

УДК 532.52; 533.95

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ “ОТСЕЧКИ” ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТОКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КУМУЛЯТИВНЫЕ СТРУИ

С. В. Федоров

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005 Москва, Россия
E-mail: sergfed-64@mail.ru

Для повышения эффективности токового воздействия на металлические кумулятивные струи предлагается использовать “отсечку” емкостного накопителя в момент, когда напряжение на нем при протекании периодического разряда становится равным нулю. Показано, что данный прием позволяет исключить перезарядку емкостного накопителя и добиться лучшей согласованности токового импульса со временем движения различных участков кумулятивной струи через межэлектродный промежуток. Исследования проводились с использованием расчетной методики, в которой в качестве возможных физических механизмов снижения проникающей способности кумулятивных струй при мощном токовом воздействии рассматривались развитие магнитогидродинамической неустойчивости струи и диспергирование ее материала.

Ключевые слова: взрыв, кумулятивная струя, глубина проникания, импульс тока, электродинамическое воздействие, емкостный накопитель, разрядный контур.

DOI: 10.15372/PMTF20160202

При пропускании по металлическим кумулятивным струям (КС) мощного импульса электрического тока возможно возникновение механических и термических эффектов, приводящих к разрушению струи и уменьшению глубины ее проникания в преграду [1–3]. Для реализации подобного электродинамического воздействия (ЭДВ) на КС применяются пара металлических пластин-электродов, разделенных слоем диэлектрика, и подающий на них напряжение источник электрической энергии, в качестве которого, как правило, используется конденсаторная батарея (рис. 1, *a*). Разделенные диэлектриком пластины-электроды устанавливаются перед защищаемой преградой и после замыкания при пробитии струей диэлектрика осуществляют подвод электрической энергии к участкам струи, движущимся в межэлектродном промежутке.

Одной из основных проблем, требующих решения при реализации ЭДВ на КС для уменьшения пробивного действия кумулятивных зарядов (КЗ), является минимизация габаритов и массы емкостного накопителя энергии, используемого для формирования мощного импульса электрического тока через КС [4–6]. В настоящей работе рассматривается один из возможных способов повышения эффективности токового воздействия на КС, позволяющий несколько уменьшить энергию емкостного накопителя (а соответственно его

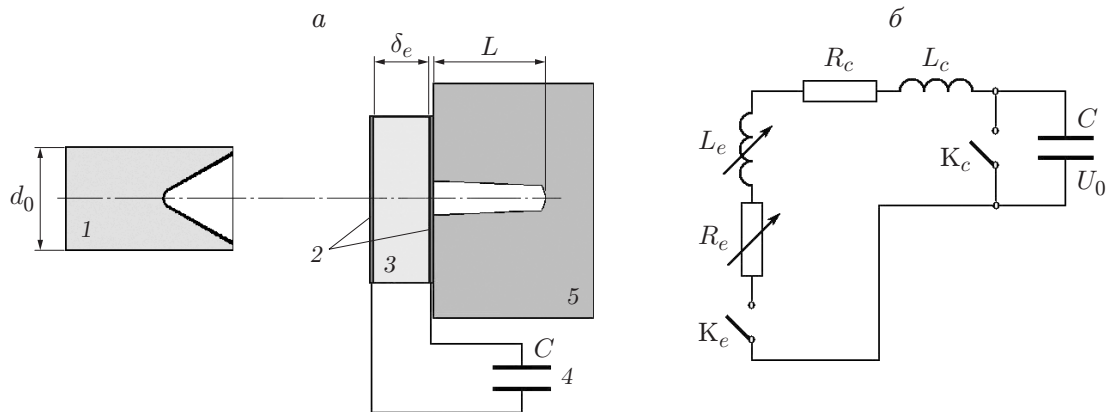


Рис. 1. Схема ЭДВ на КЗ:

a — двухэлектродный элемент, *б* — разрядный контур двухэлектродного элемента ЭДВ с емкостным накопителем; 1 — кумулятивный заряд, 2 — пластины-электроды, 3 — диэлектрик, 4 — емкостный накопитель энергии, 5 — защищаемая преграда

размеры и массу), необходимую для существенного уменьшения глубины L проникания струи в преграду.

Исследования проводились с использованием расчетной методики [7–9], в которой в качестве возможных физических механизмов снижения проникающей способности КС при мощном ЭДВ рассматривались развитие магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости КС перетяжечного типа и диспергирование ее материала с радиальным рассеиванием [10–14]. Первый из указанных механизмов приводит к уменьшению эффективной длины КС вследствие ее ускоренного распада на отдельные элементы, которые при достаточной мощности ЭДВ могут дополнительно сжиматься в осевом направлении с увеличением их поперечного размера (так называемое явление дискообразования) [10, 11]. Второй механизм может реализовываться при выходе участков КС из межэлектродного промежутка, когда происходит резкое прекращение действия на струю сжимающих электромагнитных сил, в результате чего создаются условия для диспергирования ее материала (к этому моменту существенно нагретого электрическим током вследствие выделения джоулева тепла и поэтому практически полностью лишенного прочности) [12–14]. Диспергирование материала КС, сопровождаемое его радиальным рассеиванием, приводит к уменьшению средней плотности струи. Поскольку пробивное действие КС определяется ее длиной и плотностью материала, и при развитии МГД-неустойчивости, и при радиальном рассеивании материала глубина проникания КС в преграду уменьшается.

Результаты расчетов пробивного действия КЗ при токовом воздействии на КС с использованием разработанной методики удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными [15, 16] при изменении как параметров КС, так и параметров пропускаемого по ним токового импульса в широком диапазоне. Это позволяет прогнозировать с использованием данной методики возможные характеристики ЭДВ для уменьшения глубины проникания в преграду КЗ различного размера. В проведенных расчетах по определению возможности повышения эффективности ЭДВ рассматривался КЗ диаметром $d_0 = 93$ мм с глубиной проникания КС в гомогенную стальную преграду $L = 550 \div 600$ мм. Конструкция системы ЭДВ полагалась двухэлектродной (см. рис. 1, *a*). Источником электрической энергии, обеспечивающим реализацию ЭДВ, являлась конденсаторная батарея.

На рис. 2 для двух величин межэлектродного промежутка $\delta_e = 50, 75$ мм приведены зависимости силы тока J от времени t , при которых обеспечивается полное разрушение

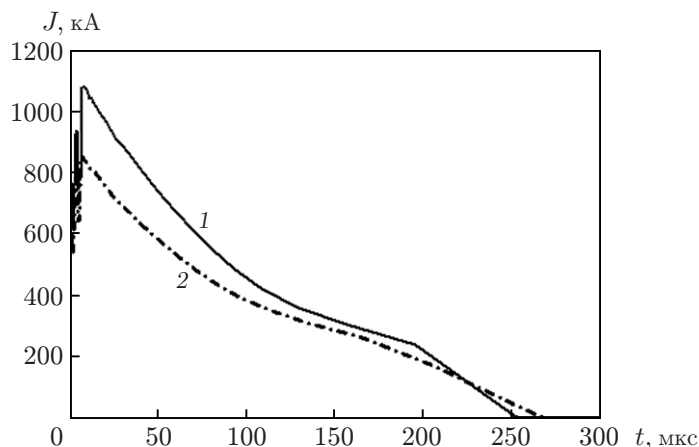


Рис. 2. Зависимость силы тока, необходимой для разрушения различных участков КС, от времени для различных величин межэлектродного промежутка:

1 — $\delta_e = 50$ мм, 2 — $\delta_e = 75$ мм

всей КС рассматриваемого КЗ при минимальных энергозатратах (остаточное пробитие КЗ при этом практически отсутствует) (“идеальные” законы изменения тока). Данные зависимости рассчитывались следующим образом. Для каждого элемента КС, формирующегося из различных частей кумулятивной облицовки, определялось время его прихода в межэлектродный промежуток, отсчитываемое с момента замыкания электродов головным элементом струи. Одновременно для рассматриваемого элемента КС подбиралась минимальная сила тока, при которой глубина проникания составляла незначительную долю начальной длины элемента, принимаемой равной длине участка кумулятивной облицовки, из которой данный элемент сформировался. В результате получалась зависимость минимальной “разрушающей” силы тока для различных элементов КС от времени их прихода в межэлектродный промежуток. На рис. 2 видно, что для эффективного ЭДВ на КС требуется очень быстрое (практически мгновенное) увеличение силы разрядного тока до значений порядка 1 МА с последующим ее монотонным относительно медленным уменьшением в течение приблизительно 250 мкс. Необходимость быстрого и значительного увеличения силы тока в начале разряда обусловлена малым временем пребывания головных элементов КС, имеющих высокую скорость, в межэлектродном промежутке (эффективность ЭДВ на участок КС зависит от силы пропускаемого по нему тока и времени его протекания). Для хвостовых участков КС с меньшей скоростью время токового воздействия увеличивается, поэтому для их разрушения требуется меньшая сила тока.

К некоторому уменьшению “разрушающей” силы тока приводит увеличение межэлектродного промежутка от $\delta_e = 50$ мм до $\delta_e = 75$ мм (см. рис. 2), что обусловлено, очевидно, соответствующим увеличением продолжительности ЭДВ на участки КС. Однако увеличивать межэлектродное расстояние можно лишь до определенного предела, так как при очень больших значениях δ_e могут ухудшаться условия протекания разряда, особенно если разрушение КС происходит непосредственно между электродами (в этом случае вследствие резкого увеличения межэлектродного сопротивления возможен даже “срыв” разряда). В расчетной методике влияние состояния КС в межэлектродном промежутке на параметры разряда и возможность его “срыва” не учитывались, поэтому межэлектродные расстояния выбирались близкими к реализованным в экспериментах с нормальным режимом протекания разрядного тока ($\delta_e \approx 1/2$ диаметра КЗ) [15, 16].

Так как “идеальные” кривые токового разряда (см. рис. 2) рассчитывались с использованием лишь условия полного разрушения различных участков КС, закон изменения

силы тока в реальной разрядной цепи системы ЭДВ, зависящий от ее параметров и параметров источника электрической энергии, в той или иной степени будет отклоняться от “идеального” с соответствующим снижением эффективности ЭДВ на КС. Параметры разрядного контура и источника электрической энергии необходимо выбрать таким образом, чтобы это уменьшение было минимальным и обеспечивало требуемую глубину проникания КС в преграду при минимальной энергии источника. Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи замкнутой участком КС двухэлектродной системы ЭДВ, запитываемой от конденсаторной батареи, включает индуктивность L_c и активное сопротивление R_c внешней части цепи (включая конденсаторную батарею), а также индуктивность L_e и активное сопротивление R_e межэлектродного промежутка (см. рис. 1, б). Роль ключа K_e , при замыкании которого происходит инициирование разряда емкостного накопителя, выполняет головной участок КС.

Полные индуктивность $L_s = L_c + L_e$ и активное сопротивление $R_s = R_c + R_e$ разрядной цепи оказывают влияние на форму токового импульса и соответственно на эффективность токового воздействия на КС. В расчетах опорные значения индуктивности L_s и активного сопротивления R_s контура принимались близкими к реализованным в экспериментах [16]: $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 5$ мОм. Изменениями индуктивности и активного сопротивления межэлектродного промежутка при движении через него различных участков КС (с различным поперечным сечением) в процессе протекания токового разряда пренебрегалось, так как эти изменения относительно малы. При постоянных значениях L_s , R_s изменение силы тока J в контуре (см. рис. 1, б) при разряде конденсаторной батареи емкостью C зависит от значения безразмерного параметра $\gamma = 0,5R_s\sqrt{C/L_s}$ [17]. При $\gamma < 1$ реализуется колебательный режим разряда:

$$J = \frac{U_0}{\sqrt{1-\gamma^2}} \sqrt{\frac{C}{L_s}} \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s}t\right) \sin\left(\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{L_s C}}t\right) \quad (1)$$

(U_0 — начальное напряжение на конденсаторной батарее). В случае $\gamma \geq 1$ разряд является аperiodическим и выражения для силы тока J в цепи имеют следующий вид:

— при $\gamma = 1$

$$J = \frac{U_0}{L_s} t \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s}t\right);$$

— при $\gamma > 1$

$$J = \frac{U_0}{\sqrt{\gamma^2-1}} \sqrt{\frac{C}{L_s}} \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s}t\right) \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\gamma^2-1}{L_s C}}t\right).$$

В соответствии с приведенными зависимостями эффективность токового воздействия на КС определяется следующими электротехническими параметрами установки: начальным напряжением U_0 , емкостью C конденсаторной батареи, индуктивностью L_s и активным сопротивлением R_s разрядного контура. Энергия, запасаемая емкостным накопителем и определяющая его размеры и массу, равна $W = 0,5CU_0^2$.

На рис. 3 для рассматриваемого КЗ показан вклад в пробитие элементов КС, формирующихся из различных частей кумулятивной облицовки (z — координата, отсчитываемая от вершины облицовки вдоль ее оси, h_0 — высота облицовки), а также распределение токов, протекающих по элементам КС в межэлектродном промежутке, при энергии конденсаторной батареи $W = 50$ кДж, межэлектродном расстоянии $\delta_e = 50$ мм, параметрах разрядного контура $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 5$ мОм и трех значениях емкости батареи: $C = 2, 4, 8$ мФ.

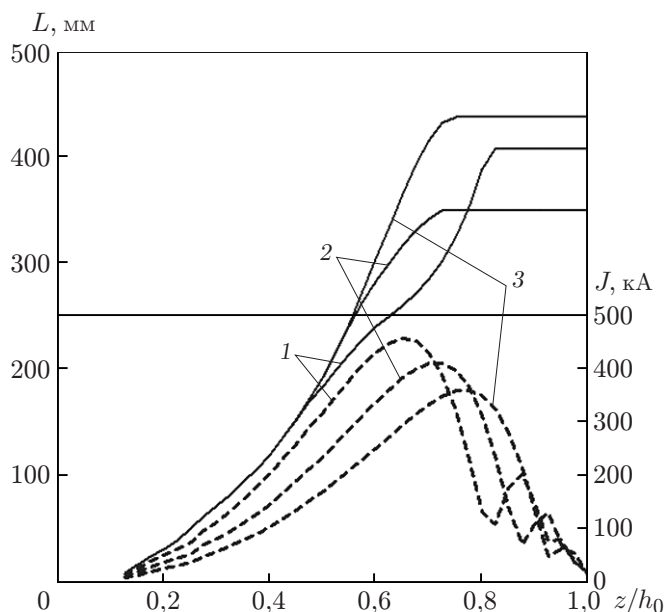


Рис. 3. Распределения силы тока (штриховые линии) и глубины пробития различными частями кумулятивной облицовки (сплошные линии) при $W = 50 \text{ кДж}$ (в отсутствие “отсечки” батареи), $\delta_e = 50 \text{ мм}$, $L_s = 0,25 \text{ мкГн}$, $R_s = 5 \text{ мОм}$ и различных значениях емкости конденсаторной батареи:

1 — $C = 2 \text{ мФ}$, 2 — $C = 4 \text{ мФ}$, 3 — $C = 8 \text{ мФ}$

От емкости конденсаторной батареи зависят амплитуда и длительность токового импульса. На рис. 3 видно, что наиболее существенное уменьшение глубины пробития КЗ достигается при $C = 4 \text{ мФ}$ ($L \approx 340 \text{ мм}$). При $C = 2 \text{ мФ}$ вследствие более быстрого увеличения силы тока и его амплитуды усиливается электродинамическое разрушение средней части КС (глубина пробития головным участком КС ($z/h_0 < 0,7$) при $C = 2 \text{ мФ}$ меньше, чем при $C = 4 \text{ мФ}$). Однако вследствие одновременного уменьшения продолжительности импульса снижается эффективность ЭДВ на хвостовые элементы КС, в результате чего глубина проникания КС в преграду при $C = 2 \text{ мФ}$ равна $L \approx 400 \text{ мм}$. При наибольшем рассмотренном значении емкости ($C = 8 \text{ мФ}$) глубина проникания в преграду увеличивается до значения $L = 430 \text{ мм}$, так как в данном случае вследствие очень медленного увеличения силы тока и уменьшения его амплитуды теряет пробивную способность только хвостовая часть КС ($z/h_0 > 0,7$) (см. рис. 3). Полученные результаты свидетельствуют о том, что при заданной энергии конденсаторной батареи существует оптимальное значение ее емкости, при котором глубина проникания КС в преграду минимальна. Наличие оптимального режима обусловлено изменением степени синхронизации токового импульса со временем прохождения через межэлектродный промежуток различных участков КС при различных значениях емкости накопителя. Как показывает анализ вклада различных элементов КС в пробивное действие, реализация ЭДВ с накопителем оптимальной емкости позволяет наиболее рационально распределить энергию токового импульса для разрушения головной и хвостовой частей КС.

Как следует из представленных на рис. 3 зависимостей, эффективность ЭДВ на КС можно повысить, если использовать конденсаторную батарею малой емкости, обеспечивая тем самым быстрое увеличение силы тока и его высокую амплитуду, однако замедляя при этом последующее уменьшение силы тока. В этом случае форма токовой кривой будет близка к “идеальной” (см. рис. 2), что позволяет “охватить” токовым воздействием

достаточной интенсивности как головной (за счет быстрого увеличения силы тока), так и хвостовой (за счет медленного уменьшения) участки КС. Это можно обеспечить путем “отсечки” (исключения из электрической цепи) источника электрической энергии непосредственно после передачи им энергии в нагрузку [17].

В настоящей работе для повышения эффективности токового воздействия на КС (с уменьшением энергии емкостного накопителя, требующейся для заданного уменьшения глубины проникания в преграду) предлагается использовать “отсечку” емкостного накопителя в момент, когда напряжение на нем при протекании периодического разряда становится равным нулю. Исключение конденсаторной батареи из разрядной цепи (“отсечка” батареи) осуществляется путем замыкания выходных разъемов (замыкания ключа K_c в схеме, приведенной на рис. 1, б). Это позволяет исключить перезарядку емкостного накопителя при токовом разряде с сопровождающим ее перетеканием электрической энергии из разрядной цепи обратно в емкостный накопитель.

При таком способе подвода электрической энергии параметры разрядного контура должны соответствовать случаю $\gamma < 1$ (колебательный режим разряда) с законом изменения разрядного тока в отсутствие “отсечки” конденсаторной батареи, описываемым соотношением (1). При этом напряжение на батарее меняется по закону

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s} t\right) \left[\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \sin\left(\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{L_s C}} t\right) + \cos\left(\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{L_s C}} t\right) \right]$$

и в первый раз принимает нулевое значение в момент времени

$$t_c = \sqrt{\frac{L_s C}{1-\gamma^2}} (\pi - \arcsin(\sqrt{1-\gamma^2})).$$

В соответствии с формулой (1) сила тока в данный момент времени равна

$$J_c = U_0 \sqrt{\frac{C}{L_s}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} (\pi - \arcsin(\sqrt{1-\gamma^2}))\right).$$

Если в данный момент производится замыкание выходных разъемов емкостного накопителя (см. рис. 1, б), то получается электрическая цепь с индуктивностью L_s и активным сопротивлением R_s , в которой течет ток силой J_c . Последующее затухание тока в такой цепи (при $t > t_c$) описывается соотношением [17]

$$J = J_c \exp\left(-\frac{R_s}{L_s} (t - t_c)\right). \quad (2)$$

Из (1), (2) следует, что в случае если при $t > t_c$ емкостный накопитель остается включенным в цепь, сила тока уменьшается более резко (вследствие изменения полярности напряжения на накопителе при его перезарядке) и после достижения ее нулевого значения ток меняет направление на противоположное. При “отсечке” накопителя сила тока постепенно монотонно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю. Таким образом, “отсечка” конденсаторной батареи в момент, когда напряжение равно нулю, позволяет более эффективно воздействовать на КС за счет “растягивания” токового импульса. Однако использование данного приема возможно лишь при условии, что параметры разрядной цепи обеспечивают колебательный режим разряда (при апериодическом разряде смены полярности напряжения на емкостном накопителе не происходит, оно монотонно уменьшается, асимптотически стремясь к нулю).

На рис. 4 приведены распределения силы тока и глубины пробития различными частями кумулятивной облицовки при энергии накопителя $W = 100$ кДж, его емкости

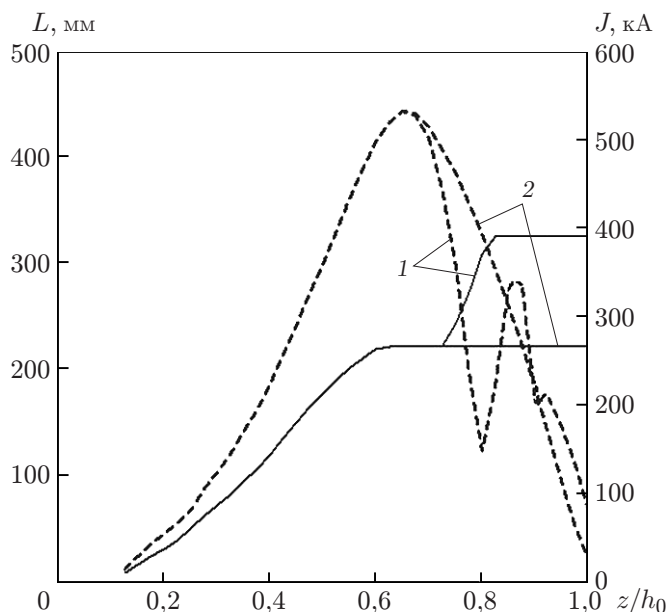


Рис. 4. Распределения силы тока (штриховые линии) и глубины пробития различными частями кумулятивной облицовки (сплошные линии) при $W = 100$ кДж, $C = 0,9$ мФ, $\delta_e = 50$ мм, $L_s = 0,5$ мкГн, $R_s = 5$ мОм в отсутствие (1) и при реализации (2) “отсечки” емкостного накопителя

$C = 0,9$ мФ, межэлектродном расстоянии $\delta_e = 50$ мм и параметрах разрядного контура $L_s = 0,5$ мкГн, $R_s = 5$ мОм в отсутствие и при реализации “отсечки” (так как при движении элементов КС в межэлектродном промежутке сила тока в цепи может существенно измениться, на рис. 4 для каждого элемента указано ее среднее по модулю значение).

На рис. 4 видно, что в отсутствие “отсечки” сила тока при движении между пластинами-электродами хвостовой части КС ($z/h_0 > 0,7$) немонотонно изменяется (резко уменьшается, увеличивается и вновь уменьшается). Это соответствует смене направления тока с его переходом через нулевое значение в тот момент, когда еще не вся КС прошла через межэлектродный промежуток. В результате ЭДВ на хвостовой участок КС оказывается слабым, и глубина пробития КЗ в данном случае приблизительно равна 325 мм. “Отсечка” конденсаторной батареи позволяет “охватить” хвостовые элементы КС токовым воздействием достаточной интенсивности, полностью лишая их пробивной способности, что уменьшает глубину пробития КЗ до 220 мм.

На основе разработанной методики для случаев реализации и отсутствия “отсечки” емкостного накопителя проведены расчеты по определению его емкости, обеспечивающей максимальное уменьшение глубины пробития КЗ при фиксированном значении энергии накопителя (рис. 5). Кроме того, при задании значений индуктивности L_s и активного сопротивления R_s разрядного контура наряду с их опорными значениями (0,25 мкГн и 5 мОм соответственно) рассматривалось еще два значения — в два раза больше и меньше. Межэлектродный промежуток выбирался равным $\delta_e = 50$ мм. Сплошные линии на рис. 5 показывают глубину проникания КС в преграду в отсутствие “отсечки” накопителя, штрихпунктирные — при ее осуществлении. Участки, на которых эти линии совпадают, соответствуют реализации аperiодических режимов разряда накопителя при $\gamma \geq 1$ (как указывалось выше, при аperiодическом разряде проводить “отсечку” накопителя нецелесообразно).

Из рис. 5 следует, что для обоих случаев (с “отсечкой” и без “отсечки” накопителя)

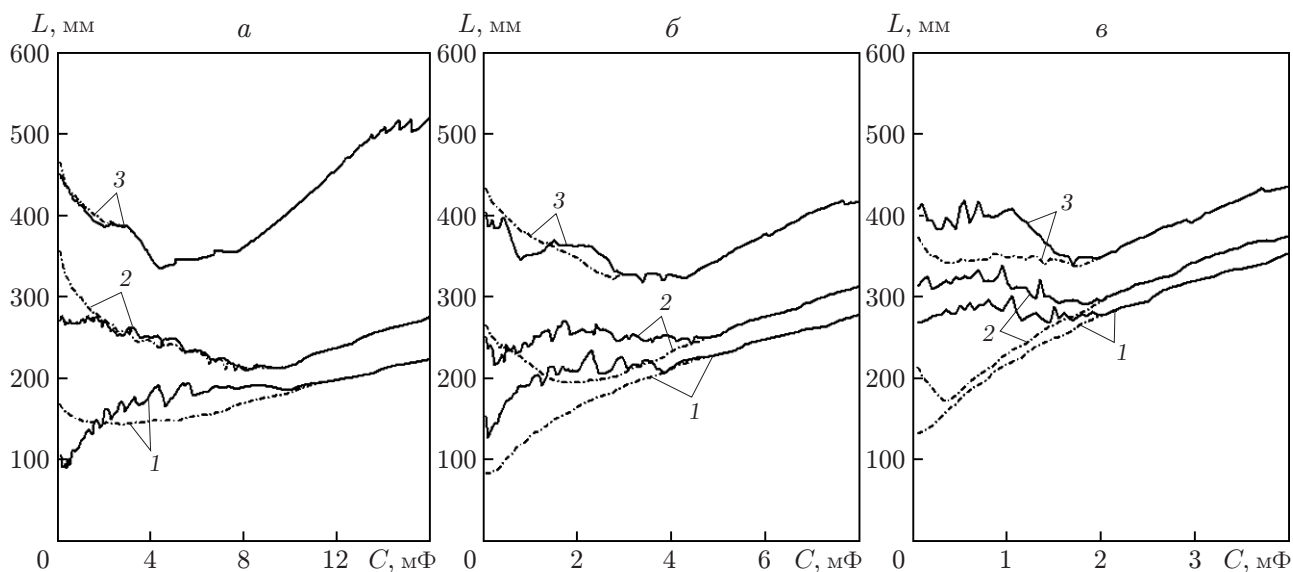


Рис. 5. Зависимость глубины пробития КЗ от емкости накопителя в отсутствие (сплошные линии) и при реализации (штрихпунктирные линии) его “отсечки” при $W = 100$ кДж и различных параметрах разрядного контура:
 а — $L_s = 0,125$ мкГн; б — $L_s = 0,25$ мкГн; в — $L_s = 0,5$ мкГн; 1 — $R_s = 2,5$ мОм, 2 — $R_s = 5$ мОм, 3 — $R_s = 10$ мОм

эффективность ЭДВ увеличивается при уменьшении активного сопротивления цепи. Это увеличение более значительно при уменьшении общей индуктивности разрядного контура. При этом с увеличением индуктивности цепи уменьшается эффективность ЭДВ. Применение “отсечки” позволяет дополнительно уменьшить глубину пробития КЗ (по сравнению со случаем отсутствия “отсечки”). При этом чем больше индуктивность разрядной цепи и меньше ее активное сопротивление, тем меньше глубина пробития КЗ. Очевидно, это обусловлено увеличением постоянной времени затухания тока L_s/R_s (2) в цепи с “отсеченной” конденсаторной батареей, что обеспечивает более плавное уменьшение силы тока после “отсечки”.

Согласно расчетам глубины пробития КЗ, проведенным при различных значениях энергии емкостного накопителя, ЭДВ с “отсечкой” конденсаторной батареи является более эффективным при меньшей энергии батареи. Например, при $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 2,5$ мОм, $C = 2$ мФ, $W = 100$ кДж (см. рис. 5, б) глубина пробития КЗ без “отсечки” накопителя равна $L \approx 220$ мм, с “отсечкой” — $L \approx 180$ мм (различие составляет 18 %). При уменьшении энергии накопителя до $W = 50$ кДж в системе ЭДВ с теми же параметрами были получены значения глубины пробития КЗ в отсутствие и при реализации “отсечки” накопителя 320 и 220 мм соответственно (различие составляет приблизительно 30 %). При увеличении энергии конденсаторной батареи до значения $W = 200$ кДж в той же системе ЭДВ значения глубины проникания различаются только на 10 % ($L \approx 130$ мм в отсутствие “отсечки”, $L \approx 120$ мм при ее реализации).

Аналогичные расчеты были проведены также при межэлектродном расстоянии $\delta_e = 75$ мм. Результаты показывают, что с увеличением межэлектродного промежутка эффективность ЭДВ несколько увеличивается, однако вследствие использования “отсечки” емкостного накопителя глубина пробития КЗ уменьшается менее существенно.

На рис. 5 также видно, что при малых значениях индуктивности и активного сопротивления разрядного контура преимущество может иметь система ЭДВ без “отсечки”

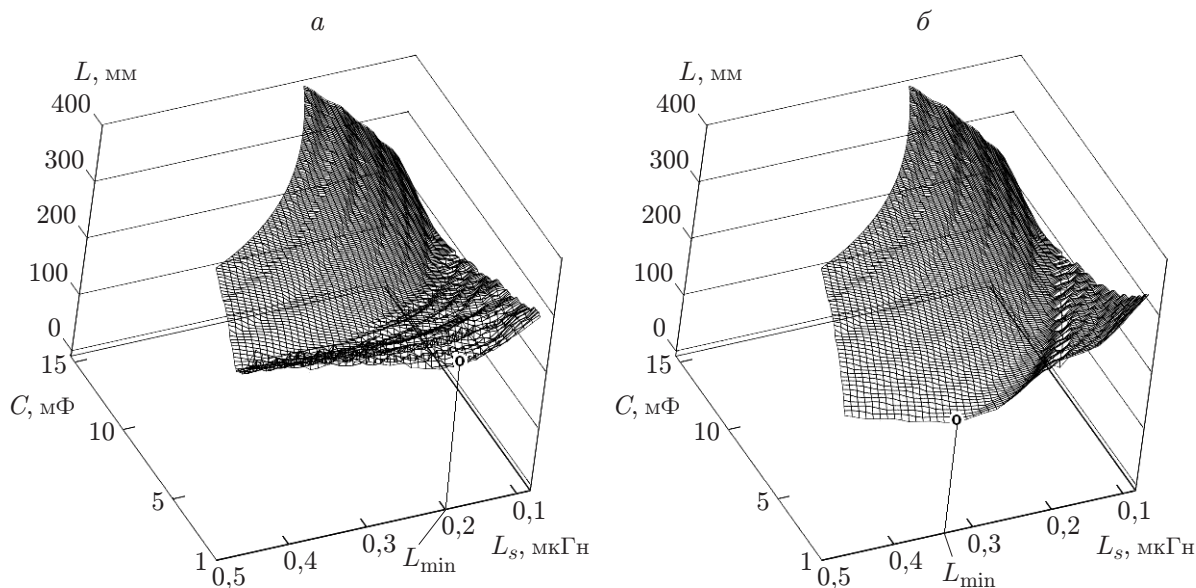


Рис. 6. Зависимость глубины пробития КЗ от емкости конденсаторной батареи и индуктивности разрядного контура при $W = 100$ кДж:

a — в отсутствие “отсечки” батареи, *б* — при реализации “отсечки” батареи

накопителя энергии. Это преимущество наблюдается при малых значениях емкости накопителя, когда реализуется высокочастотный колебательный режим его разряда с многократной за время движения КС в межэлектродном промежутке сменой направления тока, сопровождающейся его переходом через нулевое значение. Однако практическое применение таких режимов ЭДВ вряд ли возможно по двум причинам. Во-первых, обнуление тока в разрядной цепи при движении через межэлектродный промежуток КС может привести к срыву разряда. Так как КС пробивает в пластинах-электродах отверстия, размер которых существенно превышает ее толщину, замыкание цепи элемента ЭДВ происходит через дуговой разряд между струей и краями отверстий в пластинах. При переходе тока через нулевое значение дуга может погаснуть. Во-вторых, при заданной энергии емкостного накопителя уменьшение его емкости приводит к необходимости повышения начального напряжения на накопителе, что на практике ограничивается условиями обеспечения надежной электроизоляции оборудования. Предельно допустимым значением напряжения зарядки накопителя в реальных системах ЭДВ является значение, не превышающее 10 кВ. При данном ограничении и наименьшем из рассмотренных значений энергии накопителя $W = 50$ кДж его емкость не может быть меньше 1 мФ.

Как указывалось выше, для повышения эффективности ЭДВ активное сопротивление разрядного контура R_s необходимо минимизировать. Индуктивность L_s и емкость накопителя C рассчитывались с целью определения их рационального сочетания, обеспечивающего минимальную глубину пробития КЗ при заданной энергии емкостного накопителя. Рассматривались варианты с “отсечкой” и без “отсечки” накопителя. Активное сопротивление разрядной цепи принималось равным опорному значению $R_s = 5$ мОм, а межэлектродное расстояние составляло $\delta_e = 50$ мм. На рис. 6 результаты, полученные при $W = 100$ кДж, представлены как функции параметров L_s и C . Видно, что при “отсечке” конденсаторной батареи минимально достижимая при данной энергии батареи глубина проникания $L_{\min} \approx 175$ мм (см. рис. 6,б) меньше, чем в отсутствие “отсечки” $L_{\min} \approx 225$ мм (см. рис. 6,а). При этом в обоих случаях минимальная глубина проникания обеспечивается при минимальном из рассмотренного диапазона значений емкости

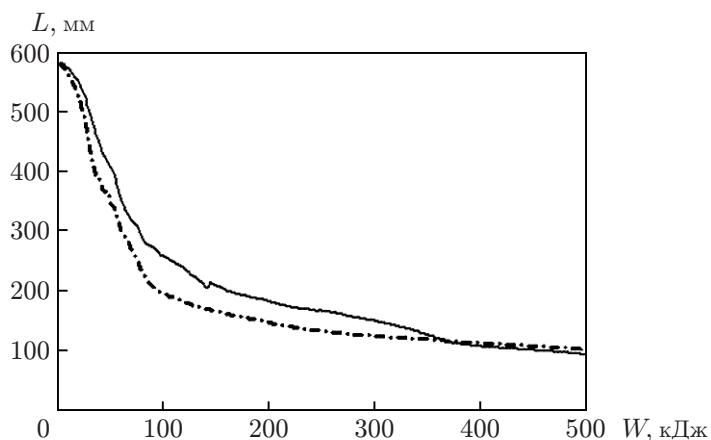


Рис. 7. Зависимость глубины пробития КЗ от энергии емкостного накопителя в отсутствие (сплошная линия) и при реализации (штрихпунктирная линия) его “отсечки”

конденсаторной батареи ($C = 1$ мФ). Оптимальное значение индуктивности разрядного контура, обеспечивающее минимальную глубину проникания, в случае “отсечки” значительно выше ($L_s \approx 0,33$ мкГн) (см. рис. 6,б), чем в случае ее отсутствия ($L_s \approx 0,2$ мкГн) (см. рис. 6,а).

Зависимость глубины пробития КЗ от энергии емкостного накопителя показана на рис. 7. Следует отметить существенную неравномерность достигаемого эффекта по мере ее увеличения. При $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 5$ мОм, $C = 2$ мФ, $\delta_e = 50$ мм в случае “отсечки” накопителя глубина пробития КЗ уменьшается до значений $L = 180 \div 200$ мм, если энергия батареи равна $W = 100$ кДж. При увеличении энергии накопителя до значения $W = 500$ кДж глубина пробития дополнительно уменьшается не более чем на 100 мм. На рис. 7 также видно, каким образом проявляются преимущества системы ЭДВ с “отсечкой” конденсаторной батареи при различных значениях ее энергии: дополнительное уменьшение глубины пробития КЗ достигается при малых значениях энергии накопителя ($W \leq 300$ кДж) и нивелируется при ее увеличении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский А. И., Пляшкевич Л. Н., Шувалов А. М., Бродский А. Я. Экспериментальные исследования разрушения кумулятивной струи импульсом тока // Журн. техн. физики. 1994. Т. 64, вып. 2. С. 76–82.
2. Федоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В. и др. О возможностях управления кумулятивным эффектом взрыва с помощью электромагнитных воздействий // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 126–145.
3. Бабкин А. В., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В. Численное моделирование и определение закономерностей деформирования и разрушения металлических кумулятивных струй // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 10. С. 26–36.
4. Федоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В. и др. Прогнозирование пробивной способности металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока // Журн. техн. физики. 2003. Т. 73, вып. 7. С. 28–36.
5. Швецов Г. А., Матросов А. Д., Бабкин А. В. и др. Электродинамическая защита от кумулятивных боеприпасов // Вопр. оборон. техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2004. Вып. 11/12. С. 40–53.

6. Швецов Г. А., Матросов А. Д., Бабкин А. В. и др. Основы электродинамической защиты от кумулятивных средств поражения // Изв. Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук. 2005. Вып. 1. С. 119–131.
7. Федоров С. В. Электродинамическая защита от кумулятивных средств поражения: физические аспекты функционирования // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 3. С. 79–100.
8. Федоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В. и др. Выбор параметров электродинамической защиты против кумулятивных средств поражения танков // Оборон. техника. 2002. № 1/2. С. 26–36.
9. Федоров С. В., Ладов С. В. Мощный электроразряд как средство противокумулятивной защиты объектов // Вопр. оборон. техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. Вып. 9/10. С. 41–52.
10. Швецов Г. А., Матросов А. Д., Бабкин А. В. и др. Поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 19–25.
11. Федоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В. Развитие магнитогидродинамической неустойчивости на подвергающейся электродинамическому воздействию кумулятивной струе // Оборон. техника. 1998. № 1/2. С. 49–56.
12. Бабкин А. В., Кружков В. А., Луговой Э. В., Федоров С. В. Математическое моделирование растяжения кумулятивной струи при пропускании через нее электрического тока // Оборон. техника. 1993. № 9. С. 36–39.
13. Бабкин А. В., Колычев М. Е., Ладов С. В., Федоров С. В. О возможном механизме разрушения кумулятивной струи импульсом тока // Оборон. техника. 1995. № 4. С. 47–54.
14. Федоров С. В. Об эффекте рассеивания металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока // Журн. техн. физики. 2012. Т. 82, вып. 10. С. 18–30.
15. Матросов А. Д., Швецов Г. А. Экспериментальное исследование токовой неустойчивости кумулятивных струй // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 4. С. 9–14.
16. Павловский А. И., Пляшкевич Л. Н., Шувалов А. М., Бродский А. Я. Исследование некоторых особенностей процесса разрушения кумулятивной струи в сильноточном режиме // Журн. техн. физики. 1994. Т. 64, вып. 5. С. 43–48.
17. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 3/Х 2014 г.
