

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРОДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ВОЗДУШНОМ КОММУТАТОРЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Приведені результати застосування нового інженерного підходу до розрахунку теплової енергії, що виділяється в плазмовому каналі іскрового розряду і на масивних металевих електродах високовольтного сильнострумного повітряного коммутатора (ВСПК) атмосферного тиску, використаного у складі високовольтної електрофізичної установки (ВЕФУ) із потужним ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ). Отримані співвідношення для визначення вказаної енергії дозволяють виконувати розрахункову оцінку балансу електричної енергії в розрядному колі ВЕФУ із ЄНЕ з урахування її теплових втрат у ВСПК. Показано, що на основі розробленого підходу може бути виконаний розрахунок електричної ерозії основних металевих електродів ВСПК. Отримані нові розрахункові вирази для знаходження глибини одиночного кратера руйнування на металевих електродах ВСПК і маси металу, що викидається іскрою з електродів досліджуваного коммутатора за один розряд ЄНЕ установки. Бібл. 21, рис. 3.

Ключові слова: високовольтний сильнострумний повітряний коммутатор, тепла енергія, що виділяється, в повітряній іскрі і на електродах коммутатора, електрична ерозія металевих електродів коммутатора, глибина одиночного кратера руйнування на електродах коммутатора, маса металу, що викидається, з одиночного кратера руйнування електродів коммутатора.

Приведены результаты применения нового инженерного подхода к расчету тепловой энергии, выделяющейся в плазменном канале искрового разряда и на массивных металлических электродах высоковольтного сильноточного воздушного коммутатора (ВСВК) атмосферного давления, используемого в составе высоковольтной электрофизической установки (ВЭФУ) с мощным емкостным накопителем энергии (ЕНЭ). Полученные соотношения для определения указанной энергии позволяют выполнять расчетную оценку баланса электрической энергии в разрядной цепи ВЭФУ с учетом ее тепловых потерь в ВСВК. Показано, что на основе разработанного подхода может быть выполнен расчет электрической эрозии основных металлических электродов ВСВК. Получены новые расчетные выражения для нахождения глубины одиночного кратера разрушения на металлических электродах ВСВК и массы металла, выбрасываемой искрой из электродов исследуемого коммутатора за один разряд ЕНЭ установки. Библ. 21, рис. 3.

Ключевые слова: высоковольтный сильноточный воздушный коммутатор, выделяемая тепловая энергия в воздушной искре и на электродах коммутатора, электрическая эрозия металлических электродов коммутатора, глубина одиночного кратера разрушения на электродах коммутатора, выбрасываемая масса металла из одиночного кратера разрушения электродов коммутатора.

Введение. Известно, что коммутация накопленной электрической энергии в мощном емкостном накопителе энергии (ЕНЭ) высоковольтной электрофизической установки (ВЭФУ) выполняется при помощи специального электротехнического устройства, именуемого по отечественной терминологии разрядником, а по зарубежной терминологии – коммутатором [1, 2]. В дальнейшем остановимся на последнем техническом термине, получившем наиболее широкое распространение в современной высоковольтной импульсной технике (ВИТ). В качестве рабочих диэлектрических сред рассматриваемых коммутаторов разрядных цепей ВЭФУ с мощными ЕНЭ могут использоваться вакуум, различные газы и их смеси, жидкости и твердые тела [1-4]. Широкое применение в области современной ВИТ из-за своей сравнительной дешевизны и простоты в изготовлении получили высоковольтные сильноточные воздушные коммутаторы (ВСВК) атмосферного давления на постоянное напряжение до ± 125 кВ и коммутируемые импульсные токи амплитудой до ± 1 МА [1, 5-7]. Как правило, основные электроды ВСВК выполняются из средне- и тугоплавких металлов (например, стали и молибдена) или металлокомпозиций (например, композиции «вольфрам-медь») [1, 3-7]. Одним из недостатков указанных ВСВК является повышенный электроэрозионный износ рабочих поверхностей их основных металлических электродов, вызванный интенсивным воз-

действием на них мощного теплового потока плазменного канала искрового разряда в зонах его привязки на электродах таких коммутаторов. В этой связи для ВСВК актуальными задачами являются те, которые связаны с расчетной оценкой в подобных сильноточных коммутаторах тепловых потерь в плазменном канале искрового разряда и на основных электродах ВСВК, а также электрической эрозии рабочих поверхностей их основных металлических электродов.

Целью статьи является получение новых расчетных соотношений, определяющих в приближенном виде энерговыделение и электрическую эрозию массивных металлических основных электродов в ВСВК, используемых в разрядных цепях ряда ВЭФУ с ЕНЭ.

1. Постановка задачи исследования. Рассмотрим разрядную цепь ВЭФУ с мощным ЕНЭ и активно-индуктивной нагрузкой, коммутацию большого импульсного тока (БИТ) в которой выполняет ВСВК с массивными однородными основными металлическими электродами полусферической формы – катодом и анодом (рис. 1). Считаем, что данные электроды ВСВК, расположенные в атмосферном воздухе при нормальных условиях (давление воздуха составляет $1,013 \cdot 10^5$ Па, а его температура равна $\theta_0 = 0$ °С [8]) на расстоянии l_k друг от друга, образуют двухэлектродную систему (ДЭС). Пусть радиус R_e рабочих поверхностей катода и анода ВСВК значительно

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

превышает глубины проникновения в их токопроводящие материалы электромагнитного и теплового полей, создаваемых цилиндрическим каналом искрового разряда радиусом $r_c < R_e$ в зонах его привязки на рабочих поверхностях электродов исследуемого ВСВК.

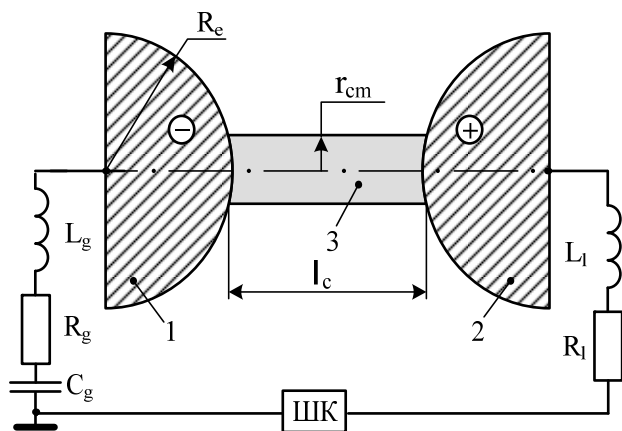


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и высоковольтным сильноточным двухэлектродным воздушным коммутатором (1, 2 – массивные металлические катод и анод ВСВК полу-сферической формы с наружным радиусом R_e ; 3 – плазменный сильноточный канал воздушного искрового разряда длиной l_c и максимальным радиусом r_{cm} ; R_g, L_g, C_g – собственные электрические параметры ВЭФУ с ЕНЭ; R_l, L_l – собственные электрические параметры активно-индуктивной нагрузки; ШК – измерительный коаксиальный шунт ШК-300, рассчитанный на измерение импульсного тока микросекундной длительности с амплитудой I_m до ± 300 кА при его интеграле действия J_a до $2,5 \cdot 10^6$ Дж/Ом [9, 10])

В связи с чем полагаем, что рабочие поверхности указанных электродов ВСВК в зонах привязки на них сильноточной искры в первом приближении будут близки к плоским. Принимаем, что в ДЭС коммутатора длина l_c плазменного канала искры равна минимальной длине l_k межэлектродного воздушного промежутка в ВСВК. Считаем, что плотность мощности $g_c(t)$ теплового потока и плотность $\delta_d(t)$ разрядного тока $i_d(t)$ ВЭФУ с ЕНЭ в цилиндрическом канале искрового разряда для исследуемого ВСВК практически равномерно распределены по его поперечному круглому сечению с переменным во времени t радиусом r_c . Одним из подтверждений тому может являться то, что в сильноточном плазменном канале газового разряда термодинамическая электронная и ионная температуры характеризуются практически однородным распределением по его текущему радиусу r_c [11]. Используем допущение о том, что возникающие в зонах привязки плазменного канала искрового разряда на рабочих поверхностях анода и катода ВСВК лунки (кратеры) разрушения имеют геометрическую форму, близкую к форме шарового сегмента [12, 13]. Требуется в рамках предлагаемого инженерного подхода получить новые соотношения для приближенного расчета энерговыделения и электрической эрозии массивных металлических электродов в ВСВК разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ, а также выполнить в условиях высоковольтной лаборатории с примени-

ем мощного генератора конденсаторного типа, формирующего на RL - нагрузке БИТ микросекундного временного диапазона, экспериментальную проверку работоспособности некоторых из этих соотношений.

2. Приближенный расчет энерговыделения в ВСВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Вначале остановимся на расчетной оценке тепловой энергии W_c , выделяющейся непосредственно в плазменном канале воздушного искрового разряда, возникающего между металлическими электродами ВСВК. Исходя из известных положений электро- и теплофизики, выражение для W_c можно представить в следующем виде:

$$W_c = R_c J_a, \quad (1)$$

где $J_a = \int_0^\infty i_d^2(t) dt$ – интеграл действия импульсного тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ; R_c – эквивалентное активное сопротивление плазменного канала воздушного искрового разряда в коммутаторе.

Далее определимся с расчетом в (1) интеграла действия J_a тока, протекающего в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ через исследуемый ВСВК. В случае изменения тока $i_d(t)$ по закону экспоненциально затухающей синусоиды, имеющему аналитический вид $i_d(t) = k_{ds} I_{ms} \exp(-\delta t) \sin(\omega t)$, для интеграла действия J_a разрядного тока в цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ можно использовать следующее расчетное соотношение:

$$J_a = 0,25 k_{ds}^2 I_{ms}^2 \delta^{-1} [(\delta / \omega)^2 + 1]^{-1}, \quad (2)$$

где I_{ms} – первая амплитуда разрядного тока $i_d(t)$, изменяющегося с круговой частотой ω и коэффициентом затухания δ в сильноточной цепи ВЭФУ с ЕНЭ; $k_{ds} = [\exp(-\delta \omega^{-1} \arctg \delta \omega^{-1}) \sin(\arctg \delta \omega^{-1})]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для тока, изменяющегося во времени t по закону затухающей синусоиды [14].

В случае же изменения разрядного тока $i_d(t)$ по аperiodическому закону, имеющему аналитический вид $i_d(t) = k_{da} I_{ma} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)]$, расчетное соотношение для интеграла действия J_a тока в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ будет иметь следующий вид:

$$J_a = 0,5 k_{da}^2 I_{ma}^2 [\alpha_1^{-1} + \alpha_2^{-1} - 4(\alpha_1 + \alpha_2)^{-1}], \quad (3)$$

где I_{ma} – амплитуда униполярного импульсного тока $i_d(t)$ с коэффициентами временной формы α_1 и α_2 ; $k_{da} = [(\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)} - (\alpha_1 / \alpha_2)^{\alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_1)}]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для импульсного тока ВЭФУ, аperiodически изменяющегося во времени t [14].

При практическом применении (3) следует иметь в виду, что $\alpha_1 \approx 0,76 / \tau_p$, а $\alpha_2 \approx 2,37 / \tau_f$ [14], где τ_f, τ_p – соответственно длительность фронта аperiodического импульса разрядного тока $i_d(t)$ между уровнями $(0,1 - 0,9) I_{ma}$ и длительность аperiodического импульса тока в исследуемой разрядной цепи на уровне $0,5 \cdot I_{ma}$. Полезным при нахождении амплитудно-временных параметров (АВП) аperiodического импульса разрядного тока $i_d(t)$ ВЭФУ с ЕНЭ может оказаться и соотношение вида $\tau_f \approx \tau_{ma} / 1,6 \approx 0,625 \ln(\alpha_2 / \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)$ [14], где τ_{ma} – время, соответствующее амплитуде I_{ma} униполярного тока в сильноточной цепи ВЭФУ с ЕНЭ.

Что касается используемого в (1) понятия эквивалентного активного сопротивления R_c плазменного канала искры, то под ним будем понимать такое усредненное во времени t постоянное активное сопротивление, на котором при прохождении в цепи ВЭФУ с ЕНЭ импульсного разрядного тока $i_d(t)$ рассеивается такая же тепловая энергия, как и на реальном переменном во времени t сопротивлении канала искрового разряда в ДЭС рассматриваемого ВСВК. При определении в общем виде переменного во времени t активного сопротивления $R_c(t)$ плазменного канала искрового разряда в исследуемом коммутаторе воспользуемся следующим классическим соотношением [14]:

$$R_c(t) = l_c / [\pi r_c^2(t) \gamma_c], \quad (4)$$

где $r_c(t)$ – изменяющийся во времени t радиус плазменного канала искрового разряда неизменной длиной l_c между металлическими электродами ВСВК; γ_c – усредненная удельная электропроводность низкотемпературной плазмы в канале искры коммутатора.

Радиус $r_c(t)$ одиночного плазменного канала искрового разряда в ВСВК любой конструкции изменяется, как известно, в процессе протекания импульсного тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ практически в интервале от нуля до своего максимального значения r_{cm} [1, 9-12]. Вначале на нарастающей части разрядного тока $i_d(t)$ данное изменение происходит от нуля до r_{cm} , а затем на спадающей части этого импульсного тока в цепи ВЭФУ с ЕНЭ – от r_{cm} до нуля. Поэтому согласно (4) кривая изменения во времени t величины активного сопротивления $R_c(t)$ плазменного искрового канала в ВСВК может быть аппроксимирована симметричной U -образной кривой, характеризующейся своими двумя максимальными значениями в моменты времени t , соответствующие нулевым значениям тока $i_d(t)$ и равенству $r_c=0$, и своим одним минимальным значением в момент времени t , когда ток $i_d(t)$ достигает своего амплитудного значения и $r_c=r_{cm}$. Тогда с учетом соответствующего изменения в (4) во времени t радиальной функции вида $f(r_c)=r_c^2$ на отрезке $[0; r_{cm}]$ и нахождения на указанном отрезке ее среднего значения для эквивалентного и постоянного во времени t активного сопротивления R_c одиночного плазменного канала искрового разряда в исследуемом ВСВК получаем следующее расчетное выражение:

$$R_c = l_c / (\pi \gamma_c r_{cm}^{-1} \int_0^{r_{cm}} r_c^2 dr_c) = 3l_c / (\pi r_{cm}^2 \gamma_c). \quad (5)$$

Из (5) при предлагаемом подходе в определении R_c вытекает расчетное соотношение для эквивалентного радиуса r_{ce} плазменного канала сильноточной искры в ВСВК, равного $r_{ce} \approx 0,577 \cdot r_{cm}$. Величину максимального радиуса r_{cm} (м) плазменного канала искрового разряда в ВСВК атмосферного давления находим из известной формулы Брагинского [1, 15]:

$$r_{cm} = 0,093 (I_m)^{1/3} (t_m)^{1/2}, \quad (6)$$

где I_m , t_m – соответственно амплитуда (А) импульсного тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и время (с), соответствующее этой токовой амплитуде.

Из (5) и (6) обобщенное выражение для эквивалентного активного сопротивления R_c (Ом) одиночно-

го плазменного сильноточного канала искрового разряда в ВСВК, размещенном в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ, принимает следующий окончательный вид:

$$R_c = 110,41 \cdot l_c / (\gamma_c I_m^{2/3} t_m). \quad (7)$$

При выборе в (7) численных значений для величины γ_c будем базироваться на собственных расчетно-экспериментальных данных, полученных ранее для плазменного канала воздушного искрового разряда в сильноточной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ [15]. Согласно результатам исследований, представленным в [15], для высоковольтных воздушных коммутаторов атмосферного давления на рабочее постоянное напряжение до ± 35 кВ и импульсные токи микросекундной длительности в разрядной цепи конденсаторной батареи ВЭФУ с низкоомной RL -нагрузкой при их амплитуде до ± 250 кА, характерные для импульсной A -компоненты тока искусственной молнии [16], усредненные значения удельной электропроводности γ_c низкотемпературной плазмы в цилиндрическом канале искры ВСВК в первом приближении с учетом (5) и (6) численно составляют от 4000 до 5000 $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. Следует отметить, что данные значения γ_c заметно отличаются от соответствующих предполагаемых значений удельной электропроводности низкотемпературной плазмы сильноточной воздушной искры (порядка $20 \cdot 10^3$ $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$), приведенных в [1] и характерных для высокоионизированной плазмы. Укажем, что при электронной температуре в сильноточном канале искрового разряда порядка 10^4 К, характерной для канала воздушной сильноточной искры в исследуемом ВСВК [17], даже в плотной плазме канала подводного искрового разряда, инициируемого электрическим взрывом тонкой медной проволоочки, численные значения для ее удельной электропроводности в зависимости от уровня канального давления составляют не более нескольких тысяч $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ [18].

Далее выполним оценку величины тепловой энергии W_e , выделяющейся в двух массивных металлических электродах рассматриваемого ВСВК, схематически приведенного на рис. 1. Определяющее влияние на W_e будет оказывать плотность мощности $g_c(t)$ теплового потока в плазменном канале искрового разряда, происходящего между катодом и анодом ВСВК. При расчетной оценке величины $g_c(t)$ в предлагаемом подходе можно использовать соотношение вида [17]:

$$g_c(t) = \delta_d(t) \cdot U_{ac}, \quad (8)$$

где U_{ac} – приэлектродное падение напряжения в рассматриваемом ВСВК, равное разности электрических потенциалов на границе раздела сред «искра-металл».

Известно, что значение U_{ac} в исследуемом ВСВК с основными электродами, изготовленными из таких традиционных проводниковых материалов как сталь, медь, латунь и бериллиевая бронза, изменяется в весьма узком количественном диапазоне, составляющем от 5 до 10 В [19]. Так, для стали марки Ст.3 приэлектродное падение напряжения U_{ac} численно составляет примерно 6,1 В, для меди – 8,6 В, а для латуни – 8,0 В [19]. С учетом принятых допущений и (8) для тепловой энергии W_e , рассеиваемой на рабочих поверхностях металлических электродов ДЭС

исследуемого коммутатора, можно записать расчетное выражение:

$$W_e = 2\pi \int_0^{\infty} g_c(t) r_c^2(t) dt = 2\pi U_{ac} \int_0^{\infty} \delta_d(t) r_c^2(t) dt = 2U_{ac} q_c, \quad (9)$$

где $q_c = \int_0^{\infty} i_d(t) dt$ – модуль электрического заряда, протекающего через плазменный канал искрового разряда в силовоточной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и металлургические электроды исследуемого ВСВК.

Из (9) видно, что для расчетного определения тепловой энергии W_e нам предварительно необходимо знать количество электричества q_c , протекшее через электроды ВСВК. Причем, искомая величина W_e прямо пропорциональна электрическому заряду q_c . При изменении импульсного тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ по закону экспоненциально затухающей синусоиды для расчетной оценки величины заряда q_c можно использовать следующее соотношение:

$$q_c = k_{ds} I_{ms} \omega^{-1} \left[(\delta / \omega)^2 + 1 \right]^{-1}. \quad (10)$$

При изменении импульсного тока $i_d(t)$ по аperiodической временной зависимости для q_c имеем:

$$q_c = k_{da} I_{ma} (\alpha_2 - \alpha_1) (\alpha_1 \alpha_2)^{-1}. \quad (11)$$

Одной из проверок правильности результатов расчета по (10) и (11) величины q_c могут служить данные, полученные из выражения $q_c = C_g U_{gc}$, где C_g и U_{gc} – соответственно электрическая емкость и зарядное напряжение высоковольтных конденсаторов ЕНЭ.

Таким образом, определив по (1) – (3) и (7) величину выделяющейся в канале искры тепловой энергии W_c и вычислив по (9) – (11) величину рассеиваемой на катоде и аноде ДЭС исследуемого ВСВК тепловой энергии W_e , по выражению $W_k = W_c + W_e$ можно найти суммарное энерговыделение в силовоточном воздушном коммутаторе разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ.

3. Приближенный расчет электрической эрозии электродов в ВСВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. В рамках данного исследования остановимся на расчетной оценке электрической эрозии рабочей поверхности металлического электрода-анода ВСВК, вызванной потоком ускоренных в продольном электрическом поле канала искры свободных электронов, бомбардирующих указанную поверхность анода рассматриваемого коммутатора. В этом случае для тепловой энергии W_a , выделяемой в круговой зоне привязки канала искрового разряда радиусом r_{cm} на рабочей поверхности анода ВСВК, можно, с одной стороны, на основе (9) записать следующее соотношение:

$$W_a = U_{ac} q_c. \quad (12)$$

С другой стороны, для искомой величины тепловой энергии W_a на основе положений теплофизики будет справедлива следующая расчетная формула:

$$W_a = M_e [C_e (\theta_m - \theta_0) + C_m], \quad (13)$$

где $M_e = d_e \cdot V_e$ – масса интенсивно нагреваемого импульсным разрядным током $i_d(t)$ в круглой зоне привязки на поверхности электрода-анода ВСВК канала искры до температуры плавления θ_m его материала, имеющего плотность d_e и объем V_e ; C_e , C_m – соответ-

ственно удельная теплоемкость и удельная теплота плавления материала анода рассматриваемого ВСВК.

Значение объема V_e расплавляемого и выбрасываемого наружу магнитным давлением жидкого металла электрода-анода коммутатора за одно воздействие на него канала искры с учетом принятого допущения о геометрической форме кратера разрушения на его рабочей поверхности в виде шарового сегмента может быть описано следующим соотношением:

$$V_e = 0,5\pi r_{cm}^2 h_e, \quad (14)$$

где h_e – глубина кратера разрушения наружным радиусом r_{cm} на рабочей поверхности анода ВСВК за время воздействия на него искры от одного силовоточного разряда конденсаторной батареи ВЭФУ.

Из (12) – (14) с учетом (6) расчетное выражение для наибольшей глубины h_e (м) одиночного эрозионного кратера разрушения на электроде-аноде исследуемого коммутатора принимает следующий вид:

$$h_e = 73,61 U_{ac} q_c d_e^{-1} [C_e (\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1} (I_m^{2/3} t_m)^{-1}. \quad (15)$$

Для убыли массы M_e (кг) металла, выбрасываемого наружу силовоточной искрой из электрода-анода за один искровой разряд в цепи ВЭФУ с ЕНЭ и рабочим воздушным промежутком рассматриваемого ВСВК, получаем следующее расчетное соотношение:

$$M_e = U_{ac} q_c [C_e (\theta_m - \theta_0) + C_m]^{-1}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что расчетная убыль металлической массы M_e с электрода-анода исследуемого коммутатора за один разряд мощного ЕНЭ в цепи ВЭФУ прямо пропорциональна заряду q_c , протекающему через основные электроды ВСВК. Отметим, что подобная зависимость для M_e ранее была установлена экспериментально при коммутации в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ больших импульсных экспоненциально затухающих синусоидальных токов микросекундной длительности для медных, молибденовых и титановых электродов ВСВК [20]. В первом приближении для потери электродом-анодом коммутатора своей массы M_{eN} за N искровых разрядов мощного ЕНЭ электрофизической установки через ВСВК можно воспользоваться расчетным соотношением вида: $M_{eN} \approx N \cdot M_e$. Кроме того, укажем, что при оценке электрической эрозии металлического электрода-анода ВСВК могут быть использованы расчетные выражения (15) и (16).

4. Экспериментальная проверка результатов расчета электрической эрозии стальных электродов в ВСВК разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Данная проверка была выполнена в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ одномодульного исполнения на номинальное напряжение ± 50 кВ с номинальной энергоемкостью его конденсаторной батареи $W_{g0} \approx 416$ кДж (111 шт. параллельно соединенных высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3), формирующем на сосредоточенной RL - нагрузке ($R \approx 10$ мОм; $L \approx 0,3$ мкГн) БИТ микросекундной длительности [9, 14]. Укажем, что экспериментальная ВЭФУ имела следующие собственные электрические параметры (до сборных стальных шин коллектора ЕНЭ без учета влияния коммутатора) [9, 14]: емкость $C_g = 333$ мкФ; индуктивность $L_g = 2,05$ мкГн; активное сопротивление $R_g = 57$ мОм. Для коммутации накопленной в ЕНЭ используемой

ВЭФУ электроэнергии был применен ВСВК каскадного типа на номинальное напряжение ± 50 кВ, содержащий два основных массивных полусферических электрода радиусом $R_e \approx 61,5$ мм и один управляющий массивный сферический электрод диаметром 30 мм, выполненные из стали марки Ст.3 (рис. 2) [7, 9].



Рис. 2. Увеличенный вид трехэлектродной системы ВСВК каскадного типа с двумя массивными основными полусферическими электродами и одним управляющим сферическим электродом из стали марки Ст.3 на номинальное напряжение ± 50 кВ и импульсный микросекундный ток амплитудой I_m до ± 300 кА (вид после однократного воздействия на ее стальные электроды в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ импульсного затухающего синусоидального тока частотой $\omega/2\pi = 4,9$ кГц и первой амплитудой $I_{ms} = -202$ кА; $J_a = 2,12 \cdot 10^6$ Дж/Ом; опытное значение радиуса канала искры $r_{cm} \approx 31$ мм; длина канала искры $l_c \approx 13,5$ мм)

При зарядном напряжении высоковольтных импульсных конденсаторов указанного ЕНЭ, равном $U_{gc} = \pm 29,7$ кВ, и запасаемой в них электрической энергии $W_g = 147$ кДж рабочий воздушный промежуток между управляющим электродом ВСВК и его потенциальным основным электродом составлял $l_{c1} \approx 9$ мм, а со стороны непотенциального основного электрода коммутатора рабочий воздушный промежуток был равен $l_{c2} \approx 4,5$ мм. В этой связи в экспериментальном ВСВК длина сильноточной искры составляла примерно $l_c = l_{c1} + l_{c2} \approx 13,5$ мм. После подачи на управляющий электрод ВСВК от специального генератора высоковольтного поджигающего микросекундного импульса напряжения амплитудой ± 100 кВ (его полярность соответствовала полярности заряда конденсаторов ЕНЭ) [7, 9] происходил электрический пробой воздушного промежутка длиной l_{c2} , что приводило к пробое воздушного промежутка длиной l_{c1} и срабатыванию указанного коммутатора в целом. В результате срабатывания ВСВК между его стальными электродами возникала сильноточная воздушная искра, разрушающая рабочие поверхности анода, катода и управляющего электрода коммутатора. На рис. 2 как раз и приведены результаты такого электротермического воздействия на указанные стальные электроды ВСВК сильноточного плазменного канала воздушного искрового разряда, происходящего в ВСВК экспериментальной ВЭФУ ($U_{gc} = -29,7$ кВ), в случае протекания через них БИТ, осциллограмма которого представлена на рис. 3.

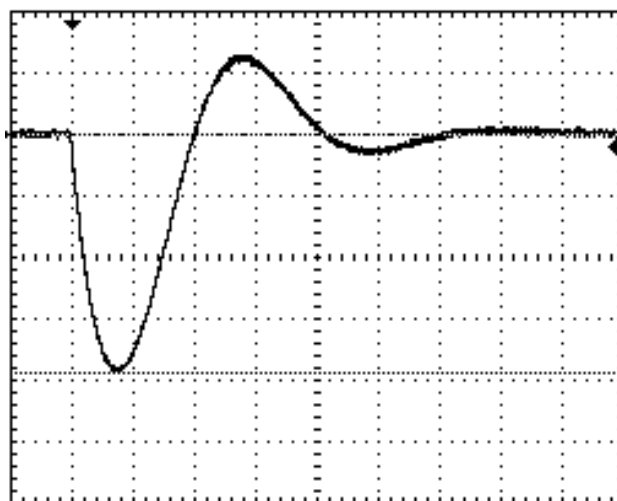


Рис. 3. Осциллограмма импульсного затухающего синусоидального тока $i_d(t)$ в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ и низкоомной сосредоточенной RL -нагрузкой, коммутируемого ВСВК каскадного типа с двумя массивными основными полусферическими электродами и одним управляющим сферическим электродом из стали марки Ст.3 на номинальное напряжение ± 50 кВ и импульсный микросекундный ток амплитудой I_m до ± 300 кА ($U_{gc} = -29,7$ кВ; $W_g = 147$ кДж; $I_{ms} = -202$ кА; $\delta = 13,00 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; $\omega = 30,79 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; $k_{ds} = 1,783$; $t_{ms} = 36$ мкс; $t_0 = 500$ мкс; $J_a = 2,12 \cdot 10^6$ Дж/Ом; $q_c = 9,93$ Кл; масштаб по вертикали – 52,1 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление).

Измерение АВП импульсного затухающего синусоидального тока $i_d(t)$ в разрядной цепи экспериментальной ВЭФУ с мощным ЕНЭ проводилось при помощи поверенных государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 с собственным активным сопротивлением около $R_s \approx 0,2$ мОм и коэффициентом преобразования, равным примерно $K_s \approx 10,42 \cdot 10^3$ А/В [10, 14], и цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS 1012. В соответствии с приведенной на рис. 3 осциллограммой затухающего синусоидального БИТ $i_d(t)$ с первой полуволной отрицательной полярности в разрядной цепи указанной ВЭФУ его АВП при полной длительности протекания импульса тока $t_0 = 500$ мкс по модулю были примерно равными: $I_{ms} = 202$ кА; $\delta = 13,00 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; $\omega = 30,79 \cdot 10^3$ с $^{-1}$; $k_{ds} = 1,783$; $t_{ms} = 36$ мкс.

Приведенным выше АВП разрядного тока $i_d(t)$ в цепи экспериментальной ВЭФУ с ЕНЭ согласно (6) соответствует расчетный максимальный радиус r_{cm} плазменного канала воздушного искрового разряда в исследуемом коммутаторе, равный около 32,7 мм. Из опытных данных, представленных на рис. 2, следует, что максимальный радиус r_{cm} круглой лунки (кратера) разрушения на рабочих поверхностях основных стальных электродов в ВСВК примененной экспериментальной ВЭФУ с ЕНЭ составляет примерно 31 мм. Видно, что расчетные и опытные результаты для радиуса r_{cm} зоны привязки плазменного канала сильноточной искры на рабочих стальных поверхностях анода и катода указанного ВСВК отличаются в пределах 5 %. В этой связи можно говорить о том, что полученные нами экспериментальные данные подтверждают работоспособность используемой из [1, 15]

расчетной формулы Брагинского для плазменного канала воздушной искры при ее практическом применении в области БИТ микросекундного временного диапазона.

Результаты обследования рабочих полусферических поверхностей стального анода и катода ВСВК, приведенных на рис. 2, указывают на то, что в рассматриваемом случае геометрическая форма одиночных круглых кратеров разрушения радиусом $r_{cm} \approx 31$ мм в зонах привязки на них силовоточной воздушной искры была близкой к форме шарового сегмента, а их опытная глубина h_e не превышала 7 мкм. В соответствии с (10) и (15) при заданных исходных данных ($I_{ms} = 202$ кА; $\delta = 13,00 \cdot 10^3$ с⁻¹; $\omega = 30,79 \cdot 10^3$ с⁻¹; $k_{ds} = 1,783$; $t_{ms} = 36$ мкс; $U_{ac} = 6,1$ В; $d_e = 7870$ кг/м³; $C_e = 460$ Дж/(кг·°С); $C_m = 84 \cdot 10^3$ Дж/кг; $\theta_0 = 0$ °С; $\theta_m = 1500$ °С [8, 10]) находим, что в нашем случае расчетная наибольшая глубина h_e для эрозионных кратеров разрушения при их расчетном радиусе $r_{cm} \approx 32,7$ мм на рабочих поверхностях массивных основных стальных электродов ВСВК при протекании через коммутатор за один импульсный разряд мощного ЕНЭ ($U_{gc} = -29,7$ кВ; $W_g = 147$ кДж) в силовоточной цепи экспериментальной ВЭФУ электрического заряда $q_c = 9,93$ Кл будет примерно равной 5,9 мкм. Как видим, расхождение между расчетным и опытным значениями для h_e применительно к используемому ВСВК составляет не более 16 %. Укажем, что при этом расчетная убыль массы M_e металла с рабочей поверхности стального электрода-анода в соответствии с (16) составляет примерно 78,2 мг. Тогда для удельной электрической эрозии M_e/q_c стального электрода-анода рассматриваемого ВСВК получаем численное значение, равное около $78,7 \cdot 10^{-4}$ г/Кл. Для сравнения указанного удельного электроэрозионного износа M_e/q_c массивных стальных основных электродов исследуемого ВСВК с известными подобными электрофизическими данными заметим, что в силовоточных высоковольтных газоразрядных коммутаторах на номинальное напряжение ± 50 кВ типа РГУ1-50-100 с основными электродами из металлокомпозиции «вольфрам-медь», рассчитанных на коммутацию затухающих синусоидальных микросекундных БИТ длительностью $t_0 \leq 100$ мкс и амплитудой I_{ms} до 100 кА, удельный электроэрозионный износ их композиционных анода и катода составляет практически на два порядка меньше численное значение и равно примерно $4,4 \cdot 10^{-5}$ г/Кл [21].

Выводы.

1. В соответствии с предложенным новым инженерным подходом для приближенной расчетной оценки энерговыделения и электрической эрозии массивных металлических электродов в ВСВК атмосферного давления, выполняющего коммутацию в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ, необходимы лишь данные об электро- и теплофизических характеристиках металла анода и катода его ДЭС, усредненной удельной электропроводности γ_c низкотемпературной плазмы в канале воздушного искрового разряда между электродами ВСВК и АВП импульсного разрядного тока $i_d(t)$ в силовоточной цепи ВЭФУ с ЕНЭ.

2. Установлено, что при расчете тепловой энергии W_c , выделяющейся в воздушной искре исследуемого

ВСВК, может быть использовано новое электрофизическое понятие, касающееся эквивалентного активного сопротивления R_c импульсной воздушной искры, постоянного в течение всего процесса колебательного или аperiodического разряда ЕНЭ ВЭФУ на электрическую нагрузку. Получена оригинальная расчетная формула (7) для нахождения приближенного численного значения R_c по известным данным для γ_c , длины l_c канала воздушной искры и АВП импульсного синусоидального (аperiodического) тока разряда ЕНЭ в силовоточной цепи ВЭФУ с RL -нагрузкой.

3. Выполненные силовоточные эксперименты в разрядной цепи ВЭФУ с мощным ЕНЭ подтвердили достоверность некоторых полученных и используемых в математических выкладках расчетных соотношений (в частности, формул (6), (10), (15) и (16)) для приближенной оценки энерговыделения и электрической эрозии массивных металлических электродов ДЭС в исследуемом ВСВК атмосферного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкурпат П.И., Шнейерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. Накопление и коммутация энергии больших плотностей / Под ред. У. Бостика., В. Нарди, О. Цукера: Пер. с англ. Э.И. Асиновского, В.С. Комелькова. – М.: Мир, 1979. – 474 с.
3. Баранов М.И. Применение новых газоразрядных и твердотельных полупроводниковых коммутаторов в силовоточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок // *Электротехника и электромеханика*. – 2009. – №1. – С. 55-58. doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.11.
4. Баранов М.И. Применение новых вакуумных коммутаторов в силовоточных цепях мощных высоковольтных электрофизических установок и схемах аварийной защиты силового электрооборудования // *Электротехника и электромеханика*. – 2009. – №3. – С. 5-10. doi: 10.20998/2074-272X.2009.3.01.
5. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M., Tour A.N. High-Voltage Spark Gaps for Technological Purposes // *Instruments and Experimental Technique*. – 2001. – vol.44. – no.2. – pp. 204-212. doi: 10.1023/a:1017515003483.
6. Баранов М.И., Бочаров В.А., Зябло Ю.П., Мельников П.Н. Высоковольтные силовоточные искровые коммутаторы для генераторов импульсных напряжений и токов // *Техническая электродинамика*. – 2003. – №3. – С. 41-47.
7. 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.
8. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
9. 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. – vol.51. – no.3. – pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
10. Баранов М.И., Князев В.В., Рудаков С.В. Расчетная и опытная оценка результатов электротермического воздействия нормированного по международному стандарту IEC 62305-1-2010 импульса тока короткого удара искусственной молнии на тонкостенное покрытие из нержавеющей стали // *Электротехника и электромеханика*. – 2017. – №1. – С. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.

11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

12. Намитокв К.К. Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.

13. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.

14. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

15. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.

16. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.

17. 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.

18. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.

19. 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.

20. Белкин Г.С., Киселев В.Я. Влияние материала электродов на эрозию при сильных токах // Журнал технической физики. – 1967. – Т.37. – №5. – С. 977-979.

21. Ермилов И.В. Разработка комплекса высоковольтного сильноточного оборудования нового поколения для магнитно-импульсной обработки материалов // Труды международной научно-технической конференции МИОМ-2007 (Российская Федерация, Самара, СГАУ, 18-19 сентября 2007). – С. 88-98.

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. Bostic W., Nardi V., Zucker O. *Nakoplenie i kommutatsiya energii bol'shikh plotnostej* [Accumulation and commutation of energy of high densities]. Moscow, Mir Publ., 1979. 474 p. (Rus).

3. Baranov M.I. Application of new gas-discharge and solid-state semiconductor switchboards in high-current circuits of powerful high-voltage electrophysical installations. *Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.1, pp. 55-58. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2009.1.11.

4. Baranov M.I. Application of new vacuum switchboards in high-current circuits of powerful high-voltage electrophysical installations and emergency protection circuits of power electrical equipment. *Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.3, pp. 5-10. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2009.3.01.

5. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M., Tour A.N. High-Voltage Spark Gaps for Technological Purposes. *Instruments and Experimental Technique*, 2001, vol.44, no.2, pp. 204-212. doi: 10.1023/a:1017515003483.

6. Baranov M.I., Bocharov V.A., Zyabko Yu.P., Melnikov P.N. High-voltage strong current spark switches for high-voltage impulse and current generators. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2003, no.3, pp. 41-47. (Rus).

7. 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.

8. Kuhling H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).

9. 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, vol.51, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.

10. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 31-38. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.

11. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razrjada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).

12. Namitokov K.K. *Elektroerozionnye javlenija* [Electroerosion phenomena]. Moscow, Energia Publ., 1978. 456 p. (Rus).

13. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. *Elektricheskaja erozija sil'notochnykh kontaktov i elektrodov* [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow, Energia Publ., 1978. 256 p. (Rus).

14. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of electrophysics tasks]. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

15. Lozanskiy E.D., Firsov O.B. *Teorija iskry* [Theory of spark]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 272 p. (Rus).

16. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.

17. 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).

18. Gulyi G.A. *Nauchnye osnovy razriadno-impul'snykh tekhnologii* [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).

19. 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).

20. Belkin G.S., Kiselev V.Ya. Influence of electrode material on erosion at strong currents. *Technical Physics*, 1967, vol.37, no.5, pp. 977-979. (Rus).

21. Ermilov I.V. Development of a complex of high-voltage high-current equipment of a new generation for magnetic-pulse processing of materials. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii MIOM-2007* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference MPPM-2007]. Russian Federation, Samara, SGAU, 18-19 September, 2007, pp. 88-98. (Rus).

Поступила (received) 27.03.2017

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

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua
² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438, e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, S.V. Rudakov²

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

² National University of Civil Protection of Ukraine, 94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

An approximate calculation of energy dissipation and electric erosion of electrodes in the high-voltage high-current air switch of atmospheric pressure.

Purpose. To obtain new calculation correlations, determining approximate energy dissipation and electric erosion of massive basic metallic electrodes in the high-voltage high-current air switchboard (HVCAS) of atmospheric pressure, in-use in the bit chain of the high-voltage electrophysics setting (HVES) with the powerful capacity store of energy (CSE). **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high-voltage and large impulsive currents (LIC), scientific and technical bases of development and planning of high-voltage heavy-current impulsive electro-devices, including HVES and powerful CSE, and also methods of measuring in their bit chains of LIC of the microsecond temporal range. **Results.** On the basis of new engineering approach the results of calculation estimation of excretions energy and electric erosion of massive basic metallic electrodes are resulted in probed HVCAS. New correlations are obtained for the approximate calculation of thermal energy, selected in an impulsive air spark and on the workings surfaces of anode and cathode of HVCAS. It is entered and a new electrophysics concept, touching equivalent active resistance of impulsive air spark, is mathematically certain. New formulas are obtained for the approximate calculation of most depth of single round crater of

destruction on the workings surfaces of basic metallic electrodes of HVCAS, and also mass of metal, thrown out magnetic pressure from this crater of destruction on the electrodes of switch for one electric discharge through them powerful CSE HVES. It is shown that the radius of the indicated single crater of destruction is approximately equal to the maximal radius of plasma channel of a spark discharge between a cathode and anode of HVCAS. The executed high-current experiments in the bit chain of HVES with powerful CSE validated row of the got and in-use calculation correlations for the estimation of energy dissipation and electric erosion of metallic electrodes in examined HVCAS. **Originality.** New engineering approach is developed for the approximate calculation and estimation of energy dissipation and electric erosion of basic metallic electrodes in HVCAS. A formula is firstly got for approximate calculation unchanging in the process of swaying or aperiodic discharge of CSE HVES on the electric loading of active resistance of impulsive air spark between the electrodes of probed HVCAS. **Practical value.** Drawing on the got results in a high-voltage impulsive technique provides operative implementation of calculation of balance of electric energy in the high-current circuit of HVES with powerful CSE and point electric load, and also prognostication of the technical state of workings surfaces of massive basic metallic electrodes of HVCAS. References 21, figures 3.

Key words: high-voltage high-current air switch, dissipated thermal energy in air spark and on the electrodes of switch, electric erosion of metallic electrodes of switch, depth of single crater of destruction on the electrodes of switch, thrown out mass of metal from the single crater of destruction of electrodes of switch.