

# Характеристики пробоя длинного воздушного промежутка в двухэлектродной разрядной системе «стержень-плоскость» высоким переменным напряжением повышенной частоты

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](mailto:mixail2901mixail@gmail.com)

Поступила в редакцию 21.11.2025

После доработки 31.03.2026

Принята к публикации 07.04.2026

Приведены результаты расчетного определения основных характеристик электрического пробоя длинного воздушного промежутка в двухэлектродной разрядной системе (ДЭРС) «стержень-плоскость» высоким (сверхвысоким) переменным напряжением  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$  с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ . Получены расчетные соотношения для нахождения среднеквадратичного значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и усредненной по минимальной длине  $l_{min} \geq 1 \text{ м}$  этого промежутка пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  сильного электрического поля для исследуемой ДЭРС. Предложенный инженерный подход для определения значений  $U_{dm}(f_0)$  и  $E_{dm}(f_0)$  базируется на известных результатах приближенного расчета в длинном воздушном промежутке ДЭРС «стержень-плоскость» с резко неоднородным сильным электрическим полем напряжения появления  $U_L$  лидера вблизи нижнего края с радиусом закругления  $r_c$  ее стержня и введении нами в формулу для  $U_L$  коэффициента  $k_f$ , учитывающего влияние частоты  $f_0$  на электроразрядные процессы в ДЭРС. Выполненное сравнение полученных расчетных результатов для численных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  с их известными экспериментальными данными для указанного диапазона изменения частоты  $f_0$  напряжения  $U_{12}(t)$  на электродах данной ДЭРС подтверждает работоспособность предложенного подхода для нахождения в ней разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля.

*Ключевые слова:* длинный воздушный промежуток, переменное напряжение повышенной частоты, электрический пробой промежутка, разрядное напряжение, пробивная напряженность электрического поля, расчет

УДК 621.3.022: 621.396.6: 533.93

<https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.37>

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи электротехнической инженерии, связанные с обеспечением электрической прочности воздушной изоляции разнообразного высоковольтного силового электроэнергетического и электротехнического оборудования, были и остаются актуальными в мире и сегодня. Поэтому в области техники высоких напряжений (ТВН), высоковольтной импульсной техники (ВИТ) и высоковольтной высокочастотной техники (ВВТ) вопросам выбора разрядных (пробивных) напряжений  $U_{dm}$  для длинных воздушных промежутков минимальной длиной  $l_{min} \geq 1 \text{ м}$  и усредненных по их указанной длине  $l_{min}$  пробивных напряженностей  $E_{dm}$  сильного электрического поля уделялось и уделяется повышенное внимание ученых-электротехников ведущих стран мира [1–7]. Как известно, электрофизика длинных электрических искровых

разрядов в атмосферном воздухе, используемом в качестве длинномерной изоляции высоковольтных устройств в области ТВН, ВИТ и ВВТ, является одной из самых сложных проблемных научных задач в области газового разряда [8, 9]. Углубление электрофизических основ длинных электрических разрядов в атмосферном воздухе будет способствовать решению таких важных прикладных задач, как молниезащита и электробезопасность работы силового промышленного и технологического электрооборудования (например, стратегических объектов электроэнергетики и высоковольтных установок электротехнологического применения [5, 7, 10–15]). Отметим, что в современных областях ТВН, ВИТ и ВВТ широко используются мощные источники высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  с частотой  $f_0$  его изменения во времени  $t$  от 50 Гц до десятков мегагерц [4–11, 16].

На данное время малоизученными задачами в области физики длинных искровых разрядов остаются те, которые связаны с электрофизическими механизмами электрического пробоя длинных воздушных промежутков высоким (сверхвысоким) переменным напряжением  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$ , относящейся к диапазону  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , и особенно с расчетным определением основных характеристик их электрического пробоя при воздействии на них такого переменного напряжения  $U_{12}(t)$ . Имеется ряд экспериментальных данных для указанного частотного диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , характеризующих электрическую прочность воздушных промежутков в двухэлектродной разрядной системе (ДЭРС) «стержень-плоскость», минимальная длина  $l_{min}$  которых составляет  $l_{min} \leq 1 \text{ м}$  [4, 7, 9]. Кстати, указанная высоковольтная ДЭРС «стержень-плоскость», имеющая как при  $f_0 = 50 \text{ Гц}$ , так и при повышенных частотах  $f_0 \gg 50 \text{ Гц}$  напряжения  $U_{12}(t)$  наименьшую электрическую прочность ее воздушной изоляции по сравнению с иными геометрическими формами электродов ДЭРС, является базовой электродной системой в области современных ТВН, ВИТ и ВВТ с ее резко неоднородным сильным электрическим полем. С помощью такой ДЭРС осуществляется инженерный выбор рабочей длиномерной воздушной изоляции в их силовых электроустройствах [2, 3, 5, 7, 9]. При этом для данного выбора минимальных значений длины  $l_{min}$  в ДЭРС в области ТВН и ВИТ применяется стандартный коммутационный аperiodический импульс высокого напряжения  $U_{12}(t)$  положительной полярности временной формы  $T_m/T_p \approx (250 \pm 50) \text{ мкс} / (2500 \pm 750) \text{ мкс}$  ( $T_m$ ,  $T_p$  – время, которое отвечает соответственно амплитуде  $U_{12m}$  и длительности импульса напряжения  $U_{12}(t)$  на уровне  $0,5U_{12m}$ ) [7, 17, 18], а в области ВВТ – высокое переменное напряжение  $U_{12}(t)$  соответствующей частоты  $f_0 \gg 50 \text{ Гц}$  [1, 7, 8, 16].

Цель статьи – расчетное определение основных усредненных характеристик электрического пробоя – разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля для длинного воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» при воздействии на ее электроды высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$  с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ .

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

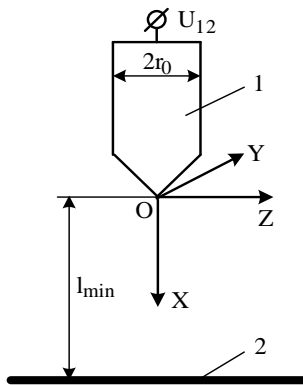
Рассмотрим рисунок, на котором представлен общий вид высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость», которая содержит вертикально размещенный потенциальный электрод в виде

металлического круглого стержня  $l$  радиусом  $r_0$  с заостренным нижним краем с радиусом  $r_c \ll r_0$  его полусферического закругления и 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 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 острого края потенциального электрода 1 по нормали к плоской поверхности заземленного электрода 2, размещен атмосферный воздух при следующих нормальных условиях [19]: давление газа –  $P_a \approx (1,013 \pm 0,03) \times 10^5 \text{ Па}$ ; абсолютная температура газа –  $T_a \approx (293,15 \pm 10) \text{ К}$ ; относительная влажность газа –  $\gamma_a \approx (45 \pm 30)\%$ . Считаем, что на исследуемую ДЭРС воздействует высокое переменное напряжение  $U_{12}(t) \approx \varphi_1(t) \approx U_{12m} \cos(2\pi f_0 t)$  повышенной частоты колебаний  $f_0$  с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , которое может формироваться на электродах рассматриваемой воздушной ДЭРС с помощью специальных высоковольтных высокочастотных генераторов [1, 4, 7, 16, 20, 21].

Отметим, что согласно известным опытным данным в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» ( $l_{min} \geq 1 \text{ м}$ ) с частот  $f_0 \geq 10 \text{ кГц}$  изменения принятого нами переменного напряжения  $U_{12}(t)$  начинается резкое уменьшение ее среднеквадратичного (действующего) разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0) \leq U_{12m}/(2)^{1/2}$  [7, 9]. При изменении в данной ДЭРС частоты  $f_0$  переменного напряжения  $U_{12}(t)$  с амплитудой  $U_{12m}$  в диапазоне  $50 \text{ Гц} \leq f_0 \leq 10 \text{ кГц}$  уменьшение значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  сравнительно невелико [7, 9]. Данное обстоятельство послужило одной из причин выбора нами нижней границы изменения в исследуемой ДЭРС частоты  $f_0$  воздействующего на ее электроды высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$ . Что касается верхней границы в принятом частотном диапазоне изменения переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , то частота  $f_0 = 1 \text{ МГц}$  является наиболее характерной для рассматриваемого исследования электро-разрядных процессов в ДЭРС «стержень-плоскость» [4, 7, 16].

Принимаем, что усредненная при заданной минимальной длине  $l_{min}$  разрядного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» пробивная напряженность  $E_{dm}(f_0)$  сильного электрического поля в зависимости от ее амплитудного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$

может быть рассчитана по приближенному соотношению вида [17, 22]:  $E_{dm}(f_0) \approx U_{dm}(f_0)/(1,13l_{min})$ . Наличие в этом соотношении сомножителя  $n_d \approx 1,13$  связано с искривлением пути продвижения плазменного канала искрового разряда в длинном воздушном промежутке этой ДЭРС на стадии его электрического пробоя, достоверность численного значения которого была подтверждена результатами выполненных нами соответствующих высоковольтных экспериментов при электрическом искровом пробое ее длинных воздушных промежутков ( $1 \text{ м} \leq l_{min} \leq 4 \text{ м}$ ) с использованием стандартного коммутационного апериодического импульса напряжения  $U_{12}(t)$  временной формы  $T_m/T_p \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$  положительной полярности [14, 17, 22].



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

При рассмотрении электродинамических процессов в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» в напряженной полевой зоне вблизи ее электрода-стержня с радиусом  $r_c$  закругления его нижнего края воспользуемся декартовой системой координат  $XYZ$ , начало координат которой привяжем к заостренному полусферическому краю стержня с радиусом  $r_c \ll r_0$  его закругления (см. рисунок). Учитывая, что геометрическая конфигурация исследуемой ДЭРС в зоне ее электрода-стержня с высоким потенциалом  $\varphi_1(t)$  удовлетворяет вокруг оси  $OX$  условию осевой симметрии, то при рассмотрении распределения возникающего в воздушном промежутке ДЭРС плоско-меридианного электромагнитного поля (ЭМП) в данной резко напряженной полевой и критической с точки зрения начала развития предпробойных электроразрядных процессов зоне ДЭРС ограничимся использованием в приближенном полевом анализе плоских монохроматических линейно поляризованных поперечных электромагнитных волн (ЭМВ),

которые могут распространяться в воздушном промежутке длиной  $l_{min} \geq 1 \text{ м}$  данной ДЭРС как вблизи, так и вдали от ее потенциального электрода-стержня. При этом минимальная длина  $\lambda_0 \approx v_0/f_0$  этих ЭМВ в рассматриваемом воздушном промежутке ДЭРС при  $v_0 \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}$  [19] и  $f_0 = 1 \text{ МГц}$  численно составляет около  $\lambda_0 \approx 300 \text{ м}$ , что значительно превышает реальные значения минимальной длины  $l_{min}$  воздушного промежутка в ДЭРС. Поэтому при рассмотрении полевых электромагнитных процессов в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» можно ограничиться их квазистационарным режимом протекания [17].

Считаем, что до начала подачи на исследуемую ДЭРС «стержень-плоскость» высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  объемная плотность  $\rho_0$  свободных электрических зарядов в ее воздушном промежутке практически отсутствует, а электрическая прочность межэлектродного длинного воздушного промежутка ДЭРС определяется усредненным уровнем пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  резко неоднородного несимметричного сильного электрического поля в нем для указанного переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , которое подается на металлические электроды этой ДЭРС.

Полагаем, что в первом приближении лавинно-стримерная и лидерная стадии высоковольтного искрового разряда в длинном воздушном промежутке исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» определяются процессом размножения в нем свободных электронов под их ударным ионизирующим действием на молекулы смеси газов ее атмосферного воздуха в сильном ЭМП, появление которого в этой ДЭРС вызывается подачей на ее электроды высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  [7, 8, 23–28].

Кроме того, принимаем то физическое положение, что активное размножение электронов главным образом происходит в окрестностях потенциального электрода-стержня ДЭРС с радиусом  $r_c \ll r_0$  закругления его полусферического края в сферической зоне радиусом  $r_i \gg r_c$  активной ударной ионизации электронами атмосферного воздуха в ДЭРС [13], где напряженность  $E_x(z, t)$  ее резко неоднородного сильного электрического поля значительно возрастает и достигает своего критического значения  $E_{xk}(f_0)$  [29], вызывающего указанную ионизацию атмосферного воздуха в исследуемой ДЭРС.

Принимаем, что начало возникновения в ярко светящейся вблизи электрода-стержня исследуемой ДЭРС зоне радиусом  $r_i$  активной ударной ионизации ее воздуха электронами, ускоренными в ее межэлектродном разрядном

промежутке электрическим полем с напряженностью порядка  $E_{xk}(f_0)$  [29], плазменного канала лидера, то есть фактически время  $T_d$  электрического пробоя ее воздушного промежутка длиной  $l_{min} \geq 1$  м, соответствует напряжению появления  $U_L$  вблизи края потенциального электрода-стержня этой ДЭРС непрерывного электрического лидера разряда [7, 17]. Кроме того, считаем, что появление этого лидера у закругленного радиусом  $r_c \ll r_0$  нижнего края потенциального электрода-стержня ДЭРС инициируется стримерной короной на данном металлическом электроде ДЭРС при положительной полуволне высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , когда эта корона характеризуется своей наибольшей интенсивностью [7, 21]. В этой связи амплитудное (действующее) значение напряженности  $E_{xm}$  электрического поля, соответствующее начальной напряженности стримерного коронного разряда с потенциального электрода-стержня высоковольтной ДЭРС, будет определять амплитудное (действующее) значение разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие принятого нами высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$ .

Необходимо на основе расчетно-экспериментальных данных, касающихся развития электроразрядных процессов в длинном воздушном промежутке ДЭРС «стержень-плоскость», в приближенном виде определить указанные выше основные усредненные характеристики его электрического искрового пробоя, вызванного воздействием на металлические электроды этой ДЭРС высокого переменного напряжения  $U_{12}(t) \approx U_{12m} \cos(2\pi f_0 t)$  повышенной частоты  $f_0$  с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ .

#### РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАЗРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $U_{dm}(f_0)$ В ДЭРС

Используя известный инженерный метод расчета электрической прочности длинного воздушного промежутка ( $l_{min} \geq 1$  м) в ДЭРС, получивший название метода критического коэффициента неоднородности электрического поля [7], для среднеквадратичного (действующего) значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного напряжения  $U_{12}(t) \approx U_{12m} \cos(2\pi f_0 t)$  повышенной частоты  $f_0$  с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , можно записать следующее приближенное соотношение [17]:

$$U_{dm}(f_0) \approx k_f E_{xm} l_{min} / k_h, \quad (1)$$

где  $E_{xm} \approx 23[1+1,22(r_{ec})^{-0,37}]$  – действующее значение начальной напряженности электрического поля (с размерностью в кВ/см) стримерной короны в ДЭРС у края ее потенциального электрода-стержня с эквивалентным радиусом его закругления  $r_{ec} \approx r_c$  (в см) [7];  $k_h \approx (14+1,5l_{min})$  – критическое значение безразмерного коэффициента неоднородности электрического поля в ДЭРС (с размерностью длины  $l_{min}$  воздушного промежутка ДЭРС в м) [7];  $k_f \approx (0,9f_{0p}+0,1f_0)/f_0$  – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий влияние частоты  $f_0$  на электроразрядные процессы в ДЭРС;  $f_{0p} \approx 10^4$  Гц – пороговое значение частоты  $f_0$  применительно к исследуемой воздушной ДЭРС [7].

Из (1) при  $f_0 = f_{0p} = 10 \text{ кГц}$  [7] следует, что  $k_f \approx 1$  и разрядное напряжение  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС при этом принимает значение, характерное для напряжения появления  $U_L \approx E_{xm} l_{min} / k_h$  положительного лидера вблизи нижнего края с радиусом  $r_c \ll r_0$  его закругления ее потенциального электрода-стержня, испытывающего импульсное воздействие на него напряжения  $U_{12}(t)$  [17] и протекание с его заостренного края стримерной короны с начальной напряженностью  $E_{xm}$  электрического поля. Видно, что значение начальной напряженности  $E_{xm}$  электрического поля в нашем электрофизическом случае зависит только от радиуса  $r_c$  закругления края электрода-стержня этой ДЭРС [7]. Отметим, что уменьшение в 2 раза численного значения  $r_c$  (например, с 0,3 до 0,15 см) в рассматриваемой ДЭРС «стержень-плоскость» приводит к возрастанию в ней начальной напряженности  $E_{xm}$  электрического поля примерно на 16% при ее действующем численном значении около  $E_{xm} \approx 7,96 \text{ МВ/м}$ . Заметим, что для начала ионизации атмосферного воздуха в ДЭРС электронными ударами требуется, чтобы напряженность  $E_{xi}$  электрического поля в ней составляла по меньшей мере примерно  $E_{xi} \approx 2,4 \text{ МВ/м}$  [8].

В (1) безразмерный коэффициент  $k_h \approx (14+1,5l_{min})$  учитывает влияние степени неоднородности сильного электрического поля в длинном воздушном промежутке ДЭРС «стержень-плоскость» на действующее значение разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  [7]. Поэтому в (1) величина  $l_{min}/(14+1,5l_{min})$  будет отражать нелинейную зависимость амплитудного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  от минимальной длины  $l_{min}$  разрядного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС, усиливающуюся с увеличением минимальной длины  $l_{min}$  воздушного промежутка в этой ДЭРС и подтвержденную многочисленными результатами соот-

ветствующих высоковольтных экспериментальных исследований электроразрядных процессов в ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками [2, 7, 9, 10].

На правомерность использования предлагаемого расчетного соотношения (1) при приближенном определении действующего значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» может указывать то, что для случаев, когда  $k_f \approx 1$  ( $f_0 = f_{0p} = 10$  кГц; *случай 1*), а влиянием частоты  $f_0$  воздействующего напряжения  $U_{12}(t)$  в диапазоне ее изменения  $50 \text{ Гц} \leq f_0 \leq 10^4 \text{ Гц}$  на электроразрядные процессы в данной ДЭРС можно практически пренебречь (*случай 2*) [7, 9], результаты выполненных нами экспериментальных исследований электрической прочности длинного воздушного промежутка (например, при  $l_{min} = 1,5$  м;  $r_c \approx 0,3$  см) в ДЭРС «стержень-плоскость» для стандартного коммутационного аperiодического импульса напряжения  $U_{12}(t)$  временной формы  $T_m/T_p \approx 200$  мкс/1990 мкс положительной полярности, нарастающая часть которого по форме полуволны напряжения  $U_{12}(t)$  соответствует ее максимальной эквивалентной частоте  $f_{0m} \approx 0,25T_m^{-1} \approx 1,25$  кГц, показали, что [17, 22]: во-первых, электрический искровой пробой указанного длинного воздушного промежутка всегда происходит на нарастающей части воздействующего на электроды ДЭРС импульсного напряжения  $U_{12}(t)$  ( $T_d \approx 95$  мкс;  $f_{0d} \approx 0,25T_d^{-1} \approx 2,63$  кГц); во-вторых, опытное амплитудное значение разрядного напряжения  $U_{dm}$  составляет около  $U_{dm} \approx 611,6$  кВ. Укажем, что при этом согласно (1) при действующем значении начальной напряженности  $E_{xm} \approx 6,68$  МВ/м электрического поля расчетное значение напряжения появления  $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$  электрического положительного лидера в исследуемой ДЭРС с указанными параметрами ( $l_{min} = 1,5$  м;  $r_c \approx 0,3$  см;  $k_h \approx 16,25$ ) составляет примерно  $U_L \approx 616,7$  кВ. Как видно, расхождение между опытным разрядным напряжением  $U_{dm} \approx 611,6$  кВ и расчетным напряжением  $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h \approx 616,7$  кВ появления электрического лидера в этом случае в рассматриваемой высоковольтной воздушной ДЭРС не превышает 1%. В этой связи можно заключить, что напряжение появления  $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$  электрического лидера в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» практически соответствует амплитудному (действующему) значению разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$ , для которого частота  $f_0$  колебаний воздействующего напряжения  $U_{12}(t)$  находится в диапазоне  $50 \text{ Гц} \leq f_0 \leq 10^4 \text{ Гц}$ .

Именно для учета влияния частоты  $f_0$  изменения во времени  $t$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t) \approx U_{12m}\cos(2\pi f_0 t)$ , удовлетворяющей принятому диапазону  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , на действующее значение разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» нами дополнительно в известную формулу  $U_L \approx E_{xm}l_{min}/k_h$  [7] и был введен согласно (1) безразмерный эмпирический коэффициент  $k_f \approx (0,9f_{0p} + 0,1f_0)/f_0$ . Данный коэффициент отражает нелинейную зависимость действующего значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  от частоты  $f_0$  изменения испытательного высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  в случае, когда частота  $f_0$  превышает ее указанное пороговое значение  $f_{0p} \approx 10^4$  Гц. Причем при данном значении коэффициента  $k_f$  частотная зависимость амплитудного значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в (1) будет носить практически обратно пропорциональный характер от частоты  $f_0$  переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , воздействующего на исследуемую воздушную ДЭРС. Укажем, что именно такая зависимость для амплитудного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и была ранее выявлена экспериментальным путем при минимальных длинах  $l_{min} \leq 1$  м воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» [7]. Кроме того, эмпирический выбор такого значения безразмерного коэффициента  $k_f$  в (1) принципиально не противоречит приведенным в [7, 9] расчетно-экспериментальным электрофизическим фактам о слабой зависимости значений амплитудного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» с короткими воздушными промежутками ( $l_{min} \leq 1$  м) от частоты  $f_0$  колебаний высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  на электродах ДЭРС, удовлетворяющей следующему диапазону ее изменения:  $50 \text{ Гц} \leq f_0 \leq 10^4 \text{ Гц}$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАЗРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $U_{dm}(f_0)$ В ДЭРС

Ограничимся результатами приближенного расчета по (1) действующего значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» при следующих характерных значениях изменения ее геометрических и частотных параметров: минимальная длина  $l_{min}$  воздушного промежутка в ДЭРС принимает три дискретных значения: 1,5; 3,0; 5,0 м; частота  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  принимает пять дискретных значений: 10; 30; 100; 300; 1000 кГц; радиус  $r_c$  закругления нижнего края потенциального электрода-стержня ДЭРС принимает одно значение, которое составляет  $r_c \approx 0,3$  см. С учетом указанных исходных данных для основных параметров воздушной

**Таблица 1.** Результаты расчета по (1) амплитудных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в ДЭРС «стержень-плоскость» ( $r_c \approx 0,3$  см) для различных значений частоты  $f_0$  высокого (сверхвысокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$  и минимальной длины  $l_{min}$  ее воздушного промежутка

Частота $f_0$ , кГц	Амплитудное значение разрядного напряжения $U_{dm}(f_0)$ в высоковольтной ДЭРС, кВ		
	Минимальная длина $l_{min}$ воздушного промежутка в высоковольтной ДЭРС, м		
	1,5	3,0	5,0
10	616,7	1083,4	1553,7
30	191,2	335,8	481,6
100	117,2	205,8	295,2
300	80,2	140,8	201,9
1000	67,2	118,1	169,3

*Примечание.* Для сравнения данных табл. 1 с известными результатами определения электрической прочности воздушных промежутков в исследуемой ДЭРС отметим, что полученные нами в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории опытные данные для разрядного напряжения  $U_{dm}$  в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» ( $1 \text{ м} \leq l_{min} \leq 4 \text{ м}$ ;  $r_c \approx 0,3$  см) в случае воздействия на ее стальные электроды стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения  $U_{12}(t)$  временной формы  $T_m/T_p \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$  ( $f_{0m} \approx 0,25T_m^{-1} \approx 1,25$  кГц) положительной полярности составляли [17]: при  $l_{min} = 1,5 \text{ м}$  –  $U_{dm} \approx 611,6$  кВ; при  $l_{min} = 3,0 \text{ м}$  –  $U_{dm} \approx 1062,3$  кВ.

ДЭРС в табл. 1 приведены результаты определения по (1) амплитудных (действующих) значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в рассматриваемой ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$  из принятого диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ .

Из расчетных данных табл. 1 видно, что с увеличением частоты  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  в рассматриваемом диапазоне ее изменения  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$  наблюдается резкое уменьшение амплитудных (действующих) значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками. Так, при  $l_{min} = 1,5 \text{ м}$  для частот  $f_0 = 10 \text{ кГц}$  и  $f_0 = 1 \text{ МГц}$  расчетное по (1) значение разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в такой воздушной ДЭРС снижается не менее чем в девять раз (с уровня  $\sim 616,7$  кВ до уровня  $\sim 67,2$  кВ). Интерполяция приведенных в [7, см. рис. 5.11] экспериментальных данных для разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС при  $f_0 = 1 \text{ МГц}$  для  $l_{min} \leq 1 \text{ м}$  на длину  $l_{min} = 1,5 \text{ м}$  ее воздушного промежутка показывает, что в этом случае его численное значение может составлять примерно  $U_{dm}(f_0) \approx 75$  кВ. Как видно, расхождение этого опытного значения  $U_{dm}(f_0) \approx 75$  кВ с расчетным по (1) при  $f_0 = 1 \text{ МГц}$  разрядным напряжением  $U_{dm}(f_0) \approx 67,2$  кВ (см. табл. 1) находится в пределах 10%. С учетом интерполяции опытных данных для  $U_{dm}(f_0)$  при  $f_0 = 100 \text{ кГц}$  [7, см. рис. 5.11] можно считать, что при  $l_{min} = 1,5 \text{ м}$  амплитудное разрядное напряжение  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС численно составляет около  $U_{dm}(f_0) \approx 107$  кВ. Согласно расчету по (1)

указанное напряжение  $U_{dm}(f_0)$  при  $f_0 = 100 \text{ кГц}$  и  $l_{min} = 1,5 \text{ м}$  (см. табл. 1) принимает численное значение около  $U_{dm}(f_0) \approx 117,2$  кВ. При этом расхождение между указанными опытным ( $U_{dm}(f_0) \approx 107$  кВ) и расчетным ( $U_{dm}(f_0) \approx 117,2$  кВ) значениями пробивного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  для выбранного длинного воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» ( $l_{min} = 1,5 \text{ м}$ ;  $f_0 = 100 \text{ кГц}$ ) не превышает 9%. Приведенные выше результаты могут аргументированно указывать на работоспособность примененного нами инженерного подхода для нахождения в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» действующего значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в принятом частотном диапазоне  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$  изменения частоты  $f_0$  воздействующего на нее высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  и предложенного на его основе расчетного соотношения (1). Дополнительным физико-техническим аргументом в этом могут служить и приведенные в примечании к табл. 1 электрофизические данные, касающиеся полученных нами в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» экспериментальных значений разрядного напряжения  $U_{dm}$  в ДЭРС «стержень-плоскость» при электрическом пробое ее длинных воздушных промежутков (для  $l_{min} = 1,5 \text{ м}$  и  $l_{min} = 3,0 \text{ м}$ ) указанным высоким и сверхвысоким стандартным коммутационным аperiodическим импульсом напряжения  $U_{12}(t)$  временной формы  $T_m/T_p \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$  ( $f_{0m} \approx 0,25T_m^{-1} \approx 1,25$  кГц) положительной полярности [13, 17]. Из приведенных в примечании к табл. 1 данных видно, что для  $f_0 = 10 \text{ кГц}$  и указанного испытательного аperiodического импульса высокого и сверхвысокого напряжения

$U_{12}(t)$  расхождения между расчетными по (1) и экспериментальными результатами определения разрядного напряжения  $U_{dm}$  в ДЭРС «стержень-плоскость» при  $l_{min} = 1,5$  м и  $l_{min} = 3,0$  м не превышают 2%.

Согласно расчетным данным табл. 1 в случае фиксированной частоты  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  при увеличении минимальной длины  $l_{min}$  воздушного промежутка в исследуемой высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» происходит и возрастание в ней амплитудных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$ . Причем это возрастание происходит не прямо пропорционально степени увеличения длины  $l_{min}$  разрядного промежутка в ДЭРС. Данное возрастание разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  для неизменной частоты  $f_0$  с увеличением длины  $l_{min}$  воздушного промежутка в ДЭРС «стержень-плоскость» ограничивается ростом степени неоднородности ее электрического поля (возрастанием критического коэффициента  $k_h$  неоднородности электрического поля в ДЭРС) и соответственно не пропорциональным степени повышения значения этой длины  $l_{min}$  ростом величины  $l_{min}/(14+1,5l_{min})$  в расчетной формуле (1) для амплитудного значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$ .

При анализе и верификации полученных на основе формулы (1) количественных результатов приближенного расчета среднеквадратичных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» (см. табл. 1) отправными материалами могут служить также и экспериментальные данные электрической прочности воздушной изоляции в ДЭРС «стержень-плоскость» (при  $l_{min} \leq 1$  м) в зависимости от частоты  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  и длины  $l_{min}$ , приведенные в [7, см. рис. 5.10]. Эти опытные результаты четко указывают на то, что действительно пороговое значение частоты  $f_{0p}$  для исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» численно составляет около  $f_{0p} \approx 10$  кГц. Именно, начиная с данной частоты  $f_0 = f_{0p}$  переменного напряжения  $U_{12}(t)$  при ее возрастании на металлических электродах рассматриваемой ДЭРС с фиксированным значением минимальной длины  $l_{min}$  ее воздушного промежутка, наблюдается резкое снижение ее разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$ , носящее практически обратно пропорциональный характер от частоты  $f_0$  колебаний воздействующего на исследуемую ДЭРС «стержень-плоскость» переменного напряжения  $U_{12}(t)$ .

#### РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ $E_{dm}(f_0)$ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДЭРС

С учетом (1) и приведенного выше приближенного расчетного соотношения между ампли-

тудными (действующими) значениями разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0) \approx U_{dm}(f_0)/(1,13l_{min})$  сильного электрического поля в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» для определения усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в этой ДЭРС имеем следующее приближенное расчетное выражение:

$$E_{dm}(f_0) \approx 0,885k_f k_h^{-1} E_{xm}. \quad (2)$$

При расчетной оценке по (2) усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» следует учитывать то обстоятельство, что используемая в ней начальная напряженность  $E_{xm} \approx 23[1+1,22(r_c)^{-0,37}]$  электрического поля стримерной короны с заостренного края при радиусе его полусферического закругления  $r_c$  (с размерностью в см) потенциального электрода-стержня этой ДЭРС (см. рисунок) имеет размерность в кВ/см [7]. При дальнейшем получении количественных результатов расчета по (2) усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в длинных промежутках исследуемой ДЭРС с атмосферным воздухом воспользуемся принятыми при нахождении по (1) разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в этой высоковольтной ДЭРС характерными дискретными значениями изменения ее основных геометрических и частотных параметров: минимальная длина  $l_{min}$  воздушного промежутка в ДЭРС принимает три значения: 1,5; 3,0; 5,0 м; частота  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  принимает пять значений: 10; 30; 100; 300; 1000 кГц; радиус  $r_c$  закругления нижнего края потенциального металлического электрода-стержня ДЭРС принимает одно значение, равное  $r_c \approx 0,3$  см.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПРОБИВНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ $E_{dm}(f_0)$ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДЭРС

Результаты приближенного определения по (2) амплитудных (действующих) значений пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  сильного электрического поля в исследуемой воздушной ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$  с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , с учетом принятых дискретных изменений ее основных геометрических и частотных параметров могут быть сведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета по (2) усредненных значений пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» ( $r_c \approx 0,3$  см) для различных значений частоты  $f_0$  высокого (сверхвысокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$  и минимальной длины  $l_{min}$  ее воздушного промежутка

Частота $f_0$ , кГц	Усредненное значение пробивной напряженности $E_{dm}(f_0)$ электрического поля в ДЭРС, кВ/м		
	Минимальная длина $l_{min}$ воздушного промежутка в высоковольтной ДЭРС, м		
	1,5	3,0	5,0
10	363,8	319,6	275,0
30	112,8	99,1	85,2
100	69,1	60,7	52,2
300	47,3	41,5	35,7
1000	39,6	34,8	30,0

*Примечание.* Для сравнения данных табл. 2 с известными результатами определения усредненных по минимальной длине  $l_{min}$  воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС значений пробивной напряженности  $E_{dm}$  электрического поля отметим, что согласно полученным нами в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории опытным данным для разрядного напряжения  $U_{dm} \approx 1,13l_{min}E_{dm}$  в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» ( $1 \text{ м} \leq l_{min} \leq 4 \text{ м}$ ;  $r_c \approx 0,3$  см) в случае воздействия на ее стальные электроды стандартного коммутационного аperiodического импульса напряжения  $U_{12}(t)$  временной формы  $T_m/T_p \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$  ( $f_{0m} \approx 0,25T_m^{-1} \approx 1,25$  кГц) положительной полярности расчетно-экспериментальные значения усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}$  составляли [17]: при  $l_{min} = 1,5$  м –  $E_{dm} \approx 360,8$  кВ/м; при  $l_{min} = 3,0$  м –  $E_{dm} \approx 313,4$  кВ/м.

Приведенные в табл. 2 расчетные по (2) данные для усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость», испытывающей воздействие высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$  с принятого диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$ , свидетельствуют о том, что с возрастанием значений как данной частоты  $f_0$ , так и минимальной длины  $l_{min}$  длинного воздушного промежутка в этой ДЭРС происходит асимптотическое уменьшение значений указанной напряженности  $E_{dm}(f_0)$ . Причем согласно (2) в первом случае (в случае частотной зависимости напряженности  $E_{dm}$  электрического поля) характер уменьшения значений  $E_{dm}(f_0)$  определяется безразмерным коэффициентом  $k_f \approx (0,9f_{0p} + 0,1f_0)/f_0$ , а во втором случае (в случае зависимости напряженности  $E_{dm}$  электрического поля от длины  $l_{min}$  разрядного промежутка) – безразмерным коэффициентом  $k_h \approx (14 + 1,5l_{min})$ . В обоих указанных случаях данное уменьшение значений усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}$  электрического поля в воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» будет носить обратно пропорциональный характер: в первом случае – от частоты  $f_0$ , а во втором случае – от длины  $l_{min}$ . Чем будет выше частота  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , подаваемого на металлические электроды исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость», тем будет меньше значение усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ней. Так, согласно данным табл. 2 при  $l_{min} = 5$  м и увеличении частоты  $f_0$  со значения  $f_0 = 10$  кГц до значения  $f_0 = 100$  кГц наблюдается уменьшение значения усредненной пробивной напря-

женности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в рассматриваемой ДЭРС более чем в 5 раз (с уровня  $\sim 275,0$  кВ/м до уровня  $\sim 52,2$  кВ/м). Для частот  $f_0 = 10$  кГц и  $f_0 = 1$  МГц колебаний переменного напряжения  $U_{12}(t)$  это уменьшение значения пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  в ДЭРС при  $l_{min} = 5$  м составляет уже более чем в 9 раз (с уровня  $\sim 275,0$  кВ/м до уровня  $\sim 30,0$  кВ/м).

Для сравнения полученных приближенных расчетных результатов для усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» с известными расчетно-экспериментальными данными для  $E_{dm}(f_0)$  укажем, что при  $l_{min} = 1,5$  м и  $f_0 = 100$  кГц они составляли соответственно при  $U_{dm}(f_0) \approx 117,2$  кВ (см. табл. 1) и  $U_{dm}(f_0) \approx 107$  кВ [7] примерно  $E_{dm}(f_0) \approx 69,1$  кВ/м (см. табл. 2) и  $E_{dm}(f_0) \approx 63,1$  кВ/м [7]. Видно, что расхождение между указанными значениями  $E_{dm}(f_0)$  находятся в пределах 9%. При  $l_{min} = 1,5$  м и  $f_0 = 1$  МГц рассматриваемые сравниваемые значения пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  были равными соответственно около  $E_{dm}(f_0) \approx 39,6$  кВ/м (см. табл. 2);  $U_{dm}(f_0) \approx 67,2$  кВ) и  $E_{dm}(f_0) \approx 44,2$  кВ/м ( $U_{dm}(f_0) \approx 75$  кВ) [7], а расхождение между ними не превышало 11%. Приведенные данные обоснованно указывают на правомерность использования в практических расчетах приближенной формулы (2) при определении усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  сильного электрического поля в высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» с ее длинным воздушным промежутком ( $l_{min} \geq 1$  м).

Дополнительным аргументом в пользу достоверности расчетного соотношения (2) и предложенного инженерного подхода для нахождения

приближенных усредненных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками могут служить приведенные в *примечании* к табл. 2 расчетно-экспериментальные данные для усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}$  электрического поля ( $E_{dm} \approx 360,8$  кВ/м при  $l_{min} = 1,5$  м и  $E_{dm} \approx 313,4$  кВ/м при  $l_{min} = 3,0$  м), полученные в условиях высоковольтной электрофизической лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» при воздействии на исследуемую ДЭРС стандартного коммутационного аperiодического импульса высокого напряжения  $U_{12}(t)$  временной формы  $T_m/T_p \approx 200$  мкс/1990 мкс ( $f_{0m} \approx 0,25T_m^{-1} \approx 1,25$  кГц) положительной полярности. Данные значения для пробивной напряженности  $E_{dm}$  отличаются от соответствующих им расчетных по (2) значений  $E_{dm}(f_0)$  при  $f_0 = 10$  кГц для  $l_{min} = 1,5$  м ( $E_{dm}(f_0) \approx 363,8$  кВ/м) и  $l_{min} = 3,0$  м ( $E_{dm}(f_0) \approx 319,6$  кВ/м) в пределах 2%.

Полученные приближенные расчетные результаты как для усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» с длинными воздушными промежутками (см. табл. 2), так и соответствующей ей амплитудного (действующего) значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в данной воздушной ДЭРС (см. табл. 1) позволяют более обоснованно с электрофизических позиций подходить к удивительным и на сегодня по достигнутым высоким научным результатам в области высоковольтной электротехники высокочастотным экспериментам выдающегося сербско-американского электротехника Н. Теслы [20], впервые применившего в области ВВТ при опытном исследовании длинных электрических разрядов в атмосферном воздухе высоковольтные высокочастотные генераторы (трансформаторы Теслы), содержащие оригинальные резонансные трансформаторные схемы со специальными катушками [1, 20, 30]. Используя эти генераторы сверхвысокого (высокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , имевшие электрическую мощность до  $P_{12m} \approx 200$  кВт и амплитудное значение напряжения  $U_{12}(t)$  до  $U_{12m} \approx (1-10)$  МВ [20], Н. Тесла при частоте  $f_0 = 150$  кГц сверхвысокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  на электродах воздушной ДЭРС имитировал и наблюдал в атмосферном воздухе длинные электрические искры (искусственные молнии) длиной до 40 м, веером расходящиеся от потенциального электрода примененной им высоковольтной ДЭРС в окружающее ее воздушное пространство [20, 30]. В основе этих пионерских выдающихся электрофизических достижений

Н. Теслы как раз и лежит частотная зависимость среднеквадратичного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в длинных воздушных промежутках ДЭРС, описанная нами выше в приближенном виде с помощью предложенных расчетных аналитических соотношений (1) и (2) применительно к высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» с резко неоднородным несимметричным сильным электрическим полем.

Выполненная по (1) расчетная оценка необходимого уровня амплитуды  $U_{12m} \approx (2)^{1/2}U_{dm}(f_0)$  переменного напряжения  $U_{12}(t)$  частотой  $f_0 = 150$  кГц для электрического пробоя воздушного промежутка длиной  $l_{min} = 40$  м в высоковольтной ДЭРС «стержень-плоскость» показывает, что в этом случае ( $k_f \approx 0,16$ ;  $k_h \approx 74$ ;  $r_c \approx 0,3$  см;  $E_{zm} \approx 6,68$  МВ/м) амплитуда переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , воздействующего с частотой колебаний  $f_0 \approx 150$  кГц на металлические электроды указанной ДЭРС, должна составлять при  $U_{dm}(f_0) \approx 577,8$  кВ и  $E_{dm}(f_0) \approx 0,885U_{dm}(f_0)/l_{min} \approx 12,8$  кВ/м примерно  $U_{12m} \approx 817$  кВ. Таким образом, данная приближенная расчетная оценка по предлагаемому нами соотношению (1) среднеквадратичного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0) \approx 577,8$  кВ в рассматриваемой ДЭРС «стержень-плоскость» ( $f_0 = 150$  кГц;  $l_{min} = 40$  м) и соответствующей ему амплитуды  $U_{12m} \approx 817$  кВ переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , подаваемого на электроды этой ДЭРС, указывает на практическую реализуемость приведенных выше экспериментальных результатов Н. Теслы при получении им электрических искр длиной около 40 м в сверхвысоковольтной воздушной ДЭРС при частоте  $f_0 = 150$  кГц и амплитуде  $U_{12m} \approx 1$  МВ переменного электрического напряжения  $U_{12}(t)$  на выходе разработанной и созданной им новой конструкции сверхвысоковольтного резонансного трансформатора [1, 20, 30].

Как следует из полученных нами по предложенным формулам (1) и (2) расчетных данных для усредненных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость», возможность электрического пробоя ее воздушного разрядного промежутка минимальной длиной  $l_{min} = 5$  м с помощью высоковольтного высокочастотного источника переменного напряжения  $U_{12}(t)$  для частоты  $f_0 = 100$  кГц будет проявляться при амплитуде  $U_{12m}$  воздействующего на металлические электроды этой ДЭРС переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , равной примерно  $U_{12m} \approx (2)^{1/2}U_{dm}(f_0) \approx 417,4$  кВ (см. табл. 1). В этом случае ( $l_{min} = 5,0$  м;

$f_0 = 100$  кГц;  $U_{dm}(f_0) \approx 295,2$  кВ) усредненная пробивная напряженность  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ДЭРС «стержень-плоскость» будет принимать численное значение, равное около  $E_{dm}(f_0) \approx 52,2$  кВ/м (см. табл. 2). Именно благодаря существенному уменьшению значения пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  в рассматриваемой воздушной ДЭРС при  $f_0 = 100$  кГц по сравнению со случаем, когда  $f_0 = 10$  кГц (примерно в 5,3 раза с уровня  $\sim 275,0$  кВ/м до уровня  $\sim 52,2$  кВ/м), появляется возможность электрического пробоя ее длинного воздушного промежутка ( $l_{min} = 5,0$  м) при сравнительно небольшом значении амплитуды  $U_{12m} \approx 1,13 \times (2)^{1/2} E_{dm}(f_0) l_{min} \approx 417,4$  кВ переменного электрического напряжения  $U_{12}(t)$ , действующего на металлические электроды ДЭРС «стержень-плоскость».

### ВЫВОДЫ

1. На основе применения известного инженерного метода расчета электрической прочности воздушной изоляции в высоковольтной ДЭРС (метода критического коэффициента неоднородности электрического поля) для случая воздействия на ее металлические электроды высокого (сверхвысокого) переменного электрического напряжения  $U_{12}(t)$  повышенной частоты  $f_0$  его колебаний с диапазона  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$  предложены приближенные расчетные соотношения для нахождения среднеквадратичного разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и усредненной пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» с длинным воздушным промежутком ( $l_{min} \geq 1$  м) и заостренным нижним краем с радиусом  $r_c$  его полусферического закругления для ее потенциального электрода-стержня.

2. Полученные результаты приближенного расчетного определения основных усредненных характеристик электрического пробоя (разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля) длинного воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» указывают на их сильную частотную зависимость в рассматриваемом диапазоне  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$  изменения частоты  $f_0$  переменного высокого (сверхвысокого) напряжения  $U_{12}(t)$ , действующего на металлические электроды этой ДЭРС. Установлено, что данная частотная зависимость для разрядных характеристик  $U_{dm}(f_0)$  и  $E_{dm}(f_0)$  носит практически обратно пропорциональный характер от частоты  $f_0$  изменения напряжения  $U_{12}(t)$ . При этом расчетным путем показано, что чем будет выше частота  $f_0$  переменного высокого

(сверхвысокого) напряжения  $U_{12}(t)$  в исследуемой воздушной ДЭРС, тем меньше будут в ней приближенные усредненные значения разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  сильного электрического поля.

3. Показано, что при частотах  $f_0 = 10$  кГц и  $f_0 = 1$  МГц действующего на исследуемую ДЭРС «стержень-плоскость» высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  для минимальной длины  $l_{min} = 1,5$  м ее воздушного промежутка расчетное среднеквадратичное разрядное напряжение  $U_{dm}(f_0)$  в данной ДЭРС принимает численные значения, равные соответственно примерно  $U_{dm}(f_0) \approx 616,7$  кВ и  $U_{dm}(f_0) \approx 67,2$  кВ. При этом для указанных значений частоты  $f_0$  уровень разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой ДЭРС снижается не менее чем в 9 раз. При тех же частотах  $f_0 = 10$  кГц и  $f_0 = 1$  МГц сверхвысокого (высокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$  и минимальной длине  $l_{min} = 5,0$  м воздушного промежутка в рассматриваемой высоковольтной ДЭРС усредненное разрядное напряжение  $U_{dm}(f_0)$  в ней, при сохранении указанного выше уровня его снижения не менее чем в 9 раз для приведенного возрастания частоты  $f_0$  в 100 раз (с 10 кГц до 1 МГц) сверхвысокого (высокого) переменного напряжения  $U_{12}(t)$ , принимает численные значения, составляющие соответственно около  $U_{dm}(f_0) \approx 1553,7$  кВ и  $U_{dm}(f_0) \approx 169,3$  кВ.

4. Установлено, что для минимальной длины  $l_{min} = 1,5$  м воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС «стержень-плоскость» при частотах  $f_0 = 10$  кГц и  $f_0 = 1$  МГц действующего на ее электроды высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  усредненная пробивная напряженность  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ней составляет соответственно численные значения, равные примерно  $E_{dm}(f_0) \approx 363,8$  кВ/м и  $E_{dm}(f_0) \approx 39,6$  кВ/м. Как и для разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$ , пробивная напряженность  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в данной ДЭРС при указанном изменении этой частоты  $f_0$  уменьшается не менее чем в 9 раз. При минимальной длине  $l_{min} = 5,0$  м воздушного промежутка в исследуемой ДЭРС и при тех же частотах  $f_0 = 10$  кГц и  $f_0 = 1$  МГц высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  на ее электродах рассматриваемая пробивная напряженность  $E_{dm}(f_0)$  принимает численные значения, равные около  $E_{dm}(f_0) \approx 275,0$  кВ/м и  $E_{dm}(f_0) \approx 30,0$  кВ/м. При этом степень снижения пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  электрического поля в ДЭРС в связи с возрастанием частоты  $f_0$  в 100 раз (с уровня 10 кГц до уровня 1 МГц) при  $l_{min} = 5,0$  м сохраняется и составляет не менее чем 9 раз.

5. Выполненное сравнение полученных приближенных расчетных результатов для среднеквадратичных значений разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$  в исследуемой высоковольтной воздушной ДЭРС «стержень-плоскость» с их известными для  $l_{min} \leq 1$  м и интерполированными для  $l_{min} = 1,5$  м экспериментальными данными в рассматриваемом диапазоне  $10 \text{ кГц} \leq f_0 \leq 1 \text{ МГц}$  изменения частоты  $f_0$  высокого переменного напряжения  $U_{12}(t)$  на электродах данной ДЭРС подтверждает работоспособность предложенного инженерного подхода к расчету электрической прочности ДЭРС и базирующихся на нем приближенных расчетных соотношений для нахождения в ней усредненных значений как разрядного напряжения  $U_{dm}(f_0)$ , так и пробивной напряженности  $E_{dm}(f_0)$  сильного электрического поля.

#### 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

- Бржезицкий, 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.
- Александров, Г.Н., *Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды: Учебное пособие для вузов*. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 360 с.
- Бейер, М., Бек, В., Меллер, К., Цаенгль, В., *Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы ее применения*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.
- Мак-Дональд, А., *Сверхвысокочастотный пробой в газах*. М.: Мир, 1969. 205 с.
- 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.
- Базелян, Э.М., Ражанский, И.М., *Искровой разряд в воздухе*. Новосибирск: Наука, 1988. 165 с.
- 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.
- Райзер, Ю.П., *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
- Дьяков, А.Ф., Бобров, Ю.К., Сорокин, А.В., Юргеленас, Ю.В., *Физические основы электрического пробоя газов*. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 400 с.
- Базелян, Э.М., Райзер, Ю.П., *Искровой разряд*. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.
- Betz, H.D., Schumann, U., Laroche, P., *Lightning: Principles, Instruments and Applications. Review of Modern Lightning Research*. Munich: Germany, Springer Dordrecht Publ., 2009. 641 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0>
- Baranov, M.I., Buriakovskiy, 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, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, p. 37. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.
- Баранов, М.І., *Вибрані питання електрофізики: Монографія у 4 томах. Том 4: Ефекти взаємодії фізичних тіл з полями і струмами*. Харків: “ФОП Панов А.М.”, 2023. 552 с.
- Baranov, M.I., A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no.1, p. 34. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.05>
- Гулый, Г.А., *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
- Григорьев, А.Д., *Электродинамика и техника СВЧ*. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.
- Баранов, М.И., Амплитудно-временные характеристики электрического пробоя длинных воздушных промежутков в двухэлектродной разрядной системе “острие-плоскость” коммутационным аperiодическим импульсом высокого напряжения, *Электронная обработка материалов*. 2025, том 61, №4, с. 29. <https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.4.29>
- 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.
- Кухлинг, Х., *Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина*. М.: Мир, 1982. 520 с.
- Баранов, М.И., *Избранные вопросы электрофизики: Монография в 4-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира*. Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. 252 с.
- 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.

22. Baranov, M.I., Calculation and experimental determination of speed of advancement of the plasma leader channel of a pulse spark discharge in atmospheric air, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, p. 48. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.07>
23. Мик, Дж., Крэгс, Дж., *Электрический пробой в газах*. М.: ИЛ, 1960. 605 с.
24. Петер, Г., *Электронные лавины и пробой в газах*. М.: Мир, 1968. 390 с.
25. Nijdam, S., Teunissen, J., and Ebert, U., The physics of streamer discharge phenomena, *Plasma Sources Science and Technology*, 2000, vol. 29, no.10, art. ID 103001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05>
26. 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, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, vol. 34, no. 6, p. 936. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/6/315>
27. 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, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no. 27, art. ID 275201. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/27/275201>
28. Hu, H.M., Yang, Y., Lu, W., and Zhao, G.P., Electrical tree simulation based on the self-organization criticality. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, no. 48, p. 1273. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B241>
29. Baranov, M.I., The main characteristics of the leader channel during breakdown of a long air gap by high pulse voltage, *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 4, p. 59. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.08>
30. Tilbury, Mitch, *The ultimate Tesla coil design and construction guide*. N.Y.: McGraw Hill Professional Publ., 2007. 413 p.

### Summary

The results are presented of the calculation determination of basic characteristics of an electric hasp of a long air interval in the double-electrode discharge system (DEDS) “bar-plane” by a high variable voltage of  $U_{12}(t)$  of an enhanceable frequency of  $f_0$  from the range of  $10 \text{ kHz} \leq f_0 \leq 1 \text{ MHz}$ . Close calculation correlations were made so as to find the root-mean-square of a discharge voltage of  $U_{dm}(f_0)$  and the middle on a minimum length of  $l_{min} \geq 1 \text{ m}$  of this interval of an aggressive tension of  $E_{dm}(f_0)$  of a strong electric-field for the probed DEDS. The offered engineering approach for the determination of values of  $U_{dm}(f_0)$  and  $E_{dm}(f_0)$  is based on the known results of close calculations in the long air interval of DEDS “bar-plane” with the sharply not-homogeneous strong electric field of the voltage of appearance of  $U_L$  of an electric leader near-by a lower edge with the radius of rounding of  $r_c$  of its bar and introduced by the author in a formula for  $U_L$  of a dimensionless coefficient of  $k_f$ , taking into account the influence of frequency of  $f_0$  on the electro-discharge processes in that DEDS. The comparison of the obtained calculation results for the numeral values of the discharge voltage of  $U_{dm}(f_0)$  with their known experimental information for the indicated turn-down frequency of  $f_0$  voltage of  $U_{12}(t)$  on the electrodes of that DEDS confirms a capacity offered approach for finding in it of a discharge voltage of  $U_{dm}(f_0)$  and an aggressive tension of  $E_{dm}(f_0)$  of an electric field.

**Keywords:** long air interval, variable voltage of enhanceable frequency, electric hasp of interval, discharge voltage, aggressive tension of electric field, calculation