

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ КАНАЛА ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В СИЛЬНОТОЧНОЙ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ МОЩНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

*Приведені результати розрахункової оцінки еквівалентного активного опору  $R_{ce}$  каналу імпульсного дугового електричного розряду в повітряній двоелектродній системі (ДЕС) сильноточного розрядного кола потужного високовольтного ємнісного накопичувача енергії (ЕНЕ), використовуюваного при моделюванні в лабораторних умовах тривалої С-компоненти струму штучної блискавки. Рекомендовано розрахункове співвідношення для оцінки максимальної електронної температури  $T_{me}$  в низькотемпературній плазмі каналу імпульсної електричної дуги в досліджуваній повітряній ДЕС. Виконана практична апробація отриманих співвідношень для  $R_{ce}$  і  $T_{me}$  стосовно повітряної ДЕС сильноточного розрядного кола потужного високовольтного ЕНЕ генератора ГИТ-С, що діє, призначеного для проведення випробувань технічних об'єктів на електротермічну стійкість до дії тривалої С-компоненти струму штучної блискавки з амплітудно-часовими параметрами, що відповідають нормативним документам США SAE ARP 5412: 2013 і SAE ARP 5416: 2013. Бібл. 16, рис. 6.*

*Ключові слова:* потужний високовольтний ємнісний накопичувач енергії, повітряна двоелектродна система, імпульсна електрична дуга, активний опір каналу імпульсної електричної дуги, максимальна температура каналу імпульсної електричної дуги.

*Приведены результаты расчетной оценки эквивалентного активного сопротивления  $R_{ce}$  канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной двухэлектродной системе (ДЭС) сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), используемого при моделировании в лабораторных условиях длительной С-компоненты тока искусственной молнии. Рекомендовано расчетное соотношение для оценки максимальной электронной температуры  $T_{me}$  в низкотемпературной плазме канала импульсной электрической дуги в исследуемой воздушной ДЭС. Выполнена практическая апробация полученных соотношений для  $R_{ce}$  и  $T_{me}$  применительно к воздушной ДЭС сильноточной разрядной цепи действующего мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С, предназначенного для проведения испытаний технических объектов на электротермическую стойкость к воздействию длительной С-компоненты тока искусственной молнии с амплитудно-временными параметрами, соответствующими нормативным документам США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013. Библ. 16, рис. 6.*

*Ключевые слова:* мощный высоковольтный емкостный накопитель энергии, воздушная двухэлектродная система, импульсная электрическая дуга, активное сопротивление канала импульсной электрической дуги, максимальная температура канала импульсной электрической дуги.

**Введение.** Известно, что в газоразрядных промежутках (например, в воздушных зазорах высоковольтных воздушных коммутаторов и иных электродных систем электрических нагрузок) цепей высоковольтных электроустановок с мощными емкостными накопителями энергии (ЕНЭ), предназначенных для воспроизведения в лабораторных условиях сильноточных электрофизических явлений (например, искусственной молнии с А-импульсной и С-длительной компонентами тока), могут протекать как импульсные искровые электрические разряды, так и импульсные дуговые электрические разряды [1-3]. Для импульсных искровых электрических разрядов, протекающих в воздушных промежутках разрядных цепей мощных высоковольтных ЕНЭ, характерными параметрами являются длительность их протекания  $\tau_{pd} \leq 1$  мс и амплитуда силы их тока  $I_{md} \leq 1000$  кА [1]. Что касается импульсных дуговых электрических разрядов в разрядных цепях мощных высоковольтных ЕНЭ, то для них указанные электрические параметры  $\tau_{pd}$  и  $I_{md}$  характеризуются следующими численными значениями [2, 3]:  $1000 \text{ мс} \geq \tau_{pd} \geq 100 \text{ мс}$  и  $1000 \text{ А} \geq I_{md} \geq 100 \text{ А}$ . В последнем случае численные значения параметров  $\tau_{pd}$  и  $I_{md}$  практически соответствуют известным характеристикам классического дугового электрического разряда, возникающего в воздушной двухэлектродной

системе (ДЭС) между ее катодом и анодом при постоянном или переменном токе в электрической цепи [4]. Согласно данным, приведенным в [4, 5], дуговой электрический разряд в воздушной ДЭС поддерживается за счет термоэлектронной эмиссии с поверхности металлического или графитового электрода-катода. За счет ускорения электронов в межэлектродном промежутке и ударной ионизации ими молекул воздуха между катодом и анодом ДЭС возникает столб (канал) ярко светящегося сильно ионизированного газа, называемого в электрофизике электронно-ионной плазмой. При этом для классического примера дугового электрического разряда на открытом воздухе между графитовыми (угольными) электродами ДЭС термодинамическая температура канала дуги радиусом до 4 мм при постоянном токе в 200 А на поверхности анода в его центральной зоне может достигать значения до 4200 К, а на поверхности катода – до 3500 К [4, 5].

В [6, 7] были представлены результаты приближенного расчета активного сопротивления  $R_c$  канала импульсного искрового электрического разряда между металлическими электродами высоковольтного сильноточного воздушного коммутатора атмосферного давления. Простые и удобные формулы для оценки максимальной температуры  $T_{me}$  электронно-ионной

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

плазмы импульсной электрической дуги в воздушной ДЭС в настоящее время нам не известны. Несомненный научный и практический интерес представляют электрофизические задачи, связанные с расчетным определением активного сопротивления  $R_{ce}$  и максимальной температуры  $T_{me}$  канала импульсного дугового электрического разряда между металлическими (графитовыми) электродами воздушной ДЭС в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ испытательной электрофизической установки.

**Целью статьи** является приближенный расчет активного сопротивления  $R_{ce}$  и максимальной температуры  $T_{me}$  плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС, входящей в состав сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ, а также практическая апробация данных расчетов в условиях высоковольтной лаборатории на реальном мощном ЕНЭ электроустановки.

**1. Постановка задачи исследования.** Рассмотрим воздушную ДЭС, размещенную в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора импульсного тока (ГИТ), ЕНЭ которого построен по одномодульной схеме на основе параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов и предназначен для воспроизведения в воздушном промежутке длиной  $h_a$  ДЭС длительной С-компоненты тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП) согласно технических требований действующих нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013 [8, 9]. Напомним, что нормируемые АВП для апериодической длительной С-компоненты тока молнии имеют нижеследующие численные значения [8, 9]: амплитуда тока  $I_{mdc} = \pm(200-800)$  А; переносимый электрический заряд  $q_{dc} = \pm(200 \pm 40)$  Кл; продолжительность протекания тока  $\tau_{pdc} = (0,25-1)$  с. Видно, что АВП указанной компоненты тока искусственной молнии соответствуют основным характеристикам тока дугового электрического разряда между катодом и анодом воздушной ДЭС [4, 5]. Принимаем, что металлические или графитовые электроды рассматриваемой ДЭС расположены в атмосферном воздухе при нормальных условиях (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура равна  $\theta_0 = 0^\circ \text{C}$  [4]). С учетом указанных численных значений  $\tau_{pdc}$  используем условие изотермичности плазмы в канале рассматриваемой электрической дуги, согласно которому ее максимальная электронная температура  $T_{me}$  будет практически равна максимальной температуре  $T_{mi}$  носителей ее ионного тока ( $T_{me} \approx T_{mi}$ ) [4]. Полагаем, что в ДЭС длина  $l_{ce}$  цилиндрического канала равновесной плазмы импульсной электрической дуги в первом приближении равна минимальной длине межэлектродного воздушного промежутка в исследуемой ДЭС. Принимаем, что в сильноточном канале дугового электрического разряда в воздушной ДЭС плотность тока  $\delta_{dc}$ , термодинамическая электронная  $T_{me}$  и ионная  $T_{mi}$  температуры его равновесной плазмы в первом приближении характеризуются практически однородным распределением по его радиусу. Требуется в рамках инженерного подхода получить новое расчетное соотношение для активного сопротивления

$R_{ce}$  и рекомендовать простую формулу для расчетной оценки максимальной температуры  $T_{me}$  плазмы канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС, а также осуществить практическую апробацию выполненных приближенных расчетов величин  $R_{ce}$  и  $T_{me}$  применительно к реальной сильноточной разрядной цепи действующего мощного ГИТ (ГИТ-С), имитирующего на низкоомной  $RL$ -нагрузке длительную С-компоненту тока искусственной молнии.

**2. Основные расчетные соотношения.** Воспользовавшись плазмодинамическим методом расчета величины  $R_{ce}$  [6], для переменного во времени  $t$  активного сопротивления плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в исследуемой воздушной ДЭС запишем следующее выражение:

$$R_{ce}(t) = l_{ce} [\pi r_{ce}^2(t) \gamma_{ce}]^{-1}, \quad (1)$$

где  $r_{ce}(t)$  – изменяющийся во времени  $t$  радиус плазменного канала дугового электрического разряда между металлическими (графитовыми) электродами ДЭС;  $\gamma_{ce}$  – усредненная удельная электропроводность низкотемпературной плазмы в цилиндрическом канале импульсной дуги между электродами ДЭС.

Известно, что величина  $r_{ce}(t)$  в процессе протекания импульсного разрядного тока  $i_{dc}(t)$  мощного ЕНЭ генератора ГИТ-С через исследуемую ДЭС изменяется на нарастающей части апериодического токового импульса от своего минимального нулевого значения (момент времени  $t=0$ ) до своего максимального значения  $r_{cem}$ , соответствующего моменту времени  $t_{mdc}$ , когда сила тока  $i_{dc}(t)$  достигает своего максимального значения  $I_{mdc}$ . На спадающей части указанного импульса тока величина  $r_{ce}(t)$  изменяется от максимального значения  $r_{cem}$  (момент времени  $t_{mdc}$ ) до минимального нулевого значения, соответствующего моменту прекращения протекания импульсного разрядного тока  $i_{dc}(t)$  через воздушную ДЭС (момент времени  $t=\tau_{pdc}$ ). Очевидно, что в моменты времени  $t=0$  и  $t=\tau_{pdc}$  активное сопротивление плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС принимает согласно (1) бесконечно большие численные значения. В связи с этим пользоваться напрямую соотношением (1) для практических расчетов величины  $R_{ce}(t)$  невозможно. Поэтому перед нами возникает новая электротехническая задача, связанная с заменой переменной во времени  $t$  величины активного сопротивления  $R_{ce}(t)$  импульсной электрической дуги на некоторую эквивалентную величину ее активного сопротивления  $R_{ce}$ , остающуюся постоянной в течение всего процесса протекания импульсного разрядного тока  $i_{dc}(t)$  апериодической временной формы через рассматриваемую ДЭС. Одним из возможных путей приближенного решения подобной задачи может стать усреднение в (1) во времени  $t$  величины  $R_{ce}(t)$ . Причем, такое нестандартное усреднение, когда в правой части выражения (1) усреднению подлежит временная функция вида  $f(r_{ce}) = r_{ce}^2(t)$ . О пределах изменения этой функции нами было сказано выше. Тогда для эквивалентного активного сопротивления  $R_{ce}$  канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС получаем соотношение:

$$R_{ce} = l_{ce} / (\pi \gamma_{ce} r_{cem}^{-1} \int_0^{r_{cem}} r_{ce}^2 dr_{ce}) = 3l_{ce} (\pi r_{cem}^2 \gamma_{ce})^{-1}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что для нахождения численного значения величины эквивалентного активного сопротивления  $R_{ce}$  канала дугового разряда длиной  $l_{ce}$  необходимо знать его два таких параметра как максимальный радиус  $r_{cem}$  и усредненную удельную электропроводность  $\gamma_{ce}$  электронно-ионной плазмы, формирующей столб рассматриваемой электрической дуги. Радиус  $r_{cem}$  (м) канала импульсного дугового разряда в воздушной ДЭС зависит от силы протекающего в нем разрядного тока  $i_{dc}(t)$  мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С и для нормальных атмосферных условий в системе СИ определяется в виде [3, 10]:

$$r_{cem} = 1,1 \cdot 10^{-4} (I_{mdc})^{1/2}. \quad (3)$$

где  $I_{mdc}$  – амплитуда (А) аperiodической длительной С- компоненты тока искусственной молнии в плазменном канале импульсной электрической дуги ДЭС.

Подставив (3) в (2), для эквивалентного активного сопротивления  $R_{ce}$  (Ом) плазменного канала импульсной электрической дуги в ДЭС сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С получаем следующее соотношение:

$$R_{ce} = 78,92 \cdot 10^6 l_{ce} (I_{mdc} \gamma_{ce})^{-1}. \quad (4)$$

Из (4) вытекает, что с увеличением силы тока  $I_{mdc}$  в разрядной цепи мощного ЕНЭ максимальное падение напряжения  $U_{mdc} = R_{ce} I_{mdc}$  на импульсной электрической дуге в воздушной ДЭС будет убывать. Связано это с тем, что с возрастанием тока  $I_{mdc}$  за счет увеличения термоэлектронной эмиссии с катода ДЭС степень ионизации газа в ее разрядном промежутке будет также возрастать. Возрастание ионизации газа в воздушном разрядном промежутке ДЭС будет приводить к увеличению усредненной удельной электропроводности  $\gamma_{ce}$  электронно-ионной плазмы канала исследуемой дуги. В результате указанных электрофизических процессов в газоразрядном промежутке воздушной ДЭС согласно (1) эквивалентное активное сопротивление  $R_{ce}$  ее импульсной электрической дуги будет сильно уменьшаться. В итоге это и будет приводить к убыванию падения напряжения  $U_{mdc}$  на импульсной электрической дуге в воздушной ДЭС с увеличением амплитуды тока  $I_{mdc}$ . Установленная особенность соответствует указанному в [4] характеру поведения дугового разряда в ДЭС. Данное обстоятельство косвенно указывает на достоверность полученного расчетного соотношения (4) для эквивалентного активного сопротивления плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС.

Что касается количественных значений для величины  $\gamma_{ce}$ , входящей в (4), то согласно расчетно-экспериментальным данным из [7, 11] они в первом приближении с учетом (2) численно составляют около  $5000 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ . Укажем, что для высокоионизированной электронно-ионной плазмы канала импульсного дугового электрического разряда в исследуемой воздушной ДЭС верхняя граница численных значений  $\gamma_{ce}$  может достигать уровня порядка  $20 \cdot 10^3 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$  [1, 6].

При расчетной оценке наибольшей электронной температуры  $T_{me}$  в электронно-ионной равновесной плазме импульсного дугового разряда для воздушной ДЭС с учетом принятых допущений (3) и приведенного в [12] теплофизического подхода может быть рекомендовано следующее приближенное выражение:

$$T_{me} \approx 95,35 \cdot \sqrt[4]{U_{ac} / \sigma_c}, \quad (5)$$

где  $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}\cdot(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)^{-1}$  – постоянная Стефана-Больцмана [4];  $U_{ac} \leq 11 \text{ В}$  – приэлектродное падение напряжения в воздушной ДЭС с металлическими (графитовыми) электродами (для графитового анода  $U_{ac} \approx U_a \approx 11 \text{ В}$ , а для графитового катода  $U_c \approx 10 \text{ В}$  [5]).

**3. Мощный высоковольтный ЕНЭ генератора ГИТ-С и его применение для испытаний технических объектов на молниестойкость.** На рис. 1, 2 приведены принципиальная электрическая схема и общий вид мощного ЕНЭ генератора ГИТ-С, используемого при экспериментальных исследованиях на электротермическую молниестойкость испытательных образцов (ИО) тех или иных элементов (например, металлической или композиционной обшивки) различных технических объектов (например, летательного аппарата). Собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-С при этом были равны [2]: активное сопротивление  $R_c \approx 4,74 \text{ Ом}$ ; индуктивность  $L_c \approx 11,43 \text{ мГн}$ ; емкость  $C_c \approx 45,36 \text{ мФ}$ .

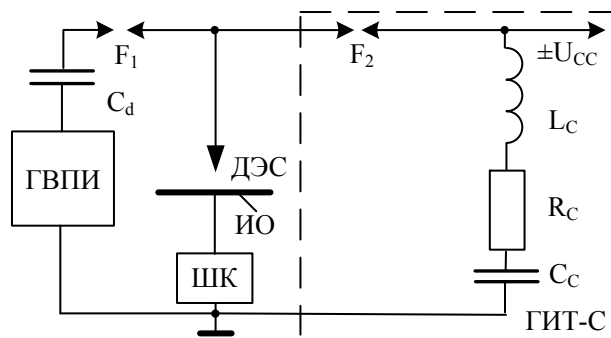


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С, используемого для исследования воздействия канала электрической дуги на ИО металлической обшивки технического объекта (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой до  $\pm 100 \text{ кВ}$ ;  $F_1, F_2$  – двухэлектродные высоковольтные воздушные искровые коммутаторы;  $C_d$  – разделительная емкость на  $180 \text{ пФ}$  и импульсное напряжение до  $\pm 120 \text{ кВ}$  в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием коммутаторов  $F_1$  и  $F_2$ ; ДЭС – двухэлектродная система с воздушным промежутком; ИО – испытательный образец металлической обшивки объекта; ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения тока импульсной электрической дуги в воздушном промежутке ДЭС и ИО;  $\pm U_{cc}$  – зарядное напряжение высоковольтных конденсаторов генератора ГИТ-С;  $L_c \approx 11,43 \text{ мГн}$ ,  $R_c \approx 4,74 \text{ Ом}$ ,  $C_c \approx 45,36 \text{ мФ}$  – собственные электрические параметры генератора ГИТ-С, включающие индуктивность, активное сопротивление и емкость его сильноточной разрядной цепи)

Мощный ЕНЭ одномодульного исполнения генератора ГИТ-С был собран на основе 324 параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИМ-5-140 (номинальное напряжение

$\pm 5$  кВ; номинальная емкость 140 мкФ) [2, 13]. Номинальное значение запасаемой электрической энергии в ЕНЭ генератора ГИТ-С составляло  $W_{co} \approx 567$  кДж [2]. В соответствии с рис. 1 в цепи генератора высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) был установлен двухэлектродный воздушный коммутатор  $F_1$  с массивными основными стальными электродами на напряжение до  $\pm 50$  кВ, а в разрядной цепи генератора ГИТ-С – высоковольтный двухэлектродный воздушный коммутатор  $F_2$  типа ВДВК-10 с прямоугольными графитовыми электродами на напряжение до  $\pm 10$  кВ [14] (рис. 3). При практической апробации расчетных соотношений (4) и (5) применительно к сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-С использовалась воздушная ДЭС, схематически показанная на рис. 4. Для инициирования электрического пробоя воздушного промежутка  $h_a$  в этой ДЭС и в соответствии с требованиями [8, 9] была применена тонкая медная электрически взрывающаяся проволочка (ЭВП), имеющая радиус  $r_e \approx 0,1$  мм и длину  $l_e \approx 37$  мм. Воздушные рабочие промежутки  $h_a$  и  $h_e$  в данной ДЭС составляли соответственно 14 и 1 мм. На рис. 5 в укрупненном виде приведен внешний вид используемой в сильноточной разрядной цепи мощного ЕНЭ высоковольтного генератора ГИТ-С воздушной ДЭС.



Рис. 2. Общий вид мощного ЕНЭ высоковольтного генератора ГИТ-С (на переднем плане видны формирующие активно-индуктивные элементы его сильноточной разрядной цепи, а на заднем плане – параллельно соединенные высоковольтные импульсные конденсаторы ИМ-5-140) [2, 3]

Зарядное напряжение высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ генератора ГИТ-С для выполнения соответствующих экспериментов выбиралось отрицательной полярности по модулю равным  $U_{cc} \leq 4,2$  кВ. Выбор полярности зарядного напряжения  $U_{cc}$  определялся необходимостью моделирования наиболее тяжелых в электротермическом смысле условий в исследуемой ДЭС и соответственно в круглой зоне привязки сильноточного цилиндрического плазменного канала импульсной электрической дуги с дли-

тельной  $C$ - компонентой тока искусственной молнии на наружной плоской поверхности ИО металлической обшивки технического объекта. Для предотвращения механических разрушений в мощной конденсаторной батарее генератора ГИТ-С и обеспечения требуемых условий по технике безопасности для обслуживающего его высоковольтный ЕНЭ персонала при аварийных режимах его работы (например, при электрическом пробое изоляции хотя бы одного из 324 указанных конденсаторов при их заряде или разряде) на всех высоковольтных выводах используемых конденсаторов ЕНЭ генератора ГИТ-С были установлены защитные сопротивления, выполненные из высоковольтных постоянных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 на постоянное напряжение до  $\pm 25$  кВ [2, 15].



Рис. 3. Внешний вид высоковольтного двухэлектродного воздушного коммутатора типа ВДВК-10 с графитовыми электродами прямоугольной формы на напряжение до  $\pm 10$  кВ, используемого в разрядной цепи генератора ГИТ-С [2]

В высоковольтном ЕНЭ генератора ГИТ-С на высоковольтных выводах каждого из 324 шт. его конденсаторов типа ИМ-5-140 были закреплены по одному защитному резистору ТВО-60-100 Ом [2, 15].

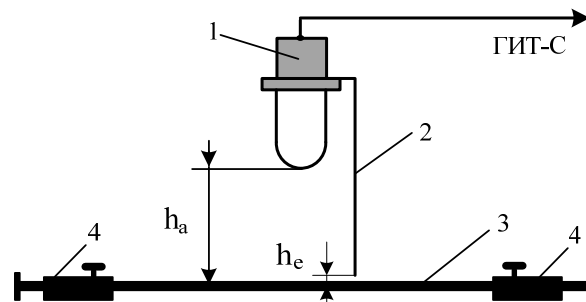


Рис. 4. Общий вид воздушной ДЭС в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-С (1 – верхний массивный цилиндрический стальной электрод; 2 – круглая тонкая медная ЭВП; 3 – нижний массивный плоский электрод, являющийся ИО металлической обшивки технического объекта; 4 – массивные прямоугольные алюминиевые электроды, предназначенные для жесткого двухстороннего закрепления в их пазах плоского ИО;  $h_a$  – длина воздушного промежутка в ДЭС;  $h_e$  – длина воздушного промежутка между нижним краем медной ЭВП и наружной плоской поверхностью ИО)

Синхронное срабатывание искровых коммутаторов  $F_1$  и  $F_2$  в схеме на рис. 1 осуществлялось за счет подачи через высоковольтную разделительную емкость  $C_d$  на сферический стальной электрод диаметром 30 мм коммутатора  $F_1$  от ГВПИ микросекундного импульса напряжения амплитудой до  $\pm 100$  кВ [2, 14].

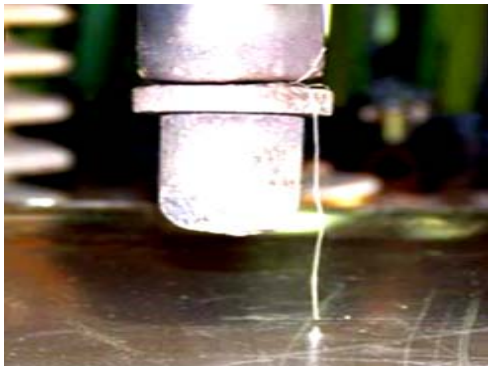


Рис. 5. Укрупненный внешний вид воздушной ДЭС с тонкой медной ЭВП на рабочем столе высоковольтного генератора ГИТ-С с мощным ЕНЭ при испытаниях в его сильноточной разрядной цепи ИО листовой металлической обшивки технического объекта на электротермическую стойкость к прямому воздействию на него длительными АВП ( $h_a \approx 14$  мм;  $h_e \approx 1$  мм;  $r_e \approx 0,1$  мм;  $l_e \approx 37$  мм) [10]

При электрическом пробое от ГВПИ воздушного рабочего промежутка искрового коммутатора  $F_1$  и его последующем срабатывании возникающее импульсное перенапряжение на ДЭС с ИО приводит к практически одновременному с ним срабатыванию и искрового коммутатора  $F_2$ . После срабатывания искровых коммутаторов  $F_1$ ,  $F_2$ , электрического пробоя воздушного промежутка длиной  $h_e \approx 1$  мм и электрического взрыва тонкой медной проволоочки в зоне ДЭС за счет разряда предварительно заряженных высоковольтных конденсаторов ЕНЭ генератора ГИТ-С через воздушную ДЭС и ИО металлической обшивки технического объекта начинает протекать импульс длительной С-компоненты тока искусственной молнии с требуемыми по [8, 9] АВП. Измерение АВП длительной С-компоненты тока искусственной молнии в канале электрической дуги в воздушной ДЭС и ИО металлической обшивки объекта проводилось с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [2, 14], имеющего для этого импульсного тока коэффициент преобразования  $K \approx 5642$  А/В, и цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS 1012.

**4. Результаты экспериментальной апробации расчетов активного сопротивления и температуры канала импульсной электрической дуги в воздушной ДЭС.** Согласно данным рис. 1 и представленных выше научно-технических материалов в рассматриваемой сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С имеются две последовательно включенные в общую электросхему воздушные ДЭС: первая – непосредственно в зоне размещения ИО листовой металлической обшивки технического объекта с длиной воздушного промежутка  $h_a \approx 14$  мм; вторая – в зоне искрового коммутатора  $F_2$  с межэлектродным воздушным промежутком длиной  $h_{ak} \approx 4$  мм. Именно суммарный воздушный промежуток этих двух ДЭС  $l_{ce} = (h_a + h_{ak})$  и будет определять минимальную суммарную длину канала импульсной электрической дуги в сильноточной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С и соответственно его минимальное общее

активное сопротивление  $R_{ce}$ . На рис. 6 приведена осциллограмма длительной С-компоненты тока искусственной молнии, протекающей через указанные воздушные ДЭС и ИО металлической обшивки объекта.

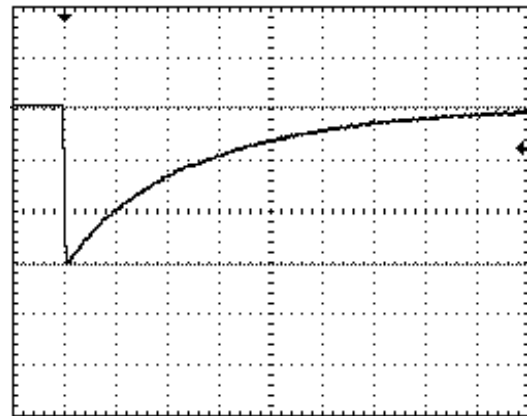


Рис. 6. Осциллограмма длительной С-компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП в сильноточной цепи генератора ГИТ-С при разряде его мощного ЕНЭ на воздушную ДЭС с электрически взрывающейся тонкой медной проволоочкой ( $r_e = 0,1$  мм;  $l_e = 37$  мм) и листовым ИО из алюминиевого сплава марки АМг2М толщиной 2 мм ( $U_{cc} \approx 4,2$  кВ;  $W_C \approx 400$  кДж;  $I_{mdc} \approx 0,869$  кА;  $t_{mdc} \approx 9$  мс;  $\tau_{pdc} \approx 1000$  мс;  $q_{dc} \approx 192$  Кл; масштаб по вертикали – 282 А/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка)

Из данных рис. 6 видно, что АВП используемой в опытах длительной С-компоненты тока искусственной молнии соответствуют требованиям [8, 9] и характеристикам импульсного дугового электрического разряда в указанных воздушных ДЭС. Принимая, что  $\gamma_{ce} \approx 5 \cdot 10^3$  (Ом·м)<sup>-1</sup> [11],  $l_{ce} \approx 18 \cdot 10^{-3}$  м и  $I_{mdc} \approx 869$  А, из (4) находим, что в рассматриваемом опытном случае суммарное эквивалентное активное сопротивление плазменного канала импульсной электрической дуги в исследуемых воздушных ДЭС будет составлять не менее  $R_{ce} \approx 0,327$  Ом. Полученное расчетное значение  $R_{ce}$  будет составлять до 7 % от собственного активного сопротивления  $R_C$  разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С. С учетом данных, полученных в [6], можно заключить, что при одинаковых значениях  $l_{ce}$  и усредненной удельной электропроводности плазмы, равной  $\gamma_{ce} \approx 5 \cdot 10^3$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, в воздушной ДЭС атмосферного давления сильноточной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ эквивалентное активное сопротивление канала импульсного дугового электрического разряда при  $I_{mdc} \approx 0,869$  кА ( $t_{mdc} \approx 9$  мс;  $\tau_{pdc} \approx 1$  с) будет примерно в 100 раз больше эквивалентного активного сопротивления канала импульсного искрового электрического разряда при  $I_{md} \approx 202$  кА ( $t_{md} \approx 36$  мкс;  $\tau_{pd} \approx 0,5$  мс). Объясняется такой полученный результат для  $R_{ce}$  тем, что при указанных АВП миллисекундного (с амплитудой  $I_{mdc}$ ) и микросекундного (с амплитудой  $I_{md}$ ) токов в воздушной ДЭС максимальный радиус по (3)  $r_{cem} \approx 3,24$  мм канала импульсного дугового электрического разряда оказывается при прочих равных условиях практически на порядок меньше максимального радиуса  $r_{cm} \approx 32,7$  мм канала импульсного искрового электрического разряда, удовлетворяющего для больших токов микросекундной длительности формуле Брагинского [1, 7, 16].

При  $U_{ac} \approx U_a \approx 11$  В из формулы (5) получаем, что в рассматриваемом сильноточном эксперименте с применением мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С максимальная электронная температура  $T_{me}$  равновесной электронно-ионной плазмы в цилиндрическом канале импульсного дугового разряда в исследуемой воздушной ДЭС для коммутатора типа ВДВК-10 ( $l_{ce} \approx 4$  мм) составляет примерно 11250 К. Видно, что полученное расчетное численное значение электронной температуры  $T_{me}$  плазмы в ярко светящемся столбе (канале) импульсной электрической дуги вблизи графитового анода указанной воздушной ДЭС хорошо согласуется с известными термодинамическими данными, характерными для приосевой области классического дугового разряда, протекающего в воздушной ДЭС с графитовыми электродами при атмосферном давлении и силе тока 200 А [4, 5]. Укажем, что при этом согласно [5] в приосевой зоне «угольной» («графитовой») дуги ( $l_{ce} \approx 46$  мм), свободно «горящей» в воздушной ДЭС, температура ее равновесной плазмы составляет около  $10^4$  К, а вблизи катода –  $1,2 \cdot 10^4$  К.

#### Выводы.

1. Получено новое соотношение (4) для приближенного расчета эквивалентного активного сопротивления  $R_{ce}$  плазменного канала импульсной электрической дуги в воздушной ДЭС сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного ЕНЭ испытательной электрофизической установки, генерирующей длительную С- компоненту тока искусственной молнии.

2. Для расчетной оценки максимальной электронной температуры  $T_{me}$  в равновесной электронно-ионной низкотемпературной плазме импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС с металлическими (графитовыми) электродами примененного в описанных опытах мощного высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-С электротехникам рекомендуется использовать приближенную формулу (5).

3. Проведенные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сильноточные эксперименты на мощном высоковольтном ЕНЭ генератора ГИТ-С, воспроизводящем на низкоомной активно-индуктивной нагрузке длительную С- компоненту тока искусственной молнии с нормированными АВП согласно действующих требований нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 и SAE ARP 5416: 2013, подтвердили работоспособность предлагаемых расчетных соотношений (4) и (5) для определения электро- и теплофизических величин  $R_{ce}$  и  $T_{me}$  в плазменном канале импульсного дугового электрического разряда в воздушной ДЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. 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.
3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: Точка, 2010. – 407 с.

4. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
6. Баранов М.И. Приближенный расчет активного сопротивления плазменного канала искрового разряда в высоковольтном сильноточном воздушном коммутаторе атмосферного давления // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2017. – №15(1237). – С. 5-11.
7. Баранов М.И., Рудаков С.В. Приближенный расчет энерговыделения и электрической эрозии электродов в высоковольтном сильноточном воздушном коммутаторе атмосферного давления // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №3. – С. 32-39. doi: 10.20998/2074-272X.2017.3.05.
8. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
9. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
10. 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.
11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
12. Баранов М.И. Приближенный расчет максимальной температуры плазмы в сильноточном канале искрового разряда высоковольтного воздушного коммутатора атмосферного давления // Технічна електродинаміка. – 2010. – №5. – С. 18-21.
13. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н., Ермуратский В.В., Кучинский Г.С., Мезенин О.Л., Назаров Н.И., Перегудова Е.Н., Рудь В.И., Садовников А.И., Смирнов Б.К., Степина К.И. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с.
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. Баранов М.И., Рудаков С.В. Разработка новых схем резистивной защиты высоковольтных конденсаторов мощных емкостных накопителей энергии от аварийных токов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 47-52. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.08.
16. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.

#### REFERENCES

1. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shikh impul'snykh tokov i magnitnykh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
2. 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.
3. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teoriia elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
4. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).

5. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).
6. Baranov M.I. A close calculation of active resistance of plasma channel of a spark digit is in the high-voltage heavy-current air switchboard of atmospheric pressure. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Technique and electrophysics of high voltage»*, 2017, no.15(1237), pp. 5-11. (Rus).
7. Baranov M.I., Rudakov S.V. An approximate calculation of energy dissipation and electric erosion of electrodes in the high-voltage high-current air switch of atmospheric pressure. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.3, pp. 32-39. doi: **10.20998/2074-272X.2017.3.05**.
8. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
9. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
10. Abramov N.R., Kuzhekin I.P., Larionov V.P. Characteristics of penetration of the walls of metal objects when exposed to lightning. *Electricity*, 1986, no.11, pp. 22-27. (Rus).
11. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
12. Baranov M.I. An approximate calculation of the maximum temperature of the plasma in high-current high-voltage spark discharge channel switch air atmospheric pressure. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2010, no.5, pp. 18-21. (Rus).
13. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevsky M.N., Ermuratsky V.V., Kuchinsky G.S., Mezenin O.L., Nazarov N.I., Peregudova E.N., Rud' V.I., Sadovnikov A.I., Smirnov B.K., Stepina K.I. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Spravochnik* [The electrical capacitors and condenser options. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 656 p. (Rus).
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., Rudakov S.V. Development of new charts of capacitance-resistance defense of high-voltage capacitors of powerful capacity stores of energy from emergency currents. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 47-52. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.6.08**.
16. Lozanskiy E.D., Firsov O.B. *Teoriya iskry* [Theory of spark]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 272 p. (Rus).

Поступила (received) 20.04.2017

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

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

<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone +38 057 7076841,

e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,

61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,

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

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

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

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

**Approximate calculation of active resistance and temperature of the pulse electric arc channel in a high-current discharge circuit of a powerful high-voltage capacitor energy storage.**

**Purpose.** To obtain calculation correlations for active resistance  $R_{ce}$  and maximal temperature  $T_{me}$  of plasma channel of pulse electric arc in the air double-electrode system (DES) with metal (graphite) electrodes, and also practical approbation of the obtained correlations for  $R_{ce}$  and  $T_{me}$  in the conditions of high-voltage laboratory on the powerful capacity energy storage (CES) of electric setting, intended for reproducing on the electric loading of protracted C- component of current of artificial lightning with the USA rationed on normative documents by amplitude-temporal parameters (ATP). **Methodology.** Electrophysics bases of high-voltage impulse technique, scientific and technical bases of development and creation of high-voltage high-current impulse electrical equipment, including powerful CES, and also measuring methods in discharge circuits of powerful high-voltage CES of pulse currents of millisecond temporal range. **Results.** On the basis of engineering approach the new results of approximate calculation of values of  $R_{ce}$  and  $T_{me}$  are resulted in the plasma channel of pulse electric arc discharge in air DES of atmospheric pressure with metallic (graphite) electrodes. Practical approbation of results of calculation of values of  $R_{ce}$  and  $T_{me}$  is executed as it applies to air DES, to connected in a discharge circuit of powerful high-voltage CES with protracted C- of component current of artificial lightning, characterized rationed ATP. It is shown that calculation of numeral value  $R_{ce}$  approximately in 100 times exceeds the proper value of active resistance for the plasma channel of impulsive spark of electric discharge in air DES other things being equal, and a calculation of numeral value  $T_{me}$  well corresponds with the known thermodynamics information for classic electric arc in air DES of atmospheric pressure with graphite electrodes. **Originality.** New engineering approach is developed for the approximate calculation of values of  $R_{ce}$  and  $T_{me}$  in electron-ion plasma of channel of pulse electric arc, arising in air DES of high-current discharge circuit of powerful high-voltage CES of proof-of-concept of electric setting of the technological setting. A formula is first obtained for the approximate calculation of equivalent active resistance of  $R_{ce}$  of channel of pulse electric arc in air DES, remaining unchanging in the process of high-current discharge on RL- load of indicated CES. **Practical value.** Drawing on the got calculation results for the values of  $R_{ce}$  and  $T_{me}$  in high-voltage impulse technique provides the rational choice of own electric parameters and construction elements of basic devices of powerful high-voltage CES of technological of electric setting, and also account of influence of electrical engineering descriptions of air DES on electromagnetic processes, taking place in the high-current discharge circuit of indicated CES with protracted C- of component current of artificial lightning. References 16, figures 6.

**Key words:** powerful high-voltage capacitor energy storage, air double-electrode system, pulse electric arc, active resistance of pulse electric arc channel, maximal temperature of pulse electric arc channel.