

АНАЛИЗ ПРОТИВОКУМУЛЯТИВНОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ «ОТСЕЧКИ» ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

С.В. Федоров

sergfed-64@mail.ru

И.А. Болотина

b.mount@mail.ru

Ю.А. Струков

ustrukov@rambler.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Для повышения эффективности разрушения металлических кумулятивных струй мощным импульсом электрического тока, формируемым системой электродинамической защиты, предложено использовать известный прием отсечки емкостного накопителя энергии в момент, когда напряжение на нем при реализации периодического режима разряда становится равным нулю. Вследствие исключения перезарядки емкостного накопителя обеспечивается лучшее согласование закона изменения силы тока в разрядном контуре со временем движения через межэлектродный промежуток различных участков кумулятивной струи. Исследования проведены на основе расчетной методики, в которой в качестве возможных физических механизмов снижения проникающей способности кумулятивных струй при мощном электродинамическом воздействии рассмотрены развитие магнитогидродинамической неустойчивости струи перетяжечного типа и диспергирование ее материала с радиальным рассеянием. Выполнен сравнительный анализ противокумулятивной стойкости электродинамической защиты с отсечкой и без отсечки емкостного накопителя. Установлено, что прием отсечки емкостного накопителя позволяет при фиксированном значении его энергии уменьшить остаточную глубину проникания кумулятивной струи в преграду. При этом достигаемый эффект снижения пробивного действия кумулятивного заряда зависит от параметров разрядного контура

Ключевые слова

Взрыв, кумулятивная струя, глубина проникания, импульс электрического тока, электродинамическая защита, отсечка емкостного накопителя энергии, разрядный контур

Поступила в редакцию 22.06.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Для пробития различных преград широко используются кумулятивные заряды [1], представляющие собой заряд взрывчатого вещества цилиндрической или конической форм с выемкой на одном из торцов, покрытой тонкой металлической облицовкой. Непосредственное пробитие преграды при взрыве подобного заряда осуществляется кумулятивной струей (КС) — высокоско-

ростной струей материала облицовки, формирующейся при ее схлопывании под действием продуктов взрыва [2]. Для управления кумулятивным эффектом взрыва (уменьшения или увеличения глубины проникания КС в преграду) могут использоваться разные варианты электромагнитных воздействий на кумулятивную облицовку [3–6], КС [7–11] или преграду [12–16] в процессе функционирования кумулятивного заряда. Наиболее исследованным как в теоретическом, так и в экспериментальном отношении вариантом электромагнитных воздействий является пропускание по КС перед ее взаимодействием с преградой мощного импульса электрического тока, направленного на разрушение КС и снижение ее пробивной способности [11, 17–22]. На данном принципе основано действие так называемой электродинамической защиты (ЭДЗ), предназначенной для обеспечения защиты различных объектов от кумулятивных средств поражения [23–27].

Оснащение объекта системой ЭДЗ может применяться в тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможна установка на объекте динамической защиты [23] со взрывным метанием металлических пластин, сбивающих КС. К числу подобных объектов относятся, например, хранилища и транспортные контейнеры для перевозки ядовитых, горючих, взрывоопасных и радиоактивных материалов. Их разрушение или повреждение в результате террористической атаки с использованием кумулятивных средств поражения способно привести к серьезным последствиям. Использование в данном случае динамической защиты практически исключается из-за опасности поражения при ее функционировании находящихся вблизи защищаемого объекта других гражданских объектов и людей разлетающимися с высокой скоростью фрагментами пластин. Кроме того, размещение на защищаемом объекте элементов динамической защиты, имеющих в своем составе взрывчатое вещество, создает дополнительные проблемы, связанные с обеспечением пожаро- и взрывобезопасности объекта. В отличие от динамической защиты функционирование ЭДЗ не сопряжено с указанными негативными факторами, что делает область ее возможного применения существенно более широкой.

Устройство ЭДЗ достаточно просто [23–27]. В конструктивном отношении его основными элементами являются пара металлических пластин, разделенных слоем диэлектрика, и подающий на них напряжение источник электрической энергии, в качестве которого наиболее реальным с точки зрения технического воплощения выглядит на данный момент времени конденсаторная батарея (рис. 1, а). Разделенные диэлектриком пластины-электроды устанавливаются перед защищаемой преградой и после их замыкания при пробитии диэлектрика КС осуществляют подвод электрической энергии к участкам струи, движущимся в межэлектродном промежутке.

Одной из основных проблем, требующих решения при практической реализации ЭДЗ, является минимизация габаритно-массовых характеристик емкостного накопителя энергии, используемого для формирования мощного импульса

электрического тока через КС [27, 28]. В настоящей работе рассматривается один из возможных способов повышения эффективности токового воздействия на КС, позволяющий несколько снизить энергию емкостного накопителя (а, соответственно, его размеры и массу), потребную для достижения определенного уровня снижения пробивного действия кумулятивных зарядов.

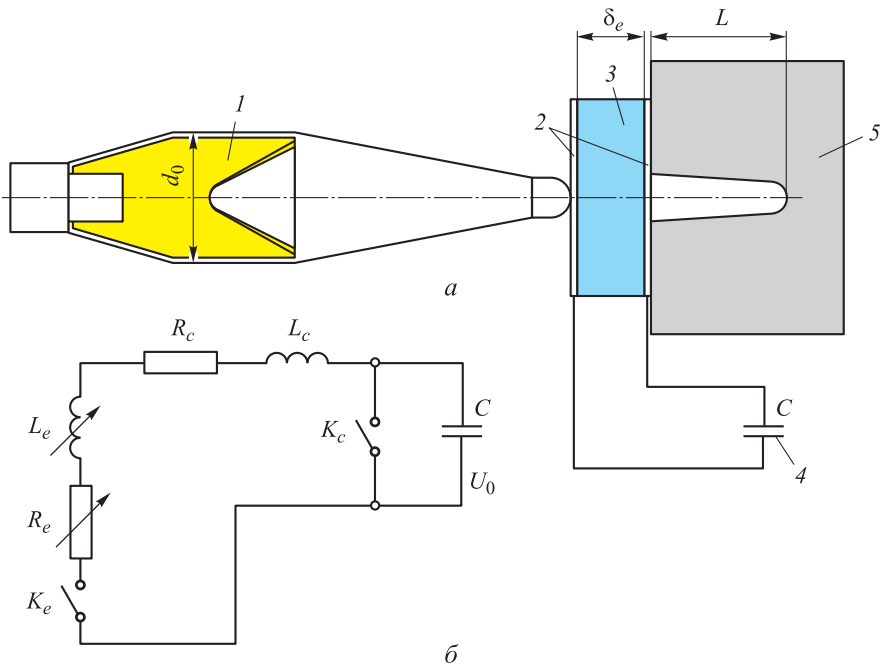


Рис. 1. Противокумулятивная электродинамическая защита:

a — схема реализации токового воздействия на кумулятивную струю с использованием двухэлектродного элемента (*1* — кумулятивный боеприпас; *2* — пластины-электроды; *3* — диэлектрик; *4* — емкостной накопитель энергии; *5* — защищаемая преграда; L — остаточное пробитие кумулятивного боеприпаса); *б* — эквивалентная схема разрядного контура двухэлектродного элемента электродинамической защиты с емкостным накопителем энергии

Исследования проводились на основе разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана расчетной методики [26], в которой в качестве возможных физических механизмов снижения проникающей способности КС при мощном электродинамическом воздействии (ЭДВ) рассматривались развитие магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости КС перетяжечного типа и диспергирование ее материала с радиальным рассеянием [29–35]. 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 своего поперечного размера (так называемое явление дискообразования) [26, 31]. Второй механизм может реализовываться при выходе участков КС из межэлектродного промежутка, когда происходит резкое прекращение действия на струю сжимающих элект-

ромагнитных сил, в результате чего создаются предпосылки для диспергирования ее материала (к этому моменту сильно нагретого электрическим током за счет выделения джоулева тепла и потому практически полностью лишённого прочности) [32–35]. Диспергирование материала КС, сопровождаемое его радиальным рассеянием, приводит к уменьшению средней плотности струи. Поскольку пробивное действие КС определяется ее длиной и плотностью материала, оба рассматриваемых фактора (развитие МГД-неустойчивости и радиальное рассеяние материала) ведут к уменьшению глубины проникания КС в преграду.

Типичные результаты расчетов действия кумулятивного заряда по стальной преграде при отсутствии токового воздействия на КС и при пропускании по ней мощного импульса электрического тока, полученные с использованием разработанной методики [26], проиллюстрированы на рис. 2. Представленные результаты были получены для заряда диаметром $d_0 \approx 70$ мм. Перед стальной преградой размещался элемент ЭДЗ с межэлектродным расстоянием 30 мм. Данные, приведенные на рис. 2, а, соответствуют случаю, когда элемент ЭДЗ не связан с источником электрической энергии (токового воздействия на КС не осуществляется). Действие кумулятивного заряда по преграде, представленное на рис. 2, б, зафиксировано для случая запитки элемента ЭДЗ от емкостного накопителя с энергией 300 кДж. Как следует из сравнения приведенных данных, токовое воздействие рассмотренной интенсивности позволяет снизить глубину проникания КС в преграду примерно в 3 раза. Характерной чертой мощного ЭДВ на КС является то, что, как свидетельствуют расчеты, остаточное пробитие в преграде в этом случае обеспечивается головным участком струи (см. рис. 2, б). Это обстоятельство связано с тем, что после замыкания струей межэлектродного промежутка протекающий по ней электрический ток нарастает не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени, зависящего от параметров разрядного контура. В результате головной участок КС испытывает слабое токовое воздействие, не приводящее к его разрушению. Как видно на рис. 2, б, эффект дискообразования не затрагивает головных элементов КС, успевающих «проскочить» межэлектродный промежуток в начале токового разряда. В то же время интенсивность токового воздействия на последующие участки КС оказывается достаточной для их полного разрушения, так что дополнительного вклада в пробитие эти участки не вносят.

Результаты расчетов пробивного действия кумулятивных зарядов при токовом воздействии на КС с использованием разработанной методики вполне удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными [18–20] при достаточно широком изменении как параметров самих КС, так и параметров пропускаемого по ним токового импульса, что дает основание для прогнозирования возможных характеристик системы ЭДЗ для противодействия штатным кумулятивным средствам поражения. Наиболее реалистичным на данный момент времени представляется применение ЭДЗ для противодействия кумулятивным средствам ближнего боя. Этот класс кумулятивных боеприпасов обладает меньшим могуществом действия по сравнению, например, с противо-

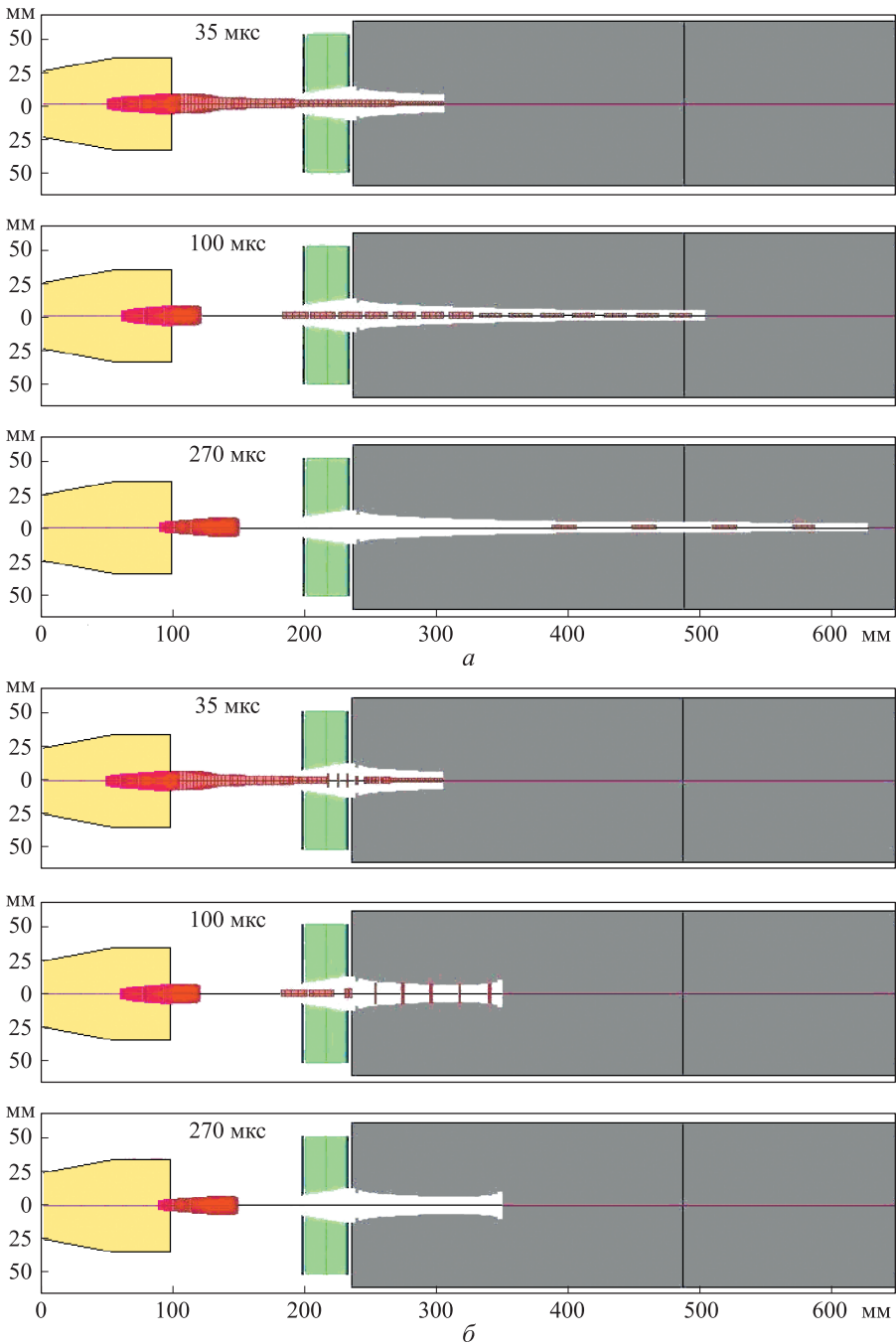


Рис. 2. Результаты расчета действия кумулятивного заряда по стальной преграде при отсутствии токового воздействия на кумулятивную струю (а) и при пропускании по струе мощного импульса электрического тока (б)

танковыми управляемыми ракетами [36]. Соответственно для снижения их пробивного действия требуется меньшая мощность электрического разряда, которая может быть обеспечена источником электрической энергии с приемле-

мыми габаритно-массовыми характеристиками. В то же время, как уже отмечалось ранее, кумулятивные средства ближнего боя могут достаточно широко использоваться террористическими группировками, что выдвигает на первый план разработку методов защиты объектов именно от этого класса кумулятивных боеприпасов.

В связи с изложенным, эффективность действия системы ЭДЗ оценивалась применительно к противотанковым кумулятивным гранатам. В качестве характерного представителя кумулятивных боеприпасов данного класса, получившего широкое распространение не только у нас в стране, но и за рубежом, в расчетах рассматривалась кумулятивная боевая часть (КБЧ) гранаты ПГ-7Л диаметром $d_0 = 93$ мм (в дальнейшем просто КБЧ) к гранатомету РПГ-7 (рис. 3) с уровнем пробития по гомогенной стальной преграде 550...600 мм [36]. Конструкция элемента ЭДЗ полагалась двухэлектродной (см. рис. 1, а). Источником электрической энергии, обеспечивающим функционирование ЭДЗ, служила конденсаторная батарея.



Рис. 3. Гранатомет РПГ-7 с кумулятивным выстрелом ПГ-7Л

На рис. 4 для двух значений межэлектродного промежутка ($\delta_e = 50$ и 75 мм) приведены законы изменения тока, при которых обеспечивается полное разрушение всей КС рассматриваемой КБЧ при минимальных энергозатратах (остаточное пробитие КБЧ при этом практически отсутствует). Для каждого элемента КС, формирующегося из разных частей кумулятивной облицовки, определялось время его прихода в межэлектродный промежуток, отсчитываемое от момента замыкания электродов головным элементом струи. Одновременно для рассматриваемого элемента КС подбиралась минимальная сила тока, при которой его пробитие составляло малую долю начальной длины элемента, принимаемой равной длине участка образующей кумулятивной облицовки, из которого данный элемент сформировался. В результате получалась зависимость минимального разрушающего тока для различных элементов КС от времени их прихода в межэлектродный промежуток. Как следует из рис. 4, для эффективного ЭДВ на КС требуется очень быстрое (практически мгновенное) нарастание силы разрядного тока до значений порядка 1 МА с последующим монотонным относительно медленным уменьшением за время ~ 250 мкс. Необходимость быстрого

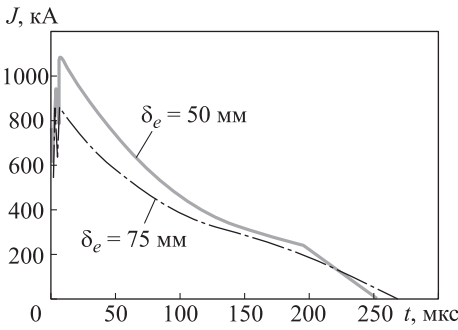


Рис. 4. Законы изменения токов, обеспечивающих разрушение всех участков кумулятивной струи

нарастания силы разрядного тока до весьма высоких значений 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 требуются меньшие токи.

К некоторому снижению значений разрушающих токов приводит увеличение межэлектродного промежутка δ_e от 50 до 75 мм (см. рис. 4), что связано, очевидно, с соответствующим увеличением продолжительности ЭДВ на участки КС. Однако увеличивать межэлектродное расстояние можно лишь до определенного предела. Дело в том, что при чересчур больших значениях δ_e могут ухудшаться условия протекания разряда, особенно если разрушение КС происходит непосредственно между электродами (в этом случае из-за 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 (δ_e около половины диаметра кумулятивного заряда) [18–20].

Поскольку идеальные кривые токового разряда (см. рис. 4) рассчитывались лишь из условия полного разрушения различных участков КС, закон изменения тока в реальной разрядной цепи элемента ЭДЗ, 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. Важно выбрать параметры разрядного контура и источника электрической энергии так, чтобы это снижение было минимальным и обеспечивало требуемый уровень остаточного пробития КБЧ при минимальной энергии источника. Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи замкнутого участком КС двухэлектродного элемента ЭДЗ, запитываемого 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 в приведенной схеме, 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 влияют на форму токового импульса и, следовательно, на эффек-

тивность токового воздействия на КС. В расчетах опорные значения индуктивности L_s и активного сопротивления R_s контура принимались близкими к реализованным в экспериментах [19] и составляли $L_s = 0,25$ 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 токового разряда пренебрегали, так как эти изменения относительно невелики. При постоянных значениях L_s и R_s характер изменения силы тока J в контуре (см. рис. 1, б) при разряде конденсаторной батареи с емкостью C зависит от значения безразмерного параметра $\gamma = 0,5R_s\sqrt{C/L_s}$ [37]. При $\gamma < 1$ реализуется колебательный режим разряда:

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

где U_0 — начальное напряжение на конденсаторной батарее. В случае $\gamma \geq 1$ разряд является аperiодическим и выражения для силы тока J в цепи имеют вид

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

при $\gamma = 1$,

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

при $\gamma > 1$. В соответствии с приведенными зависимостями эффективность токового воздействия на КС определяется следующими электротехническими параметрами установки — начальным напряжением U_0 и емкостью C конденсаторной батареи, а также индуктивностью L_s и активным сопротивлением R_s разрядного контура. Энергия, запасаемая емкостным накопителем и определяющая его габаритно-массовые характеристики, составляет $W = 0,5CU_0^2$.

На рис. 5 для рассматриваемой КБЧ проиллюстрированы вклад в пробитие элементов КС, формирующихся из разных частей кумулятивной облицовки (z — координата, отсчитываемая от вершины облицовки вдоль ее оси, h_0 — высота облицовки), а также распределение токов, протекающих по элементам КС во время их пребывания 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 — 2, 4 и 8 мФ. От емкости конденсаторной батареи зависят амплитуда и длительность токового импульса. Наилучший результат по снижению пробития КБЧ достигается при $C = 4$ мФ (остаточное пробитие около 340 мм). При меньшей емкости ($C = 2$ мФ) из-за более быстрого темпа нарастания тока и увеличения его амплитуды усиливается эффект электродинамического разру-

шения средней части КС (пробитие головного участка КС $z/h_0 < 0,7$ при $C = 2$ мФ меньше, чем при $C = 4$ мФ). Однако вследствие одновременного сокращения продолжительности импульса снижается эффективность ЭДВ на хвостовые элементы КС, которые при $C = 2$ мФ доводят остаточное пробитие КБЧ примерно до 400 мм. При наибольшем из рассмотренных значений емкости ($C = 8$ мФ) остаточное пробитие увеличивается до 430 мм, так как в данном случае за счет слишком медленного темпа нарастания тока и уменьшения его амплитуды теряет свою пробивную способность только хвостовая часть КС $z/h_0 > 0,7$ (см. рис. 5). Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют, что при заданной энергии конденсаторной батареи существует оптимальное значение ее емкости, при котором происходит наибольшее снижение пробития КБЧ [27, 28]. Наличие оптимального значения связано с изменением степени синхронизации токового импульса со временем прохождения через межэлектродный промежуток различных участков КС при изменении емкости накопителя. Как показывает анализ вклада различных элементов КС в пробивное действие, реализация ЭДВ с накопителем оптимальной емкости позволяет наиболее рациональным образом распределить энергию токового импульса на разрушение головной и хвостовой частей КС.

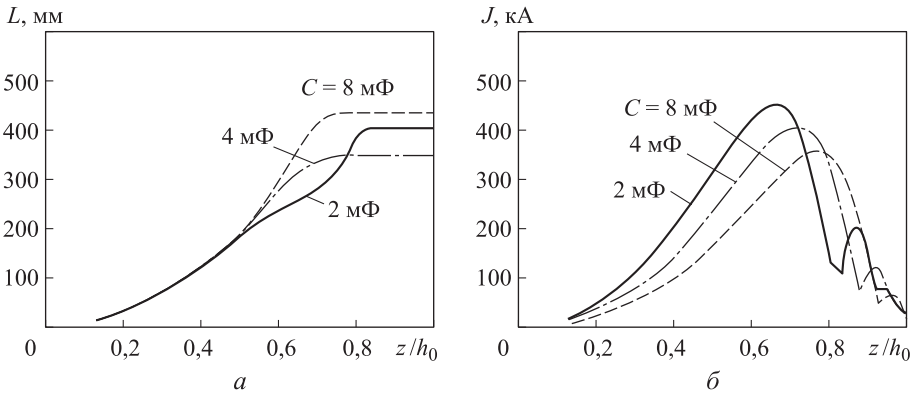


Рис. 5. Последовательное нарастание глубины пробития при проникании элементов кумулятивной струи, формирующихся из разных частей кумулятивной облицовки (а), и распределение протекающих по ним токов (б) при различных емкостях конденсаторной батареи с энергией 50 кДж (при отсутствии при отсечки батареи)

Анализ представленных на рис. 5 данных приводит к вопросу — нельзя ли повысить эффективность ЭДВ на КС, используя конденсаторную батарею небольшой емкости и обеспечивая тем самым быстрое нарастание тока и высокую его амплитуду, но замедляя при этом каким-либо образом последующий спад тока. В этом случае токовая кривая приближалась бы по форме к идеальной (см. рис. 4), позволяя охватить токовым воздействием достаточной интенсивности как головной (за счет быстрого нарастания тока), так и хвостовой (за счет медленного спада) участки КС. На поставленный вопрос может быть дан утверди-

тельный ответ, если обратиться к известному в импульсной электрофизике приему — отсечке (исключению из электрической цепи) источника электрической энергии сразу после передачи им энергии в нагрузку [37].

В настоящей работе для повышения эффективности токового воздействия на КС (со снижением энергии емкостного накопителя, требующейся для заданного снижения глубины ее проникания в преграду) предлагается использовать прием отсечки емкостного накопителя в тот момент, когда напряжение на нем в процессе периодического разряда становится равным нулю. Исключение конденсаторной батареи из разрядной цепи (отсечка батареи) осуществляется путем замыкания накоротко ее выходных разъемов (замыкания ключа K_c в схеме на рис. 1, б). Такой прием позволяет исключить перезарядку емкостного накопителя в процессе токового разряда с сопровождающим ее обратным перетеканием электрической энергии из разрядной цепи в емкостной накопитель.

Качественное сравнение процессов разряда емкостного накопителя при отсутствии и реализации его отсечки проиллюстрировано на рис. 6. Параметры разрядного контура соответствуют случаю $\gamma < 1$ (колебательный режим разряда), и закон изменения разрядного тока при отсутствии отсечки конденсаторной батареи имеет вид (1). Напряжение на батарее при этом 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

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

В соответствии с (1) сила тока в данный момент времени имеет значение

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

Если в данный момент замыкаются выходные разъемы емкостного накопителя накоротко (см. рис. 1, б), то получается электрическая цепь с индуктивностью L_s и активным сопротивлением R_s , в которой протекает ток J_c . Последующее затухание тока в такой цепи (при $t > t_c$) описывается соотношением [37]

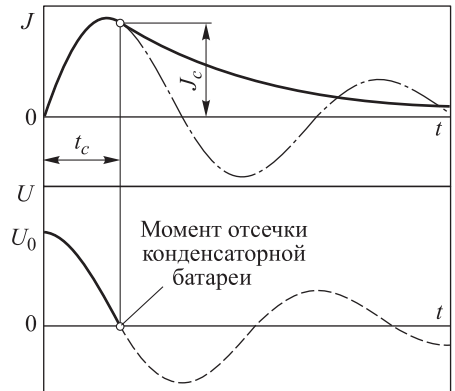


Рис. 6. Колебательный режим разряда емкостного накопителя энергии при отсутствии и реализации его отсечки

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

На токовых кривых (см. рис. 6) при $t > t_c$ сплошная линия соответствует изменению тока при реализации отсечки батареи, а штрихпунктирная — при ее отсутствии. Видно, что в случае сохранения емкостного накопителя включенным в цепь, ток после времени t_c падает более резко (вследствие изменения полярности напряжения на накопителе при его перезарядке) и затем после преодоления нулевого значения изменяет свое направление на противоположное. При отсечке же накопителя происходит постепенное монотонное снижение силы тока с асимптотическим приближением к нулю. Таким образом, реализация приема отсечки конденсаторной батареи в момент обнуления напряжения может позволить более эффективно воздействовать на КС за счет растягивания токового импульса. При этом необходимо еще раз отметить, что 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, а оно монотонно уменьшается, асимптотически стремясь к нулю).

Эффект, который может дать применение отсечки емкостного накопителя в системе ЭДЗ, иллюстрирует рис. 7 на примере рассматриваемой КБЧ кривыми вклада в пробитие различных элементов КС и распределений воздействующих на них токов при энергии накопителя $W = 100$ кДж, его емкости $C = 0,9$ мФ, межэлектродном расстоянии $\delta_e = 50$ мм и параметрах разрядного контура $L_s = 0,5$ мкГн, $R_s = 5$ мОм (так как за время движения элементов КС в межэлектродном промежутке сила тока в цепи может существенно измениться, на рис. 7 для каждого элемента указано ее среднее значение, взятое по модулю). Видно, что при отсутствии отсечки ток во время движения между пластинами-электродами хво-

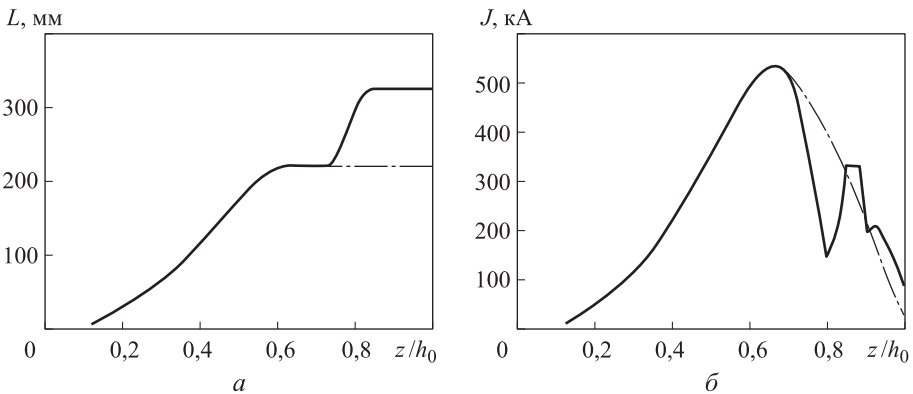


Рис. 7. Последовательное нарастание глубины пробития при проникании элементов кумулятивной струи, формирующихся из разных частей кумулятивной облицовки (а), и распределение протекающих по ним токов (б) при энергии емкостного накопителя 100 кДж при отсутствии (сплошная) и реализации (штрихпунктирная) его отсечки

стовой части КС ($z/h_0 > 0,7$) испытывает немонотонное изменение (резко снижается, возрастает и снова снижается). Это соответствует смене направления тока с его переходом через нулевое значение, когда еще не вся КС прошла через межэлектродный промежуток. В результате ЭДВ на хвостовой участок КС оказывается слабым, что дает существенный вклад в остаточное пробитие КБЧ, составляющее в данном случае примерно 325 мм. Применение же отсечки конденсаторной батареи позволяет охватить хвостовые элементы КС токовым воздействием достаточной интенсивности, полностью лишив их пробивной способности, что снижает остаточное пробитие КБЧ до 220 мм.

На основе разработанной методики для случаев реализации и отсутствия отсечки емкостного накопителя были проведены сравнительные расчеты по определению его емкости, обеспечивающей максимальный эффект снижения пробития КБЧ при фиксированном значении энергии накопителя (рис. 8). В расчетах рассмотрено три значения энергии — 50, 100 и 200 кДж. Кроме того, при задании общих индуктивности L_s и активного сопротивления R_s разрядного контура наряду с их опорными значениями (соответственно 0,25 мкГн и 5 МОм) рассматривались еще два значения — в 2 раза большее и меньшее. Межэлектродный промежуток равен 50 и 75 мм. Сплошные линии на рис. 8 — остаточное пробитие КБЧ при отсутствии отсечки накопителя, а штрихпунктирные — при ее осуществлении. Те участки, на которых эти линии накладываются одна на другую, соответствуют реализации аperiodических режимов разряда накопителя с $\gamma \geq 1$ (при аperiodическом разряде, как указывалось выше, производить отсечку накопителя не имеет смысла).

Как следует из рис. 8, для обоих случаев (с отсечкой накопителя и без) эффективность ЭДВ возрастает с уменьшением активного сопротивления цепи. Это носит тем более выраженный характер, чем меньше энергия накопителя и общая индуктивность разрядного контура. С увеличением индуктивности цепи проявляется тенденция к снижению эффективности ЭДВ. Если говорить о различии остаточного пробития КБЧ при отсутствии и реализации приема отсечки емкостного накопителя, то прием отсечки дает более заметный выигрыш с увеличением индуктивности разрядной цепи и уменьшением ее активного сопротивления. Очевидно, данное обстоятельство обусловлено происходящим при этом возрастанием постоянной времени затухания тока L_s/R_s в цепи с «отсеченной» конденсаторной батареей.

Преимущество системы ЭДЗ с отсечкой конденсаторной батареи заметнее также при меньшей энергии батареи. Например, при межэлектродном расстоянии $\delta_e = 50$ мм, параметрах цепи $L_s = 0,25$ мкГн и $R_s = 2,5$ МОм, емкости накопителя $C = 2$ мФ и его энергии $W = 100$ кДж (см. рис. 8, б) остаточное пробитие КБЧ без отсечки накопителя составляет около ~220 мм, а с отсечкой — ~180 мм (различие в 1,22 раза). При уменьшении энергии накопителя до $W = 50$ кДж (см. рис. 8, а) в системе ЭДЗ с теми же параметрами были получены значения остаточных пробитий КБЧ при отсутствии и реализации приема отсечки

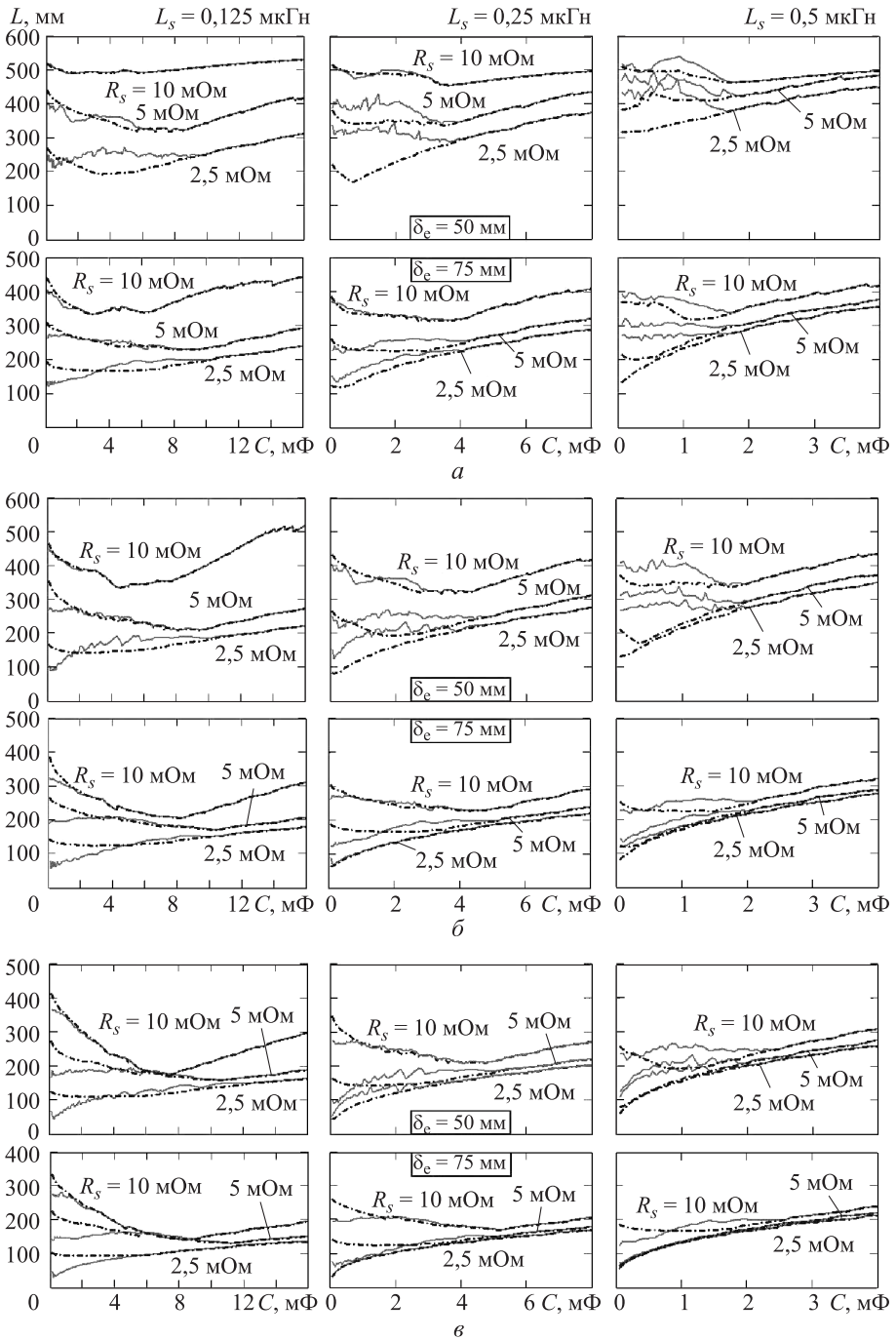


Рис. 8. Остаточное пробитие КБЧ при разных параметрах разрядного контура и различной энергии емкостного накопителя при отсутствии (сплошная) и реализации (штрихпунктирная) его отсечки:

a — $W = 50$ кДж; *б* — $W = 100$ кДж; *в* — $W = 200$ кДж

накопителя соответственно 320 и 220 мм (различие примерно в 1,5 раза). Увеличение же энергии конденсаторной батареи до $W = 200$ кДж (см. рис. 8, в) в той же системе ЭДЗ дало различие остаточных пробитий только на 10 % (чуть более 130 мм при отсутствии отсечки и 120 мм при ее реализации).

Анализируя данные (см. рис. 8) для различных межэлектродных расстояний δ_e (50 и 75 мм), выявили, что с увеличением межэлектродного промежутка эффективность ЭДВ несколько возрастает, но при этом относительный выигрыш в снижении пробития КБЧ за счет использования приема отсечки емкостного накопителя проявляется в существенно меньшей степени.

Из рис. 8 также следует, что при малых значениях индуктивности и активного сопротивления разрядного контура преимущество может иметь система ЭДЗ без отсечки накопителя энергии. Это наблюдается в области малых значений емкости накопителя, где реализуется высокочастотный колебательный режим его разряда с многократной сменой за время движения КС в межэлектродном промежутке направления тока, сопровождающейся его переходом через нулевое значение. Однако, как представляется, практическое применение таких режимов ЭДВ вряд ли возможно по двум причинам. Во-первых, обнуление тока в разрядной цепи во время движения через межэлектродный промежуток КС может привести к срыву разряда. Поскольку КС пробивает в пластинах электродах отверстия размером, существенно превышающим ее собственную толщину, замыкание цепи элемента ЭДЗ 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 напряжением зарядки накопителя в реальных системах ЭДЗ представляется значение, не превышающее 10 кВ [38]. При данном ограничении и самой малой из рассмотренных энергии накопителя $W = 50$ кДж его емкость не может выбираться меньше 1 мФ.

Как было отмечено ранее, для повышения эффективности ЭДВ активное сопротивление разрядного контура R_s должно быть минимальным. В отношении двух других его параметров (индуктивности L_s и емкости накопителя C) были проведены расчеты по определению их рационального сочетания, обеспечивающего минимум остаточного пробития КБЧ при заданной энергии емкостного накопителя. В расчетах были рассмотрены варианты системы ЭДЗ с отсечкой и без отсечки накопителя. Активное сопротивление разрядной цепи принималось равным своему опорному значению $R_s = 5$ мОм, а межэлектродное расстояние составляло $\delta_e = 50$ мм. На рис. 9 результаты, полученные при энергии емкостного накопителя $W = 100$ кДж, представлены поверхностями остаточного пробития как функции параметров L_s и C , а также линиями уровня. Видно, что для системы ЭДЗ с отсечкой конденсаторной батареи минимально

достижимое при данной энергии батареи остаточное пробитие L_{\min} (~ 175 мм, рис. 9, б) меньше, чем при отсутствии отсечки (~ 225 мм, рис. 9, а). При этом в обоих случаях минимум остаточного пробития обеспечивается при минимальном из рассмотренного диапазона значения емкости конденсаторной батареи ($C = 1$ мФ). Что касается индуктивности разрядного контура, то для системы ЭДЗ с отсечкой емкостного накопителя оптимальное значение данного параметра, обеспечивающее минимум остаточного пробития, оказывается заметно более высоким ($L_s \approx 0,33$ мкГн, см. рис. 9, б), чем в случае отсутствия отсечки ($L_s \approx 0,2$ мкГн, см. рис. 9, а).

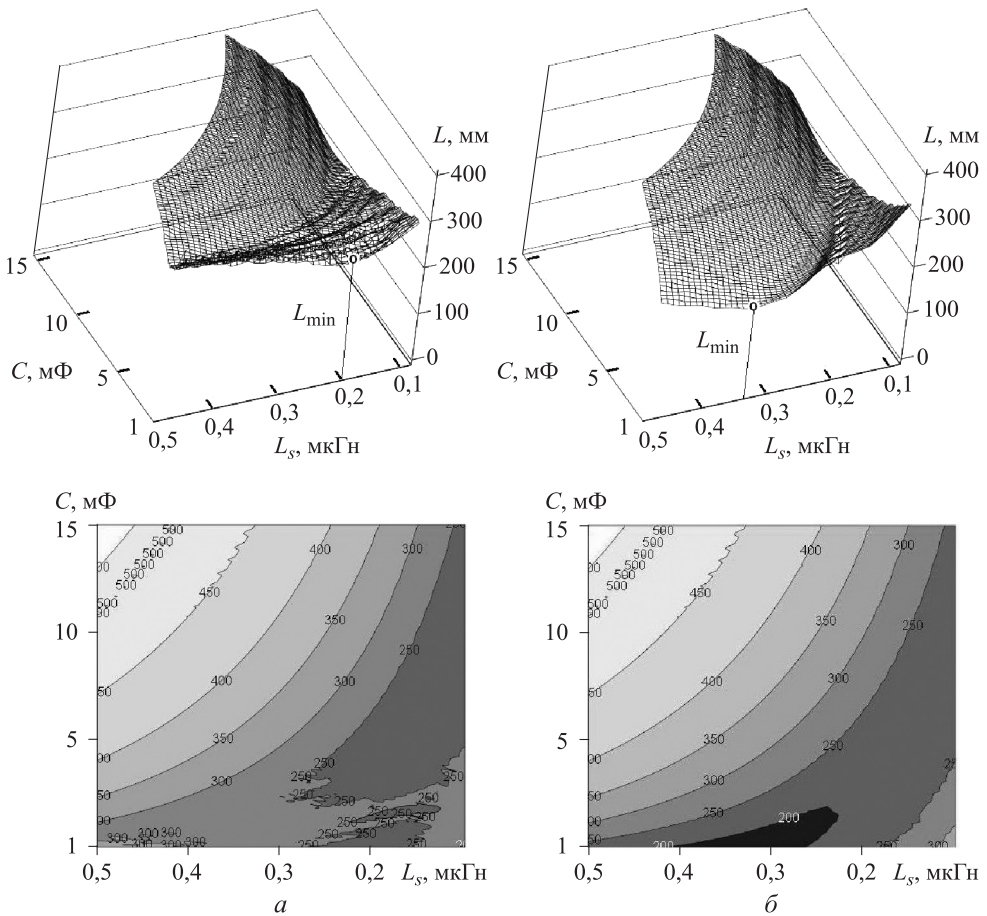


Рис. 9. Влияние на остаточное пробитие КБЧ емкости конденсаторной батареи и индуктивности разрядного контура при энергии батареи 100 кДж при отсутствии отсечки (а) и при реализации (б) отсечки батареи

Если рассматривать зависимость остаточного пробития КБЧ от энергии емкостного накопителя, следует отметить существенную неравномерность достигаемого эффекта по мере ее увеличения. При параметрах разрядного контура $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 5$ мОм, емкости накопителя $C = 2$ мФ и межэлектродном рас-

стоянии $\delta = 50$ мм система ЭДЗ с отсечкой накопителя позволяет снизить пробитие КБЧ до 180...200 мм, если энергия батареи составляет $W = 100$ кДж (рис. 10). Дальнейшее же 5-кратное увеличение энергии накопителя (до $W = 500$ кДж) дает дополнительное снижение пробития не более, чем на 100 мм. На рис. 10 также видно, как проявляются преимущества системы ЭДЗ с отсечкой конденсаторной батареи при различной ее энергии — выигрыш в снижении остаточного пробития КБЧ при реализации отсечки явно прослеживается при малых энергиях накопителя (до ~300 кДж) и нивелируется по мере дальнейшего роста энергии.

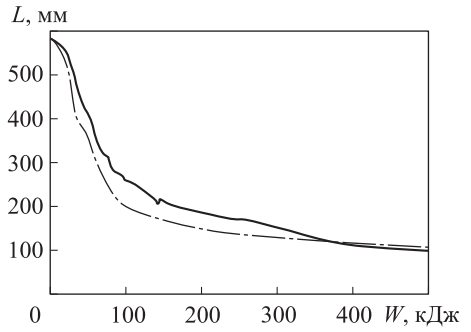


Рис. 10. Зависимость остаточного пробития КБЧ от энергии емкостного накопителя при отсутствии (сплошная) и реализации (штрихпунктирная) его отсечки

Основной вывод, который можно сделать по результатам проведенного расчетно-теоретического исследования, заключается в том, что использование приема отсечки емкостного накопителя энергии в тот момент, когда напряжение на нем в процессе периодического разряда становится равным нулю, позволяет повысить противокумулятивную стойкость ЭДЗ. Данный способ повышения эффективности ЭДЗ достаточно просто реализуется технически и поэтому может представлять практический интерес. При этом для реализации обеспечиваемых им преимуществ в снижении остаточного пробития КБЧ важно должным образом выбрать параметры разрядного контура, осуществляющего подвод электрической энергии к замыкаемому КС межэлектродному промежутку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of shaped charges. New York: Wiley, 1989. 398 p.
2. Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
3. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. О влиянии магнитного поля, создаваемого в облицовке кумулятивного заряда, на его пробивное действие // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 5. С. 145–146.
URL: http://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120194&ARTICLE_ID=122489
4. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Проявление магнитокумулятивного эффекта при взрыве кумулятивного заряда с созданным в его облицовке аксиальным магнитным полем // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. № 8. С. 111–117.
URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8053>
5. Федоров С.В. О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № 2. С. 73–80.

6. О возможности снижения пробивного действия кумулятивных зарядов в магнитном поле / С.В. Федоров, А.В. Бабкин, С.В. Ладов, Г.А. Швецов, А.Д. Матросов // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т. 48. № 3. С. 112–120.
URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=120032&ARTICLE_ID=126812
7. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Особенности инерционного удлинения высокоградиентного проводящего стержня в продольном низкочастотном магнитном поле // Инженерно-физический журнал. 2001. Т. 74. № 2. С. 79–86.
8. Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Численное моделирование и определение закономерностей деформирования и разрушения металлических кумулятивных струй // Химическая физика. 1999. Т. 18. № 10. С. 26–36.
9. Федоров С.В., Болотина И.А. Магнитно-импульсное уплотнение формируемых взрывом высокоскоростных металлических элементов в свободном полете // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 12. С. 183–196.
DOI: 10.7463/1212.0496555 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/496555.html>
10. Федоров С.В. Усиление магнитного поля в металлических кумулятивных струях при их инерционном удлинении // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 1. С. 120–128.
URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=120226&ARTICLE_ID=125052
11. Поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока / Г.А. Швецов, А.Д. Матросов, А.В. Бабкин, С.В. Ладов, С.В. Федоров // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 3. С. 19–25.
URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119990&ARTICLE_ID=123688
12. Федоров С.В., Бабкин А.В., Колпаков В.И. О возможности генерации сильных магнитных полей в проводящих материалах при проникании в них высокоскоростных тел // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 3. С. 13–18.
URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119990&ARTICLE_ID=123687
13. Федоров С.В., Бабкин А.В., Демидков С.В. Об усилении магнитного поля в идеально проводящей среде при проникании в нее высокоскоростной струи // Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73. № 6. С. 1268–1277.
14. Федоров С.В., Колпаков В.И., Бабкин А.В. Проникание плоской кумулятивной струи в идеально проводящую преграду с поперечным магнитным полем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2000. № 2. С. 80–92.
15. Федоров С.В. О генерации магнитного поля в области сдвигового деформирования проводящего материала при высокоскоростном проникании // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 3. С. 15–23.
URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119996&ARTICLE_ID=122946
16. Федоров С.В., Бабкин А.В. О генерации магнитного поля при сдвиговом движении вязкой проводящей среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2002. Т. 122. № 2(8). С. 310–319. URL: <http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index/r/122/2/p310?a=list>
17. Pollock C.E. Electromagnetic effect of the natural hydrodynamic instability of stretching, high velocity, metallic jets // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications. New York: Nova Sci. Publ., 1994. P. 309–316.
18. Павловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я. Экспериментальные исследования разрушения кумулятивной струи импульсом тока // Журнал технической физики. 1994. Т. 64. № 2. С. 76–82. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/18637>

19. Павловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я. Исследование некоторых особенностей процесса разрушения кумулятивной струи в сильноточном режиме // Журнал технической физики. 1994. Т. 64. № 5. С. 43–48. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/18705>
20. Матросов А.Д., Швецов Г.А. Экспериментальное исследование токовой неустойчивости кумулятивных струй // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 4. С. 9–14. URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119967&ARTICLE_ID=132702
21. Разрушение кумулятивных струй током / Л.Н. Пляшкевич, А.М. Шувалов, Г.М. Спиоров, А.Я. Бродский, Е.М. Димант, Н.Б. Лукьянов, Б.С. Макаев, А.Г. Репьев, С.В. Гайдаш, А.С. Зайцев // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 5. С. 124–127. URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=120212&ARTICLE_ID=121648
22. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation / G.A. Shvetsov, A.D. Matrosov, S.V. Fedorov, A.V. Babkin, S.V. Ladov // International Journal of Impact Engineering. 2011. Vol. 38. No. 6. P. 521–526. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.024 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X10001703>
23. Григорян В.А., ред. Защита танков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 327 с.
24. Ogorkiewicz R.M. Future tank armors revealed // Janes Int. Defense Review. 1997. No. 5. P. 50–51.
25. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Электрическая защита перспективной боевой машины XXI века // Оборонная техника. 2000. № 1-2. С. 19–25.
26. Федоров С.В. Электродинамическая защита от кумулятивных средств поражения: физические аспекты функционирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 3. С. 79–100.
27. Федоров С.В. Электродинамическая защита от кумулятивных средств поражения: перспективы практической реализации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 4. С. 12–32.
28. Прогнозирование пробивной способности металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока / С.В. Федоров, А.В. Бабкин, С.В. Ладов, Г.А. Швецов, А.Д. Матросов // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. № 7. С. 28–36. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/8017>
29. Littlefield D.L., Powell J.D. The effect of electromagnetic fields on the stability of a uniformly elongating plastic jet // Physics of Fluids A. 1990. Vol. 2. No. 12. P. 2240–2248.
30. Littlefield D.L. Finite conductivity effects on the MHD instabilities in uniformly elongating plastic jets // Physics of Fluids A. 1991. Vol. 3. No. 6. P. 1666–1673.
31. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Развитие магнитогидродинамической неустойчивости на подвергающейся электродинамическому воздействию кумулятивной струе // Оборонная техника. 1998. № 1-2. С. 49–56.
32. Бабкин А.В., Колычев М.Е., Ладов С.В., Федоров С.В. О возможном механизме разрушения кумулятивной струи импульсом тока // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 47–54.
33. Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38. № 2. С. 10–18. URL: http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=119971&ARTICLE_ID=132281

34. *Experimental study of electromagnetic effects on solid copper jets* / P. Appelgren, M. Skoglund, P. Lundberg, L. Westerling, A. Larsson, T. Hurtig // *Journal of Applied Mechanics*. 2010. Vol. 77. No. 1. P. 1–7. DOI: 10.1115/1.3172251
URL: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1420573>
35. Федоров С.В. Об эффекте рассеивания металлических кумулятивных струй при пропуске по ним мощного импульса электрического тока // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82. № 10. С. 18–30. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/10718>
36. Селиванов В.В., ред. Средства поражения и боеприпасы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
37. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
38. Ford M.D., Dorr G.B., Toepfer A.J. Design and testing of a compact electromagnetic armor power system // *Proc. of the 11th Annual US Army Ground Vehicle Survivability Symp.* 2000.

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Болотина Ирина Алексеевна — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Струков Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Федоров С.В., Болотина И.А., Струков Ю.А. Анализ противокумулятивной стойкости электродинамической защиты с реализацией «отсечки» емкостного накопителя энергии // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2017. № 4. С. 42–64.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-42-64

**ANALYSIS OF ANTI SHAPED-CHARGE RESISTANCE
OF ELECTRODYNAMIC PROTECTION WITH IMPLEMENTATION
OF "SHUTDOWN" OF ENERGY CAPACITIVE STORAGE**

S.V. Fedorov

sergfed-64@mail.ru

I.A. Bolotina

b.mount@mail.ru

Yu.A. Strukov

ustrukov@rambler.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

To increase the efficiency of metal shaped-charge jets destruction by electric current powerful pulse which is created by electrodynamic protection system, we offer to use the energy capacitive storage "shutdown" at the moment when its voltage becomes equal to zero in case of implementing the discharge periodic mode. As a result of an excluding the capacitive storage recharging, we provided a better agree-

Keywords

Explosion, shaped-charge jet, penetration depth, electrical current pulse, electrodynamic protection, energy capacitive storage "shutdown", discharge circuit

ment between the law of current change in discharge circuit and the time of motion of shaped-charge jet various parts through an interelectrode interval owing. We conducted the studies based on computational procedure. Meanwhile, we considered the development of necking-type magnetohydrodynamic instability of shaped-charge jet and its material dispergation with radial dispersion as possible physical mechanisms of reducing the penetration capability of shaped-charge jets under the powerful electrodynamic action. We carried out the comparative analysis of anti shaped-charge resistance of electrodynamic protection with "shutdown" and without "shutdown" of the capacitive storage in relation to a shaped charge of diameter about 90 mm with penetration depth in a homogeneous steel target 550... 600 mm. Findings of the research show that use of the capacitive storage "shutdown" allows us at the fixed value of its energy to reduce the residual depth of shaped-charge jet penetration into a target. At the same time the effect of shaped charge penetrability reduction which is reached due to the capacitive storage "shutdown" depends on parameters of a discharge circuit

REFERENCES

- [1] Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of shaped charges. New York, Wiley, 1989. 398 p.
- [2] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. V 2 t. T. 2 [Physics of explosion. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 656 p.
- [3] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Influence of the magnetic field produced in the liner of a shaped charge on its penetrability. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 598–599. DOI: 10.1007/BF02674508
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02674508>
- [4] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Magnetic comulative effect upon the explosion of a shaped charge with an axial magnetic field in its sheath. *Technical Physics*, 2003, vol. 48, no. 8, pp. 1047–1052. DOI: 10.1134/1.1607479
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/1.1607479>
- [5] Fedorov S.V. On cut-off possibility of the leading high velocity part of metal jet during shaped-charge explosion in axial magnetic field. *Boepripsy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy*, 2008, no. 2, pp. 73–80 (in Russ.).
- [6] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D. On the possibility of reducing the penetration capability of shaped-charge jets in a magnetic field. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 3, pp. 393–400.
DOI: 10.1007/s10808-007-0049-0
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10808-007-0049-0>
- [7] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Salient features of inertial stretching of a high-gradient conducting rod in a longitudinal low-frequency magnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 2, pp. 364–374.
DOI: 10.1023/A:1016656522643
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1016656522643>

- [8] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Numerical modelling and the physical pattern of deformation and destruction of metallic jets produced by shaped-charges. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2000, vol. 18, no. 10–11, pp. 1805–1822.
- [9] Fedorov S.V., Bolotina I.A. Magnetic pulsing compression of high-speed metal elements created by an explosion in free flight. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGТУ im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2012, no. 12, pp. 183–196 (in Russ.). DOI: 10.7463/1212.0496555
Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/496555.html>
- [10] Fedorov S.V. Magnetic-field amplification in metal shaped-charge jets during their inertial elongation. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 106–113. DOI: 10.1007/s10573-005-0012-4
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10573-005-0012-4>
- [11] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Behavior of metallic shaped-charge jets with passage of a pulsed electric current through them. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 3, pp. 394–400. DOI: 10.1007/BF02465287 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02465287>
- [12] Fedorov S.V., Babkin A.V., Kolpakov V.I. Possibility of generating strong magnetic fields in conducting materials by the action of high-velocity penetrators. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 3, pp. 389–393. DOI: 10.1007/BF02465286
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02465286>
- [13] Fedorov S.V., Babkin A.V., Demidkov S.V. Enhancement of a magnetic field in a perfectly conducting medium on penetration of a high-velocity jet into it. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2000, vol. 73, no. 6, pp. 1226–1235. DOI: 10.1023/A:1009490708904
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1009490708904>
- [14] Fedorov S.V., Kolpakov V.I., Babkin A.V. Penetration of plane shaped-charge jet into ideally conducting obstruction with transversal magnetic field. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2000, no. 2, pp. 80–92.
- [15] Fedorov S.V. Generation of a magnetic field in the shear deformation region of a conducting material upon high-velocity penetration. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 397–403. DOI: 10.1023/A:1019230200796
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1019230200796>
- [16] Fedorov S.V., Babkin A.V. Generation of magnetic field during shearing motion of a conducting viscous medium. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2002, vol. 95, no. 2, pp. 266–274. DOI: 10.1134/1.1506434
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/1.1506434>
- [17] Pollock C.E. Electromagnetic effect of the natural hydrodynamic instability of stretching, high velocity, metallic jets. *Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications*. New York, Nova Sci. Publ., 1994, pp. 309–316.
- [18] Pavlovskiy A.I., Plyashkevich L.N., Shuvalov A.M., Brodskiy A.Ya. Experimental research of shaped-charge jet disruption by the current pulse. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1994, vol. 64, no. 2, pp. 76–82 (in Russ.). Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/18637>

- [19] Pavlovskiy A.I., Plyashkevich L.N., Shuvalov A.M., Brodskiy A.Ya. Research on some features of the shaped-charge jet disruption process in a strong-flow mode. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1994, vol. 64, no. 5, pp. 43–48 (in Russ.). Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/18705>
- [20] Matrosov A.D., Shvetsov G.A. Experimental investigation of current instability of shaped-charge jets. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, no. 4, pp. 464–469. DOI: 10.1007/BF02369716
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02369716>
- [21] Plyashkevich L.N., Shuvalov A.M., Spirov G.M., Brodskiy A.Ya., Dimant E.M., Luk'yanov N.B., Makaev B.S., Rep'yev A.G., Gaydash S.V., Zaytsev A.S. Disruption of shaped-charge jets by a current. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 602–605. DOI: 10.1023/A:1020355021586
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1020355021586>
- [22] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, no. 6, pp. 521–526. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.024
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734743X10001703>
- [23] Grigoryan V.A., ed. *Zashchita tankov [Protection for tanks]*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 327 p.
- [24] Ogorkiewicz R.M. Future tank armors revealed. *Janes Int. Defense Review*, 1997, no. 5, pp. 50–51.
- [25] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Electrical protection advanced technology combat vehicle of the XXI century. *Oboronnaya tekhnika*, 2000, no. 1-2, pp. 19–25.
- [26] Fedorov S.V. Electrodynamic protection against shaped-charge weapons. Physical aspects of functioning. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 3, pp. 79–100.
- [27] Fedorov S.V. Electrodynamic protection against shaped-charge weapons. Prospects of practical implementation. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 4, pp. 12–32.
- [28] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D. Prediction of the penetrating power of metallic shaped charge jets subjected to an intense electric current pulse. *Technical Physics*, 2003, vol. 48, no. 7, pp. 829–836. DOI: 10.1134/1.1593187
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/1.1593187>
- [29] Littlefield D.L., Powell J.D. The effect of electromagnetic fields on the stability of a uniformly elongating plastic jet. *Physics of Fluids A*, 1990, vol. 2, no. 12, pp. 2240–2248.
- [30] Littlefield D.L. Finite conductivity effects on the MHD instabilities in uniformly elongating plastic jets. *Physics of Fluids A*, 1991, vol. 3, no. 6, pp. 1666–1673.
- [31] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Formation of magnetohydrodynamic instability of the shaped-charge jet exposing electrodynamic impact. *Oboronnaya tekhnika*, 1998, no. 1-2, pp. 49–56 (in Russ.).
- [32] Babkin A.V., Kolychev M.E., Ladov S.V., Fedorov S.V. On probable mechanism of shaped-charge jet disruption by a current pulse. *Oboronnaya tekhnika*, 1995, no. 4, pp. 47–54 (in Russ.).
- [33] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Effect of shaped-charge jet compressibility and strength on the characteristics of their inertial stretching in free flight. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 177–184. DOI: 10.1007/BF02467898 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02467898>

[34] Appelgren P., Skoglund M., Lundberg P., Westerling L., Larsson A., Hurtig T. Experimental study of electromagnetic effects on solid copper jets. *Journal of Applied Mechanics*, 2010, vol. 77, no. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1115/1.3172251

Available at: <http://appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1420573>

[35] Fedorov S.V. On the scattering of a metallic shaped-charge jet with an intense electric current pulse passing through it. *Technical Physics*, 2012, vol. 57, no. 10, pp. 1341–1352. DOI: 10.1134/S1063784212100052

Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1063784212100052>

[36] Selivanov V.V., ed. *Sredstva porazheniya i boepripasy* [Destruction means and explosives]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 984 p.

[37] Knopf G. Pulsed high magnetic fields. Amsterdam, North-Holland Publ. Company, 1970. 373 p. (Russ. ed.: *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polya*. Moscow, Mir Publ., 1972. 392 p.)

[38] Ford M.D., Dorr G.B., Toepfer A.J. Design and testing of a compact electromagnetic armor power system. *Proc. of the 11th Annual US Army Ground Vehicle Survivability Symp.* 2000.

Fedorov S.V. — Assist. Professor of High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bolotina I.A. — Assistant of Rocket-and-Space Engineering Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Strukov Yu.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fedorov S.V., Bolotina I.A., Strukov Yu.A. Analysis of Anti Shaped-Charge Resistance of Electrodynamic Protection with Implementation of "Shutdown" of Energy Capacitive Storage. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 4, pp. 42–64. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-42-64