Амплитудно-временные характеристики электрического пробоя длинных воздушных промежутков в двухэлектродной разрядной системе «острие–плоскость» коммутационным апериодическим импульсом высокого напряжения

М. И. Баранов

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 61013, Украина, e-mail: mixail2901mixail@gmail.com

Поступила в редакцию 15.07.2025
После доработки 24.07.2025
Принята к публикации 28.07.2025

Приведены результаты расчетно-экспериментального определения основных амплитудно-временных характеристик электрического пробоя длинных воздушных промежутков в двухэлектродной разрядной системе (ДЭРС) «острие–плоскость» стандартным коммутационным апериодическим импульсом высокого напряжения временной формы T_m/T_p≈200 мкс/1990 мкс положительной полярности. Получены приближенные расчетные соотношения для нахождения времени T_d пробоя, пробивного (разрядного) напряжения U_d и усредненной по минимальной длине $l_{min} \geq 1$ м данных промежутков пробивной напряженности E_d сильного электрического поля для этой ДЭРС. Предложенный инженерный подход для определения значений T_d, U_d и E_d базируется на результатах приближенного расчета в длинном воздушном промежутке ДЭРС «острие–плоскость» резко неоднородного сильного электромагнитного поля и возникновении из-за его действия вблизи нижнего заостренного края верхнего потенциального электрода–острия ДЭРС сферической зоны радиусом r_i активной ударной ионизации электронами ее атмосферного воздуха, с которой в сторону нижнего заземленного электрода–плоскости ДЭРС развивается положительный лидер разряда.

Ключевые слова: длинный воздушный промежуток, пробой, коммутационный импульс напряжения, время пробоя, пробивное напряжение, пробивная напряженность электрического поля, расчет, эксперимент

УДК 621.3.022: 621.396.6: 533.93
https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.4.29

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая прочность высоковольтной и сверхвысоковольтной изоляции разного агрегатного состояния (газового, жидкого и твердого) определяет надежность функционирования силового электрооборудования непосредственно как у производителей электроэнергии, так и у ее потребителей. Поэтому в области техники высоких (ТВН), сверхвысоких (СВН) и ультравысоких (УВН) напряжений вопросам выбора пробивных (разрядных) напряжений U_d и усредненных по длине пробивных напряженностей E_d сильного электрического поля для изоляционных промежутков минимальной длиной l_{min} разнообразных электротехнических конструкций при действии на них постоянных, переменных и импульсных напряжений во всем мире уделялось и уделяется повышенное внимание ученых [1–4]. Отдельным важным физико-техническим вопросом в области ТВН, высоковольтной импульсной техники (ВИТ) и техники СВН (УВН) были и остаются те проблемные задачи, которые связаны с определением электрической прочности длинных воздушных промежутков (при их минимальной длине $l_{min} \geq 1$ м [1–4]) в воздушных линиях электропередачи переменного напряжения, а также в мощных сверхвысоковольтных и высоковольтных электрофизических установках, которые формируют в больших объемах с атмосферным воздухом сильные импульсные электромагнитные поля (ЭМП) специальных временных форм для испытаний на электромагнитную совместимость (стойкость) многих технических объектов гражданского и военного назначения [5–8]. Для решения этих важных прикладных электротехнических задач необходимо углубление научно-технических знаний в области физики длинных электрических искровых разрядов в воздухе, которые относятся к одним из самых сложных электрофизических

явлений в природе газового разряда [2–4, 9]. Кроме того, понимание физики длинных электрических искр способствует решению и ряда других актуальных практических задач (например, обеспечению молниезащиты и электробезопасности функционирования различных летательных аппаратов и наземных мощных электроэнергетических сооружений стратегического значения, включая атомные электрические станции [10–14]).

На данное время малоизученными задачами в области физики длинных искровых разрядов остаются те, которые связаны с электрофизическими механизмами электрического пробоя длинных воздушных промежутков импульсным высоким (сверхвысоким) напряжением и особенно с расчетным определением основных амплитудно-временных характеристик (АВХ) их электрического пробоя при воздействии на них стандартных коммутационных апериодических импульсов напря-жения $U_{12}(t)$ [1–3, 9, 15]. Известно, что указанная временная форма этих испытательных импульсов напряжения $U_{12}(t)$, которые подаются на базовую в данных областях современной высоковольтной электротехники двухэлектродную разрядную систему (ДЭРС) «острие–плоскость» с атмосферным воздухом, определяет в области современной ТВН, ВИТ и техники СВН (УВН) инженерный выбор рабочей длинномерной воздушной изоляции в их силовых электроустройствах [2, 3, 15]. Бесспорно, длинный воздушный промежуток в сверхвысоковольтной и высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость», которая характеризуется наличием в подобном ее изоляционном промежутке резко неоднородного сильного импульсного электрического поля, с указанным коммутационным апериодическим импульсом напряжения $U_{12}(t)$ позитивной полярности имеет наименьшую электрическую прочность по сравнению с ДЭРС других геометрических конфигураций ее металлических электродов и с другими временными формами воздействующего на эти электроды сверхвысокого и высокого электрического напряжения [1–3, 15].

Цель статьи – расчетно-экспериментальное определение основных АВХ (времени T_d пробоя, пробивного (разрядного) напряжения U_d и усредненной по минимальной длине l_{min} воздушного промежутка пробивной напряженности E_d сильного электрического поля) электрического искрового пробоя длинных воздушных промежутков в ДЭРС «острие–плоскость» стандартным коммутационным апериодическим импульсом сверхвысокого и высокого электрического напряжения положительной полярности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим высоковольтную ДЭРС «острие–плоскость» (рис. 1), которая содержит вертикально размещенный верхний потенциальный электрод в виде металлического круглого стержня *1* радиусом r_0 со своим заостренным нижним округлым краем с радиусом $r_c << r_0$ его кривизны и нижний заземленный плоский электрод в виде горизонтально расположенной металлической плоскости *2*, габаритные размеры которой существенно превышают минимальную длину l_{min} ее воздушного промежутка. Принимаем, что в этой ДЭРС электрические потенциалы металлических электродов *1* и *2* равны соответственно $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2 \approx 0$, а между ними в межэлектродном разрядном газовом промежутке минимальной длиной l_{min}, равной длине прямой, проведенной от острия потенциального электрода *1* по нормали к плоской поверхности заземленного электрода *2*, размещен воздух при следующих нормальных атмосферных условиях [16]: давление газа – $P_a \approx (1{,}013\pm0{,}03)\times10^5$ Па; абсолютная температура газа – $T_a \approx (293{,}15 \pm 10)$ К; относительная влажность газа – $\gamma_a \approx (45\pm30)\%$. Считаем, что на исследуемую ДЭРС воздействует высокое (сверхвысокое) импульсное напряжение $U_{12}(t) \approx (\varphi_1(t)-\varphi_2)\approx\varphi_1(t)$ положительной полярности, которое формируется с помощью сверхвысоковольтного генератора импульсных напряжений конденсаторного исполнения и специальных схемно-технических решений в его разрядном электрическом контуре [14, 17, 18].

Принимаем, что импульсное напряжение $U_{12}(t)$ в межэлектродном воздушном промежутке исследуемой высоковольтной ДЭРС изменяется во времени t по закону стандартного коммутационного апериодического импульса высокого (сверхвысокого) напряжения временной формы $T_m/T_p \approx (250\pm50)$ мкс/(2500 ± 750) мкс положительной полярности с заданными временными допусками [17–19]:

$$U_{12}(t) = k_{12}U_{12m}\left[\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)\right], \quad (1)$$

где U_{12m} – амплитуда апериодического импульса напряжения $U_{12}(t)$; $\alpha_1 \approx 0{,}76/T_p$, $\alpha_2 \approx 3{,}79/T_m$ – коэффициенты формы импульса напряжения $U_{12}(t)$; T_m, T_p – адаптированные к коммутационной форме показатели времени, которые отвечают амплитуде U_{12m} и длительности импульса напряжения $U_{12}(t)$ на уровне $0{,}5U_{12m}$; $k_{12} = [(\beta_0)^n-(\beta_0)^m]^{-1}$ – нормирующий коэффициент; $\beta_0 = \alpha_1/\alpha_2$; $n = \alpha_1/(\alpha_2-\alpha_1)$; $m = \alpha_2/(\alpha_2-\alpha_1)$.

Ограничимся рассмотрением широко распространенного в области ТВН и ВИТ электрофизического случая, когда минимальная длина

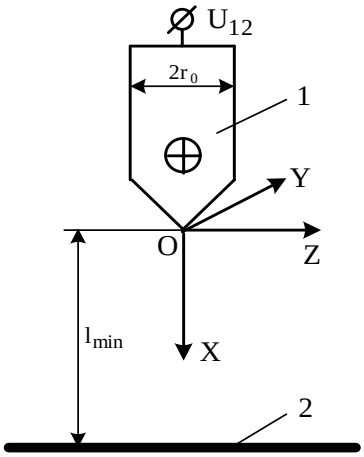


Рис. 1. Общий вид высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» с минимальной длиной l_{min} ее воздушного промежутка (*1*, *2* − соответственно потенциальный металлический стержень–острие радиусом r_0 с его заостренным нижним краем с радиусом $r_c << r_0$ кривизны и положительным потенциалом $\varphi_1(t) \approx U_{12}(t)$ и заземленная металлическая плоскость с потенциалом $\varphi_2 \approx 0$).

l_{min} воздушного промежутка в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» численно составляет l_{min} = (1−4) м. При этом усредненная по длине l_{min} пробивная (разрядная) напряженность E_d сильного импульсного электрического поля в длинном воздушном промежутке этой ДЭРС в зависимости от пробивного напряжения U_d может быть рассчитана по следующему приближенному соотношению [20]: $E_d \approx U_d/(1{,}13l_{min})$. Под основными АВХ электрического искрового пробоя длинных воздушных промежутков, удовлетворяющих принятому диапазону 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м их изменения в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость», понимаем [15, 17]: во-первых, пробивное (разрядное) напряжение U_d; во-вторых, усредненную пробивную напряженность E_d сильного электрического поля; в-третьих, время T_d пробоя, которое при достижении импульсным напряжением $U_{12}(t)$ в ДЭРС уровня пробивного напряжения U_d соответствует моменту начала резкого падения (коммутации) электрического напряжения на воздушном промежутке ДЭРС.

При рассмотрении полевых электродинамических процессов в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС в напряженной зоне ее электрода–острия с радиусом r_c кривизны его нижнего края воспользуемся декартовой системой координат *XYZ*, начало координат которой привяжем к заостренному полусферическому краю с его радиусом $r_c << r_0$ кривизны указанного электрода–острия этой ДЭРС (см. рис. 1). Учитывая, что геометрическая конфигурация исследуемой ДЭРС в зоне ее электрода–острия с положительным высоким (сверхвысоким) потенциалом $\varphi_1(t)$ удовлетворяет вокруг оси *OX* условию осевой симметрии, то при рассмотрении распределения возникающего в воздушном промежутке ДЭРС плоскомеридианного импульсного ЭМП в данной резко напряженной полевой и критической с точки зрения начала предпробойных электроразрядных процессов зоне исследуемой ДЭРС ограничимся использованием в приближенных полевых расчетах плоских монохроматических линейно-поляризованных поперечных электромагнитных волн (ЭМВ), которые могут распространяться в длинном воздушном промежутке этой ДЭРС как вблизи, так и вдали от ее металлического электрода–острия.

Считаем, что до начала подачи на электрод–острие исследуемой ДЭРС импульсного сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ объемная плотность $\rho_0(0)$ свободных электрических зарядов в воздушном промежутке ДЭРС практически отсутствует, а электрическая прочность межэлектродного воздушного промежутка в этой ДЭРС определяется усредненным уровнем пробивной напряженности E_d резко неоднородного несимметричного сильного электрического поля в нем для апериодического импульса указанного напряжения $U_{12}(t)$ положительной полярности по (1), который подается на эту ДЭРС.

Скорость нарастания (крутизну) импульса воздействующего на ДЭРС «острие–плоскость» напряжения $U_{12}(t)$ будем определять в виде производной $dU_{12}(t)/dt$ на его нарастающей во времени t части, на которой, согласно результатам известных в области ТВН, ВИТ и СВН (УВН) экспериментов [2–4, 9, 15], обычно и происходит реальный электрический пробой длинного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС. При этом в случае положительной полярности коммутационного апериодического импульса высокого (сверхвысокого) напряжения $U_{12}(t)$ для численного определения усредненного

значения производной $dU_{12}(t)/dt$ используем приближенное соотношение вида: $dU_{12}(t)/dt \approx U_d/T_c$, где U_d – пробивное напряжение, которое соответствует уровню среза (коммутации) импульса напряжения $U_{12}(t)$ при электрическом пробое длинного воздушного промежутка в ДЭРС «острие–плоскость», а $T_c \approx T_d$ – время среза (коммутации) импульса воздействующего напряжения $U_{12}(t)$ в разрядном промежутке этой ДЭРС. Укажем, что определение численных значений величин U_d и $T_c \approx T_d$ и расшифровку соответствующих осциллограмм импульсов напряжения $U_{12}(t)$ указанной временной формы при электрическом искровом пробое длинных воздушных промежутков в исследуемой опытной высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» будем осуществлять, согласно требованиям действующего стандарта ГОСТ 1516.2-97 [17].

Принимаем, что в первом приближении лавинно-стримерная и лидерная стадии высоковольтного искрового разряда в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» определяются процессом размножения в нем свободных электронов под их ударным ионизирующим действием на атомы и молекулы смеси газов ее атмосферного воздуха в сильном импульсном ЭМП, появление которого в ДЭРС вызывается подачей на нее рассматриваемого по (1) импульсного электрического напряжения $U_{12}(t)$ [9, 15, 21–26].

Кроме того, принимаем то физическое положение, что активное размножение электронов главным образом происходит в окрестностях потенциального электрода–острия ДЭРС с радиусом $r_c << r_0$ кривизны его полусферического края в сферической зоне радиусом $r_i >> r_c$ активной ударной ионизации электронами атмосферного воздуха в ДЭРС [19], где напряженность $E_x(z, t)$ ее резко неоднородного сильного импульсного электрического поля значительно возрастает и достигает своего критического значения E_{xk}, вызывающего указанную выше ионизацию атмосферного воздуха в исследуемой ДЭРС. В связи с этим считаем, что для высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» при электрическом пробое ее атмосферного воздуха временное равенство $T_d \approx T_c$ в общем случае определяется как длительностью процесса активной ударной ионизации электронами, которые ускоряются в ее сильном электрическом поле с напряженностью $E_x(z, t)$, атомов (молекул) в составе воздуха ДЭРС, так и длительностью процессов формирования и развития положительных стримеров и лидера в воздушном промежутке данной ДЭРС. Принимаем, что начало возникновения в ярко светящейся вблизи электрода–острия ДЭРС сферической зоне радиусом r_i активной ударной ионизации ее воздуха электронами, ускоренными в нем электрическим полем с напряженностью E_{xk} [19], плазменного канала лидера, то есть фактически время $T_d \approx T_c$ пробоя ее воздушного промежутка длиной $l_{min} \geq 1$ м, соответствует электрическому напряжению появления U_{ed} в этой воздушной ДЭРС беспрерывного положительного лидера разряда [15].

Необходимо на основе расчетных и экспериментальных данных, которые касаются протекания электрофизических процессов в длинных разрядных воздушных промежутках ($1 \text{ м} \leq l_{min} \leq 4$ м) высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость», в приближенном виде определить указанные выше основные АВХ электрического искрового пробоя этих промежутков в данной ДЭРС стандартным коммутационным апериодическим импульсом сверхвысокого и высокого электрического напряжения $U_{12}(t)$ положительной полярности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ДЛИННОГО ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА В ИССЛЕДУЕМОЙ ДЭРС

Согласно классической теории ЭМП, первое и второе уравнения Максвелла в дифференциальной форме для сильного импульсного ЭМП, что генерируется в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» в зоне металлического острия ее потенциального электрода, в принятой декартовой системе координат при указанных допущениях для случая, когда компоненты векторов ЭМП зависят только от одной переменной z и времени t, имеют следующий вид [27–29]:

$$-\frac{\partial H_y(z,t)}{\partial z} = \varepsilon_0 \frac{\partial E_x(z,t)}{\partial t}; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial E_x(z,t)}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_y(z,t)}{\partial t}, \qquad (3)$$

где $E_x(z, t)$, $H_y(z, t)$ – компоненты напряженностей электрического и магнитного полей в воздушном промежутке рассматриваемой ДЭРС вдоль координатных осей OX и OY в окрестностях ее электрода–острия, где под действием импульса напряжения $U_{12}(t)$ генерируется плоско-меридианное ЭМП; $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}$ Ф/м, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – соответственно электрическая и магнитная постоянные [16].

Уравнения (2) и (3) при $\rho_0(0) \approx 0$ дополняются следующими приближенными граничными и начальными условиями для импульсного ЭМП,

которое радиально распространяется от электрода–острия вдоль координатной оси *OZ* в длинном воздушном промежутке ДЭРС «острие–плоскость»:

$$E_x(0,t) = U_{12}(t)/r_c; \quad (4)$$

$$H_y(0,t) = U_{12}(t)/(r_c Z_0); \quad (5)$$

$$E_x(z,0) = 0; \quad (6)$$

$$H_y(z,0) = 0, \quad (7)$$

где $Z_0 = [\mu_0/(\varepsilon_r\varepsilon_0)]^{1/2}$ – волновое сопротивление воздушной среды с ее относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r \approx 1$ для длинного разрядного газового промежутка с его минимальной длиной l_{min} в рассматриваемой высоковольтной ДЭРС.

При аналитическом решении приведенной выше системы уравнений Максвелла (2) и (3) с краевыми условиями (4)–(7) рассмотрим принятый выше электротехнический случай, когда импульсное электрическое напряжение $U_{12}(t)$ в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» изменяется во времени *t*, согласно (1), по закону указанного стандартного коммутационного апериодического импульса временной формы $T_m/T_p \approx (250\pm50)$ мкс/(2500 ± 750) мкс положительной полярности [17–19].

Для принятого нами случая временного изменения электрического напряжения $U_{12}(t)$ положительной полярности на потенциальном электроде–острие исследуемой воздушной ДЭРС решение рассматриваемой прикладной полевой задачи для напряженностей электрического $E_x(z, t)$ и магнитного $H_y(z, t)$ полей в воздушной среде вблизи электрода–острия данной ДЭРС с длинным разрядным промежутком можно записать в виде следующих приближенных электродинамических соотношений:

$$E_x(z,t) \approx k_{12}U_{12m}r_c^{-1}[e^{-(k_0 z+\alpha_1 t)} - e^{-(k_0 z+\alpha_2 t)}]; \quad (8)$$

$$H_y(z,t) \approx k_{12}U_{12m}r_c^{-1}Z_0^{-1}[e^{-(k_0 z+\alpha_1 t)} - e^{-(k_0 z+\alpha_2 t)}], \quad (9)$$

где $k_0 \approx 0{,}5\pi T_m^{-1}(\varepsilon_r\varepsilon_0\mu_0)^{1/2}$ – продольное волновое число.

Выражения (8) и (9) при фиксированном значении координаты *z* на оси *OZ* описывают временные изменения соответствующих компонент плоской поперечной апериодической ЭМВ положительной полярности, которая распространяется в радиальном направлении от оси *OX* наружу от длинного воздушного промежутка исследуемой ДЭРС «острие–плоскость». Как известно, такие пространственно-временные изменения напряженностей электрического $E_x(z, t)$ и магнитного $H_y(z, t)$ полей в электродинамике характерны для плоской поперечной ЭМВ, что «бежит» в диэлектрической среде [28, 29]. Причем амплитуды и нулевые значения напряженностей $E_x(z, t)$ и $H_y(z, t)$ в этих ЭМВ, что «бегут» в ДЭРС, соответствуют друг другу, то есть эти напряженности ее импульсного ЭМП синфазны [28]. При этом минимальная длина λ_0 плоской вертикально поляризованной поперечной ЭМВ в воздухе для принятой ДЭРС будет определяться следующей формулой [29]: $\lambda_0 \approx 2\pi/k_0 \approx 4T_m(\varepsilon_r\varepsilon_0\mu_0)^{-1/2}$. Видим, что при $T_m \approx 200$ мкс и $\varepsilon_r \approx 1$ указанная длина λ_0 волны ЭМП, которое генерируется в исследуемой ДЭРС под действием импульсного напряжения $U_{12}(t)$, принимает численное значение, равное около $\lambda_0 \approx 240\times10^3$ м. Это количественное значение минимальной длины λ_0 поперечной ЭМВ для рассматриваемой нами области современной ТВН и ВИТ [1–4, 19] значительно превышает принятую выше минимальную длину $l_{min} = (1–4)$ м длинного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость». Данный результат может свидетельствовать о том, что при рассмотрении импульсного ЭМП в исследуемой нами ДЭРС допустимо квазистационарное приближение для его электрической и магнитной компонент.

Отметим, что импульсные электромагнитные процессы в длинных воздушных промежутках исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» с указанными выше плоскими поперечными ЭМВ, что «бегут» в ее атмосферном воздухе, определяются в рассматриваемом нами прикладном случае, согласно (2), плотностью $\delta_s(t) = \varepsilon_0\partial E_x(z, t)/\partial t$ тока смещения $i_s(t)$ в этом воздухе, который в традиционном понимании электрическим током (направленным движением электрических зарядов [28]) и не является. В [19, 30] расчетным путем для тока смещения $i_s(t)$ и его плотности $\delta_s(t)$ в различных средах было показано, что эти важные для электродинамики физические понятия можно трактовать как особую форму переменного (импульсного) ЭМП, одновременно способную как к обеспечению с помощью вызываемых этой формой ЭМП стоячих поперечных ЭМВ соленоидальности (замкнутости) полного переменного (импульсного) тока в металлических проводниках конечных геометрических размеров, так и к передаче на дальние расстояния, с помощью создаваемых ею же в диэлектрической среде поперечных «бегущих» ЭМВ, потоков электромагнитной энергии в атмосферном воздухе или вакууме.

Укажем, что в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» плотность потока электромагнитной энергии в воздухе будет определяться вектором Пойнтинга $P_z(z, t)$, направленным вдоль координатной оси *OZ* наружу данной ДЭРС (см. рис. 1).

При этом усредненное значение модуля этого вектора на временном интервале [0, T_p] изменения в ней ЭМВ с учетом (8) и (9) принимает аналитический вид:

$$P_{z0} \approx k_{12}^2 U_{12m}^2 r_c^{-2} T_p^{-1} Z_0^{-1} \times \\ \times \int_0^{T_p} \left[e^{-(k_0 z+\alpha_1 t)} - e^{-(k_0 z+\alpha_2 t)} \right]^2 dt. \quad (10)$$

После интегрирования в (10) для усредненного значения модуля вектора Пойнтинга P_{z0} в ближней воздушной зоне ($z << \lambda_0$; $\varepsilon_r \approx 1$) исследуемой высоковольтной ДЭРС получаем выражение:

$$P_{z0} \approx k_{12}^2 U_{12m}^2 r_c^{-2} (\varepsilon_0 / \mu_0)^{1/2}. \quad (11)$$

Из (11) следует то, что удельная мощность потока электромагнитной энергии P_{z0} (Вт/м^2), радиально направленного наружу от длинного воздушного промежутка исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» по оси *OZ*, не зависит от временных параметров T_m и T_p воздействующего на нее импульсного напряжения $U_{12}(t)$, что изменяется по (1) и подается на ее металлические электроды. Эта мощность P_{z0} прямо пропорциональна квадрату амплитуды напряженности $E_{xm} \approx k_{12} U_{12m}/r_c$ сильного импульсного электрического поля вблизи потенциального электрода–острия исследуемой ДЭРС. Поэтому отсюда нам можно обоснованно заключить, что чем больше будет в высоковольтной воздушной ДЭРС «острие–плоскость» амплитуда U_{12m} электрического напряжения $U_{12}(t)$ для коммутационного апериодического импульса по (1) и меньше радиус r_c кривизны нижнего полусферического края острия ее потенциального электрода, приводящие к резкому обострению в этой локальной воздушной зоне напряженности $E_x(z, t)$ ее электрического поля по (8), тем большей будет удельная мощность потока электромагнитной энергии P_{z0} по (11), вводимая в длинный воздушный промежуток данной ДЭРС.

Из (2)–(7) вытекает то, что при $\partial E_x(z, t)/\partial t = 0$ и соответственно при $\partial H_y(z, t)/\partial t = 0$, то есть при отсутствии изменения во времени t электрического напряжения на потенциальном электроде–острие высоковольтной ДЭРС (при $U_{12}(t) = U_{12} = \text{const}$), в длинном воздушном промежутке такой ДЭРС ни каких волн ЭМП не генерируется. В этом случае ($T_m \to 0$, $T_p \to \infty$, $\alpha_1 \to 0$, $\alpha_2 \to \infty$ и $k_{12} \to 1$) значение напряженности $H_y(z, t)$ магнитного поля, согласно (9), обнуляется, а в воздушном промежутке данной ДЭРС в локальной зоне вблизи ее металлического электрода–острия возникает, согласно (8), лишь сильное электростатическое поле с его постоянной напряженностью, равной $E_x|_{z=0} \approx U_{12}/r_c$. При этом следует отметить то, что пробивные (разрядные) напряжения U_d и вероятные физические механизмы пробоя длинных воздушных промежутков при постоянном электрическом напряжении U_{12} положительной (отрицательной) полярности в базовых для ТВН и ВИТ воздушных высоковольтных ДЭРС с металлическими электродами основных канонических геометрических форм ранее были приведены в [1–3, 9, 15].

Расчетные соотношения (8) и (9) описывают в принятом приближении изменения указанных компонент напряженностей электрического $E_x(z, t)$ и магнитного $H_y(z, t)$ импульсных полей в длинном воздушном промежутке исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» на основе их исходных значений, найденных вблизи полусферической поверхности нижнего края металлического электрода–острия ДЭРС для предельного случая, когда фактически $x \approx 0$. При $x \geq 0$ с учетом (8), (9) и принятых допущений изменения вдоль координатных осей *OX* и *OZ* соответствующих компонент напряженностей электрического $E_{xx}(x, z, t) \approx E_x(z, t)\, r_c (x + r_c)^{-1}$ и магнитного $H_{yx}(x, z, t) \approx H_y(z, t)\, r_c (x + r_c)^{-1}$ импульсных полей в рабочей ближней воздушной зоне ($z << \lambda_0$) данной ДЭРС в первом приближении, согласно известным положениям классической электродинамики [28, 29], будут описываться следующими соотношениями:

$$E_{xx}(x, z, t) \approx k_{12} U_{12m} \times \\ \times (x + r_c)^{-1} [e^{-(k_0 z+\alpha_1 t)} - e^{-(k_0 z+\alpha_2 t)}]; \quad (12)$$

$$H_{yx}(x, z, t) \approx k_{12} U_{12m} (x + r_c)^{-1} \times \\ \times Z_0^{-1} [e^{-(k_0 z+\alpha_1 t)} - e^{-(k_0 z+\alpha_2 t)}]. \quad (13)$$

Из (12) и (13) видно, что при $x = 0$ полученные нами в первом приближении электродинамические соотношения для напряженностей электрического $E_{xx}(x, z, t)$ и магнитного $H_{yx}(x, z, t)$ полей переходят соответственно в соотношения (8) и (9). Кроме того, для рассматриваемой ДЭРС «острие–плоскость» (1 м $\leq l_{min} \leq$ 4 м; $\lambda_0 \approx 240 \times 10^3$ м) при $k_0 z \approx 2\pi z/\lambda_0 \approx 0$, что характерно для ее рабочей воздушной зоны ($z << \lambda_0$; $\varepsilon_r \approx 1$) с исследуемыми изоляционными промежутками указанной длины l_{min}, волновые соотношения (12) и (13) вырождаются в следующие расчетные квазистационарные электродинамические соотношения:

$$E_{xx}(x, 0, t) \approx U_{12}(t) (x + r_c)^{-1} \approx \\ \approx k_{12} U_{12m} (x + r_c)^{-1} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}]; \quad (14)$$

$$H_{yx}(x,0,t) \approx U_{12}(t)(x+r_c)^{-1}Z_0^{-1} \approx$$
$$\approx k_{12}U_{12m}(x+r_c)^{-1}Z_0^{-1}[e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}]. \quad (15)$$

При электрическом пробое длинного воздушного промежутка исследуемой ДЭРС «острие–плоскость», когда в нем длина $l_d \approx 1{,}13l_{min}$ зигзагоподобного плазменного канала искрового разряда соответствует наименьшему значению падения на нем электрического напряжения [31], выражение (14) при $U_{12}(t) \approx U_d$ и $(x+r_c) \approx 0{,}9l_d \approx l_{min}$ будет определять усредненную по длине l_{min} разрядного промежутка пробивную напряженность E_d электрического поля в высоковольтной воздушной ДЭРС. Укажем, что, согласно (14), для прикладного случая, когда $U_{12}(t) \approx U_d \approx 611{,}6$ кВ (l_{min} = 1,5 м; $r_c \approx 3$ мм; $r_i \approx 25$ мм) [20], а $x \approx (r_i - r_c) \approx 22$ мм, напряженность $E_{xx}(x, 0, t)$ сверхсильного импульсного электрического поля [1, 4] на краю сферической зоны радиусом около $r_i \approx 25$ мм, размещенной вокруг потенциального металлического электрода–острия этой высоковольтной воздушной ДЭРС, принимает численное значение, равное приблизительно $E_{xx}(x, 0, t)\big|_{x=22\text{ мм}} \approx U_d/r_i \approx 24{,}5$ МВ/м. Подобного уровня напряженности сверхсильного электрического поля в атмосферном воздухе достаточно для осуществления активной ударной ионизации электронами молекул (атомов) смеси газов используемого в исследуемой ДЭРС воздушного диэлектрика в сферической зоне радиусом около $r_i \approx 25$ мм в окрестностях электрода–острия рассматриваемой ДЭРС (l_{min} = 1,5 м; $r_c \approx 3$ мм; $U_d \approx 611{,}6$ кВ) [3, 9, 20]. На основании полученных в этом разделе приближенных результатов полевых электродинамических расчетов можно сделать заключение о том, что при определении основных АВХ пробоя длинных воздушных промежутков в исследуемой ДЭРС может быть применен режим квазистационарного приближения для электромагнитных процессов, что протекают в этой ДЭРС.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ T_d ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ, ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ U_d И ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ E_d СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИССЛЕДУЕМОЙ ДЭРС

Анализ результатов многочисленных экспериментальных исследований электрической прочности длинных воздушных промежутков в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» для стандартного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ положительной полярности с амплитудно-временными параметрами по (1) свидетельствуют о том, что электрический пробой таких разрядных газовых промежутков в рассматриваемой воздушной ДЭРС происходит всегда на его фронтальной части в пределах временного интервала [0, T_m] [3, 15, 18, 20, 32]. Учитывая временную зависимость слагаемых экспонент в (1), определяющих во времени t форму испытательного электрического напряжения $U_{12}(t)$, и полученные в [3, 15, 18, 20, 32] результаты высоковольтных экспериментов, для приближенного расчетного определения времени T_d электрического пробоя длинных воздушных промежутков (1 м $\le l_{min} \le$ 4 м) в исследуемой нами ДЭРС «острие–плоскость» с принятым апериодическим импульсом сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ предлагается следующее эмпирическое соотношение:

$$T_d \approx 1{,}9/\alpha_2. \quad (16)$$

Из (16) при $\alpha_2 \approx 3{,}79/T_m$ [18, 19] и $T_m \approx 200$ мкс вытекает, что для указанного, согласно (1), испытательного стандартного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого и высокого электрического напряжения $U_{12}(t)$ используемой нами временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности время T_d электрического искрового пробоя длинного воздушного промежутка в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» численно составляет примерно $T_d \approx 0{,}501T_m \approx 100{,}3$ мкс.

Тогда, используя (1), (16) и временное равенство $T_d \approx T_c$, в квазистационарном приближении для пробивного (разрядного) напряжения U_d, как основной АВХ в исследуемой нами ДЭРС «острие–плоскость», на металлические электроды которой непосредственно действует стандартный коммутационный апериодический импульс сверхвысокого или высокого напряжения $U_{12}(t)$ рассматриваемой временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности, можно записать следующее расчетное соотношение:

$$U_d \approx k_{12}l_{\min}E_{d\max} \times$$
$$\times\left[\exp(-\alpha_1 T_d) - \exp(-\alpha_2 T_d)\right], \quad (17)$$

где $E_{dmax} = U_{12m}/l_{min}$ – максимальная пробивная напряженность сильного электрического поля в атмосферном воздухе для исследуемой высоковольтной ДЭРС.

После подстановки (16) в (17) с учетом выполнения для действующего на металлические электроды исследуемой ДЭРС «острие–

плоскость» импульса электрического напряжения $U_{12}(t)$ неравенства вида $\alpha_1 << \alpha_2$ ($\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$; $\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$ [19]) для пробивного напряжения U_d в рассматриваемой воздушной ДЭРС с принятой по (1) временной формой импульсного напряжения $U_{12}(t)$ получаем упрощенное соотношение:

$$U_d \approx 0{,}812 k_{12} l_{\min} E_{d\max}. \qquad (18)$$

Для нахождения в (17) и (18) численного значения максимальной пробивной напряженности E_{dmax} могут быть использованы отдельные экспериментальные данные для U_{12m} и l_{min}, которые были получены при электрическом искровом пробое длинного воздушного промежутка в ДЭРС «острие–плоскость» той или иной минимальной длины l_{min} (например, при l_{min} = 1,5 м или при l_{min} = 3,0 м) стандартным апериодическим коммутационным импульсом сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ указанной по (1) временной формы с соответствующими коэффициентами α_1, α_2 и k_{12} для такого испытательного импульса напряжения $U_{12}(t)$. Покажем, что при перерасчете в (17) и (18) уровня пробивного напряжения U_d для других значений минимальных длин l_{min} межэлектродного воздушного промежутка, с указанного выше диапазона его изменения 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость», численные значения E_{dmax} могут изменяться в пределах до 15% согласно полученным нами результатам, приведенным ниже в этом разделе. Поэтому, согласно (17) и (18), пробивное (разрядное) напряжение U_d в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» для принятого диапазона изменения в ней минимальной длины l_{min} ее длинного воздушного промежутка (1 м $\le l_{min} \le$ 4 м) будет зависеть практически линейно от геометрического параметра l_{min} в рассматриваемой ДЭРС. Полученный нами для пробивного (разрядного) напряжения U_d расчетный результат соответствует известным экспериментальным данным, характерным для электрического пробоя высоким униполярным импульсным напряжением $U_{12}(t)$ в ДЭРС «острие–плоскость» ее длинных воздушных промежутков с указанной минимальной длиной l_{min} [2, 9,15, 32–34]. Кроме того, нами установлено, что при возрастании минимальной длины l_{min} воздушного промежутка в ДЭРС «острие–плоскость» с диапазона 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м с учетом уменьшения при этом значения E_{dmax} влияние геометрического параметра l_{min} на уровень пробивного (разрядного) напряжения U_d в ней по (18) будет уменьшаться, что соответствует экспериментальным результатам для данной ДЭРС, приведенным в [15].

Заметим, что, согласно принятым выше допущениям, пробивное (разрядное) электрическое напряжение U_d по (18) должно соответствовать напряжению появления U_{ed} в исследуемой ДЭРС беспрерывного положительного лидера разряда. Известно, что для высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость», нижний край потенциального круглого металлического электрода–острия радиусом r_0 которой имеет полусферическую форму с радиусом его кривизны $r_c << r_0$, электрическое напряжение появления U_{ed} положительного лидера в этой высоковольтной воздушной ДЭРС определяется приближенным соотношением вида [15]:

$$U_{ed} \approx E_{e0} l_{\min} / k_c, \qquad (19)$$

где $E_{e0} \approx 23[1+1{,}22(r_{ec})^{-0{,}37}]$ с размерностью (кВ/см) – начальная напряженность электрического поля в ДЭРС у края ее электрода–острия с эквивалентным радиусом его кривизны $r_{ec} \approx r_c$; $k_c \approx (14+1{,}5 l_{min})$ с размерностью (м) при этом минимальной длины l_{min} воздушного промежутка ДЭРС – критическое значение безразмерного коэффициента неоднородности электрического поля в исследуемой ДЭРС.

Из (19) для рассматриваемой ДЭРС при l_{min} = 1,5 м и $r_c \approx$ 0,3 см электрическое напряжение появления U_{ed} в ней положительного лидера принимает расчетное значение, которое количественно составляет около $U_{ed} \approx$ 616,6 кВ. При l_{min} = 3,0 м и $r_c \approx$ 0,3 см указанное электрическое напряжение U_{ed}, согласно (19), для исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «острие–плоскость» оказывается равным около $U_{ed} \approx$ 1083,3 кВ.

Для апробации полученных приближенных расчетных соотношений (16)–(18), определяющих время T_d пробоя и пробивное (разрядное) напряжение U_d в воздушной ДЭРС «острие–плоскость», и опытного нахождения максимальной пробивной напряженности E_{dmax} сильного электрического поля в данной ДЭРС нами были выполнены необходимые для этого высоковольтные эксперименты.

На рис. 2 приведена реальная осциллограмма срезанного на нарастающей фронтальной части использованного в экспериментах, которые выполнялись в лабораторных условиях на открытом воздухе с помощью сверхвысоковольтного оборудования разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (рис. 3, 4) [18, 20], стандартного апериодического коммутационного импульса высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс положительной полярности при электрическом искровом пробое длинного воздушного промежутка в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» (рис. 5) с его минимальной длиной l_{min} = 3,0 м.

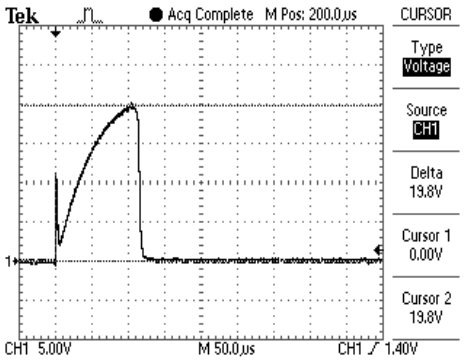


Рис. 2. Осциллограмма срезанного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого напряжения временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс ($\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$; $\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$; $k_{12} \approx 1{,}103$) положительной полярности при электрическом пробое длинного воздушного промежутка ($l_{min} = 3{,}0$ м; $r_c \approx 3$ мм) в ДЭРС «острие–плоскость» ($U_d \approx 19{,}8$ В × 53650 ≈ 1062,3 кВ − уровень среза импульса напряжения $U_{12}(t)$ (пробивное напряжение U_d в ДЭРС); $T_c \approx T_d \approx 104$ мкс − время среза импульса напряжения $U_{12}(t)$ (время T_d пробоя воздушного промежутка в ДЭРС); $T_{dc} \approx 33$ мкс − длительность среза (коммутации) импульса напряжения $U_{12}(t)$; масштаб по вертикали – 268,2 кВ/дел.; масштаб по горизонтали – 50 мкс/дел.) [20].



Рис. 3. Общий вид сверхвысоковольтного генератора стандартных коммутационных апериодических импульсов напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной (отрицательной) полярности типа ГКИН-2 на номинальное выходное электрическое напряжение до ±2 МВ отечественной разработки [18].

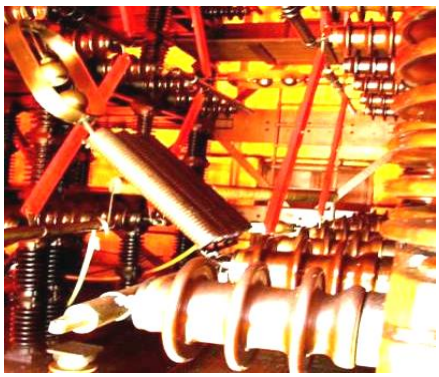


Рис. 4. Общий вид элементов зарядно-разрядного контура сверхвысоковольтного генератора стандартных коммутационных апериодических импульсов напряжения $U_{12}(t)$ типа ГКИН-2 на номинальное выходное электрическое напряжение до ±2 МВ, построенного на основе мощного высоковольтного генератора импульсных напряжений типа ГИН-4 [18].



Рис. 5. Общий вид высоковольтной воздушной ДЭРС «острие–плоскость» ($l_{min} = 3{,}0$ м) с передвижным высоковольтным омическим делителем напряжения типа ОДН-2,5, подсоединенным к ее потенциальному верхнему круглому стальному электроду–острию ($r_0 \approx 15$ мм; $r_c \approx 3$ мм), размещенному по центру заземленного нижнего электрода–плоскости квадратной формы размером 5×5 м из листовой оцинкованной стали исследуемой ДЭРС [18].

Укажем на то, что при измерении в выполненных нами высоковольтных экспериментах амплитудно-временных параметров приведенного на рис. 2 испытательного стандартного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс были использованы [20]: передвижной высоковольтный омический делитель напряжения типа ОДН-2,5 на номинальное импульсное электрическое напряжение до ±2,5 МВ с коэффициентом деления K_d, равным $K_d \approx 53650$ [14, 18], и цифровой запоминающий осциллограф типа Tektronix TDS 1012.

Из осциллограммы на рис. 2 следует, что в этом прикладном электрофизическом случае для рассматриваемой ДЭРС «острие–плоскость» (см. рис. 5) опытное пробивное электрическое напряжение U_d для стандартного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого напряжения $U_{12}(t)$ положительной полярности с ее воздушным промежутком минимальной длиной $l_{min} = 3{,}0$ м численно составляет примерно $U_d \approx 1062{,}3$ кВ. Сравнивая этот полученный экспериментальный результат для значения пробивного напряжения U_d с уровнем электрического напряжения U_{ed} в ДЭРС, укажем, что при этом расчетное электрическое напряжение появления U_{ed} положительного лидера разряда в исследуемой воздушной ДЭРС, согласно (19), оказывается равным около $U_{ed} \approx 1083{,}3$ кВ. Как видим, приведенные численные значения напряжений U_d и U_{ed} отличаются в пределах 2%, что может свидетельствовать о работоспособности расчетного соотношения (19).

Отметим, что наличие пикоподобного всплеска на приведенной на рис. 2 осциллограмме срезанного импульса напряжения $U_{12}(t)$ (вначале ее фронтальной части) связано с конструкционными особенностями построения по классической в области ТВН схеме Аркадьева–Маркса генератора импульсных напряжений типа ГИН-4 [15, 34], который входит в состав использованного в проведенных высоковольтных экспериментах генератора стандартных коммутационных импульсов напряжения типа ГКИН-2 [18]. Быстрый заряд и разряд электрической емкости стального экрана–крыши указанного генератора ГИН-4 площадью ~ 60 м^2, размещенного на высоте ~ 12 м над землей, и вызывает появление на соответствующей осциллограмме электрического напряжения $U_{12}(t)$ указанного пика напряжения, наличие которого практически не влияет на электрическую прочность длинного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС.

Подставив в (17) найденное по данным рис. 2 опытное значение времени электрического пробоя $T_d \approx T_c \approx 104$ мкс используемого воздушного промежутка ($l_{min} = 3{,}0$ м), характерное для испытательного в исследуемой ДЭРС апериодического импульса сверхвысокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности ($\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$; $\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$; $k_{12} \approx 1{,}103$ [19]), при $l_{min} = 3{,}0$ м и $U_d \approx 1062{,}3$ кВ получаем опытное значение максимальной пробивной напряженности E_{dmax} сильного электрического поля, которое для этого эксперимента, проведенного в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории, оказывается равным около $E_{dmax} \approx 390{,}5$ кВ/м.

Видим, что полученное нами экспериментальным путем численное значение указанной максимальной пробивной напряженности $E_{dmax} \approx 390{,}5$ кВ/м электрического поля в рассматриваемой ДЭРС соответствует принятому в области ТВН и ВИТ диапазону изменения сильного импульсного ЭМП [4, 35]. При этом опытная усредненная пробивная напряженность $E_d \approx U_d/(1{,}13l_{min})$ [20] сильного импульсного электрического поля в длинном воздушном промежутке ($l_{min} = 3{,}0$ м) исследуемой сверхвысоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» при $U_d \approx 1062{,}3$ кВ количественно составляет примерно $E_d \approx 313{,}4$ кВ/м. Поэтому на основании данных опытных результатов можно заключить, что реальный искровой пробой атмосферного воздуха в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» ($l_{min} = 3{,}0$ м), как и предполагалось на основе предложенных нами расчетных формул (16)–(18) для этого электрического пробоя, происходит на фронте ($T_c \approx T_d \approx 104$ мкс; $T_m \approx 200$ мкс) испытательного стандартного коммутационного апериодического импульса напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности. При этом расчетное по (16) значение для времени пробоя $T_d \approx 100{,}3$ мкс в данной ДЭРС с ее длинным воздушным промежутком минимальной длиной $l_{min} = 3{,}0$ м отличается от полученного нами опытного значения $T_d \approx 104$ мкс в пределах 4%.

Для численной оценки значения максимальной пробивной напряженности E_{dmax} в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» с другой минимальной длиной l_{min} ее воздушного промежутка с принятого диапазона $1 \text{ м} \le l_{min} \le 4$ м, при действии на ее металлические электроды указанного стандартного апериодического коммутационного импульса высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс, нами были выполнены

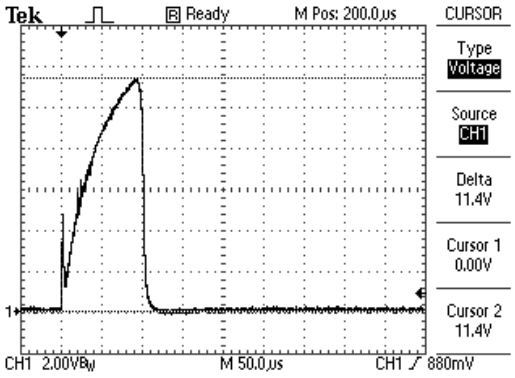


Рис. 6. Осциллограмма срезанного коммутационного апериодического импульса высокого напряжения временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс ($\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$; $\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$; $k_{12} \approx 1{,}103$) положительной полярности при электрическом пробое длинного воздушного промежутка (l_{min} = 1,5 м; $r_c \approx 3$ мм) в ДЭРС «острие–плоскость» ($U_d \approx 11{,}4$ В × 53650 ≈ 611,6 кВ − уровень среза импульса напряжения $U_{12}(t)$ (пробивное напряжение U_d в ДЭРС); $T_c \approx T_d \approx 95$ мкс − время среза импульса напряжения$U_{12}(t)$ (время T_d пробоя воздушного промежутка в ДЭРС); $T_{dc} \approx 17$ мкс − длительность среза (коммутации) импульса напряжения $U_{12}(t)$; масштаб по вертикали – 107,3 кВ/дел.; масштаб по горизонтали − 50 мкс/дел.) [20].

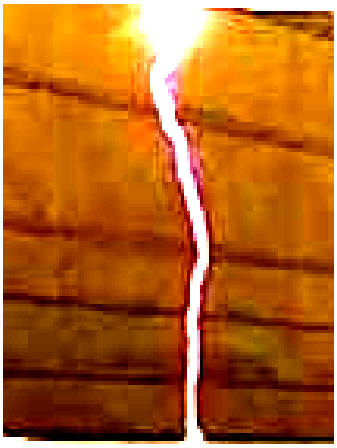


Рис. 7. Общий вид яркой практически сферической зоны радиусом $r_i \approx (25–30)$ мм (вверху) активной ударной ионизации электронами молекул (атомов) атмосферного воздуха вблизи вертикально размещенного потенциального стального электрода–острия ($r_0 \approx 15$ мм; $r_c \approx 3$ мм) и зигзагоподобного плазменного искрового канала разряда в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» при электрическом пробое коммутационным апериодическим импульсом высокого напряжения временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности ее длинного воздушного промежутка минимальной длиной l_{min} = 1,5 м ($U_{12}(T_d) \approx U_d \approx 611{,}6$ кВ; $T_c \approx T_d \approx 95$ мкс).

соответствующие эксперименты, когда в этой ДЭРС ее геометрический параметр l_{min} принимал численное значение l_{min} = 1,5 м. На рис. 6 приведены результаты одного из таких высоковольтных экспериментов с применением исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» [20], а на рис. 7 показан общий вид яркой практически сферической зоны активной ударной ионизации электронами молекул (атомов) атмосферного воздуха вблизи вертикально размещенного потенциального круглого стального электрода–острия ($r_0 \approx 15$ мм; $r_c \approx 3$ мм) в рассматриваемой воздушной ДЭРС «острие–плоскость» (l_{min} = 1,5 м; $U_d \approx 611{,}6$ кВ).

С использованием (17) и данных, которые приведены на осциллограмме на рис. 6 ($U_d \approx 611{,}6$ кВ; $\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$; $\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$; $k_{12} \approx 1{,}103$), при l_{min} = 1,5 м и $T_c \approx T_d \approx 95$ мкс для максимальной пробивной напряженности E_{dmax} электрического поля в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» получаем значение, которое численно составляет около $E_{dmax} \approx 462{,}6$ кВ/м и отличается от полученного нами выше значения $E_{dmax} \approx 390{,}5$ кВ/м при l_{min} = 3,0 м в пределах 15%. Видно, что с увеличением в исследуемой ДЭРС минимальной длины l_{min} ее воздушного промежутка значение E_{dmax} уменьшается.

Кроме того, в этом прикладном электротехническом случае (l_{min} = 1,5 м; $r_c \approx 3$ мм; $U_d \approx 611{,}6$ кВ) реальный электрический искровой пробой длинного воздушного промежутка исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» происходит также на переднем фронте ($T_c \approx T_d \approx 95$ мкс; $T_m \approx 200$ мкс) испытательного коммутационного апериодического импульса высокого напряжения $U_{12}(t)$ используемой нами временной формы положительной полярности [20]. При этом расчетное по (16) значение времени пробоя $T_d \approx 100{,}3$ мкс в данной ДЭРС ее длинного воздушного промежутка

минимальной длиной l_{min} = 1,5 м отличается от его опытного значения $T_d \approx 95$ мкс в пределах 5%. Укажем, что в данном случае усредненное опытное значение пробивной напряженности $E_d \approx U_d/(1{,}13l_{min})$ сильного импульсного электрического поля в длинном воздушном промежутке (l_{min} = 1,5 м) рассматриваемой высоковольтной ДЭРС при $U_d \approx 611{,}6$ кВ количественно составляет около $E_d \approx 360{,}8$ кВ/м. Важно отметить то, что для этого случая (при опытном значении пробивного напряжения $U_d \approx 611{,}6$ кВ) расчетное по (19) электрическое напряжение появления U_{ed} положи-тельного лидера разряда в исследуемой ДЭРС (l_{min} = 1,5 м; $r_c \approx 3$ мм) составляет примерно $U_{ed} \approx 616{,}6$ кВ. Видно, что различие между значениями указанных электрических напряжений U_d и U_{ed} для рассматриваемого случая с применением исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» (l_{min} = 1,5 м) не превышает 1%, что подтверждает справедливость физического положения о том, что при электрическом пробое в этой ДЭРС ее длинного воздушного промежутка минимальной длиной l_{min} с диапазона 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м ее изменения должно выполняться следующее равенство: $U_d \approx U_{ed}$.

Указанное выше уменьшение в разрядном длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» опытной усредненной пробивной напряженности E_d сильного импульсного электрического поля в атмосферном воздухе ДЭРС с уровня $E_d \approx 360{,}8$ кВ/м до уровня $E_d \approx 313{,}4$ кВ/м с увеличением в ней минимальной длины l_{min} указанного воздушного промежутка с 1,5 м до 3,0 м объясняется увеличением при этом степени неоднородности сильного импульсного электрического поля в длинном воздушном промежутке рассматриваемой высоковольтной ДЭРС. Это физическое положение может быть распространено также и на объяснение указанного нами ранее для этих двух конкретных минимальных длин l_{min} = 1,5 м и l_{min} = 3,0 м соответствующего уменьшения максимальной пробивной напряженности E_{dmax} электрического поля в исследуемой ДЭРС с уровня $E_{dmax} \approx 462{,}6$ кВ/м до уровня $E_{dmax} \approx 390{,}5$ кВ/м.

Установленное нами уменьшение значений максимальной пробивной напряженности E_{dmax} сильного электрического поля в исследуемой ДЭРС с увеличением минимальной длины l_{min} ее воздушного промежутка при этом будет приводить, согласно (18), к определенному ограничению возрастания расчетных значений пробивного электрического напряжения U_d в данной ДЭРС, когда ее длина l_{min} изменяется в принятом диапазоне 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м. Это утверждение соответствует известным экспериментальным данным других авторов при определении электрической прочности длинных воздушных промежутков минимальной длиной l_{min}, изменяющейся в высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» в диапазоне 1 м $\le l_{min} \le$ 30 м [1–3, 9, 15, 33].

Важно отметить то, что усредненное значение производной $dU_{12}(t)/dt$ в воздушной зоне вблизи электрода–острия высоковольтной воздушной ДЭРС «острие–плоскость» для выполненных нами высоковольтных экспериментов численно составляло соответственно в первом случае (l_{min} = 3,0 м) использования в ней стандартного коммутационного апериодического импульса высокого электрического напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс около $dU_{12}(t)/dt \approx U_d/T_c \approx 10{,}21$ кВ/мкс, а во втором случае (l_{min} = 1,5 м) – 6,44 кВ/мкс. Согласно [15], при $dU_{12}(t)/dt \ge 5$ кВ/мкс развитие в длинном воздушном промежутке данной ДЭРС положительного лидера разряда должно осуществляться беспрерывно (без ступенчатого образования в ДЭРС отдельных плазменных лидерных каналов разряда), что и наблюдалось нами при проведении в ней описанных выше соответствующих высоковольтных экспериментов.

Найденные выше расчетно-экспериментальным путем приближенные численные значения максимальной пробивной напряженности E_{dmax} сильного электрического поля в исследуемой ДЭРС для двух дискретных значений минимальной длины l_{min} ее длинного воздушного промежутка с принятого нами диапазона ее изменения (1 м $\le l_{min} \le$ 4 м) в межэлектродном разрядном промежутке этой ДЭРС (l_{min} = 1,5 м и l_{min} = 3,0 м) позволяют с помощью (17), (18) и полученного, согласно (16), численного значения времени пробоя $T_d \approx 100{,}3$ мкс при действии в ней коммутационного апериодического импульса сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс положительной полярности оценить соответствующие расчетные значения пробивного (разрядного) напряжения U_d в рассматриваемой ДЭРС «острие–плоскость». Для первого случая при длине l_{min} = 1,5 м межэлектродного длинного воздушного промежутка в этой ДЭРС при $T_d \approx 100{,}3$ мкс, $\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$, $\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$, $k_{12} \approx 1{,}103$ и $E_{dmax} \approx 462{,}6$ кВ/м расчетное по (18) пробивное напряжение U_d в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» принимает численное значение около $U_d \approx 621{,}4$ кВ, а для второго случая при l_{min} = 3,0 м ($T_d \approx 100{,}3$ мкс; $\alpha_1 \approx 0{,}382\times10^3$ с$^{-1}$,

$\alpha_2 \approx 18{,}95\times10^3$ с$^{-1}$, $k_{12} \approx 1{,}103$ и $E_{dmax} \approx 390{,}5$ кВ/м) – $U_d \approx 1049{,}2$ кВ. С полученных по (18) указанных выше приближенных расчетных численных значений пробивного электрического напряжения U_d для исследуемой воздушной ДЭРС «острие–плоскость» при минимальных длинах ее длинного разрядного промежутка l_{min} = 1,5 м ($U_d \approx 621{,}4$ кВ) и l_{min} = 3,0 м ($U_d \approx 1049{,}2$ кВ) следует, что они от соответствующих экспериментальных численных значений для этого пробивного электрического напряжения U_d ($U_d \approx 611{,}6$ кВ при l_{min} = 1,5 м и $U_d \approx 1062{,}3$ кВ при l_{min} = 3,0 м) отличаются в пределах 2%.

Следует подчеркнуть то, что при этом полученные по (18) приближенные расчетные значения для пробивного (разрядного) электрического напряжения U_d ($U_d \approx 621{,}4$ кВ при l_{min} = 1,5 м и $U_d \approx 1049{,}2$ кВ при l_{min} = 3,0 м) от соответствующих приближенных расчетных значений по (19) электрического напряжения появления U_{ed} положительного лидера разряда в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» ($U_{ed} \approx 616{,}6$ кВ при l_{min} = 1,5 м и $U_{ed} \approx 1083{,}3$ кВ при l_{min} = 3,0 м) отличаются в пределах 3%. Приведенные выше результаты электродинамических количественных оценок могут аргументированно указывать на работоспособность полученных нами приближенных аналитических соотношений (16)–(18) соответственно для приближенного расчета времени T_d электрического пробоя атмосферного воздуха и пробивного электрического напряжения U_d в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость», а также на правомерность предложенного инженерного подхода к выбору значений как максимальной пробивной напряженности E_{dmax} сильного электрического поля, так и усредненной по длине l_{min} пробивной напряженности E_d сильного электрического поля при электрическом пробое длинных воздушных промежутков в исследуемой ДЭРС «острие–плоскость» стандартным коммутационным апериодическим импульсом сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности.

ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная электрофизическая модель электрического искрового пробоя длинных воздушных промежутков в высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» (1 м $\le l_{min} \le$ 4 м) стандартным коммутационным апериодическим импульсом высокого (сверхвысокого) напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности, которая базируется на результатах приближенного расчета в разрядном промежутке данной ДЭРС резко неоднородного сильного импульсного ЭМП и возникновении из-за его действия вблизи ее потенциального металлического электрода–острия яркой сферической зоны радиусом r_i активной ударной ионизации электронами ее атмосферного воздуха, с которой при достижении на электроде–острие ДЭРС уровня импульсного электрического напряжения около $U_{12}(t) \approx U_{ed}$ начинает развиваться в сторону заземленного металлического электрода–плоскости указанной ДЭРС тонкий плазменный канал положительного лидера разряда. Эта расчетная модель позволяет в режиме квазистационарного приближения для электромагнитных процессов, что протекают в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «острие–плоскость», определить основные АВХ данного электрофизического явления в атмосферном воздухе рассматриваемой ДЭРС.

2. Получено приближенное эмпирическое расчетное соотношение для времени T_d электрического искрового пробоя длинных воздушных промежутков в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость», достоверность которого при изменении минимальной длины l_{min} данных изоляционных промежутков в диапазоне 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м нами была подтверждена экспериментально. Показано, что электрический пробой атмосферного воздуха в исследуемой ДЭРС ($r_c \approx 3$ мм) всегда происходит на переднем фронте ($0 < T_d < T_m$) действующего в ДЭРС «острие–плоскость» стандартного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности. Установлено, что в исследуемой ДЭРС при l_{min} = 1,5 м расчетное время T_d электрического пробоя, ее указанного длинного воздушного промежутка количественно составляет примерно $T_d \approx 100{,}3$ мкс (при его опытном значении около $T_d \approx 95$ мкс), а при l_{min} = 3,0 м – $T_d \approx 100{,}3$ мкс (при его опытном значении $T_d \approx 104$ мкс).

3. Получено приближенное расчетное соотношение для определения в исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» пробивного (разрядного) напряжения U_d ее длинных воздушных промежутков минимальной длиной l_{min} с диапазона ее изменения 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м при действии в этой ДЭРС стандартного коммутационного апериодического импульса высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx 200$ мкс/1990 мкс положительной полярности. Достоверность данного соотношения для пробивного напряжения U_d была подтверждена

результатами выполненных нами на открытом воздухе в условиях электрофизической лаборатории с применением этой ДЭРС сверхвысоковольтных экспериментов с использованием отечественного испытательного электрооборудования. Установлено, что для рассматриваемой ДЭРС «острие–плоскость» при l_{min} = 1,5 м расчетное пробивное (разрядное) электрическое напряжение U_d численно составляет примерно $U_d \approx$ 621,4 кВ (при его опытном значении около $U_d \approx$ 611,6 кВ), а при l_{min} = 3,0 м – $U_d \approx$ 1049,2 кВ (при его опытном значении около $U_d \approx$ 1062,3 кВ). Показано, что пробивное напряжение U_d соответствует расчетному напряжению появления U_{ed} положительного лидера в данной ДЭРС.

4. Введено и определено понятие максимальной пробивной напряженности $E_{dmax} = U_{12m}/l_{min}$ сильного электрического поля в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «острие–плоскость». Расчетно-экспериментальным путем показано, что для его двух дискретных значений минимальной длины l_{min} = 1,5 м и l_{min}=3,0 м с принятого нами диапазона 1 м $\le l_{min} \le$ 4 м ее изменения максимальная напряженность E_{dmax} для стандартного коммутационного апериодического импульса сверхвысокого и высокого напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс положительной полярности численно составляет соответственно около $E_{dmax} \approx$ 462,6 кВ/м и $E_{dmax} \approx$ 390,5 кВ/м. На основании выполненных исследований установлено уменьшение значений максимальной пробивной напряженности E_{dmax} в исследуемой высоковольтной ДЭРС с возрастанием минимальной длины l_{min} воздушного промежутка в этой ДЭРС.

5. Показано, что усредненная опытная пробивная напряженность $E_d \approx U_d/(1{,}13l_{min})$ сильного импульсного электрического поля в длинном воздушном промежутке исследуемой высоковольтной ДЭРС «острие–плоскость» при действии на нее стандартного коммутационного апериодического импульса высокого (сверхвысокого) напряжения $U_{12}(t)$ временной формы $T_m/T_p \approx$ 200 мкс/1990 мкс положительной полярности для l_{min} = 1,5 м и $U_d \approx$ 611,6 кВ составляет около $E_d \approx$ 360,8 кВ/м, а для l_{min} = 3,0 м и $U_d \approx$ 1062,3 кВ − примерно $E_d \approx$ 313,4 кВ/м. При этом расчетные значения усредненной пробивной напряженности E_d сильного электрического поля для исследуемой ДЭРС при l_{min} = 1,5 м ($U_d \approx$ 621,4 кВ) и l_{min} = 3,0 м ($U_d \approx$ 1049,2 кВ) соответственно составляют $E_d \approx$ 366,6кВ/м и $E_d \approx$ 309,5 кВ/м. Уменьшение этих пробивных напряженностей E_d с уровней $E_d \approx$ 360,8 кВ/м ($E_d \approx$ 366,6 кВ/м) до уровней $E_d \approx$ 313,4 кВ/м ($E_d \approx$ 309,5 кВ/м) с увеличением с 1,5 м до 3,0 м минимальной длины l_{min} воздушного промежутка в ДЭРС «острие–плоскость» вызывается увеличением при этом степени неоднородности сильного импульсного электрического поля в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Украины (бюджетная тема № 0125U001617).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бржезицький, В.О., Білий, І.В., Бойко, М.І., Гуль, В.І., и др., *Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник*. Харків: НТУ «ХПІ»−Торнадо, 2005. 930 с.
2. Александров, Г.Н., *Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды: Учебное пособие для вузов*. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 360 с.
3. Бейер, М., Бек, В., Меллер, К., Цаенгль, В., *Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы ее применения.* М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.
4. Дашук, П.Н., Зайенц, С.Л., Комельков, В.С., Кучинский, Г.С., и др., *Техника больших импульсных токов и магнитных полей*. М.: Атомиздат, 1970. 472 с.
5. Рикетс, Л.У., Бриджес, Дж.Э., Майлетта, Дж., *Электромагнитный импульс и методы защиты*. М.: Атомиздат, 1979. 328 с.
6. Кравченко, В.И., *Оружие на нетрадиционных физических принципах: Электромагнитное оружие*. Харьков: Изд-во НТМТ, 2009. 266 с.
7. *MIL-STD-461G: 2015. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*. USA, Department of defense Publ., 2015. 280 p.
8. *AECTP-500: 2016. NATO Standard Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1*. Brussels: NSO Publ., 2016. 1125 p.
9. Райзер, Ю.П., *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
10. Guerrieri, S., Nucci, C.A., Rachidi, F. and Rubinstein, M., On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1998, vol. 13, no. 4, p. 1543. https://doi.org/10.1109/61.714865
11. Uman, M.A. and Rakov, V.A., Critical review of nonconventional approaches to lightning protection, *Amer. Meteorol. Soc.*, 2002, no. 2, p. 1809. https://doi.org/10.1175/BAMS-83-12-1809

12. Hussein, A.M., Janischewskyi, W.I., Chang, J.S., Shostak, V.A., et al., Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower, *J. Geophys. Res.*, 1995, vol. 100, no. D5, p. 8853.

13. Baranov, M.I., Buriakovskyi, S.G., Hrytsenko, A.S. and Kostiuk, V.A., Results of investigations of thermal resistibility of prototypes of aluminum alloy panels of fuel tank of airplane to direct action normalized components of artificial lightning current. *Electr. Eng. Electromech.*, 2019, no. 6, p. 29.
https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.04

14. Baranov, M.I., Buriakovskyi, S.G., Kniaziev, V.V. and Rudenko, S.S., Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering complex Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya» NTU «KhPI» for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-rocket technique on electric safety and electromagnetic compatibility, *Electr. Eng. Electromech.*, 2020, no. 4, p. 37.
https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06

15. Бортник, И.М., Белогловский, А.А., Верещагин, И.П., Вершинин, Ю.Н., и др., *Электрофизические основы техники высоких напряжений*: *Учебник для вузов.* М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.

16. Кухлинг, Х., *Справочник по физике.* М.: Мир, 1982. 520 с.

17. *Стандарт ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции*. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. 31 с.

18. Baranov, M.I., Koliushko, G.M. and Kravchenko, V.I., A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects, *Instrum. Experim. Techn.*, 2013, vol. 56, no. 6, p. 639.
https://doi.org//10.1134/S0020441213050126

19. Баранов, М.І., *Вибрані питання електрофізики. Том 4: Ефекти взаємодії фізичних тіл з полями і струмами*. Харків: Вид-во «ФОП Панов А.М.», 2023. 552 с.

20. Baranov, M.I., Calculation and experimental determination of speed of advancement of the plasma leader channel of a pulse spark discharge in atmospheric air, *Electr. Eng. Electromech.*, 2024, no. 2, p. 48.
https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.07

21. Мик, Дж., Крэгс, Дж., *Электрический пробой в газах*. М.: ИЛ, 1960. 605 с.

22. Ретер, Г., *Электронные лавины и пробой в газах.* М.: Мир, 1968. 390 с.

23. Nijdam, S., Teunissen, J. and Ebert, U., The physics of streamer discharge phenomena, *Plasma Sour. Sci. Technol.*, 2000, vol.29, no.10, art. ID 103001.
https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05

24. Kupershtokh, A.L., Charalambakos, V.P., Agoris, D.P. and Karpov, D.I., Simulation of breakdown in air using cellular automata with streamer to leader transition, *J. Phys.D: Appl. Phys.*, 2001, vol. 34, no. 6, p. 936.
https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/6/315

25. Xiong, Z., Robert, E., Sarron, V., Pouvesle, J.-M., et al., Dynamics of ionization wave splitting and merging of atmospheric-pressure plasmas in branched dielectric tubes and channels, *J. Phys.D: Appl. Phys.*, 2012, vol. 45, no. 27, art. ID 275201.
https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/27/275201

26. Hu, H.M., Yang, Y., Lu, W. and Zhao, G.P., Electrical tree simulation based on the self-organization criticality, *Energy Power Eng.*, 2013, vol. 5, no. 48, p. 1273.
https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B241

27. Максвелл, Дж.К., *Избранные сочинения по теории электромагнитного поля*. М.: Гостехиздат, 1954. 687 с.

28. Кузьмичев, В.Е., *Законы и формулы физики.* Киев: Наукова думка, 1989. 864 с.

29. Никольский, В.В., Никольская, Т.И., *Электродинамика и распространение радиоволн*: *Учебное пособие для вузов*. М.: Наука, 1989. 544 с.

30. Баранов, М.И., Расчетная оценка плотности тока смещения и ее влияния на электромагнитные процессы в металлическом проводнике с переменным током проводимости, *ЭОМ,* 2023, т. 59, № 2, с. 35.
https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.2.35

31. Baranov, M.I., A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric, *Electr. Eng. Electromech.*, 2024, no. 1, p. 34.
https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.05

32. Базелян, Э.М., Ражанский, И.М., *Искровой разряд в воздухе*. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.

33. Базелян, Э.М., Райзер, Ю.П., *Искровой разряд*. М.: МФТИ, 1997. 320 с.

34. Богатенков, И.М., Иманов, Г.М., Кизеветтер, В.Е., Костенко, М.В., и др., *Техника высоких напряжений. Учебное пособие для вузов.* СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. 700 с.

35. Кнопфель, Г., *Сверхсильные импульсные магнитные поля.* М.: Мир, 1972. 391 с.

Summary

The studies of the calculation-experimental determination of the basic peak-temporal descriptions of an electric hasp of long air intervals are resulted in the double-electrode discharge system (DEDS) “edge-plane” by the standard interconnect aperiodic impulse of high voltage of a temporal form of $T_m/T_p \approx 200$ μs/1990 μs of the positive polarity. Close calculation correlations were applied for finding the time of T_d of the hasp, aggressive (discharge) voltage of U_d, and middle on minimum length of $l_{min} \geq 1$ m of those intervals of an aggressive tension of E_d

of a strong electric field for the studied DEDS. The offered engineering approach for the determination of values of T_d, U_d and E_d is based on the results of close calculations in the long air interval of DEDS a "edge-plane" is sharp the not-homogeneous strong electromagnetic field and origin under that influence near the potential electrode-edge of this DEDS of the spherical area with the radius of r_i of active shock ionization of its atmospheric air electrons, with which the positive leader of discharge develops toward the earthed electrode-plane of DEDS. The executed high-voltage experiments confirmed legitimacy of the offered calculation correlations for the determination of sizes of T_d, U_d and E_d at the electric hasp of long air intervals in probed high-voltage DEDS "edge-plane" with their minimum length of l_{min} from the range of 1 m $\leq l_{min} \leq$ 4 m.

Keywords: long air interval, hasp, interconnect impulse of voltage, time of hasp, aggressive voltage, aggressive tension of electric field, calculation, experiment