

УДК 621.3

В.Т. ЧЕМЕРИС, канд. техн. наук (Нац. авиационный ун-т Украины, г. Киев)

АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО УСКОРЕНИЯ МАКРОТЕЛ (Часть 2)

В первой части статьи [1] были рассмотрены принципы построения многоступенчатых импульсных индукционных ускорителей макротел в виде дискретной последовательности одноступенчатых ускорителей. Во 2-й части работы рассмотрены особенности мощных индукторных систем калибра 120 мм, специфика работы стартовой ступени ускорителя на основе торцевого взаимодействия индуктора с плоским якорем, а также индукционные системы метания плоских пластин. Обсуждается возможность синхронного ускорения проводящего тела в поле импульсной бегущей магнитной волны, создаваемой распределенной системой катушек.

У першій частині статті було розглянуто принципи побудови багатоступінчастих імпульсних індукційних прискорювачів макротіл у вигляді дискретної послідовності одноступінчастих прискорювачів. В 2-й частині роботи розглянуто особливості потужних індукторних систем калібру 120 мм, специфіка роботи стартового ступеня прискорювача на основі торцевої взаємодії індуктора з плоским якорем, а також індукційні системи прискорення плоских пластин. Обговорюються можливості синхронного прискорення електропровідного тіла в полі імпульсної бігучої магнітної хвилі, яку створено розподіленою системою катушок.

1. Особенности индукторных систем для ускорителей большой мощности.

Рассматривается многоступенчатый ускоритель цилиндрической конфигурации с движением массивного снаряда вдоль оси индукторной системы. Свойства высоконагруженных индукторных систем и их устойчивость к нагрузкам могут быть изучены методами ма-

тематического моделирования при заторможенном якорем. В качестве примера рассматривается индукторная система индукционного ускорителя калибра 120 мм при массе снаряда от 25 до 50 кг при мегаамперном уровне тока в катушке индуктора.

Принципиальная схема одной ступени ускорителя показана на рис. 1, где изображены также силовые линии импульсного магнитного поля. Картина магнитного поля моделировалась с помощью программы Elcut v. 5.7 professional при содействии ООО «Тор» (Россия) [2]. На рис. 1 и далее на рис. 2 используются следующие обозначения: 1 – массивный сердечник снаряда; 2 – активный проводник якоря; 3 – промежуточный слой (образуется при запрессовке проводника 2); 4 – катушка индуктора; 5 – бандаж индуктора; 6 – защитный магнитный экран. Снаряд 1 изготавливается из немагнитной либо магнитной стали (далее рассмотрен пример выполнения из магнитной стали); проводник якоря 2 – из меди; катушка индуктора 4 – из проводников с высокой устойчивостью к циклическим деформациям; бандаж индуктора 5 – из высокопрочного немагнитного и неэлектропроводного материала; магнитный экран 6 – из магнитной конструкционной

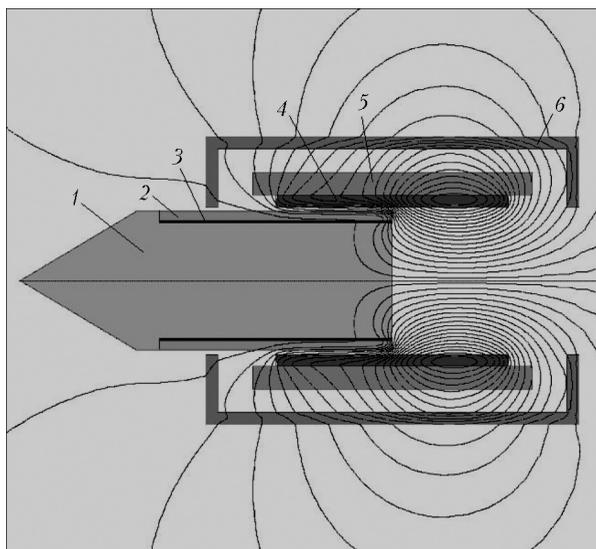


Рис. 1. Продольное сечение типовой ступени индукционного ускорителя с массивным якорем

© В.Т. ЧЕМЕРИС, 2014

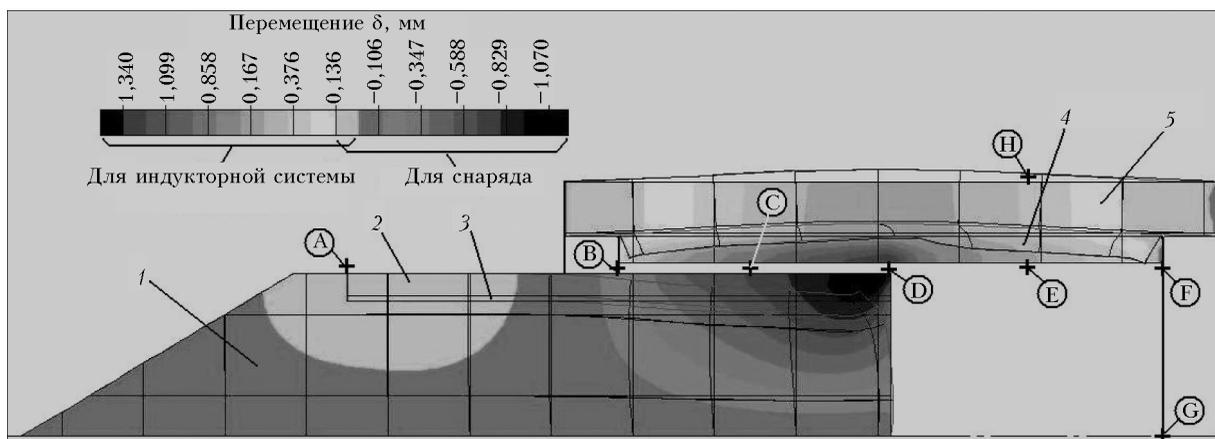


Рис. 2. Картина радиальных перемещений в элементах индукторной системы под действием электромагнитных сил. (значения индукции в точках, обозначенных латинскими буквами от А до Н, даны в таблице)

стали, возможно также применение двухслойного материала (наружный слой — сталь, внутренний слой — медь или алюминий). Для показанного на рис. 1 расположения снаряда относительно индуктора полный ток в катушке индуктора составляет 20 МА, полный ток, индуктированный в проводнике якоря равен 12,4 МА, мгновенное максимальное значение осевой электромагнитной силы 740 МН. Среднее осевое усилие, действующее на снаряд в такой системе за время пролета снаряда сквозь индукторную систему, достигает величины 250–300 МН, что достаточно для ускорения снаряда массой 50 кг до предельно допустимого ускорения (порядка $5 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$). Осевая составляющая индукции магнитного поля в зазоре между поверхностью якоря и катушкой индуктора изменяется в пределах от 5 до 150 Тл в зависимости от перемещения якоря. Подробнее структура поля на поверхности якоря рассмотрена далее на рис. 3.

Как показали расчеты, при таких высоких электромагнитных нагрузках внешнее магнитное поле вблизи наружной поверхности индуктора достигает 27 Тл. Для ограничения внешних полей рассеяния должен применяться магнитный экран, как показано на рис. 1 (поз. 6). Расчет картины поля был выполнен нами как при отсутствии экрана, так и с уче-

том наличия экрана, выполненного из ферромагнитной стали с коэффициентом электропроводности 10^6 См/м .

Из-за сильного насыщения стали эффективность ферромагнитного экрана не очень велика, поле вблизи наружной поверхности экрана превышает допустимые значения. Более высокую эффективность имеют двухслойные экраны, у которых внутренняя поверхность стального экрана покрыта слоем меди или алюминия [3]. Применение двухслойного экрана в рассматриваемой задаче позволяет снизить магнитную индукцию на внешней поверхности экрана до 0,3 Тл. Экранирование снижает радиальные нагрузки на снаряд и катушку индуктора, однако значительно меньше влияет на осевое усилие (его снижение из-за наличия экрана составляет всего 5–7 % при том же токе индуктора) [3].

Силовое взаимодействие индуктора с ускоряемым телом при заторможенном снаряде было промоделировано нами с помощью программы Elcut v.5.7 [2]. На рис. 2 при большом увеличении масштаба перемещений отображены результаты радиальной деформации индуктора и метаемого снаряда под действием электромагнитных сил в индукторной системе без защитного экрана. Абсолютный размер радиальных перемещений на рис. 2 показан с

Индукция магнитного поля в характерных точках индукторной системы

Обозначение точки	A	B	C	D	E	F	G	H
Индукция в системе без экранирования (рис. 2), Тл	5,3	66,7	124	130,6	75,4	43,4	37,6	27

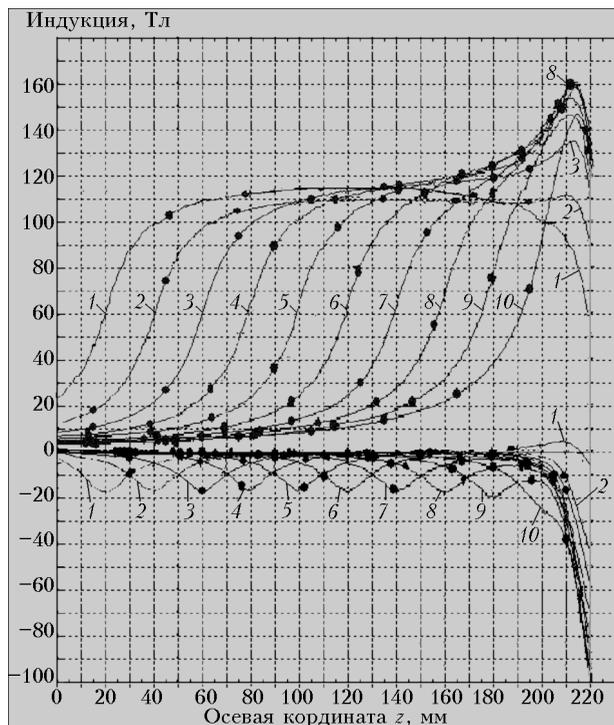


Рис. 3. Изменение структуры импульсного магнитного поля на поверхности заторможенного якоря при его осевом смещении влево относительно катушки индуктора. Верхние кривые — осевая составляющая индукции B_z , нижние кривые — радиальная составляющая индукции B_r . Цифрами обозначены кривые для различных значений относительного осевого смещения: 1 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0$; 2 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,1$; 3 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,2$; 4 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,3$; 5 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,4$; 6 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,5$; 7 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,6$; 8 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,7$; 9 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,8$; 10 — $\tilde{z}_{\text{см}} = 0,9$

помощью серой шкалы, на которой снаряду соответствует сжатие, а индуктору — растяжение. При моделировании были заданы следующие значения модуля упругости/модуля сдвига: для массивного сердечника якоря $E/G = (20/7,81) \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, для проводящего слоя снаряда $E/G = (12,3/4,56) \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, для катушки индуктора $E/G = (50/1,95) \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$ и для бандажа индуктора $E/G = (50/1,95) \cdot 10^{12} \text{ Н/м}^2$.

Для ограничения радиальных деформаций катушки индуктора, способных резко сократить ее ресурс, бандаж, удерживающий радиальные загрузки на катушку, должен быть выполнен из материала с максимально возможной устойчивостью к деформациям на растяжение, обусловленным воздействием магнитного давления.

Определение силового форм-фактора индукционной системы по результатам модели-

рования импульсного магнитного поля при заторможенном снаряде. Структура магнитного поля на поверхности якоря при изменении осевой координаты снаряда по отношению к индуктору показана на рис. 3 в системе координат, связанной с якорем. Здесь верхняя группа кривых представляет осевую составляющую магнитной индукции B_z , а нижний ряд кривых — радиальную составляющую индукции B_r . Осевой размер катушки индуктора $l_1 = 200 \text{ мм}$, осевой размер активного проводника якоря $l_2 = l_1$. Индуктор запитан прямоугольным импульсом тока, а катушка индуктора смещается в системе координат якоря каждый раз вправо на величину Δz , составляющую $0,1$ длины катушки, то есть на 20 мм . Цифрами от 1 до 10 пронумерованы кривые, соответствующие 10 различным положениям снаряда внутри индуктора. Цифра 1 соответствует симметричному положению активного проводника снаряда относительно катушки индуктора, когда относительное смещение $\tilde{z}_{\text{см}} = \Delta z / l_1 = 0$. Для иных положений якоря нумерация кривых и соответствующее им осевое смещение якоря указаны в подрисуночной надписи к рис. 3. На рис. 3 видно, что при смещении якоря влево от симметричного положения всего на $0,1l_1$ на его правом торце резко возрастает до $17\text{--}18 \text{ Тл}$ радиальная составляющая индукции B_r (кривая 2 в нижней части рисунка, справа). Этот максимум B_r сохраняет свою величину при дальнейшем смещении якоря, в то время как осевая составляющая индукции B_z на хвостовой части якоря начинает возрастать выше уровня 110 Тл только после прохождения якорем $0,2\text{--}0,3$ длины катушки индуктора (кривые 3, 4 на рис. 3).

Исходя из соотношения $F_z = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{dz}$, с использованием нормированной величины коэффициента взаимной индукции

$$\tilde{M} = L_{12} / (w_1 w_2)$$

для каждого положения якоря относительно катушки индуктора была вычислена производная коэффициента взаимной индуктивности как функции смещения якоря в приведенной форме:

$$f(z) = \frac{d\tilde{M}}{dz} = \frac{1}{w_1 w_2} \frac{dL_{12}}{dz} = - \left| \frac{F_z}{s_1 s_2} \right| < 0.$$

График этой зависимости приведен в работе [3]. Далее, используя из [1] формулу (2) для электромагнитной силы, ускоряющей якорь

$$F_z = \mu_0 i_1 w_1 i_2 w_2 \frac{R_1 R_2}{l_1 l_2} \Phi_z,$$

в которой величина Φ_z была определена аналитически для тонкослойных катушек в работе [4], можно найти величину силового фактора Φ_z :

$$\Phi_z = \frac{l_1 l_2}{\mu_0 R_1 R_2} \left| \frac{d\tilde{M}}{dz} \right|.$$

Величина $f_z(z) = \frac{dM}{dz}$, равно как и $\Phi_z(z) = l_1 l_2 |f_z(z)| / (\mu_0 R_1 R_2)$, может быть использована в системе уравнений, описывающих динамику ускорения снаряда.

2. Стартовый ускоритель с дисковым или коаксиальным якорем и торцевым взаимодействием между катушкой индуктора и вторичным контуром.

В ранних работах по электромагнитному ускорению неоднократно рассматривалась коаксиальная схема индукционного ускорителя («tubular coilgun»), в которой снаряд имеет кольцевую форму, а ствол ускорителя должен иметь по центру консоль, закрепленную в начале участка разгона и имеющую свободный конец на выходе. Торцевое взаимодействие между катушкой индуктора и снарядом позволяет эффективно осуществить разгон снаряда от нулевой скорости. Принципиальная схема стартового «торцевого» ускорителя показана на рис. 4 в трех вариантах.

Вариант «А» характеризуется кольцевой формой снаряда и катушки и наличием направляющей консоли. Вариант «Б» отличается тем, что снаряд выполнен в форме диска с возможностью ограниченного осевого перемещения и может быть использован в роли стартового толкателя для снаряда меньшего калибра (как это было предложено в одном из патентов США [6]). Вариант «В» рассчитан на дальнейшее ускорение подкалиберного снаряда в стволе большого диаметра. Все варианты имеют аналогию с пневмоускорителем [5] с тем отличием, что вместо давления сжатого газа в полости рабочего объема действует давление магнитного поля катушки с током.

В рассматриваемой схеме (рис. 4) при подаче импульсного тока в катушку индуктора 3 энергия поля концентрируется в суммарном объеме зазоров V с двух сторон от катушки: с одной стороны, между катушкой 3 и торцевой частью ускоряемого снаряда и, с другой стороны, между катушкой 3 и неподвижной опорной проводящей плитой 1. Катушка индуктора 3 имеет свободу осевого перемещения благодаря гибкости токоподвода. Под действием электромагнитных сил катушка 3 приобретает импульс в направлении оси системы, отталкиваясь от плиты 1, и через электромагнитные силы, воздействуя на проводящий торец проводника якоря 5, сообщает снаряду 7 ускорение. Возможность перемещения катушки индуктора позволяет более полно использовать электромагнитную энергию, сообщенную индукторной системе. Применительно к индукционному ускорителю дисковой конфигурации расчетная модель, соответствующая варианту «Б», исследовалась в книге В.Ф. Болюха и

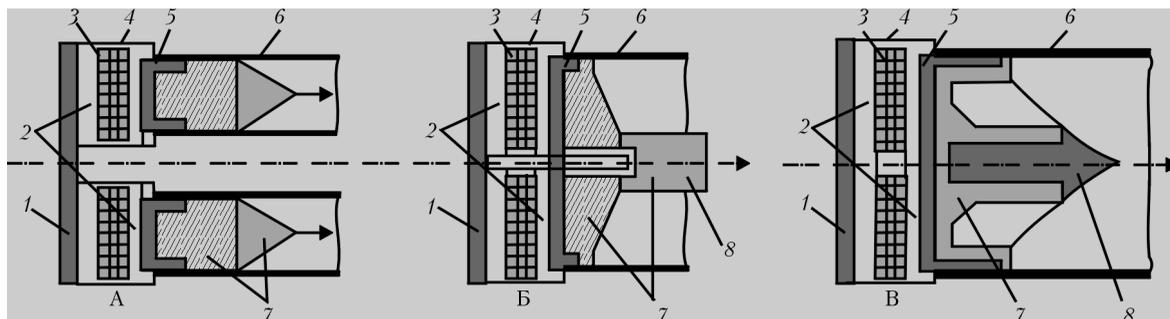


Рис. 4. Схема стартового ускорителя: А — коаксиальная конфигурация; Б — дисковая конфигурация; В — с подкалиберным снарядом; 1 — опорная металлическая плита; 2 — рабочий объем поля; 3 — катушка индуктора; 4 — металлический корпус; 5 — активный проводник якоря; 6 — канал ускорителя (ствол); 7 — массивный якорь; 8 — ударник (толкатель)

В.Г. Данько [7] (см. раздел 10 книги) при максимальной индукции поля в центре катушки индуктора 4 Тл. В схеме на рис. 4 вместо короткозамкнутых катушек на торцах, которые были рассмотрены в работе [7], катушка 3 взаимодействует с симметрично расположенными относительно нее проводящими поверхностями 1 и 5.

Использование двухстороннего взаимодействия катушки индуктора с проводящими поверхностями опорной плиты и ускоряемого тела кроет в себе возможность создания стартовой ступени с повышенным значением коэффициента электромеханического преобразования энергии. Увеличение КПД более, чем в 2 раза по сравнению с ускорителем, имеющим неподвижную катушку индуктора [7], достигается благодаря увеличению скорости якоря под действием добавочного импульса, получаемого от подвижной катушки.

3. Индукционные системы для метания плоских пластин.

Импульсное электромеханическое преобразование энергии может достаточно эффективно осуществляться при плоской геометрии катушек, возбуждающих магнитное поле, и выполнении якоря в форме плоской пластины из электропроводящего материала. При этом движение пластины происходит не вдоль оси магнитного поля, а в поперечном направлении, то есть перпендикулярно оси поля в плоскости зазора между катушками (рис. 5). Результаты оптимизационных расчетов индукторных систем прямоугольной конфигурации [8] указывают на необходимость иметь малый зазор между пластиной и катушками и относительно малую толщину намотки катушек, образующих индуктор. Этим достигается наи-

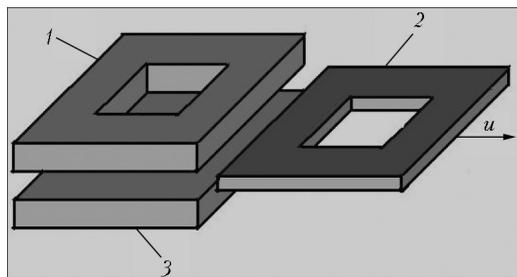


Рис. 5. Индукторная система плоской конфигурации: 1, 3 — катушки индуктора; 2 — метаемая пластина; u — скорость движения пластины

большее начальное значение коэффициента магнитной связи между обмоткой индуктора и метаемой пластиной. Если катушки и пластина имеют в плане конфигурацию, близкую к квадратной или же к прямоугольной с большей стороной, ориентированной поперек направления движения, тогда обеспечивается наибольшая производная коэффициента магнитной связи при перемещении пластины относительно индуктора. Для расчета коэффициента связи между каждой из катушек индуктора и пластиной в зависимости от перемещения пластины использовались формулы для взаимной индуктивности прямоугольных катушек из работы [9].

В работах зарубежных ученых (из США, Китая) изучались различные варианты плоских индукторных систем для метания макротел в виде плоских пластин. В работе [10] был исследован экспериментальный макет 3-ступенчатого ускорителя плоских пластин с питанием каждой ступени от отдельного емкостного накопителя. В качестве индуктора использовалась намотанная медной шиной 10-витковая катушка с размерами 125×105 мм при толщине намотки 170 мм. Метаемое тело представляло собой алюминиевую пластину массой 0,16 кг с размерами 110×70×8 мм. Схема взаимодействия показана на рис. 6.

После 3-х ступеней ускорения в работе [10] была достигнута скорость метаемого тела 45 м/с при максимальной величине зарядного напряжения емкостей до 5 кВ. Дальнейшие усилия этих авторов были направлены на моделирование 100-ступенчатого ускорителя с целью повысить скорости метания до 1 км/с [11]. Оптимизация ступеней ускорителя здесь свелась к выбору величины емкости и начального напряжения ступеней накопителя, однако не коснулась геометрии индукторной системы. Позже появились предложения использовать плоские индукторные системы для активной защиты бронетехники от поражения снарядами [12], в отличие от известных систем защиты с торцевым взаимодействием индуктора и метаемой пластины, рассматривавшихся ранее на 13-м международном IEEE EMU симпозиуме (2007 г.).

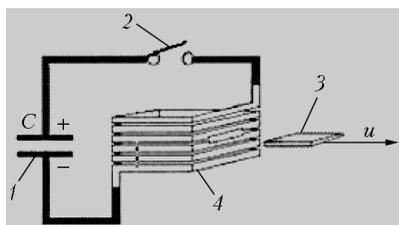


Рис. 6. Метание плоской пластины в одной из ступеней многоступенчатого ускорителя [10, 11]: 1 — накопитель энергии; 2 — коммутатор; 3 — метаемые пластины; 4 —

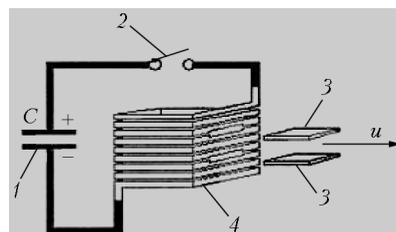


Рис. 7. Метание плоских пластин в системе активной защиты бронетехники [12]: 1 — накопитель энергии; 2 — коммутатор; 3 — метаемые пластины; 4 — катушка индуктора; u — скорость движения пластин

4. Ускоритель с движением метаемого тела на фронте бегущей магнитной волны.

Если секции катушек индукторной системы плотно размещены на длине разгонного участка (впритык одна к другой) и группа таких секций, занимающих длину, равную длине вторичного контура на якоре, запитана импульсным током, то при оперативной коммутации этих секций таким образом, чтобы группа запитанных катушек была перемещаемой с ускорением за счет переключений, получим квазираспределенную систему с ускоренной бегущей волной магнитного поля [8]. Здесь не будет отдельных актов взаимодействия катушек со снарядом, а будет непрерывное перемещение фронта зоны, в которой создано магнитное поле.

Взаимодействие ускоренной волны поля с массивным проводящим телом может иметь упругий характер и заканчиваться одним из следующих процессов. Либо в результате взаимодействия волны поля с индуктированными в теле токами оно будет отталкиваться вперед, что в дальнейшем приведет к колебательному движению, когда волна снова догонит тело, или же, если уровень токов в теле недостаточен, волна поля обойдет тело и вытолкнет его назад, то есть произойдет срыв ускорения. Идеализированная схема такого упругого взаимодействия изучалась нами в работе [13]. Было выявлено, что существует безразмерная критическая масса ускоряемого тела $\tilde{m}_{кр}$, определяемая отношением кинетической энергии W_K , сообщаемой телу при его захвате волной, к энергии магнитного поля W_M , переносимой волной, и максимальным коэффициентом магнитной связи k_{12} между ускоряющей катушкой и телом:

$$\tilde{m}_{кр} = \frac{W_K}{W_M} \leq \frac{k_{12}^2}{1 - k_{12}^2},$$

откуда необходимая энергия волны

$$W_M \leq W_K \frac{1 - k_{12}^2}{k_{12}^2}.$$

Джоулева диссипация энергии в ускоряемом теле снижает величину критической массы и повышает энергию, необходимую для захвата тела волной. Реальные условия удержания проводящего тела бегущей магнитной волной зависят от конфигурации поля, создаваемого индукторной системой.

На рис. 8 показана зависимость приведенной величины осевого электродинамического усилия $F/|i_1 i_2|$, действующего на перемещаемый внутренний соленоид (якорь) в системе, состоящей из двух коаксиальных катушек с равными ампервитками ($i_1 w_1 = i_2 w_2$), от величины относительного смещения катушек вдоль осевой линии при двух различных направлениях тока в якоре относительно тока в индукторе (встречном — кривая 1 либо согласном — кривая 2). Геометрические характеристики и материал сердечника якоря соответствует данным индукторной системы без внешнего экрана, приведенной на рис. 2.

Различие максимумов кривых 1 и 2 на рис. 8 обусловлено различным насыщением сердечника якоря при встречном либо согласном направлении токов в катушках. Кривые рис. 8 показывают, что при определенном смещении якоря относительно индуктора на него может действовать ускоряющая сила. Ее величина должна быть достаточной для достижения ускорения величиной $a = k_{ср} F_{max} / m_a$, где m_a — полная масса якоря, $k_{ср}$ — коэффициент усреднения электродинамической силы на интервале взаимодействия якоря с ин-

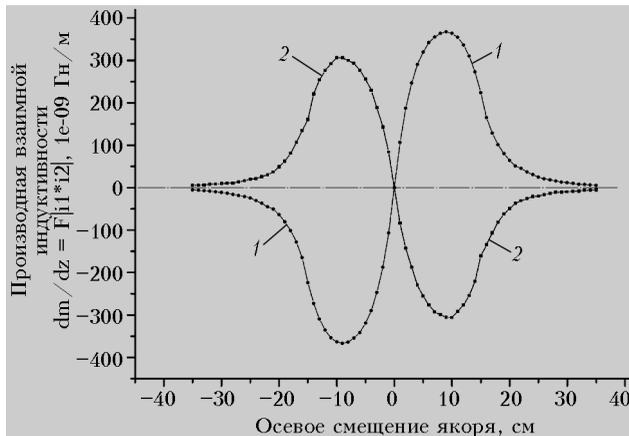


Рис. 8. Характеристика силового взаимодействия двух цилиндрических катушек (одна из них на стальном якоре) при различной взаимной ориентации направлений тока: 1 – режим выталкивания якоря из индуктора (токи противоположного направления); 2 – режим втягивания якоря в индуктор (токи одинакового направления)

дуктором. Когда токовая зона индуктора перемещается вдоль системы распределенных катушек с этим же ускорением $a_{\text{ср}}$, движение якоря синхронно с движением волны токов в катушках будет возможно при неизменной величине средней силы. Всякие колебания магнитного поля, связанные с коммутацией катушек ускоряющей системы, приведут к колебаниям положения якоря относительно подвижной волны токов и дополнительным колебаниям ускоряющей силы.

Ускорение будет стабильным, если размах этих колебаний не превысит порог устойчивого движения, определяемый положением максимумов силы $\pm F_{\text{max}}$ на оси ординат рис. 8 относительно нулевого значения силы.

Выводы

1. В осесимметричных индукционных системах цилиндрической конфигурации с высоким уровнем электродинамических усилий для обеспечения приемлемых ресурсных показателей индукторной системы необходимы специальные конструктивные меры по снижению радиальных деформаций катушки индуктора.

2. Картина нагружения элементов индукторной системы электродинамическими силами обещает быть более благоприятной в системах метания плоских тел (т.е. электропроводящих пластин).

3. Цилиндрические системы с торцевым взаимодействием между катушкой индуктора

и плоским якорем могут быть использованы в качестве стартовых ступеней в многоступенчатых ускорителях. Эффективность стартовой системы повышается за счет дополнительного импульса, сообщаемого якору подвижной катушкой.

4. Квазираспределенные системы ускорения проводящих тел под действием непрерывно перемещаемой с ускорением импульсной волны магнитной индукции могут быть перспективны при условии, что конфигурация магнитного поля в них будет соответствовать условиям удержания проводящего тела бегущей магнитной волной. Для этого токи в обмотке ускоряемого тела должны поддерживаться извне за счет гальванической связи с дополнительным источником тока.

Список литературы

1. Чемерис В.Т. Анализ концепции многоступенчатого ускорения макротел. Часть 1 // Озброєння та військова техніка. – 2013. – № 1. – С. 51–62.
2. Комплекс программ «Elcut». – ООО «Тор», г. Санкт-Петербург, Россия. – Доступ в Интернете: elcut.ru.
3. Чемерис В.Т., Марітченко Г.Є. Застосування моделюючої програми «ELCUT» для дослідження електромагнітних характеристик індукторних систем. – Науковий журнал. – 2011. – № 1–2. – С. 116–123.
4. Дойников Н.И. Определение силы взаимодействия двух коаксиальных соленоидов // Электrofизическая аппаратура. – 1965. – Вып. 3. – С. 46–50.
5. Холзунов А.Г. Основы расчета пневматических приводов. – М.-Л.: Машиностроение, 1964. – 268 с.
6. Aivaliotis E., McKee B.D. Electromagnetic launcher system. Патент США № 5075136. – 1991. – Int. Cl. F41B 6/00.
7. Болух В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – 260 с.
8. Чемерис В.Т. Многоступенчатый индукционный ускоритель: поиск технических решений // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 45–57.
9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей // Справ. кн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.
10. Chun Z., Jiyan Z., Xiaopeng L., Minfu L., Zhengyang Z., and Yufeng W. Study of a three-stage reconnection electromagnetic launcher using triggered vacuum switches // IEEE Trans. on Magnetics. – January 2007. – Vol. 43. – No. 1. – P. 219–222.
11. Chun Zhao, Junjia He, Jiyan Zou, Xiaopeng Li, and Zhengyang Zhou. Simulation and optimization of the multi-stage reconnection electromagnetic launch // IEEE Trans. on Magnetics. – January 2009. – Vol. 45. – No. 1. – P. 506–509.
12. Xiaopeng L., Yufeng W., Meng Tao, Cun Z., and Liyi L. Multi-projectile electromagnetic armor // Proceed. of 13th IEEE EML symposium. – 2007. – Paper № 59. – 5 p.
13. Чемерис В.Т., Подольцев А.Д. Особенности увлечения проводящего контура движущимся магнитным полем // ПМТФ. – 1983. – № 3. – С. 120–123.