k_A = 1,812$) модуль величины электрического заряда Q_k , протек-

шего через основные электроды ВСИК, при $I_{mA} = -212$ кА и $\tau_{uA} = 500$ мкс оказывается примерно равным 9,21 Кл. Тогда из (1) при $U_{ka} = 6,1$ В, $d_{ka} = 7,82 \cdot 10^3$ кг/м³, $|Q_k| = 9,21$ Кл и $W_{ca} = 5,56 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ масса металла, выброшенная искрой из стального электрода-анода за один сильноточный искровой разряд в рабочем воздушном промежутке ВСИК составит величину, равную около $M_k = 7,9$ мг.

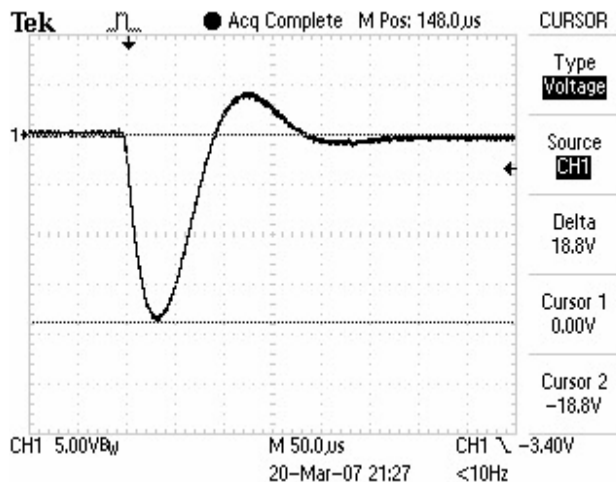


Рис. 3. Осциллограмма разрядного тока мощного ЕНЭ в сильноточной цепи ВЭФУ, полученная с использованием воздушного ВСИК атмосферного давления типа ТКВР-50 со стальными основными электродами и активно-индуктивной нагрузки ($I_{mA} = -212$ кА; $t_{mA} = 34$ мкс; $\tau_{uA} = 500$ мкс) [7, 21]

На рис. 4 хорошо видны последствия такого сублимационного уноса материала со стального электрода-анода исследуемого ВСИК. При количестве N_p сильноточных искровых разрядов в ВСИК с одинаковыми АВП их токов общая потеря массы его электродом-анодом будет примерно равной $M_{kp} = N_p \cdot M_k$. Из практики эксплуатации воздушного ВСИК типа ТКВР-50 следует, что для исключения заметного влияния на его работу последствий электрической эрозии собственных электродов и сохранения стабильности работы разрядника в сильноточной цепи мощного ЕНЭ, используемого при имитации импульсной А компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП [7, 21], основные стальные электроды данного коммутатора после воздействия на них сильноточных искровых разрядов в количестве, равном не более $N_p = 30$, необходимо тщательно защищать и полировать [7].

Оценка удельного износа F_k электрода коммутатора.

Из (1) для удельного электрического износа F_k электрода-анода рассматриваемого воздушного ВСИК получаем следующее выражение:

$$F_k = U_{ka} d_{ka} / W_{ca} \quad (5)$$

Из (5) видно, что чем больше значение удельной энергии сублимации W_{ca} для материала электрода-анода, тем меньше и его удельный износ F_k , обусловленный воздействием на него низкотемпературной плазмы искрового разряда.

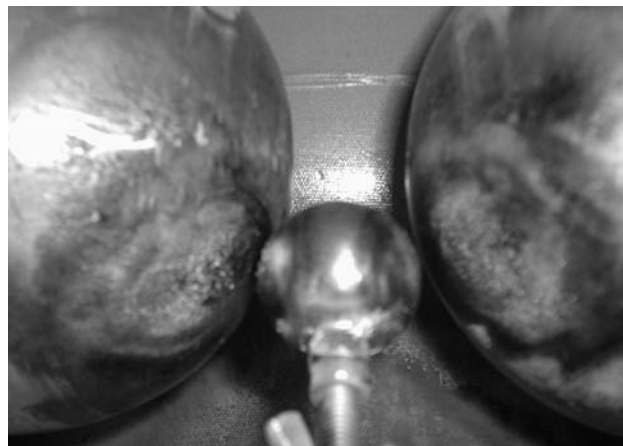


Рис. 4. Внешний вид электроэрозионных следов на массивных стальных основных электродах наружным радиусом $R_k = 61,5$ мм (слева – анод, справа – катод, а по центру – управляющий стальной электрод $\varnothing 30$ мм) трехэлектродного воздушного разрядника на 50 кВ типа ТКВР-50 после прохождения через них одного затухающего синусоидального импульса тока амплитудой $I_{mA} = -212$ кА при $t_{mA} = 34$ мкс с длительностью протекания около $\tau_{uA} = 500$ мкс [7, 21]

При оценке F_k , безусловно, необходимо принимать во внимание согласно (5) не только одну величину W_{ca} (изменяется от $2,29 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ – для алюминия до $9,28 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ – для вольфрама [3,15]), но и ее соотношение с такими величинами как приэлектродное падение напряжения U_{ka} (для сильноточных разрядов изменяется незначительно и принимает для различных металлических материалов численные значения от 5 до 10 В [20]) и плотность материала электрода-анода d_{ka} (изменяется от $2,71 \cdot 10^3$ кг/м³ – для алюминия до $19,1 \cdot 10^3$ кг/м³ – для вольфрама [17]). Численная оценка по (5) значений F_k показывает, что для исследуемого массивного стального электрода-анода ВСИК на напряжение 50 кВ типа ТКВР-50, предназначенного для коммутации импульсных микросекундных токов с длительностью $\tau_{uA} \leq 500$ мкс и амплитудой I_{mA} до 300 кА [7], при $U_{ka} = 6,1$ В, $d_{ka} = 7,82 \cdot 10^3$ кг/м³ и $W_{ca} = 5,56 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ удельный электроэрозионный износ его основных электродов может принимать значение около $8,58 \cdot 10^{-4}$ г/Кл. Отметим, что согласно опытным данным [22] удельный электрический износ F_k для металлокерамических основных электродов управляемых высоковольтных газоразрядных (воздушных) сильноточных разрядников на напряжение 50 кВ типа РГУ1-50-100 (рассчитаны на коммутацию импульсных микросекундных токов при $\tau_{uA} \leq 100$ мкс амплитудой I_{mA} до 100 кА), выполненных на основе металлокерамики "вольфрам-медь", составляет около $4,4 \cdot 10^{-5}$ г/Кл. Повышенная электроэрозионная стойкость металлокерамики по сравнению с однородными металлическими электродами (например, рассматриваемыми нами массивными стальными электродами в ВСИК типа ТКВР-50) может быть связана с повышенными удельными потерями энергии на локальное испарение (сублимацию) в зоне привязки искрового канала на ее наружной поверхности одной из компонент такого компо-

зиционного материала (например, меди) и затрудненным выбросом из этой металлокомпозиции жидкой фазы [20]. Этой устоявшейся научной точке зрения в теории электрической эрозии сильноточных электродов удовлетворяют и предлагаемые автором простые по структуре расчетные формулы (1) и (5) для приближенной оценки соответственно массы M_k эрозируемого металла за один сильноточный искровой разряд и удельного электроэрозионного износа F_k для массивных однородных металлических электродов воздушных ВСИК атмосферного давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены соотношения для приближенной расчетной оценки убыли массы M_k (M_{kP}) и удельного электроэрозионного износа F_k массивных металлических однородных электродов воздушного ВСИК атмосферного давления, испытывающих воздействие сильноточных искровых разрядов, АВП импульсных токов которых характеризуются амплитудами I_{mA} в десятки (сотни) килоампер, временем нарастания до токовых амплитуд t_{mA} в десятки микросекунд и длительностями протекания τ_{HA} в сотни микросекунд.

2. Полученные количественные результаты для M_k , M_{kP} , и F_k не противоречат известным данным экспериментальных исследований электрической эрозии сильноточных электродов воздушных коммутаторов мощных ВЭФУ под действием БИТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.- М.: Атомиздат, 1970.-472с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.-391 с.
3. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карнюшина. Минск: Наука и техника, 1983.-151 с.
4. Гулий Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.-208 с.
5. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. и др. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок// Приборы и техника эксперимента.-2001.-№2.-С. 79-88.
6. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябко Ю.П. и др. Высоковольтные сильноточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов// Технічна електродинаміка.-2003.-№3.- С. 41-47.
7. 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.
8. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления.- М.: Энергия, 1978. - 456 с.
9. Намитоков К.К. Электронно-микроскопическое и рентгенографическое исследование продуктов электрической эрозии металлов// Украинский физический журнал.-1961.-Т.6.-№4.- С. 556-563.
10. Намитоков К.К. О строении и составе отдельных лунок разрушения поверхности электродов импульсным разрядом// Украинский физический журнал.-1962.-Т.7.-№10. - С. 1139-1141.
11. Баранов М.И. Расчет кратера электротеплового разрушения на металлической обшивке летательного аппарата при прямом ударе в нее молнии// Електротехніка і електромеханіка.-2003.- №4.- С. 101-103.
12. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Влияние материала электродов на эрозию при сильных токах// Журнал технической физики.-1967.-Т.37.-№5.-С. 977-979.
13. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Особенности эрозии электродов при больших импульсных токах// Журнал технической физики.-1967.-Т.37.-№5.-С. 996-998.
14. Зорин В.Б., Головина У.Ю., Мазурин И.М. и др. Эрозия электродов при сильноточном мегавольтном разряде в элегазе// Журнал технической физики.-1986.-Т.56.-№5. - С. 926-929.
15. Баранов М.И. Приближенный расчет электрической эрозии металлических электродов высоковольтных сильноточных искровых коммутаторов // Технічна електродинаміка.- 2004.- №5. - С. 11-14.
16. Абрамов Н.Р., Кужекин И.П., Ларионов В.П. Характеристики проплавления стенок металлических объектов при воздействии на них молнии// Электричество.-1986.-№11. - С. 22-27.
17. Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем.- М.: Мир, 1982.-520 с.
18. Баранов М.И. Термоэлектронная эмиссия из металла при нагреве и электрическом взрыве проводников под воздействием больших импульсных токов// Технічна електродинаміка.-2008.-№3.-С. 3-8.
19. Абрамов Н.Р. Расчет теплового воздействия канала молнии на металлические объекты// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1986.-№1.-С. 118-126.
20. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А. и др. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов.- М.: Энергия, 1978.- 256 с.
21. 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 // Електротехніка і електромеханіка.-2008.-№3.-С. 69-75.
22. Ермилов И.В. Разработка комплекса высоковольтного сильноточного оборудования нового поколения для магнитно-импульсной обработки материалов// Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Россия, г. Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007).- С. 88-98.

Поступила 14.07.2008

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"
тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33,
e-mail: eft@kpi.kharkov.ua