

М.И. Баранов, Г.М. Колишко, В.О. Лысенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО КАНАЛА ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНОЙ КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Дослідним шляхом отримано чисельні значення активного опору, питомій електропровідності і напруженості подовжнього електричного поля для сильнострумового плазмового каналу підводного іскрового розряду в колі потужного генератора з ємнісним накопичувачем енергії, який використовується при формуванні на навантаженні імпульсної А- компоненти струму штучної блискавки з амплітудою до 200 кА.

Опытным путем получены численные значения активного сопротивления, удельной электропроводности и напряженности продольного электрического поля для сильноточного плазменного канала подводного искрового разряда в цепи мощного генератора с емкостным накопителем энергии, используемого при формировании на нагрузке импульсной А- компоненты тока искусственной молнии с амплитудой до 200 кА.

ВВЕДЕНИЕ

При определении молниестойкости различных технических объектов (например, объектов энергетики, авиационной и ракетно-космической техники), содержащих многообразные устройства, изоляционные и металлические конструкции, с помощью генератора тока молнии (ГТМ) требуется при выборе режима токового нагружения испытываемых элементов учитывать электрофизические характеристики сильноточных плазменных каналов (СПК) искровых разрядов в электрических цепях высоковольтных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) данного ГТМ [1-4]. Как известно, к воспроизводимым отдельными высоковольтными генераторами импульсных токов (ГИТ) подобных мощных ГТМ, работающими на общую электрическую нагрузку (объект испытаний), амплитудно-временным параметрам (АВП) основных компонент тока искусственной молнии предъявляются жесткие международные технические требования [5-8]. В работах [9, 10] авторами были представлены результаты экспериментальных исследований в ГТМ основных электрических характеристик СПК (например, активного сопротивления R_k , удельной электропроводности σ_k и напряженности продольного электрического поля E_k), характерных для воздушных искровых разрядов в цепях его ГИТ, формирующих повторную импульсную D- (с амплитудой тока до 100 кА и длительностью до 500 мкс) и импульсную А- (с амплитудой тока до 200 кА и длительностью до 500 мкс) компоненты тока искусственной молнии. В практике электромагнитных испытаний на молниестойкость при помощи мощного ГТМ ряда объектов (например, деревянных клееных конструкций устройств высоковольтной импульсной техники [11] и др.) необходимы данные для указанных величин сопротивления R_k , электропроводности σ_k и напряженности E_k в СПК при подводных искровых разрядах в сильноточных цепях высоковольтных генераторов ГИТ-D и ГИТ-A, формирующих соответственно повторную импульсную D- и импульсную А- компоненты тока искусственной молнии. В рамках данной статьи ограничимся рассмотрением СПК подводного искрового разряда в цепи мощного генератора ГИТ-A.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ОЦЕНКЕ В ЦЕПИ С ИМПУЛЬСНОЙ А- КОМПОНЕНТОЙ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ ПАРАМЕТРОВ СПК ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

Рассмотрим приведенную на рис. 1 рабочую камеру (РК) с изоляционным корпусом 1, внутри которой размещен окруженный технической водой 2 тонкий металлический электрически взрывающийся проводник (ЭВП) 3, включенный в разрядную цепь генератора ГИТ-A, формирующего на эквиваленте нагрузки ГТМ согласно [1-3] импульсную А-компоненту тока искусственной молнии с нормированными АВП. Принимаем, что в соответствии с международными требованиями [5-8] данная компонента тока имитированной молнии (как правило, отрицательной полярности) характеризуется следующими основными нормированными АВП: амплитудой тока $I_{mA} = 200$ кА с допуском $\pm 10\%$; интегралом действия $J_A = 2 \cdot 10^6$ А²·с при допуске $\pm 20\%$; временем амплитуды тока $t_{mA} \leq 50$ мкс; длительностью своего протекания $\tau_i \leq 500$ мкс.

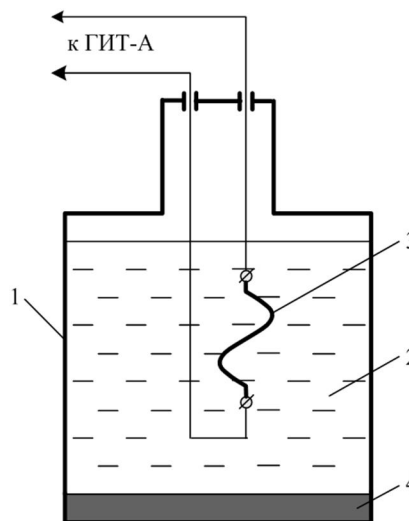


Рис. 1. Схематическое изображение рабочей камеры с ЭВП в цепи подводного разряда высоковольтного ГИТ-A, предназначенного для получения импульсной А- компоненты тока искусственной молнии (1 – изоляционный корпус РК; 2 – техническая вода; 3 – медный ЭВП; 4 – мелкодисперсные продукты от подводного взрыва медного проводника)

Принимаем, что в наших опытах в качестве ЭВП выступает прямолинейный оголенный тонкий медный проводник диаметром $d_0 = 0,2$ мм и длиной $l_0 = 100$ мм, погруженный в техническую воду РК и жестко подсоединенный своими концами к зажимам на медных электродах крупногабаритного коаксиального радиочастотного кабеля марки РК 50-17-17 со сплошной полиэтиленовой изоляцией, выходящего через горловину РК наружу и включенного далее в разрядную цепь генератора ГИТ-А. Считаем, что в проводимых экспериментах с подводным сильноточным искровым разрядом, инициированным тонким медным ЭВП, АВП импульсного разрядного тока в цепи генератора ГИТ-А могут из-за использования пониженного зарядного напряжения U_{3A} его ЕНЭ, влияя вносимых в нее электрических параметров токоподводов к РК и явления электрического взрыва (ЭВ) тонкого медного ЭВП отличаться от указанных выше нормированных параметров импульсной А-компоненты тока искусственной молнии. Пусть отрицательное зарядное напряжение U_{3A} для генератора ГИТ-А не превышает значения -7 кВ. Полагаем, что в соответствии со схемой на рис. 2 основные собственные электрические параметры разрядной цепи генератора ГИТ-А имеют следующие численные значения [1, 10]: $C_A = 333$ мкФ; $L_A = 2,05$ мкГн; $R_A = 0,061$ Ом.

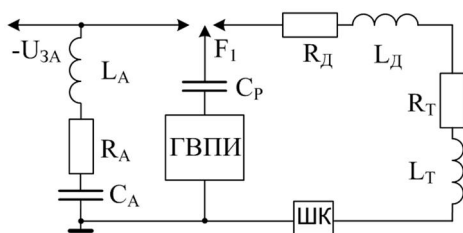


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А с шунтом ШК, используемой при формировании на электрической нагрузке (медном массивном проводнике или тонком ЭВП) импульсной А-компоненты тока искусственной молнии [1, 3]

Высоковольтный ЕНЭ данного ГИТ после его соответствующего заряда разряжается с помощью сильноточного трехэлектродного воздушного разрядника F_1 через медные токоподводы к РК (с электрическими параметрами R_T и L_T) на тонкий медный ЭВП (с электрическими параметрами R_D и L_D). Электрический запуск разрядника F_1 в цепи генератора ГИТ-А осуществляется генератором высоковольтных поджигающих импульсов (ГВПИ) на выходное импульсное напряжение до ± 100 кВ. Полярность этого пускового микросекундного импульса напряжения от ГВПИ, отделенного от управляющего электрода разрядника F_1 разделительной емкостью $C_P = 180$ пФ на 120 кВ, определяется полярностью зарядного напряжения U_{3A} (для создания между управляющим электродом разрядника F_1 и его непотенциальным или заземленным электродом больших перенапряжений данные полярности должны совпадать). Отметим, что заранее параметры R_T , L_T и R_D , L_D нам не известны и они подлежат определению по результатам осциллографирования импульсной А-компоненты тока молнии соответственно до и после включения в разрядную цепь генератора ГИТ-А тонкого медного ЭВП, вносящего в цепь величины R_D и L_D .

Полагаем, что величина индуктивности L_D для ЭВП мало отличается от индуктивности предваритель-

но шунтирующего участок его установки прямолинейного массивного медного проводника диаметром $d_{ш} = 2$ мм и длиной $l_{ш} = 100$ мм, активное сопротивление которого (порядка $0,55$ мОм) существенно меньше величин собственного активного сопротивления R_A выбранного ГТМ и активного сопротивления R_D , вносимого в рассматриваемую сильноточную цепь подводным ЭВ тонкого медного проводника аналогичной длины и диаметром $d_0 = 0,2$ мм. Принимаем, что активное сопротивление СПК $R_k = R_D$ при подводном искровом разряде в цепи высоковольтного генератора ГИТ-А обусловлено возникающей от ЭВП высокоионизированной металлической плазмой, сосредоточенной в цилиндрическом объеме радиусом круглого основания r_k , подлежащим в дальнейшем расчетному или экспериментальному определению, и высотой $l_k = l_0 = 100$ мм. Следует указать, что измерение АВП импульсной А-компоненты тока имитированной молнии в разрядной цепи генератора ГИТ-А будет выполняться при помощи метрологически поверенного коаксиального шунта (ШК) типа ШК-300 разработки НИПКИ "Молния" НГУ "ХПИ" (рис. 3), включенного согласно электрической схеме на рис. 2 в заземленную часть цепи разряда используемого нами ГИТ.



Рис. 3. Внешний вид измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 с экранированной кабельной линией связи длиной 60 м и специальным делителем напряжения СД-300, предназначенным для подключения в экранированном заглубленном бункере ряда цифровых осциллографов [1, 3]

Требуется по результатам осциллографирования и численного расчета с помощью стандартной программы Electronics Workbench (версия EWB 5.12) [9, 12] электроразрядных процессов в схеме на рис. 2 определить активное сопротивление R_k , электропроводность σ_k и напряженность E_k в СПК подводного искрового разряда в цепи мощного генератора ГИТ-А.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СПК ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА АВП ИМПУЛЬСНОЙ А-КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

На рис. 4 приведена осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии в схеме рис. 2 при $U_{3A} = -7$ кВ, полученная с помощью измерительного коаксиального шунта ШК-300 [1, 3] и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012 практически при $R_k = R_D = 0$, когда прямолинейный участок под тонкий медный ЭВП был зашунтирован массивным медным проводником диаметром $d_{ш} = 2$ мм и длиной $l_{ш} = 100$ мм (масштаб по вертикали -1 В/клетка; масштаб по горизонтали -50 мкс/клетка).

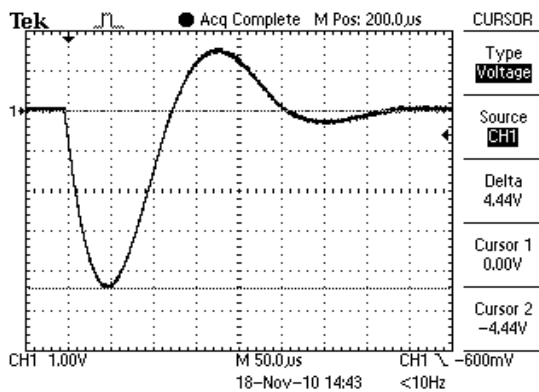


Рис. 4. Осциллограмма импульсной A -компоненты тока искусственной молнии при подводном сильноточном разряде высоковольтного ГИТ-А на массивный медный проводник в РК диаметром $d_{ш}=2$ мм и длиной $l_{ш}=0,1$ м ($U_{3A}=-7$ кВ)

Из приведенной на рис. 4 осциллограммы импульсной A -компоненты тока имитированной молнии видно, что при коэффициенте преобразования измерительного шунта ШК-300, численно равном для рассматриваемой составляющей тока грозового разряда $K_A = 11261$ А/В [1, 3], ее первая амплитуда I_{mA} оказывается примерно равной $4,44 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 50$ кА. Данной амплитуде импульсного тока I_{mA} соответствует время, равное $t_{mA} = 46$ мкс. Переход через ось абсцисс первой отрицательной полуволны импульсной A -компоненты тока молнии происходит при времени $t_{A1} = 122$ мкс, а ее второй положительной полуволны – при времени $t_{A2} = 254$ мкс. Амплитуда второй положительной полуволны рассматриваемого тока не превышает $16,9$ кА, а третьей отрицательной полуволны – $3,35$ кА. Логарифмический декремент колебаний Δ_{A1} импульсного тока i_A согласно рис. 4 составляет около $2,7$ при его периоде $T_A = 254$ мкс и коэффициенте затухания, равном $\delta_{A1} = \Delta_{A1}/T_A = 10,63 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Тогда при полной индуктивности разрядной цепи генератора ГИТ-А в проводимой серии опытов $L_{A\Sigma} = T_A^2 / (4\pi^2 C_A) = 4,9$ мкГн ($L_D = 0,1$ мкГн; $L_T = 2,75$ мкГн) для ее полного активного сопротивления $R_{A\Sigma 1} = 2\delta_{A1} L_{A\Sigma}$ на основании осциллограммы рис. 4 получаем величину, равную примерно $0,104$ Ом ($R_T = R_{A\Sigma 1} - R_A = 5,5 \cdot 10^{-4}$ Ом = $0,043$ Ом).

На рис. 5 представлена осциллограмма исследуемой импульсной A -компоненты тока искусственной молнии, полученной в рассматриваемой согласно рис. 2 электрической схеме при использовании в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТ-А взрывающегося в РК с технической водой из-за проявления в ее (камере) сильноточном контуре подводного ЭВ тонкого сплошного медного ЭВП, имеющего диаметр $d_0 = 0,2$ мм и длину $l_0 = 100$ мм ($U_{3A} = -7$ кВ; масштаб по вертикали – 1 В/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка). В этом случае из данных рис. 5 видно, что импульсный ток i_A в разрядной цепи ГИТ-А характеризуется сильным затуханием во времени и колебательный процесс разряда его ЕНЭ приближается к аperiодическому режиму, при котором полное активное сопротивление разрядной цепи генератора должно принимать критическое значение, равное $2(L_{A\Sigma}/C_A)^{1/2} = 0,243$ Ом. Амплитуда первой отрицательной полуволны импульсной A -компоненты имитированного в лабораторных условиях тока молнии при проявлении в РК подводного ЭВ тонкого медного проводника ($d_0 = 0,2$ мм; $l_0 = 100$ мм) оказывается рав-

ной около $3,52 \text{ В} \times 11261 \text{ А/В} = 39,6$ кА при $t_{mA} = 44$ мкс. Длительность первой полуволны разрядного тока i_A составляет 124 мкс. Амплитуда второй положительной полуволны тока i_A в цепи разряда ГИТ-А на тонкий медный ЭВП в РК с технической водой принимает значение, равное примерно $2,25$ кА. Длительность периода токовых колебаний при этом, как и случае применения в РК шунтирующего массивного медного проводника ($d_{ш} = 2$ мм; $l_{ш} = 100$ мм), составляет около $T_A = 254$ мкс. Путем изменения на экране осциллографа и соответственно на рис. 5 масштаба по вертикали было установлено, что амплитуда третьей отрицательной токовой полуволны достигает значения $0,75$ кА. Указанным амплитудам разрядного тока i_A на рис. 5 соответствует логарифмический декремент колебаний Δ_{A2} , равный $3,96$. Поэтому в этом случае коэффициент затухания δ_{A2} тока в цепи разряда генератора ГИТ-А принимает численное значение около $15,59 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. При $T_A = 254$ мкс и $L_{A\Sigma} = 4,9$ мкГн подводный ЭВ в РК с технической водой рассматриваемого тонкого медного проводника ($d_0 = 0,2$ мм; $l_0 = 100$ мм) согласно вышеприведенным на основании рис. 5 данным для импульсного тока i_A приводит к возникновению в цепи разряда ГИТ-А полного активного сопротивления величиной $R_{A\Sigma 2} = 0,153$ Ом. Данное значение сопротивления $R_{A\Sigma 2}$, как и следовало было ожидать, оказалось меньше его критического значения, равного $0,243$ Ом.

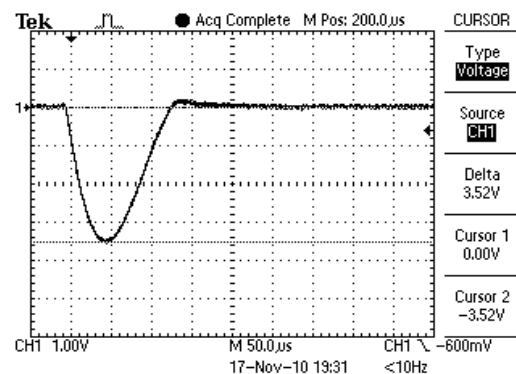


Рис. 5. Осциллограмма импульсной A -компоненты тока искусственной молнии при подводном сильноточном разряде высоковольтного ГИТ-А на тонкий медный ЭВП в РК диаметром $d_0=0,2$ мм и длиной $l_0=100$ мм ($U_{3A}=-7$ кВ)

Отметим, что аналогичные данные для активного сопротивления $R_{A\Sigma 2}$ следуют и из результатов численного моделирования на основе стандартной программы EWB 5.12 [9, 12] линейных электромагнитных процессов в схеме разряда генератора ГИТ-А, приведенной на рис. 2. В результате из полученных экспериментальных данных находим, что при подводном ЭВ в РК с технической водой примененного тонкого медного проводника ($d_0 = 0,2$ мм; $l_0 = 100$ мм) активное сопротивление R_k СПК подводного искрового разряда в сильноточной цепи используемого высоковольтного генератора ГИТ-А оказывается приближенно равным:

$$R_k = R_{A\Sigma 2} - R_{A\Sigma 1} = 0,049 \text{ Ом.} \quad (1)$$

Тогда в указанных электрофизических условиях погонная величина активного сопротивления R_{k0} для СПК длиной $l_k = l_0 = 100$ мм подводного искрового разряда в цепи мощного генератора ГИТ-А, формирующего импульсную A -компоненту тока искусственной молнии, составит следующее численное значение:

$$R_{k0} = R_k/l_k = 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/мм} = 0,49 \text{ Ом/м.} \quad (2)$$

Из представленных здесь опытных данных вытекает, что введение в разрядную сильноточную цепь высоковольтного генератора ГИТ-А электрического контура РК с длинными от рабочего стола ГТМ токоподводами ($R_T = 0,043 \text{ Ом}$; $L_T = 2,75 \text{ мкГн}$) и размещенным в технической воде РК тонким медным ЭВП диаметром $d_0 = 0,2 \text{ мм}$ и длиной $l_0 = 100 \text{ мм}$ вызывает заметное уменьшение (на 21 %) первой амплитуды I_{mA} импульсной А- компоненты тока искусственной молнии и резкую деформацию разрядного тока ГИТ-А.

3. ОЦЕНКА РАДИУСА СПК ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЦЕПИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ГИТ-А

Учитывая известную зависимость радиуса СПК для воздушного искрового разряда (формулу Брагинского [13, 14]) и расчетно-экспериментальные данные, представленные во второй главе монографии [15], посвященной теории и практике электрогидравлического эффекта, представим искомую величину для максимального радиуса плазменного канала r_{mk} при подводном искровом разряде в сильноточной цепи генератора ГИТ-А в следующем аналитическом виде:

$$r_{mk} = B_k (I_{mA})^{1/3} (t_{mA})^{1/2}, \quad (3)$$

где I_{mA} , t_{mA} – соответственно первая амплитуда импульсного тока в разрядной цепи ГИТ-А и время достижения импульсом тока этой амплитуды; B_k – неизвестный коэффициент, подлежащий определению.

Для нахождения значения коэффициента B_k воспользуемся экспериментальными результатами табл. 2 из [15], полученными при подводном ЭВ и исследовании развития в технической воде разрядного плазменного канала в сильноточных цепях высоковольтных ГИТ, характеризующихся зарядным напряжением 5 кВ (при амплитуде тока 88 кА и времени ее достижения 4 мкс) и 8 кВ (при амплитуде тока 42 кА и времени ее достижения 2 мкс). Заметим, что для указанных АВП разрядного тока в упомянутых ГИТ подводные СПК соответственно имели следующие значения своих радиусов r_{mk} [15]: 2,14 и 1,16 мм. Тогда на основании этих опытных данных из [15], соответствующих рассматриваемому нами электротехнологическому случаю, коэффициент B_k в формуле (3) примет численное значение, равное $0,024 \text{ м/(А}^{1/3} \cdot \text{с}^{1/2})$. После подстановки в формулу (3), записанную в системе СИ, при $B_k = 0,024 \text{ м/(А}^{1/3} \cdot \text{с}^{1/2})$ соответствующих АВП для импульсного тока i_A согласно данным рис. 5 ($I_{mA} = 39,6 \cdot 10^3 \text{ В}$; $t_{mA} = 44 \cdot 10^{-6} \text{ с}$) находим, что в нашем случае величина максимального радиуса r_{mk} СПК при подводном искровом разряде в цепи ГИТ-А принимает численное значение, примерно равное 5,425 мм. Такое найденное расчетным путем по (3) относительно большое значение для радиуса r_{mk} , по сравнению с приведенными ранее опытными результатами из [15], обуславливается существенно большим для нашего электрофизического случая значением времени t_{mA} .

4. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛАЗМЫ В СПК ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ А- КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Усредненную по поперечному сечению разрядного канала удельную электропроводность σ_k высокоионизированной низкотемпературной плазмы в СПК подводного искрового разряда в РК от мощного генератора ГИТ-А, формирующего импульсную А- ком-

поненту тока искусственной молнии, с учетом экспериментально определенного нами значения активного сопротивления R_k рассматриваемого СПК цилиндрической формы находим из следующего соотношения:

$$\sigma_k = l_k / (\pi r_{mk}^2 R_k). \quad (4)$$

Из (4) при $r_{mk} = 5,425 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_k = 0,1 \text{ м}$ и $R_k = 0,049 \text{ Ом}$ следует, что искомая величина удельной электропроводности σ_k плазмы в исследуемом случае принимает значение $22073 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$. Полученное нами усредненное значение для удельной электропроводности σ_k СПК подводного искрового разряда в цепи генератора ГИТ-А оказывается примерно в два раза меньше соответствующих опытных значений для σ_k , приведенных в табл. 2 из [15] для низкотемпературной плазмы сильноточного канала при подводных искровых разрядах ГИТ с ЕНЭ. Это отличие может быть объяснено большими (до 4,6 раз) для цепи подводного искрового разряда ГИТ-А значениями радиуса r_{mk} его канала, приводящими к уменьшению плотности его "металлической" плазмы и соответственно к уменьшению ее удельной электропроводности σ_k . Необходимо указать, что подстановка в (4) опытных данных из [15] для r_{mk} ($1,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $2,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) и R_k (соответственно 0,19 Ом и 0,057 Ом) при одинаковой длине каналов разряда $l_k = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ приводит к расчетным значениям для σ_k , равным соответственно $49801 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ и $48776 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$. Эти расчетные данные для усредненной удельной электропроводности σ_k СПК хорошо согласуются с соответствующими изменяющимися по текущему радиусу СПК опытными значениями σ_k для плазмы каналов подводных искровых разрядов, а также с усредненными по радиусу плазменного канала опытными значениями электропроводности σ_k (соответственно $49420 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ и $48023 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$), приведенными в табл. 2 из [15]. Это обстоятельство свидетельствует о работоспособности соотношения (4), предусматривающего использование в нем понятия усредненной по поперечному сечению разрядного сильноточного канала удельной электропроводности σ_k его высокоионизированной плазмы.

5. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СПК ПОДВОДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ А- КОМПОНЕНТЫ ТОКА ИСКУССТВЕННОЙ МОЛНИИ

Максимальное значение напряженности E_{mk} продольного электрического поля в СПК подводного искрового разряда для сильноточной цепи ГИТ-А с импульсной А- компонентой тока искусственной молнии может быть оценено по следующим выражениям:

$$E_{mk} = I_{mA} / (\pi r_{mk}^2 \sigma_k) = I_{mA} R_k / l_k. \quad (5)$$

После подстановки в (5) полученных расчетно-экспериментальным путем значений I_{mA} , r_{mk} и σ_k или I_{mA} , R_k и l_k для величины E_{mk} в высокоионизированной плазме сильноточного подводного искрового разряда при $I_{mA} = 39,6 \cdot 10^3 \text{ А}$, $R_k = 0,049 \text{ Ом}$ и $l_k = 0,1 \text{ м}$ находим, что она принимает численное значение, примерно равное $19,4 \text{ кВ/м} = 19,4 \text{ В/мм}$. В этой связи на искровом подводном разрядном промежутке РК длиной $l_k = 100 \text{ мм}$ в цепи генератора ГИТ-А на участке его первой полуволны тока i_A падает импульсное электрическое напряжение отрицательной полярности с амплитудой, равной около 1,94 кВ. Данное напряжение составляет примерно 27,7 % от зарядного напряжения $U_{3A} = -7 \text{ кВ}$ мощного ЕНЭ генератора ГИТ-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
2. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 6. – С. 58-62.
3. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 69-75.
4. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Мощный импульсный генератор тока молнии: разработка и примеры применения / Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы Международной научной конференции (17-21 августа 2009 г.). – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2009. – С. 113-115.
5. SAE ARP 5412/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированные составляющие внешнего тока" (США), 1985. – С. 30-39.
6. SAE ARP 5416/ED-84. Нормативный документ "Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Условия воздействия молнии на летательные аппараты и соответствующие формы испытательных сигналов" (США), 1997. – 145 с.
7. КТР-ВВФ/DO-160D/ED-14D. Квалификационные требования "Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний". Раздел 23.0. "Прямое воздействие молнии". – М.: Изд-во госстандартов Российской Федерации, 2004. – С. 258-273.
8. MIL-STD-464A. Военный стандарт США "Электромагнитные и экологические эффекты воздействия молнии. Требования интерфейса и критерии проверки систем", 2002. – С. 1-162.
9. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. и др. Экспериментальная оценка электрического сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в цепи разряда мощного генератора тока искусственной молнии // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 61-64.
10. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 62-66.
11. Баранов М.И., Лысенко В.О. Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее линейной молнии // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 39. – С. 10-18.
12. Баранов М.И., Носенко М.А. Применение программы EWB для численного расчета электромагнитных процессов в разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 49. – С. 71-84.
13. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
14. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
15. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlya naturnykh ispytaniy tehniceskikh ob'ektov // Pribory i tehnika `eksperimenta. – 2008. – № 3. – S. 81-85. 2. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Vysokovol'tnye sil'notochnye vozdushnye razryadniki generatora toka iskusstvennoj molnii // Pribory i tehnika `eksperimenta. – 2008. – № 6. – S. 58-62. 3. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Moschnaya vysokovol'tnaya `elektrofizicheskaya ustanovka dlya imitacii polnogo toka molnii i ee primenenie v oblasti molniezaschity tehniceskikh ob'ektov // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2008. – № 3. – S. 69-75. 4. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Moschnyy impul'snyy generator toka molnii: razrabotka i primery primeniya / Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovannykh sredah: Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii (17-21 avgusta 2009 g.). – Nikolaev: KP "Mikolaivs'ka oblasna drukarnya", 2009. – S. 113-115. 5. SAE ARP 5412/ED-84. Normativnyy dokument "Rekomenduemaya praktika aviacionno-kosmicheskikh rabot. Idealizirovannye sostavlyayuschie vneshnego toka" (SShA), 1985. – S. 30-39. 6. SAE ARP 5416/ED-84. Normativnyy dokument "Rekomenduemaya praktika aviacionno-kosmicheskikh rabot. Usloviya vozdeystviya molnii na letatel'nye apparaty i sootvetstvuyuschie formy ispytatel'nykh signalov" (SShA), 1997. – 145 s. 7. KTR-VVF/DO-160D/ED-14D. Kvalifikacionnye trebovaniya "Usloviya `ekspluatatsii i okruzhayushej sredy dlya bortovogo aviacionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniy". Razdel 23.0. "Pryamoe vozdeystvie molnii". – M.: Izd-vo gosstandartov Rossijskoj Federacii, 2004. – S. 258-273. 8. MIL-STD-464A. Voennyj standart SShA "Elektromagnitnyye i `ekologicheskie `effekty vozdeystviya molnii. Trebovaniya interfejsa i kriterii proverki sistem", 2002. – S. 1-162. 9. Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. i dr. "Eksperimental'naya ocenka `elektricheskogo soprotivleniya i `elektroprovodnosti sil'notochnogo plazmennogo kanala v cepi razryada moschnogo generatora toka iskusstvennoj molnii // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2011. – № 1. – S. 61-64. 10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. `Eksperimental'noe opredelenie aktivnogo soprotivleniya i `elektroprovodnosti sil'notochnogo plazmennogo kanala v razryadnoy cepi generatora impul'snoy komponenty toka iskusstvennoj molnii // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2011. – № 3. – S. 62-66. 11. Baranov M.I., Lysenko V.O. Priblizhennyye modeli `elektrodinamicheskogo razrusheniya drevesiny v atmosfernom vozduhe pod deystviem pryamogo udara v nee lineynoy molnii // Visnik NTU "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. – Harkiv: NTU "HPI". – 2009. – № 39. – S. 10-18. 12. Baranov M.I., Nosenko M.A. Primenenie programmy EWB dlya chislennogo rascheta `elektromagnitnykh processov v razryadnykh cephay moschnykh emkostnykh nakopitelej `energii // Visnik NTU "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. – Harkiv: NTU "HPI". – 2005. – № 49. – S. 71-84. 13. Lozanskij `E.D., Firsov O.B. Teoriya iskry. – M.: Atomizdat, 1975. – 272 s. 14. Baranov M.I. Izbrannyye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya `elektrofizicheskikh `effektov i zadach. – Hark'ov: Izd-vo NTU "HPI", 2009. – 384 s. 15. Gul'yy G.A. Nauchnyye osnovy razryadno-impul'snykh tehnologiy. – Kiev: Naukova dumka, 1990. – 208 s.

Поступила 21.03.2011

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
Колушко Георгий Михайлович, к.т.н., с.н.с.
Лысенко Виталия Олеговна
НИПКИ "Молния"
Национального технического университета
"Харьковский политехнический институт".
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47.
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua*

Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O.
Experimental estimation of the basic electric characteristics of the heavy-current plasma channel of an underwater spark discharge in the circuit of a high-voltage generator of artificial lightning current pulse component.
Numerical values of ohmic resistance, specific conductivity and intensity of the longitudinal electric field are experimentally obtained for the heavy-current plasma channel of an underwater spark discharge in the circuit of a powerful generator with a capacitive storage applied for artificial lightning current pulse A-component formation with the magnitude under 200 kA.
Key words – heavy-current plasma channel, underwater spark discharge, electric parameters, artificial lightning current.