

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»
Украина, 61013, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»
тел. (0572) 40-08-41, Факс (0572) 40-01-33, E-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

Запропонована нестрога аналітична модель електричного вибуху циліндричного провідника великим імпульсним струмом різної часової форми, основаної на електротепловому механізмі його електровибухового руйнування.

Предложена нестрогая аналитическая модель электрического взрыва цилиндрического проводника большим импульсным током различной временной формы, основанная на электротепловом механизме его электровзрывного разрушения.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники больших импульсных токов (БИТ), сильных электрических и магнитных полей, а также техники высоких плотностей энергии, радиофизики, сильноточной электроники, физики плазмы, техники импульсных источников света, новых электрофизических технологий и высоковольтной импульсной техники обуславливает разработку и создание специальных мощных импульсных источников энергии – генераторов импульсных напряжений (ГИН) и токов (ГИТ) с амплитудными значениями импульсов напряжения в сотни (тысячи) киловольт и импульсов тока в сотни (тысячи) килоампер при их длительностях порядка 10 наносекунд и более [1-4]. В разрядных цепях малоиндуктивных ГИН (ГИТ), реализующих указанные амплитудно-временные параметры (АВП) выходных импульсов напряжения и тока, достаточно широко применяется такое сложное и не до конца исследованное явление как электрический взрыв (ЭВ) проводников [5-7]. Отметим, что под ЭВ проводников обычно понимается быстрое разрушение последних под действием их интенсивного кратковременного нагрева большими плотностями тока, носящее взрывообразный характер. Согласно принятой классификации ЭВ проводников [6] последние в случае применения для разрушения проводников разрядных затухающих синусоидальных токов ГИН (ГИТ) и токов молнии, когда во взрывающихся проводниках достигаются плотности импульсного тока порядка 10^{11} А/м² и более, следует относить к быстрым взрывам, а для токов короткого замыкания (КЗ) промышленной частоты 50 Гц в токопроводах силового электроэнергетического оборудования, когда плотности аварийного тока в переходном режиме в проводниках принимают значения порядка 10^9 А/м², – к медленным взрывам, для которых характерно дробление проводника на макроскопические капли жидкого металла (типичный пример – плавкий предохранитель [23]). Вкратце остановимся на эволюции изучения и применения в импульсной технике явления ЭВ проводников.

Электрофизика ЭВ проводников начала интенсивно изучаться в период исследования возможностей получения высокотемпературной плазмы для реализации управляемой термоядерной реакции в Z – пинче [8]. Позднее работы по исследованию ЭВ проводников стали стимулироваться такими направлениями его

практического использования как моделирование ядерного взрыва с использованием взрыва проводников в жидкости [9], ускорение до сверхвысоких скоростей микрочастиц и имитация воздействия микрометеоритов на космические аппараты [10]. Далее возрастает интерес к взрывающимся проводникам как к инструменту для изучения свойств металлов при высоких температурах [11]. Наблюдается рост технологических применений подводного ЭВ проводников, обеспечивающего получение интенсивных ударных волн сжатия в жидкой среде с амплитудой избыточного давления в тысячи атмосфер [12]. Проводятся работы по электровзрывному получению металлических пленок для нужд микроэлектроники [13], детонации взрывчатых веществ с помощью электроподрыва проводников [14], созданию сверхскоростных размыкателей сильноточных электрических цепей с использованием эффекта от взрывающихся алюминиевых фольг [15,16], получению мощных радиоимпульсов [17] и оптической накачке квантовых генераторов, базирующейся на применении ЭВ проводников [18]. Имеющиеся результаты показывают, что взрывающиеся проводники могут использоваться в качестве импульсных источников высоких температур (до 10^4 °С), рентгеновского излучения и мощных ударных волн, распространяющихся в газовых средах со скоростью до 10 км/с [6]. В последние годы внимание специалистов уделено фундаментальным и прикладным исследованиям в области электровзрывного преобразования энергии в конденсированных средах [19] и формирования в сильноточных разрядных цепях ГИН (ГИТ) с помощью электрически взрывающихся проводников БИТ молнии микросекундной длительности [20].

Неоднократные попытки исследователей, связанные с аналитическим описанием процесса ЭВ проводников под воздействием БИТ и соответственно больших плотностей импульсного тока, не привели до сих пор к получению удобных для инженерно-технического персонала соотношений, применяемых в его практических расчетах. Численное моделирование этого сложного процесса на ПЭВМ с привлечением математического аппарата магнитогидродинамики требует задания основных исходных данных, включая электрические параметры разрядного контура ГИН (ГИТ), физические параметры окружающей проводники среды, электрофизические и геометрические

характеристики проводников [21]. Однако на практике зачастую часть этих данных необходимо не задавать, а определять. Кроме того, развитый в [22] метод подобия для электрически взрывающегося в разрядной цепи ГИН (ГИТ) проводника содержит многочисленные эмпирические зависимости и коэффициенты, затрудняющие понимание электрофизических процессов, протекающих при его ЭВ, и усложняющие мотивированный выбор основных параметров ГИН (ГИТ), электрофизических и геометрических характеристик проводника. Согласно результатам экспериментального изучения ЭВ в воздухе медных цилиндрических проводников было установлено, что отношение энергии, подводимой к проводнику в процессе его ЭВ, к запасенной в ГИН (ГИТ) электрической энергии W_c может составлять до 0,95, т.е. энергия диссипации в разрядном контуре ГИН (ГИТ) может не превышать 5% от W_c (см. табл. 1.1 в [6]).

Целью данной статьи является разработка упрощенной модели ЭВ в воздухе проводников и на ее основе приближенный аналитический расчет энергоемкости разряжающихся на взрывающиеся проводники ГИН (ГИТ), критических плотностей электротепловой энергии и скорости ее ввода при ЭВ проводников, скорости нарастания температуры критического нагрева проводников, времени до взрыва проводников и основных электрофизических и геометрических характеристик электрически взрывающихся проводников под воздействием БИТ.

ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Примем, что электротепловому воздействию БИТ подвергаются длинные круглые цилиндрические ферромагнитные проводники, для которых справедливо условие $l \gg d$, где l , d – соответственно длина и диаметр проводника. Пусть исследуемые проводники размещены в воздухе при нормальных атмосферных условиях (воздушное давление составляет 101,3 кПа, а температура воздуха равна комнатной $\theta_0 = 20$ °С). Предположим, что АВП воздействующих на исследуемые проводники БИТ изменяются по зависимостям, характерным для рассматриваемых областей импульсной техники: затухающего синусоидального разрядного тока ГИН (ГИТ), аperiodического импульсного тока молнии 2/50 мкс и тока КЗ промышленной частоты 50 Гц. Считаем, что в процессе достижения поставленной цели выполняются следующие допущения:

1. Радиальные распределения тока и температуры по поперечному сечению электрически взрывающихся проводников носят равномерный характер [6,12].
2. Электротепловая энергия, расходуемая на теплообмен электрически взрывающегося проводника с окружающей его воздушной средой, незначительна и ею можно пренебречь [6].
3. Классические зависимости для тепло – и электрофизических характеристик материала проводников от температуры справедливы и для условий их ЭВ [24].
4. Запасенная в ГИН (ГИТ) электрическая энергия практически вся затрачивается на нагрев и фазовые превращения материала электрически взрывающихся

проводников [6,19].

5. Изменением значений удельной теплоемкости и плотности материала проводников в процессе их ЭВ можно пренебречь [6,24].

6. Процесс нагрева материала проводников от температуры его кипения до начала фазы испарения материала электрически взрывающихся проводников происходит практически мгновенно.

Требуется с учетом принятых допущений разработать упрощенную расчетную модель ЭВ в воздушной среде проводников на начальной стадии их взрыва (плавление и фазовый переход жидкий металл–пар), базирующуюся на электротепловой природе их взрывного разрушения и позволяющую на основе аналитических соотношений сравнительно легко и физически понятно осуществлять приближенный выбор основных параметров ГИН (ГИТ), процесса ЭВ проводников и характеристик электрически взрывающихся под воздействием БИТ цилиндрических проводников.

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для электротепловой энергии $W_{\dot{O}}$, выделяющейся в проводнике с импульсным током, в соответствии с законом Джоуля-Ленца [25] имеем:

$$W_{\dot{O}} = RS^2 J_c, \quad (1)$$

где R , S – соответственно активное сопротивление

и поперечное сечение проводника; $J_c = \int_0^{t_{\dot{e}}} \delta^2 dt$ – интеграл тока для проводника [15]; δ – плотность аксиального тока в проводнике; $t_{\dot{e}}$ – время, соответствующее моменту определения интеграла тока J_c .

Используя на основании закона Ома при принятых допущениях классическое соотношение $R = l/S\gamma$ [25], где γ – удельная электропроводимость материала проводника, выражение (1) запишем в виде:

$$W_{\dot{O}} = lS J_c / \gamma. \quad (2)$$

Тогда из (2) и условия ЭВ проводника [15] следует следующее соотношение для приближенного определения основных геометрических характеристик электрически взрывающегося проводника:

$$l_{\dot{e}} = \frac{W_{\dot{e}} \gamma_{\dot{e}}}{J_{\dot{e}} S_{\dot{e}}}, \quad (3)$$

где $l_{\dot{e}}$, $S_{\dot{e}}$ – соответственно критические значения длины и поперечного сечения электрически взрывающегося проводника; $\gamma_{\dot{e}}$ – удельная электропроводимость материала проводника на начальной стадии его ЭВ; $W_{\dot{e}}$ – критическое значение электротепловой энергии, вводимой в электрически взрывающийся проводник; $J_{\dot{e}}$ – критическое значение интеграла тока для проводника при его ЭВ (при $\theta_0 = 20$ °С для алюминия $J_{\dot{e}} = 1,09 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$, а для меди $J_{\dot{e}} = 1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ [15]).

Одним из подтверждений достоверности выра-

жения (3) являются приведенные в [10] экспериментальные данные, которые свидетельствуют о том, что энергия взрыва цилиндрического проводника прямо пропорциональна его объему, т.е. произведению $l_{\dot{\epsilon}} \cdot S_{\dot{\epsilon}}$. При известных значениях запасенной в ГИН (ГИТ) электрической энергии $W_c \geq W_{\dot{\epsilon}}$, выбранном материале проводника и заданном значении его поперечного сечения $S = S_{\dot{\epsilon}}$ соотношение (3) позволяет однозначно выполнить приближенный выбор критической длины проводника $l_{\dot{\epsilon}}$. Следует заметить, что при окончательном выборе значений $l_{\dot{\epsilon}}$ необходимо пользоваться следующими двумя неравенствами. Первое - $l_{\dot{\epsilon}} > l_{\min}$, где l_{\min} - минимальное значение длины проводника, определяемое электрическим пробоем вдоль поверхности проводника до его ЭВ [7]. Второе - $l_{\dot{\epsilon}} < l_{\max}$, где l_{\max} - максимальное значение длины проводника, при котором проводник электрически не взрывается ($W_c < W_{\dot{\epsilon}}$).

Для нахождения значений $\gamma_{\dot{\epsilon}}$ и их дальнейшей подстановки в (3) при используемых допущениях можно воспользоваться следующим приближенным соотношением [15]:

$$\gamma_{\dot{\epsilon}} = \frac{\gamma_0}{[1 + \theta_{\dot{\epsilon}} c_0 \beta_0]}, \quad (4)$$

где γ_0 - удельная электропроводимость материала проводника до воздействия на него БИТ, т.е. при температуре окружающей воздушной среды, равной комнатной $\theta_0 = 20$ °С (для алюминия $\gamma_0 = 3,61 \cdot 10^7$ См/м; для меди $\gamma_0 = 5,81 \cdot 10^7$ См/м [15]); \tilde{n}_0 - удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материала проводника (для алюминия $\tilde{n}_0 = 2,7 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С; для меди $\tilde{n}_0 = 3,92 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С [15]); $\theta_{\dot{\epsilon}} = (\theta_m - \theta_0)$ - критическое превышение температуры материала проводника; θ_m - температура кипения материала проводника (для алюминия $\theta_m = 2450$ °С; для меди $\theta_m = 2590$ °С [26]); β_0 - тепловой коэффициент удельной электропроводимости материала проводника (для алюминия $\beta_0 = 2,14 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж; для меди $\beta_0 = 1,31 \cdot 10^{-9}$ м³/Дж [15]).

После элементарных преобразований из (3) получаем следующее простое выражение для аналитического определения минимальной критической плотности электротепловой энергии $W_{\dot{\epsilon}i}$ в электрически взрывающемся проводнике:

$$W_{\dot{\epsilon}i} = \frac{J_{\dot{\epsilon}}}{\gamma_{\dot{\epsilon}}}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что минимальная критическая плотность электротепловой энергии $W_{\dot{\epsilon}i}$ для взрывающегося проводника является практически неизменной величиной, зависящей только от свойств выбранного материала проводника, его начального и конечного теплового состояний. В таблице представлено вычисленное по (5) и (4) приближенное численное значение $W_{\dot{\epsilon}i}$ для медного проводника. Эти электро-

тепловые расчеты для медного проводника свидетельствуют о том, что аналитически полученное нами численное значение для $W_{\dot{\epsilon}i} = 4,76 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ близко к удельной энергии (теплоте) сублимации для меди, найденной экспериментально и равной $W_{\tilde{n}0} = 4,68 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ [6]. Заметим, что удельная энергия сублимации $W_{\tilde{n}0}$ представляет собой количество теплоты, необходимой для перевода единицы объема материала проводника в металлический пар, состоящий из нейтральных атомов [6,26]. В связи с этим введенную в данной работе величину $W_{\dot{\epsilon}i}$ можно трактовать как минимальную удельную энергию электротеплового разрушения материала проводника.

Знание $W_{\dot{\epsilon}i}$ позволяет найти минимальное значение запасаемой в ГИН (ГИТ) электрической энергии W_{cm} , приводящее к ЭВ проводника, в виде:

$$W_{cm} = l_{\dot{\epsilon}} S_{\dot{\epsilon}} W_{\dot{\epsilon}i}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что чем больше критические значения $l_{\dot{\epsilon}}$ и $S_{\dot{\epsilon}}$ для проводника, тем требуется и большее значение запасаемой в ГИН (ГИТ) электрической энергии, вызывающей его ЭВ. Для надежного обеспечения ЭВ проводника в разрядной цепи ГИН (ГИТ) необходимо выполнение следующего условия:

$$W_c > W_{cm}. \quad (7)$$

В адиабатическом режиме для скорости ввода критической плотности электротепловой энергии $dW_{\dot{\epsilon}i}/dt$ в электрически взрывающийся проводник имеем:

$$\frac{dW_{\dot{\epsilon}i}}{dt} = \frac{\delta_{\dot{\epsilon}}^2}{\gamma_{\dot{\epsilon}}}, \quad (8)$$

где $\delta_{\dot{\epsilon}}$ - критическое значение плотности тока во взрывающемся проводнике.

Автором ранее были выполнены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на определение минимальных амплитудных критических значений $\delta_{\dot{\epsilon}m} \leq \delta_{\dot{\epsilon}}$ для сплошных круглых алюминиевых и медных цилиндрических проводников, испытывающих воздействие рассматриваемых трех видов БИТ [27-29]. Результаты данных исследований для медного проводника представлены в таблице. Там же для случая, когда $\delta_{\dot{\epsilon}} = \delta_{\dot{\epsilon}m}$, приведены и результаты расчета по (8) и (4) значений $dW_{\dot{\epsilon}i}/dt$. Следует отметить, что в приведенной таблице для затухающего синусоидального разрядного тока ГИН (ГИТ) нами использованы наиболее характерные для сильнооточной импульсной техники численные значения безразмерного отношения α/ω (α, ω - соответственно коэффициент затухания и круговая частота разрядного тока ГИН (ГИТ) [25]), временные параметры для импульсного тока молнии приняты равными 2/50 мкс [27], а для тока КЗ промышленной частоты длительность его протекания $t_{\dot{\epsilon}C}$ была выбрана равной 0,1с [29].

Из теории нестационарной теплопроводности [30] для скорости нарастания температуры критического нагрева проводников $d\theta_{\dot{\epsilon}}/dt$ при их ЭВ получаем:

$$\frac{d\theta_{\dot{e}}}{dt} = c_0^{-1} \frac{dW_{\dot{e}i}}{dt} \quad (9)$$

Численные данные для минимальных значений $d\theta_{\dot{e}}/dt$, рассчитанные по (9) с привлечением выражений (8) и (4) применительно к медным проводникам при $\delta_{\dot{e}} = \delta_{\dot{e}m}$, указаны в таблице. Из (9) следует, что чем больше скорость ввода критической плотности электротепловой энергии $dW_{\dot{e}i}/dt$ в проводник, тем будет и выше скорость нарастания температуры его критического нагрева $d\theta_{\dot{e}}/dt$. Поэтому для достижения рекордных значений $d\theta_{\dot{e}}/dt$ в проводниках необходимо использовать максимально возможные в них значения плотности импульсного тока $\delta_{\dot{e}}$, т.е. предельные для разрядной цепи ГИН (ГИТ) амплитудные значения тока. Кроме того, в соответствии с данными, приведенными в таблице, временные параметры импульсного тока при этом должны характеризоваться максимально возможными значениями отношения α/ω , а значения частоты ω выбираться из соотношения $\omega \leq 2\pi(\mu_0 \gamma_{\dot{e}} S_{\dot{e}})^{-1}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Важной характеристикой процесса ЭВ проводников является время до их взрыва $t_{\dot{a}}$, равное времени от момента начала ввода электротепловой энергии $W_{\dot{e}}$ в проводник до момента формирования пикового электрического напряжения на нем, соответствующего моменту взрывного разрушения проводника [31]. Из (5) и (8) для времени до взрыва проводника $t_{\dot{a}}$ находим:

$$t_{\dot{a}} = W_{\dot{e}i} / \frac{dW_{\dot{e}i}}{dt} = \frac{J_{\dot{e}}}{\delta_{\dot{e}}^2} \quad (10)$$

Из (10) видно, что для уменьшения значений $t_{\dot{a}}$ необходимо увеличивать скорость ввода в проводник критической плотности электротепловой энергии $dW_{\dot{e}i}/dt$ и соответственно повышать критическую плотность тока $\delta_{\dot{e}}$ в проводнике. Причем, в случае применения для ЭВ проводника разрядного тока ГИН (ГИТ), изменяющегося по закону экспоненциально затухающей синусоиды, для получения наименьших значений $t_{\dot{a}}$ его затухание (отношение α/ω) и одновременно токовую амплитуду требуется выбирать наибольшими (см. таблицу). Согласно (10) для выбранного материала проводника, т.е. заданного для проводника критического значения интеграла тока $J_{\dot{e}}$, значение $t_{\dot{a}}$ определяется только значением критической плотности тока $\delta_{\dot{e}}$ в проводнике. Чем больше амплитуда $\delta_{\dot{e}}$ для проводника, тем меньше его $t_{\dot{a}}$. Для получения минимальных значений $t_{\dot{a}}$ и соответственно предельных временных характеристик сверхскоростных размыкателей силовоточных электрических цепей [15] для взрывающегося проводника необходимо создавать максимально возможную токовую перегрузку, т.е. использовать следующее условие:

$$\delta_{\dot{e}} > \delta_{\dot{e}m} \quad (11)$$

В этом случае при принятых нами допущениях и известном предельном значении амплитуды I_m импульсного тока $i_{\dot{d}}$ в разрядной цепи ГИН (ГИТ) численное значение амплитуды $\delta_{\dot{e}}$ может быть найдено из соотношения:

$$\delta_{\dot{e}} = \frac{i_{\dot{d}}}{S_{\dot{e}}} \quad (12)$$

Таблица

Вид воздействующего на медный проводник БИТ		Минимальное амплитудное значение критической плотности тока $\delta_{\dot{e}m}$ для медного проводника, 10^{11} А/м ²	Критическая плотность электротепловой энергии $W_{\dot{e}i}$ для медного проводника, 10^{10} Дж/м ³	Скорость ввода в медный проводник критической плотности электротепловой энергии $dW_{\dot{e}i}/dt$, 10^{14} Дж/м ³ ·с	Скорость нарастания температуры критического нагрева медного проводника $d\theta_{\dot{e}}/dt$, 10^6 °С/с	Время до взрыва медного проводника $t_{\dot{a}}$, 10^{-6} с
Затухающий синусоидальный разрядный ток ГИН (ГИТ)	$\alpha/\omega = 0,057$	0,86	4,76	18,08	461,2	26,3
	$\alpha/\omega = 0,095$	1,0	4,76	24,45	623,4	19,5
	$\alpha/\omega = 0,185$	1,15	4,76	32,33	824,4	14,7
Апериодический импульсный ток молнии 2/50 мкс		0,73	4,76	13,03	332,2	36,6
Ток КЗ промышленной частоты 50 Гц		0,01	4,76	0,0025	0,062	$1,9 \cdot 10^5$

Определенное при одной и той же плотности тока $\delta_{\bar{e}}$ по (10) значение $t_{\bar{a}}$ для алюминиевого проводника оказывается в 1,79 раза меньше, чем для медного. Это соответствует результатам экспериментов по ЭВ цилиндрических проводников, представленным в [10].

Отметим, что приведенное в таблице расчетное значение $t_{\bar{a}}$ для медного цилиндрического проводника, подверженного воздействию затухающего синусоидального разрядного тока ГИН (ГИТ) в режиме обеспечения в нем минимального амплитудного значения критической плотности тока $\delta_{\bar{e}m}$, хорошо согласуется как с данными численного расчета импульсного нагрева БИТ сплошной медной жилы радиочастотного кабеля типа РК 75-7-15 до температуры ее плавления и выше, так и с экспериментальными результатами исследований автора ее начальной стадии электровзрывного разрушения [28]. Кроме того, полученная аналитическая зависимость (10) для $t_{\bar{a}}$ от плотности тока в проводнике в виде $1/\delta_{\bar{e}}^2$ была экспериментально подтверждена в [31], а результаты расчета по ней времени до взрыва $t_{\bar{a}}$ сплошных круглых медных проводников удовлетворительно согласуются с данными экспериментов по исследованию начальной стадии ЭВ цилиндрических проводников в разрядной цепи ГИТ, приведенными в [6].

Определив по формуле (10) значение $t_{\bar{a}}$, выполним необходимый для выражения (3) уточненный выбор критического сечения $S_{\bar{e}}$ электрически взрывающегося проводника из следующего соотношения:

$$S_{\bar{e}} = \sqrt{\frac{J_d}{J_{\bar{e}}}}, \quad (13)$$

где $J_d = \int_0^{t_{\bar{a}}} i_p^2 dt$ - интеграл действия тока i_p , протекающего по проводнику [5,27,32].

УПРОЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВ ПРОВОДНИКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БИТ

Анализ полученных результатов приближенного расчета ЭВ цилиндрических проводников с использованием материала известных процитированных нами работ по электрически взрывающимся проводникам позволяет дать приближенное представление о электротепловом механизме ЭВ в воздухе цилиндрического проводника, испытывающего воздействие БИТ. На первой стадии взрыва проводник большой плотностью импульсного тока $\delta_{\bar{e}}$ разогревается до температуры плавления и последующего кипения материала. Длительность этого процесса согласно формуле (10) обратно пропорциональна скорости ввода в проводник критической плотности электротепловой энергии $dW_{\bar{e}i} / dt$ и соответственно величине $\delta_{\bar{e}}^2$. Из-за интенсивного тепловыделения внутри жидкого материала проводника повышается давление. Внутренняя удельная тепловая энергия проводника при этом достигает в соответствии с выражением (5) значения кри-

тической плотности электротепловой энергии $W_{\bar{e}i}$, т.е. удельной энергии электротеплового разрушения материала проводника. На второй стадии взрыва проводника, когда гидродинамическое давление внутри жидкого материала проводника сравнивается с внешним магнитным давлением, наружные слои материала проводника начинают испаряться и разлетаться в радиальном направлении. Происходит увеличение поперечного сечения проводника, превращение материала проводника в мелкодисперсную массу, резкое уменьшение удельной электропроводимости этой массы по сравнению с удельной электропроводимостью материала проводника до воздействия на него БИТ и как следствие этого – потеря материалом проводника металлической проводимости. Последнее вызывает быстрый рост активного сопротивления разрушенного материала проводника, уменьшение (спад) разрядного тока ГИН (ГИТ) и пикообразное возрастание электрического напряжения на образовавшемся вместо проводника разрядном промежутке, экспериментально зафиксированное многочисленными исследователями (в том числе и автором) явления ЭВ и достигающее своего максимального значения в момент взрывообразного разрушения проводника.

ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная математическая модель ЭВ в воздухе немагнитных цилиндрических проводников под воздействием БИТ, основанная на теоретически развитом в данной работе положении о том, что механизм электровзрывного разрушения проводника определяется скоростью ввода в него критической плотности электротепловой энергии $dW_{\bar{e}i} / dt$, которая по формуле (8) аналитически вычисляется через значение критической плотности импульсного тока $\delta_{\bar{e}}$ в проводнике и критическое значение удельной электропроводимости материала $\gamma_{\bar{e}}$ проводника.

2. Приведены данные по приближенному выбору согласно формуле (4) критических значений удельной электропроводимости материала $\gamma_{\bar{e}}$ проводника и минимальных амплитудных значений критической плотности импульсного тока $\delta_{\bar{e}m} \leq \delta_{\bar{e}}$ в сплошном круглом медном цилиндрическом проводнике для трех наиболее распространенных видов БИТ – затухающего синусоидального разрядного тока ГИН (ГИТ), аperiodического импульсного тока молнии 2/50 мкс и тока КЗ промышленной частоты 50 Гц.

3. Получено простое выражение (5) для приближенного определения минимальных значений критической плотности электротепловой энергии $W_{\bar{e}i}$, вводимой в разрядной цепи ГИН (ГИТ) в электрически взрывающийся проводник, которая практически неизменна для него и представляет собой минимальную удельную энергию электротеплового разрушения материала проводника.

4. Показано, что при ЭВ проводников их такие геометрические характеристики как критическая длина $l_{\bar{e}}$ и критическое поперечное сечение $S_{\bar{e}}$ в при-

ближенном виде могут быть при известных значениях запасенной в ГИН (ГИТ) электрической энергии $W_c \geq W_\varepsilon$ и выбранном материале проводников сравнительно легко аналитически определены из соотношений (3), (4) и (13).

5. Определена согласно выражению (9) расчетная скорость нарастания температуры критического нагрева проводника $d\theta_\varepsilon / dt$, соответствующая скорости ввода в проводник критической плотности электротепловой энергии $dW_{\varepsilon r} / dt$ и приводящая к его ЭВ.

6. На основании предложенной упрощенной математической модели ЭВ проводников получена простая формула (10) для аналитического расчета времени до их взрыва $t_{\bar{a}}$, удовлетворительно согласующаяся с известными данными экспериментальных исследований начальной стадии ЭВ цилиндрических проводников, указанными в [6].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Техника* больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова. М.: Атомиздат, 1970.-472с.
- [2] *Накопление и коммутация энергии* больших плотностей/ Пер. с англ. под ред. В. Бостика, В. Нарди, О. Цукера. М.: Мир, 1979.-474с.
- [3] *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов.-М.: Сов. радио, 1974.-256с.
- [4] *Шнеерсон Г.А.* Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов.-Л.: Энергоиздат.-1981.-199с.
- [5] *Кузнецкин И.П.* Испытательные установки и измерения на высоком напряжении.-М.: Энергия, 1980.-136с.
- [6] *Столович Н.Н.* Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карнюшина.-Минск: Наука и техника, 1983.-151с.
- [7] *Кремнев В.В., Месяц Г.А.* Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике.-Новосибирск: Наука, 1987.-226с.
- [8] *Кварцхава И.Ф., Плотно А.А., Чернов А.А., Бондаренко В.В.* Электрический взрыв металлических проволок// Журнал экспериментальной и теоретической физики.-1956.-т.30.-вып. 1.-С.42-53.
- [9] *Взрывающиеся проволочки/* Пер. с англ. под ред. А.А. Рухадзе.-М.: ИЛ, 1963.-342с.
- [10] *Электрический взрыв проводников /* Пер. с англ. под ред. А.А. Рухадзе, И.С. Шпигеля.-М.: Мир, 1965.-360с.
- [11] *Лебедев С.В.* Возможность использования электрического взрыва проволочек для исследования металлов при высоких температурах// Теплофизика высоких температур.-1968.-т.6.-№1.-С.157-159.
- [12] *Гулый Г.А., Малюшевский П.П.* Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах.-Киев: Наукова думка, 1977.-176с.
- [13] *Махорин Б.И., Золотухин В.Д., Гревцов Н.В.* Влияние параметров разрядного контура на формирование пленок при напылении электрическим взрывом// Физика и химия обработки материалов.-1973.-№2.-С.60-64.
- [14] *Лурье А.И.* Электрическое взрывание зарядов.-М.: Недра, 1973.-270с.
- [15] *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля/ Пер. с англ.-М.: Мир.-1972.-392с.
- [16] *Андреанов В.В., Баев В.П., Лебедев С.В., Савватимский А.И.* Сверхпроводящий импульсный соленоид, коммутируемый методом электрического взрыва// Доклады АН СССР.-1981.-т.256.-№5.-С.1119-1122.
- [17] *Кульгавчук В.М.* Получение мощных радиоимпульсов при помощи электрического взрыва металлических проволок// Приборы и техника эксперимента.-1965.-№1.-С.132-137.
- [18] *Александров А.Ф., Рухадзе А.А.* Физика сильноточных электроразрядных источников света.-М.: Атомиздат.-1976.-184с.
- [19] *Гулый Г.А.* Научные основы разрядноимпульсных технологий.-Киев: Наукова думка, 1990.-208с.
- [20] *Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К.* О применении высоковольтного кабельного трансформатора в разрядной цепи генератора больших импульсных токов молнии// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.-Харків: НТУ "ХПІ".-2003.-№1, т.1.-С.131-136.
- [21] *Бакулин Ю.Д., Куропатенко В.Ф., Лучинский А.В.* Магнитогидродинамический расчет взрывающихся проводников// Журнал технической физики.-1976.-т.46.-вып. 9.-С.1963-1969.
- [22] *Котов Ю.А., Седой В.С.* Подobie при электрическом взрыве проводников/ В кн.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков.-Новосибирск: Наука, 1976.-С.56-59.
- [23] *Намитков К.К., Хмельницкий Р.С., Аникеева К.Н.* Плавкие предохранители.-М.: Энергия, 1979.-176с.
- [24] *Столович Н.Н., Минуцкая Н.С.* Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов.-Минск: Наука и техника, 1975.-160с.
- [25] *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники.-Л.: Энергоиздат, 1981, т.2.-415с.
- [26] *Кухлинг Х.* Справочник по физике/ Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина.-М.: Мир, 1982.-520с.
- [27] *Баранов М.И.* Термическая стойкость неизолированных проводов при прямом ударе молнии// Технічна електродинаміка.-1997.-№6.-С.9-15.
- [28] *Баранов М.И., Бондина Н.Н., Бочаров В.А.* Моделирование нелинейной электротепловой задачи для цилиндрических изотропных токопроводов электрофизических установок при получении больших импульсных токов// Технічна електродинаміка.-1998.-№4.-С.19-22.
- [29] *Баранов М.И., Бондина Н.Н., Даценко В.П.* Математическое моделирование нестационарной нелинейной электротепловой задачи для цилиндрических токопроводов силовых электроустановок при коротком замыкании// Технічна електродинаміка.-2002.-№6.-С.8-12.
- [30] *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.-599с.
- [31] *Лебедев С.В.* О механизме электрического взрыва металла// Теплофизика высоких температур.-1980.-т.18.-№2.-С.273-278.
- [32] *Баранов М.И.* Сравнение двух моделей для электротепловых расчетов цилиндрических проводников при воздействии на них больших импульсных токов// Технічна електродинаміка.-1999.-№3.-С.14-19.

Поступила 21.04.2003