

Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах

БАРАНОВ М.И., ЛЫСЕНКО В.О.

Получены приближенные расчетные соотношения для определения времени наступления явления воздушного электрического взрыва тонкого металлического проводника, амплитудно-временных параметров импульса перенапряжения на электрически взрывающемся проводнике и критического значения интеграла тока при электровзрыве данного проводника. Их экспериментальная проверка в условиях воздействия на тонкий круглый медный провод большого импульсного затухающего синусоидального тока микросекундной длительности разрядной цепи высоковольтного генератора с мощным емкостным накопителем энергии показала, что полученные соотношения для основных характеристик электрического взрыва в атмосферном воздухе исследуемого проводника могут быть использованы в теории и практике высоких электротехнологий, основанных на применении указанного электрофизического явления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *металлический проводник, электрический взрыв, генератор импульсного тока, время взрыва, импульс перенапряжения*

В настоящее время электрический взрыв (ЭВ) металлических проводников широко используется в фундаментальных и прикладных научных исследованиях и высоких электротехнологиях, в частности: при изучении физики конденсированного состояния проводящего вещества в условиях его быстрого нагрева импульсным током большой плотности; создании плазмы и исследовании ее теплофизики; разработке электровзрывных преобразователей электрической энергии в энергию ударных волн; получении высоких импульсных давлений для определения динамических физико-технических характеристик различных материалов и их энергосиловой формообразующей обработки в жидкости за счет проявления в ней электрогидравлического эффекта; высокоскоростной коммутации силовых цепей высоковольтных электрофизических установок; имитации действия мощных разрядов линейной молнии на технические объекты; нанесении на поверхность изделий тонких пленочных проводящих покрытий и получении ультрадисперсных порошков различного фазового и химического составов [1–5].

Approximate relations are obtained for determining the time at which an air electrical explosion of a thin metal conductor occurs, the amplitude and timing parameters of the overvoltage impulse across the electrically exploding conductor, and the critical integral of current during the electrical explosion of a given conductor. The obtained relations were experimentally verified by subjecting a thin round copper wire to a high decaying sine-wave microsecond impulse current produced in the discharge circuit of a high-voltage generator fitted with a powerful capacitive energy storage. The performed check has shown that the obtained relations for the main parameters characterizing the electrical explosion of the studied conductor in air can be used in the theory and practice of high electrical technologies based on application of the above-mentioned electrophysical phenomenon.

Key words: *electrical explosion, metal conductor, impulse current generator, explosion time, overvoltage impulse*

Несмотря на имеющиеся весьма обширные результаты многолетних отечественных и зарубежных исследований в области высокотемпературной электрофизики ЭВ металлических проволок и фольги из различных материалов в неконденсированной и конденсированной внешней среде [1–7], в настоящее время отсутствуют необходимые для теории и практики ЭВ металлических проводников соотношения для расчетной оценки таких основных характеристик рассматриваемого электрофизического явления, как времени наступления их ЭВ $t_{\text{в}}$ с учетом реальных электро- и теплофизических параметров взрывающихся проводников и токопроводящих элементов разрядной цепи высоковольтного генератора импульсного тока (ГИТ), амплитудно-временных параметров (АВП) возникающего импульса перенапряжения в силовых цепях ГИТ при осуществлении в ней ЭВ и критических значений интеграла тока J_k для электрически взрывающихся металлических круглых проволок и плоских видов фольги. В этой связи получение и экспериментальная проверка достоверности приближенных расчетных соотношений для определения количественных значений указанных характе-

ристик ЭВ в газовой и жидкой среде металлического проводника произвольных геометрических размеров из различных материалов, включенного в разрядную цепь ГИТ с большим импульсным током (БИТ), является актуальной научно-технической задачей в области техники и электрофизики высоких импульсных напряжений БИТ.

Постановка задачи. Рассмотрим размещенный в воздушной среде тонкий прямолинейный круглый сплошной металлический проводник длиной $l_{\text{п}}$ и поперечным сечением $S_{\text{п}} = \rho r_{\text{п}}^2$, включенный в двухэлектродную систему (ДЭС) сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТ (рис. 1), выполненного на основе мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) и предназначенного для получения на активно-индуктивной нагрузке БИТ микросекундного временного диапазона [8]. Считаем, что протекающий по исследуемому проводнику импульсный ток равномерно распределен по его поперечному сечению $S_{\text{п}}$, а температура материала проводника к моменту времени $t_{\text{в}}$ достигает температуры его кипения $T_{\text{к}}$ [1]. Полагаем, что до наступления явления ЭВ рассматриваемого проводника его геометрические размеры (радиус $r_{\text{п}}$ и длина $l_{\text{п}}$) в первом приближении остаются неизменными и равными первоначальным, а интенсивный и равномерный по объему джоулев нагрев материала проводника осуществляется в адиабатическом режиме [3, 6]. На основании опытных измерений принимаем, что давление атмосферного воздуха составляет около $p_0 \approx 1,087 \times 10^5$ Па, а его относительная влажность и температура равны примерно 75% и

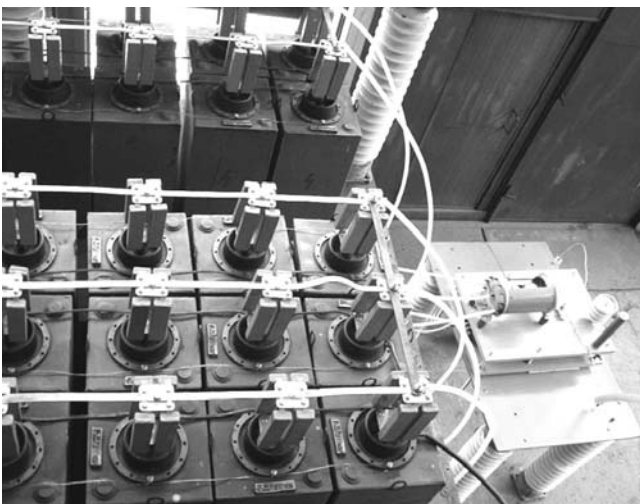


Рис. 1. Внешний вид второго этажа мощного высоковольтного ЕНЭ, содержащего 111 шт. параллельно включенных конденсаторов типа ИК-50-3 (± 50 кВ, 3 мкФ каждый), и рабочего стола с управляемым сильноточным трехэлектродным воздушным коммутатором и ДЭС с исследуемым взрывающимся тонким металлическим проводником в разрядной цепи низкоомного генератора ГИТ-А для получения на активно-индуктивной нагрузке импульсной А-компоненты тока искусственной молнии [8]

$T_0 \gg 20$ °С соответственно. В проводимых экспериментах по исследованию ЭВ рассматриваемого тонкого медного провода ($r_{\text{п}} = 0,1$ мм; $l_{\text{п}} = 110$ мм) собственные электрические параметры разрядной цепи выбранного ГИТ (генератора ГИТ-А) согласно схеме на рис. 2 имели следующие численные значения [8]: емкость $C_A \gg 333$ мкФ; индуктивность $L_A \gg 2,5$ мкГн; активное сопротивление $R_A \gg 0,057$ Ом. Токопроводы (немассивные и массивные) рабочего стола с ДЭС разрядной цепи генератора ГИТ-А перед подачей БИТ на взрывающийся медный провод без учета его активного сопротивления $R_{\text{п}}$ в момент времени $t_{\text{в}}$ обладали суммарной индуктивностью $L_{\text{т}} \gg 0,6$ мкГн и суммарным активным сопротивлением $R_{\text{т}} \gg 0,06$ Ом, вносимым практически данным проводом.

Перед испытанием в разрядной цепи генератора ГИТ-А тонкий медный провод одним концом жестко закреплялся на верхнем круглом стальном электроде ДЭС диаметром 20 мм, а другим концом устанавливался перпендикулярно поверхности нижнего плоского алюминиевого электрода ДЭС толщиной 2 мм и размером в плане 500×500 мм² (рис. 3). В экспериментальных исследованиях ЭВ тонкого медного провода используем отрицательную полярность зарядного напряжения $U_{3А}$ ЕНЭ в генераторе ГИТ-А и метрологически поверенный измерительный коаксиальный шунт типа ШК-300 собственной разработки для регистрации АВП его разрядного тока амплитудой до ± 300 кА, установленный в заземленной части электрического контура генератора ГИТ-А (см. рис. 2) и имеющий после модернизации собственное активное сопротивление около 0,2 мОм и коэффициент преобразования, равный примерно 10^4 А/В [8]. Для опытной

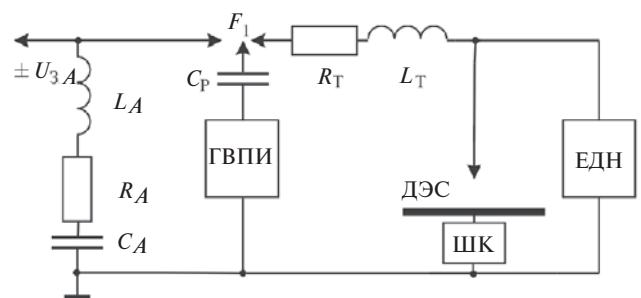


Рис. 2. Электрическая схема сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А для формирования в ДЭС с тонким электрически взрывающимся проводом импульсной А-компоненты тока искусственной молнии: E_1 – управляемый высоковольтный трехэлектродный воздушный коммутатор; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; C_p – разделительная емкость 180 пФ на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи генератора ГВПИ для управления работой коммутатора F_1 ; ДЭС – воздушная двухэлектродная система; ШК – измерительный коаксиальный шунт ШК-300 на импульсный ток амплитудой до ± 300 кА; ЕДН – емкостный делитель ЕДН-100 импульсного напряжения амплитудой до ± 100 кВ

регистрации при ЭВ тонкого медного провода АВП импульса перенапряжения в ДЭС разрядной цепи генератора ГИТ-А был использован экспериментально апробированный емкостный делитель импульсного напряжения типа ЕДН-100 собственной конструкции, рассчитанный на измерение импульсов напряжения микросекундного временного диапазона амплитудой до ± 100 кВ и имеющий коэффициент деления $25,15 \times 10^2$ [9]. Фиксация с шунта типа ШК-300 и делителя типа ЕДН-100 измеряемых амплитудных и временных параметров импульсного тока и напряжения в ДЭС при ЭВ закрепленного в ней тонкого медного провода выполнялась с помощью цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. Требуется получить приближенные соотношения для расчетной оценки рассматриваемых характеристик ЭВ в воздухе тонкого металлического проводника и опытным путем апробировать полученные соотношения с помощью соответствующих экспериментальных данных, характерных для сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А с этим взрывающимся проводом.

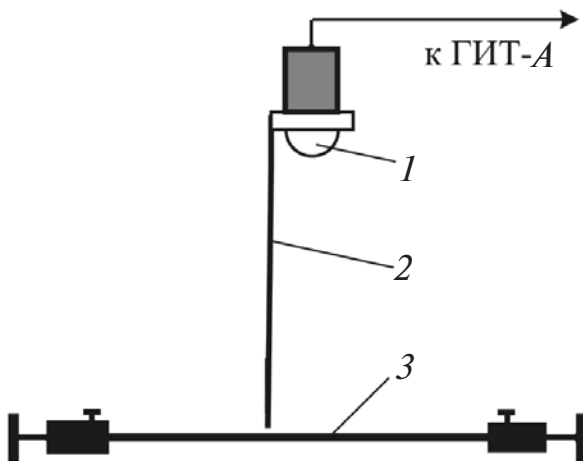


Рис. 3. Схема ДЭС в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А при опытно-исследовательском исследовании в ней ЭВ в атмосферном воздухе тонкого прямолинейного медного проводника: 1 – верхний массивный круглый стальной электрод системы; 2 – взрывающийся тонкий круглый медный провод; 3 – нижний массивный плоский алюминиевый электрод системы

Результаты экспериментов и расчетов по определению времени наступления ЭВ металлического проводника в цепи ГИТ. Проведенные эксперименты показали, что при зарядном напряжении $U_{3A} \approx -27$ кВ мощного ЕНЭ генератора ГИТ-А в его разрядной цепи (см. рис. 2) с тонким медным проводом при управляемом срабатывании с помощью ГВПИ трехэлектродного воздушного коммутатора F_1 генератора ГИТ-А протекает резко затухающий во времени синусоидальный БИТ (кривая канала 1 на рис. 4,а), характеризующийся коэффициентом затухания $d_A \approx 16,76 \times 10^3$ с⁻¹, периодом колебаний

$T_A \approx 240$ мкс и соответственно круговой частотой $\omega_A \approx 26,18 \times 10^3$ Гц. При этом первая амплитуда импульсного разрядного тока $i_A(t)$ генератора ГИТ-А составляет $I_{mA} \approx -190$ кА при времени ее достижения $t_{mA} \approx 42$ мкс. Из приведенных на рис. 4,а осциллограмм видно, что на фронте импульсного тока разряда ЕНЭ генератора ГИТ-А происходит ЭВ исследуемого тонкого медного провода, вызывающий появление в ДЭС с электрически взрывающимся медным проводом пикообразного перенапряжения (кривая канала 2 на рис. 4,а).

На рис. 4,б приведенные совмещенные осциллограммы импульсного тока $i_A(t)$ и напряжения $u_A(t)$ в ДЭС рабочего стола генератора ГИТ-А представлены при существенно меньшей, чем на рис. 4,а временной развертке. Из кривых рис. 4,б следует, что явление ЭВ в воздухе испытываемой

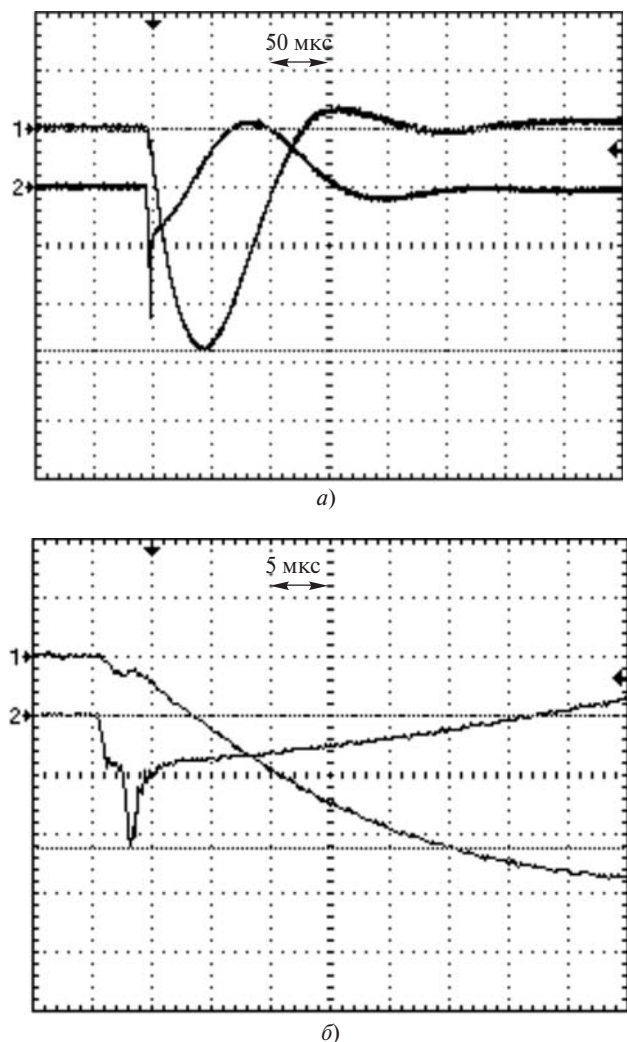


Рис. 4. Совмещенные осциллограммы импульсов тока $i_A(t)$ (кривая канала 1) и напряжения $u_A(t)$ (кривая канала 2) в ДЭС сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А при воздушном ЭВ в ней тонкой медной проволокой ($r_n = 0,1$ мм; $l_n = 110$ мм; $U_{3A} \approx -27$ кВ; $I_{mA} \approx -190$ кА; $t_b \approx 3,2$ мкс; $U_{mA} \approx -15,6$ кВ; $t_{mu} \approx 2,7$ мкс; масштаб по вертикали для тока – 50 кА/клетка; масштаб по вертикали для напряжения – 12,6 кВ/клетка: а – полных импульсов; б – нарастающих частей импульса

медной проволоки в разрядной цепи генератора ГИТ-А наступает при $t_B \gg 3,2$ мкс, которому соответствует явный провал (см. кривую канала 1) на осциллограмме импульсного тока $i_A(t)$ и резкий всплеск (см. кривую канала 2) на осциллограмме импульсного напряжения $u_A(t)$. В этом случае модуль амплитуды U_{mA} импульса перенапряжения в ДЭС с указанным электрически взрывающимся медным проводом достигает примерно 15,6 кВ при его длительности (ширине его основания) около $t_{mu} \gg 2,7$ мкс.

Расчетную оценку времени наступления ЭВ исследуемого тонкого проводника в атмосферном воздухе t_B построим на основе приближенного выражения для критического значения интеграла тока J_k в цепи ГИТ-А [1, 6]:

$$J_k \gg \int_0^{t_0} d_k^2(t) dt, \quad (1)$$

где $d_k(t)$ – критическое значение плотности импульсного тока в электрически взрывающемся проводнике; t_0 – время до ЭВ проводника, соответствующее протеканию по нему наибольшей плотности тока $d_k(t)$ и приближающееся к моменту достижения интегралом тока значения J_k .

С учетом принятых допущений и практически синусоидального характера протекающего до ЭВ при $0 \leq t < t_B$ по рассматриваемому металлическому проводнику импульсного тока разряда ЕНЭ генератора ГИТ-А выражение для $d_k(t)$ представим в приближенном виде:

$$d_k(t) \gg I_{m0} S_n^{-1} \sin(\omega_0 t), \quad (2)$$

где $I_{m0} \gg I_{mA} \sin(\omega_A t_0) \gg I_{mA} \omega_A t_0$ – максимальное значение тока в проводнике при $t = t_0$ до наступления явления его ЭВ; ω_0, ω_A – условная круговая частота изменения тока в проводнике до его ЭВ ($\omega_0 = 0,5\pi t_0^{-1}$) и реальная круговая частота изменения тока в нем, определяемая электрическими параметрами разрядного контура и ДЭС генератора ГИТ-А соответственно.

После подстановки (2) в (1) и выполнения в полученном выражении для J_k соответствующего интегрирования для времени $t_0 < t_B$ получаем приближенное расчетное соотношение:

$$t_0 \gg \frac{2 J_k S_{\Pi}^2 \omega^{-1/3}}{3 \epsilon \omega_A^2 I_{mA}^2 \omega}. \quad (3)$$

Учитывая, что для разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А при колебательном

режиме разряда его мощного ЕНЭ (при $(R_A + R_T) < 2[(L_A + L_T)/C_A]^{1/2}$ [10]) выполняется равенство $I_{mA} = U_{3A} / (\omega_A L_k k_A)$, где $L_k = (L_A + L_T)$ – полная индуктивность разрядного контура ГИТ-А, а k_A – нормирующий коэффициент, определяемый согласно [11] в рассматриваемом случае

$$\text{выражением } \frac{1}{\epsilon} \exp\left\{-\frac{d_A}{\omega_A} \arccctg \frac{d_A}{\omega_A} \right\} \frac{d_A}{\omega_A} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \frac{d_A}{\omega_A} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \frac{d_A}{\omega_A} \frac{\ddot{\omega}}{\omega},$$

то (3) при неизвестной заранее величине I_{mA} можно записать в таком удобном для расчетов значении предвзрывного времени t_0 виде:

$$t_0 \gg \frac{2 J_k S_{\Pi}^2 L_k^2 k_A^2 \omega^{-1/3}}{3 \epsilon U_{3A}^2 \omega}. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что в принятом приближении в момент времени t_0 производная тока $i_A(t)$ становится равной нулю ($di_A(t)/dt|_{t=t_0} \gg$

$\gg I_{mA} \sin(\omega_A t_0) \omega_0 \cos(\omega_0 t_0) = 0$), то из последнего выражения, (3) и (4) для условной круговой частоты ω_0 , входящей в (2), находим:

$$\omega_0 \gg 0,5\pi \frac{2 J_k S_{\Pi}^2 \omega^{-1/3}}{\epsilon \omega_A^2 I_{mA}^2 \omega} \gg 0,5\pi \frac{2 J_k S_{\Pi}^2 L_k^2 k_A^2 \omega^{-1/3}}{\epsilon U_{3A}^2 \omega}. \quad (5)$$

С учетом изложенного и экспериментальных данных из [1, 3, 5] принимаем, что производная разрядного тока $di_A(t)/dt$ при наступлении ЭВ металлического провода свое максимальное значение принимает до выполнения следующего приближенного условия для токовой фазы: $(\omega_0 t_B) \gg 2\pi/3$. Согласно (5) данному условию для ЭВ соответствует равенство: $t_B \gg 4t_0/3$. Тогда, исходя из (3) и (4), время наступления явления ЭВ тонкого металлического провода в атмосферном воздухе и сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А равно:

$$t_B \gg \frac{4}{3} \frac{2 J_k S_{\Pi}^2 \omega^{-1/3}}{\epsilon \omega_A^2 I_{mA}^2 \omega} \gg \frac{4}{3} \frac{2 J_k S_{\Pi}^2 L_k^2 k_A^2 \omega^{-1/3}}{\epsilon U_{3A}^2 \omega}. \quad (6)$$

Применительно к ЭВ при комнатной температуре окружающего воздуха ($T_0 \gg 20$ °С) исследуемого тонкого круглого медного проводника ($S_{\Pi} = 3,14 \times 10^{-8}$ м²; $J_k = 1,95 \times 10^{17}$ А²с²м⁻⁴ [6]) в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А ($\omega_A \gg 26,18 \times 10^3$ Гц; $d_A \gg 16,76 \times 10^3$ с⁻¹; $I_{mA} \gg -190$ кА; $L_k \gg 3,1$ мкГн; $U_{3A} \gg -27$ кВ) в соответствии с (6) при указанных исходных данных находим, что $t_B \gg 3,3$ мкс. Данное расчетное значение времени t_B отличается от экспериментально найденного значения $t_B \gg 3,2$ мкс (см. рис. 4,б) не более чем на

3%. Из полученных соотношений (6) следует, что при воздушном ЭВ тонкой металлической проволоки для уменьшения значений времени наступления описываемого электрофизического явления – ее ЭВ в рассматриваемой разрядной цепи высоковольтного ГИТ-А необходимы: вид материала проволоки и соответственно значения критического интеграла тока J_k для него, значения ее поперечного сечения S_{Π} и индуктивности L_k разрядного контура ГИТ-А, которые надо выбирать как можно меньшими, а значения круговой частоты ω_A разрядного тока $i_A(t)$, постоянного зарядного напряжения U_{3A} высоковольтного ЕНЭ генератора ГИТ-А и соответственно первой амплитуды I_{mA} импульсного тока в его сильноточной разрядной цепи – как можно большими.

Результаты расчетов и экспериментов по определению АВП импульса перенапряжения в цепи ГИТ при ЭВ металлического проводника. Запишем обобщенное выражение для импульса перенапряжения, возникающего при $t_0 \ll t < \rho / \omega_A$ в ДЭС разрядной цепи генератора ГИТ-А с импульсным током $i_A(t)$ при ЭВ в ней металлического проводника:

$$u_{mA}(t) = L_{\Pi} \frac{di_A(t)}{dt} + [R_{\Pi}(t) - R_{\Pi}(0)]i_A(t), \quad (7)$$

где L_{Π} , R_{Π} – индуктивность и активное сопротивление электрически взрывающегося в воздушной ДЭС используемого генератора ГИТ-А металлического проводника соответственно.

На основе (7) оценим по модулю для $t = t_B$ максимальное значение импульса перенапряжения U_{mA} в рассматриваемой сильноточной разрядной цепи ГИТ-А при ЭВ в ней тонкого медного провода ($r_{\Pi} = 0,1$ мм; $l_{\Pi} = 110$ мм). В этом случае для наибольшего значения токовой производной до наступления ЭВ данного проводника в цепи разряда мощного ЕНЭ генератора ГИТ-А с учетом (2) и (5) можно записать следующее приближенное соотношение:

$$\left. \frac{di_A(t)}{dt} \right|_{\max} \gg 0,5\rho\omega_A I_{mA} \gg 0,5\rho U_{3A} / (L_k k_A). \quad (8)$$

Входящее в (7) значение разрядного тока $i_A(t)$ генератора ГИТ-А, соответствующее значению U_{mA} и токовому провалу в его цепи при ЭВ проводника, для момента времени наступления ЭВ медной проволоки с учетом (2)–(6) запишем в следующем приближенном виде:

$$i_A(t_B) \gg I_{mA} \sin(\omega_A t_0) \sin(\omega_0 t_B) \gg I_{mA} \omega_A t_0 \sin(0,5\rho t_B / t_0). \quad (9)$$

Что касается полной индуктивности L_{Π} электрически взрывающегося в сильноточной цепи генератора ГИТ-А тонкого медного провода, то ее значение с учетом принятых допущений находим из известного в теоретической электротехнике соотношения [6]:

$$L_{\Pi} = 0,5\rho^{-1} \mu_0 l_{\Pi} [\ln(2l_{\Pi} / r_{\Pi}) - 0,75], \quad (10)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [12].

Значение активного сопротивления R_{Π} взрывающегося в ДЭС разрядной цепи генератора ГИТ-А медного провода в момент времени t_B с учетом принятых допущений определяем из известного в высокотемпературной электрофизике теплофизического соотношения [13]:

$$R_{\Pi} = l_{\Pi} S_{\Pi}^{-1} [9,1 + 9 \times 10^{-3} (T_K + 273,16)] \times 10^{-8}, \quad (11)$$

где $T_K = 2590$ °С – температура кипения для меди [12].

Тогда согласно (7), (8) и (10) при указанных исходных электрофизических данных ($r_{\Pi} = 0,1$ мм; $S_{\Pi} = 3,14 \times 10^{-8}$ м²; $l_{\Pi} = 110$ мм; $\omega_A \gg 26,18 \times 10^3$ Гц; $d_A \gg 16,76 \times 10^3$ с⁻¹; $I_{mA} \gg -190$ кА; $L_k \gg 3,1$ мкГн; $U_{3A} \gg -27$ кВ; $t_0 \gg 2,5$ мкс; $L_{\Pi} \gg 0,15$ мкГн и $\left. \frac{di_A(t)}{dt} \right|_{\max} \gg -7,81 \times 10^9$ А/с) модуль индуктивной составляющей для амплитуды U_{mA} импульса перенапряжения оказывается в нашем случае равным $U_{mAL} \gg L_{\Pi} \left. \frac{di_A(t)}{dt} \right|_{\max} \gg 1,17$ кВ. Используя (7), (9) и (11) с учетом (3)–(6) при $R_{\Pi}(t_B) \gg 1,22$ Ом, $R_{\Pi}(0) \gg R_T \gg 0,06$ Ом, $i_A(t_B) \gg -10,7$ кА и прежних исходных данных для провода и разрядной цепи генератора ГИТ-А для модуля активной составляющей в амплитуде U_{mA} импульса перенапряжения, получаем $U_{mAR} \gg [R_{\Pi}(t_B) - R_{\Pi}(0)]i_A(t_B) \gg 12,41$ кВ. В результате расчетное значение модуля амплитуды $U_{mA} = (U_{mAL} + U_{mAR})$ импульса перенапряжения в ДЭС разрядной цепи генератора ГИТ-А составит примерно 13,6 кВ, что отличается от опытного значения модуля амплитуды $U_{mA} = 15$ кВ, полученного в проведенной серии ЭВ из пяти рассматриваемых экспериментов, (см. рис. 4,б) на ~13%. Выполненные расчетные оценки U_{mA} показывают, что амплитуда импульса перенапряжения в разрядной цепи генератора ГИТ-А при воздушном ЭВ в ее ДЭС тонкого медного провода практически определяется резким возрастанием к моменту времени t_B активного сопротивления взрывающегося провода $R_{\Pi}(t_B)$. В этой связи для ряда электротехнологических применений явления ЭВ тонкого металлического провода основными путями увеличения амплитуды импульса перенапряжения U_{mA} в ДЭС

со взрывающимся в воздухе проводом применительно к разрядной цепи высоковольтного ГИТ являются: уменьшение его поперечного сечения S_{Π} и увеличение его длины l_{Π} , а также увеличение постоянного зарядного напряжения U_{3A} ЕНЭ, круговой частоты ω_A и первой амплитуды I_{mA} разрядного тока $i_A(t)$ в электрической цепи ГИТ, работающего в колебательном режиме.

Значение длительности (ширины основания) t_{mu} импульса перенапряжения $u_{mA}(t)$ при воздушном ЭВ тонкого металлического проводника в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А на основании результатов обработки многочисленных известных [1, 3, 5–7] и имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных данных и с учетом (3)–(6) в приближенном виде находим из следующего полуэмпирического соотношения:

$$t_{mu} \gg 3(t_B - t_0) \gg \frac{\frac{2}{3} J_k S_{\Pi}^2 \frac{\ddot{\phi}}{\phi}^{1/3}}{\frac{2}{3} \frac{U_{3A}^2}{\omega_A^2 I_{mA}^2}} \gg \frac{\frac{2}{3} J_k S_{\Pi}^2 L_k^2 k_A^2 \frac{\ddot{\phi}}{\phi}^{1/3}}{U_{3A}^2} \quad (12)$$

Из (12) при используемых исходных количественных данных для тонкого медного провода и разрядной цепи генератора ГИТ-А следует, что расчетное значение длительности t_{mu} импульса перенапряжения в ДЭС с электрически взрывающейся на воздухе медной проволокой ($r_{\Pi} = 0,1$ мм; $l_{\Pi} = 110$ мм) равно около 2,5 мкс. Это значение t_{mu} хорошо согласуется (при расхождении не более чем на 8%) с опытным значением длительности всплеска импульсного напряжения в ДЭС при воздушном ЭВ закрепленного в ней исследуемого тонкого проводника, составившим согласно данным рис. 4,б примерно 2,7 мкс.

Определение критического значения интеграла тока при ЭВ металлического проводника в цепи ГИТ. Для расчетной оценки критического значения интеграла тока J_k при воздушном ЭВ тонкого металлического проводника в разрядной цепи генератора ГИТ-А, входящего в соотношения для t_0 , t_B , t_{mu} и U_{mA} , воспользуемся приближенным выражением [14, 15]:

$$J_k \gg g_{\Pi,k} N_0 W_B, \quad (13)$$

где $g_{\Pi,k}$ – удельная электропроводность материала проводника при температуре его кипения T_K [13]; N_0 – концентрация атомов (положительных ионов) в кристаллической решетке материала проводника до воздействия на него БИТ при его первоначальной температуре (в нашем случае при $T_0 \gg 20$ °С) [12]; W_B – работа выхода свободных электронов из материала проводника [16].

Отметим, что значение $g_{\Pi,k}$ для основных проводниковых материалов может быть определено

вплоть до температуры их кипения T_K по экспериментально полученным для них эмпирическим соотношениям, приведенным в [13]. Значение исходной плотности атомов N_0 в электрически взрывающемся металлическом проводнике с плотностью его материала d_{Π} при $T_0 \gg 20$ °С может быть рассчитано по известному в классической физике соотношению [12]:

$$N_0 = d_{\Pi} / M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27}, \quad (14)$$

где M_a – атомная масса материала проводника, практически равная массовому числу A ядра атома проводникового материала и определяемая в атомных единицах массы согласно периодической системе химических элементов Менделеева (одна атомная единица массы равна 1/12 массы атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$, т.е. $1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг [12]).

Для входящей в (13) величины W_B используем экспериментальные эмиссионные данные [16], количественно определяющие термодинамическую работу выхода свободных электронов из широкого ряда проводниковых материалов, применяемых в области высоковольтной сильноточной импульсной техники и теплофизики ЭВ металлов.

Остановимся далее на определении критического численного значения интеграла тока J_k (13) для тонкого медного проводника, использованного в проведенных экспериментах по его воздушному ЭВ в сильноточной цепи генератора ГИТ-А. Из (11) с учетом теплофизических данных [13] находим, что в нашем случае удельная электропроводность $g_{\Pi,k}$ для меди при температуре ее кипения T_K окажется примерно равной $2,87 \cdot 10^6$ (Ом \cdot ж) $^{-1}$. Согласно (14) первоначальная плотность атомов N_0 в меди ($d_{\Pi} = 8900$ кг/м 3 ; $M_a = 63,55$ [12]) составляет около $8,43 \cdot 10^{28}$ м $^{-3}$. Работа выхода W_B для свободных электронов из меди в соответствии с [16] равна $7,05 \cdot 10^{-19}$ Дж. Тогда по (13) расчетное критическое значение интеграла тока J_k для меди будет примерно $1,71 \cdot 10^{17}$ А 2 \cdot ж $^{-4}$. Согласно данным табл. 4.П из [6] экспериментальное критическое значение интеграла тока J_k для меди при ее комнатной начальной температуре ($T_0 = 20$ °С) равно около $1,95 \cdot 10^{17}$ А 2 \cdot ж $^{-4}$. Видно, что расхождение между опытным [6] и расчетным (13) численным значением критического интеграла тока J_k для меди составляет примерно 12%.

Вывод. Полученные приближенные расчетные соотношения для времени наступления t_B в сильноточной разрядной цепи высоковольтного ГИТ воздушного ЭВ тонкого металлического проводника, АВП импульса перенапряжения на электрически взрывающемся проводнике и критического

значения интеграла тока J_k при ЭВ рассматриваемого проводника дают возможность их использования при приближенных расчетных оценках исследуемых основных характеристик ЭВ металлических проводников от действия на них БИТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Столочич Н.Н.** Электровзрывные преобразователи энергии/Под ред. В.Н. Карнюшина.— Минск: Наука и техника, 1983.
2. **Лебедев С.В., Савватимский А.И.** Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности. — Успехи физических наук, 1984, т. 144, вып. 2.
3. **Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.** Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках.— М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. **Лернер М.И.** Образование наноразмерной фазы при электрическом взрыве проводников. —Изв. вузов. Физика, 2006, т. 49, № 6.
5. **Григорьев А.Н., Павленко А.В.** Давление при электрическом взрыве металлических фольг. — Письма в ЖТФ, 2009, т. 35, вып. 18.
6. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля.— М.: Мир, 1972.
7. **Гулый Г.А.** Научные основы разрядно-импульсных технологий.— Киев: Наукова думка, 1990.
8. **Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др.** Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов. — Приборы и техника эксперимента, 2008, № 3.
9. **Баранов М.И., Зябко Ю.П., Лысенко В.О. и др.** Разработка и создание передвижного емкостного делителя импульсного напряжения амплитудой до 100 кВ. — Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. — Харків: НТУ «ХПІ», 2011, № 49.
10. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники, т. 1.— Л.: Энергоиздат, 1981.
11. **Баранов М.И.** Расчет процесса энерговыделения в цилиндрических токопроводах электрофизических установок высокого напряжения. — Электричество, 1992, № 4.
12. **Кузьмичев В.Е.** Законы и формулы физики/Отв. ред. В.К. Тартаковский.— Киев: Наукова думка, 1989.
13. **Столочич Н.Н., Миницкая Н.С.** Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов.— Минск: Наука и техника, 1975.
14. **Баранов М.И.** Термоэлектронная эмиссия из металла при нагреве и электрическом взрыве проводников под воздействием больших импульсных токов. — Технічна електродинаміка (Киев), 2008, № 3.
15. **Баранов М.И.** Аналитический расчет критических значений интеграла тока для основных металлов, применяемых в технике больших импульсных токов при электрическом взрыве проводников. — Технічна електродинаміка (Киев), 2008, № 6.
16. **Фоменко В.С.** Эмиссионные свойства материалов. Справочник.— Киев: Наукова думка, 1981.

[26.01.12]

Авторы: Баранов Михаил Иванович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) по специальности «Инженерная электрофизика». В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты» в Национальном техническом университете (НТУ) «ХПИ». Заведующий отделом электромагнитных испытаний в Научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте «Молния» НТУ «ХПИ», профессор НТУ «ХПИ» по кафедре инженерной электрофизики.

Лысенко Виталия Олеговна окончила в 2008 г. физико-технический факультет НТУ «ХПИ» по специальности «Техника и электрофизика высоких напряжений». Аспирант НТУ «ХПИ».

* * *

Внимание предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485