

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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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  $J_A = 2 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с при допуске  $\pm 20\%$ ; временем амплитуды тока  $t_{mA} \leq 50$  мкс; длительностью своего протекания  $\tau_i \leq 500$  мкс.

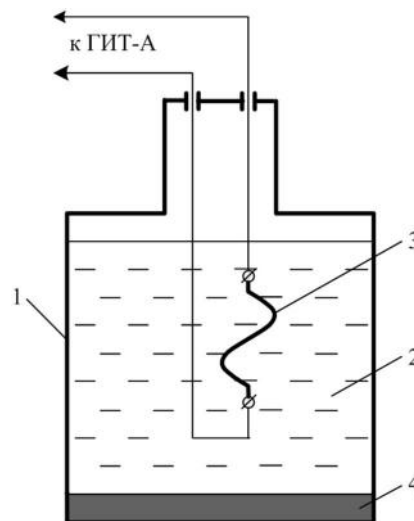


Рис. 1. Схематическое изображение рабочей камеры с ЭВП в цепи подводного разряда высоковольтного ГИТ-A, предназначенного для получения импульсной А- компоненты тока искусственной молнии (1 – изоляционный корпус РК; 2 – техническая вода; 3 – медный ЭВП; 4 – мелкодисперсные продукты от подводного взрыва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

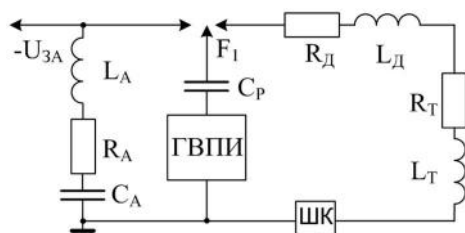


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А с шунтом ШК, используемой при формировании на электрической нагрузке (медном массивном проводнике или тонком ЭВП) импульсной А-компоненты тока искусственной молнии [1, 3]

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  $\pm 100$  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  $\sigma_k$  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).

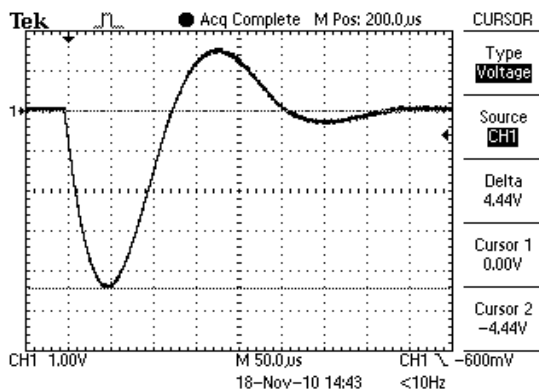


Рис. 4. Осциллограмма импульсной  $A$ -компоненты тока искусственной молнии при подводном сильноточном разряде высоковольтного ГИТ-А на массивный медный проводник в РК диаметром  $d_{ш}=2$  мм и длиной  $l_{ш}=0,1$  м ( $U_{3A}=-7$  кВ)

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  $\Delta_{A1}$  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 аperiodическому 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  $\Delta_{A2}$ , равный  $3,96$ . Поэтому в этом случае коэффициент затухания  $\delta_{A2}$  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.

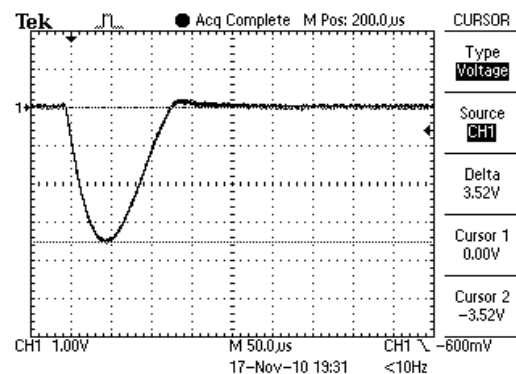


Рис. 5. Осциллограмма импульсной  $A$ -компоненты тока искусственной молнии при подводном сильноточном разряде высоковольтного ГИТ-А на тонкий медный ЭВП в РК диаметром  $d_0=0,2$  мм и длиной  $l_0=100$  мм ( $U_{3A}=-7$  кВ)

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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  плазмы в исследуемом случае принимает значение  $22073 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ . Полученное нами усредненное значение для удельной электропроводности  $\sigma_k$  СПК подводного искрового разряда в цепи генератора ГИТ-А оказывается примерно в два раза меньше соответствующих опытных значений для  $\sigma_k$ , 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  $\sigma_k$ . 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  $\sigma_k$ , равным соответственно  $49801 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$  и  $48776 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ . Эти расчетные данные для усредненной удельной электропроводности  $\sigma_k$  СПК хорошо согласуются с соответствующими изменяющимися по текущему радиусу СПК опытными значениями  $\sigma_k$  для плазмы каналов подводных искровых разрядов, а также с усредненными по радиусу плазменного канала опытными значениями электропроводности  $\sigma_k$  (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  $\sigma_k$  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  $\sigma_k$  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 naturnyh 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. Moschnyj impul'snyj generator toka molnii: razrabotka i primery primeneniya / Fizika impul'snyh razryadov v kondensirovannyh sredah: Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (17-21 avgusta 2009 g.). – Nikolaev: KP "Mikolaivs'ka oblasna drukarnya", 2009. – S. 113-115. 5. SAE ARP 5412/ED-84. Normativnyj dokument "Rekomenduemaya praktika aviacionno-kosmicheskikh rabot. Idealizirovannye sostavlyayuschie vneshnego toka" (SShA), 1985. – S. 30-39. 6. SAE ARP 5416/ED-84. Normativnyj dokument "Rekomenduemaya praktika aviacionno-kosmicheskikh rabot. Usloviya vozdejstviya molnii na letatel'nye apparaty i sootvetstvuyuschie formy ispytatel'nyh signalov" (SShA), 1997. – 145 s. 7. KTR-VVF/DO-160D/ED-14D. Kvalifikacionnye trebovaniya "Usloviya `ekspluatcii i okruzhayushej sredy dlya bortovogo aviacionnogo oborudovaniya. Trebovaniya, normy i metody ispytaniy". Razdel 23.0. "Pryamoe vozdejstvie molnii". – M.: Izd-vo gosstandartov Rossijskoj Federacii, 2004. – S. 258-273. 8. MIL-STD-464A. Voennyj standart SShA "Elektromagnitnye i `ekologicheskie `effekty vozdejstviya 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 razryadnoj cepi generatora impul'snoj komponenty toka iskusstvennoj molnii // Elektrotehnika i elektromehaniika. – 2011. – № 3. – S. 62-66. 11. Baranov M.I., Lysenko V.O. Priblizhennye modeli `elektrodinamicheskogo razrusheniya drevesiny v atmosfernom vozduhe pod dejstviem pryamogo udara v nee linejnoy 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 `elektromagnitnyh processov v razryadnyh cepyah 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. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya `elektrofizicheskikh `effektov i zadach. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2009. – 384 s. 15. Gul'j G.A. Nauchnye osnovy razryadno-impul'snyh tehnologij. – 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.**