

УДК 621.31:629.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ЦЕПИ ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ МЕТАНИЯ МАКРОТЕЛ

В. Т. ЧЕМЕРИС, канд. техн. наук (Нац. авиац. ун-т Украины, г. Киев),
В. В. МАШТАЛИР, инж. (Ген. штаб Вооруженных сил Украины, г. Киев),
А. Е. МАРИНЧЕНКО, канд. техн. наук (Нац. авиац. ун-т Украины, г. Киев)

Определены эквивалентные параметры первичной цепи, пригодные для экспресс-оценки требований к источнику импульсного тока и предварительной оценки эффективности метания на основании анализа уравнений двухконтурного импульсного индукционного ускорителя макротел. Показано влияние электромеханического преобразования энергии на величину затухания, вносимого в разрядный контур первичной цепи. Рассчитан реальный характер изменения вносимого сопротивления во времени.

Визначено еквівалентні параметри первинного кола, що можуть бути використані для експрес-оцінки вимог до джерела імпульсного струму та попередньої оцінки ефективності розгону тіла на підставі аналізу рівнянь двоконтурного імпульсного індукційного прискорювача макротіл. Продемонстровано вплив електро механічного перетворення енергії на величину загасання, що вноситься у розрядний контур первинного кола. Розраховано реальний характер зміни опору, який внесено у первинний контур, як функції часу.

Equivalent parameters of a primary circuit fit for express-estimation of requirements to the pulse current source and preliminary assessment of throwing efficiency are determined on basis of analysis of equations of a two-circuit pulse induction accelerator of macrobodies were determined. Influence of the electro-mechanical transformation of energy on value of attenuation introduced into the discharge circuit of the primary loop is shown. Real character of the introduced resistance change in time is calculated.

Индукционный ускоритель макротел [1–3] представляет собой двухконтурный электро-механический преобразователь импульсного действия с весьма существенной внутренней нелинейностью рабочего процесса. Как видно из рис. 1, первичный контур преобразователя состоит из импульсного соленоида (индуктора), а вторичный контур образован проводником на поверхности метаемого тела (якоря). Нелинейность электромагнитных процессов обусловлена изменением магнитной связи между контурами по мере перемещения вторичного контура под действием электромагнитных сил, а также изменением электрического сопротивления каждого из контуров на протяжении рабочего цикла. К причинам, вызывающим изменение электросопротивления, относятся: формирование глубины проникновения тока (или так называемого

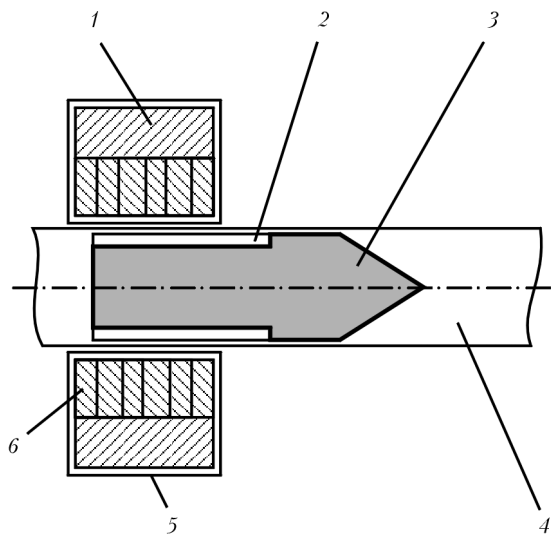


Рис. 1. Конструктивная схема одноступенчатого индукционного ускорителя: 1 – бандаж для упрочнения катушки; 2 – проводник подвижной части (якорь); 3 – метаемое тело; 4 – направляющая система (ствол), в котором движется метаемое тело; 5 – индуктор; 6 – витки катушки индуктора

© В. Т. ЧЕМЕРИС, В. В. МАШТАЛИР, А. Е. МАРИНЧЕНКО, 2009

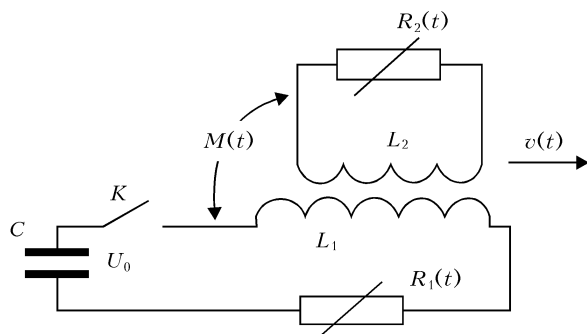


Рис. 2. Электрическая схема двухконтурного индукционного ускорителя: C — емкостный накопитель энергии; K — стартовый замыкатель; L_1 , $R_1(t)$ — параметры первичного контура (индуктора); L_2 , $R_2(t)$ — параметры вторичного контура (якоря); $M(t)$ — коэффициент взаимной индукции между первичным и вторичным контурами; $v(t)$ — скорость движения якоря

скин-слоя) в проводники, изменение размеров области, занятой токами во вторичном контуре, как результат вылет якоря из зоны взаимодействия с индуктором, и нагрев проводников импульсным током. Последний фактор (нагрев джоулевым теплом) учитывается наиболее просто, поэтому в данной работе основное внимание уделяется учету влияния скин-слоя и перемещения якоря. В полном объеме анализ рабочего цикла ускорителя может быть выполнен на основе численного моделирования рабочего процесса в том или ином приближении [1–3]. В работе [3] авторами предложен простой и надежный алгоритм численного моделирования средствами пакета Матлаб на основе рассмотрения двухконтурной электрической схемы ускорителя (рис. 2). В целом моделирование ускорителя численными методами является довольно трудоемким процессом и требует определенных затрат времени на разработку алгоритма. В то же время при разработке опытных моделей ускорителя часто требуется экспресс-оценка ожидаемых результатов по ускорению макро-

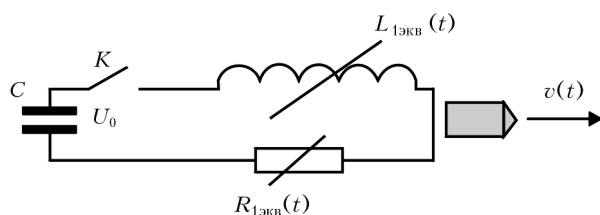


Рис. 3. Одноконтурная схема замещения индукционного ускорителя ($L_{1экв}(t)$ и $R_{1экв}(t)$ — эквивалентные параметры первичной цепи)

тела и предсказание характеристик рабочего режима источника импульсного тока, используемого для питания данного ускорителя. Такая экспресс-оценка может быть выполнена с помощью одноконтурной схемы замещения ускорителя (рис. 3), в которой нелинейные, т. е. зависящие от времени элементы (эквивалентные индуктивность и сопротивление первичной цепи), определены на основе учета особенностей электрохимического преобразования энергии. Эквивалентная индуктивность однозначно зависит от коэффициента магнитной связи между контурами, в то время как характер изменения эквивалентного сопротивления существенно зависит от особенностей электрохимического преобразования энергии. В данной работе рассмотрен способ определения эквивалентного сопротивления первичной цепи в виде функции времени, обусловленной протеканием указанных выше процессов (формирование скин-слоя, вылет якоря из соленоида). Наряду с приближенной аналитической оценкой зависимости эквивалентного сопротивления от этих факторов проведено строгое численное определение эквивалентного сопротивления первичной цепи для обобщенной модели ускорителя, рассмотренной в работе [3].

Исходные уравнения. Основой для дальнейшего рассмотрения служат уравнения двухконтурной схемы ускорителя, аналогичные использованным в работе [3]:

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 + \frac{d}{dt} [M(t) I_2] = U_1(t), \quad (1)$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + \frac{d}{dt} [M(t) I_1] = 0, \quad (2)$$

где I_1 , I_2 — токи первичного и вторичного контура соответственно; $M(t)$ — коэффициент взаимной индуктивности контуров; $U_1(t)$ — напряжение питания на зажимах индуктора; R_1 , R_2 — омические сопротивления контуров, взятые с учетом влияния основных факторов, обуславливающих их изменение во времени (в нашем рассмотрении это скин-эффект и изменение размеров области, обтекаемой токами во вторичном контуре). По сути это эффективные активные сопротив-

ления в соответствии с определением, данным в работе [3], т. е. $R_1 = R_{1эф}$, $R_2 = R_{2эф}$, в которых учитывается влияние дополнительных факторов, определяющих отличие этих сопротивлений от омических (конструктивных) сопротивлений, вычисленных для исходного состояния якоря. Если выразить производную dI_2/dt из уравнения (2) и подставить в уравнение (1), то из него можно найти эквивалентные характеристики первичного контура:

$$\left[L_1 - \frac{M^2(t)}{L_2} \right] \frac{dI_1}{dt} + \left[R_1 + \frac{I_2}{I_1} \frac{dM(t)}{dt} - \frac{I_2}{I_1} \frac{R_2}{L_2} M(t) - \frac{M(t)}{L_2} \frac{dM(t)}{dt} \right] \times I_1 = U_1(t). \quad (3)$$

Здесь выражение в скобках перед производной тока дает нам эквивалентную индуктивность первичного контура, а выражение в квадратных скобках перед током I_1 представляет собой эквивалентное сопротивление первичного контура

$$R_{1экв}(t) = R_1 + \frac{I_2}{I_1} \frac{dM(t)}{dt} - \frac{I_2}{I_1} \frac{R_2}{L_2} M(t) - \frac{M(t)}{L_2} \frac{dM(t)}{dt}, \quad (4)$$

в котором, помимо ранее названных факторов, содержится изменяющийся во времени коэффициент трансформации тока из первичного контура во вторичный $K_I(t) = I_2/I_1$. Вводя зависящий от времени коэффициент магнитной связи контуров $k_m(t) = \frac{M(t)}{\sqrt{L_1 L_2}} = k_0 \gamma(t)$, где $M(t) = M_0 \gamma(t)$, $M_0 = M(0)$, $k_0 = M_0/\sqrt{L_1 L_2}$, уравнение (3) можно переписать в форме

$$\left[1 - k_m^2(t) \right] \frac{dI_1}{dt} + \left[\frac{R_1}{L_1} + \frac{I_2}{I_1} \left(\frac{\sqrt{L_2}}{L_1} \frac{dk_m(t)}{dt} - \frac{R_2}{\sqrt{L_1 L_2}} k_m(t) \right) - \frac{1}{2} \frac{dk_m^2(t)}{dt} \right] I_1 = \frac{U_1(t)}{L_1}. \quad (5)$$

Приближенный теоретический анализ. Выражение для эквивалентного сопротивления в

уравнении (3) можно значительно упростить, если в уравнении (2) омическое падение напряжения играет незначительную роль вследствие малости отношения R_2/L_2 . Согласно (2)

$$\frac{dI_2}{dt} = - \left[\frac{R_2}{L_2} I_2 + \frac{M(t)}{L_2} \frac{dI_1}{dt} + \frac{I_1}{L_2} \frac{dM(t)}{dt} \right].$$

Полагая, что $R_2/L_2 \rightarrow 0$, для начального отрезка времени ускорения при быстром нарастании тока I_1 можно принять, что $di_1/i_1 \gg dM(t)/M(t)$. Это позволяет получить приближенное значение коэффициента трансформации тока $K_I = I_2/I_1 \approx -M(t)/L_2$. Подставив его в (4), получим

$$R_{1экв}(t) = R_1 + R_2 \left(\frac{M(t)}{L_2} \right)^2 + 2 \frac{M(t)}{L_2} \frac{dM(t)}{dt}, \quad (6)$$

или с учетом того, что $M(t)/L_2 = -I_2/I_1$

$$R_{1экв}(t) = R_1 + R_2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 - 2 \frac{I_2}{I_1} \frac{dM(t)}{dt}.$$

Зависимость коэффициента трансформации тока $K_I(t)$ от времени можно стандартизовать для оптимальных режимов преобразования энергии. Зависимость $M(t)$ либо $dM(t)/dt$ также можно рассматривать как типовую для определенных конструкций ускорителя. Знание этих двух параметров позволяет оценить характер изменения эквивалентного сопротивления за время рабочего цикла ускорителя и уточнить требования к импульсному источнику тока на основе анализа одноконтурной схемы замещения.

Коэффициент взаимной индукции $M(t)$ за время ускорения якоря изменяется от начального значения практически до нуля. Более удобно использовать коэффициент магнитной связи $k_m(t)$, максимально возможное значение которого нормировано и не превышает 1. В силу конструктивных ограничений начальное значение этого параметра k_0 при $t = 0$ составляет не более чем 0,95... 0,98. На практике зависимость $k_m(t)$, имея спадающий характер, никогда не совпадает с экспоненциальной функцией, однако для получения приближенных оценок допустим, что $M(t) = M_0 \exp(-\alpha t)$, тогда $k_m(t) = k_0 \exp(-\alpha t)$, где $\alpha = -1/M(t) dM(t)/dt =$

= const. Теперь из (5) с учетом того, что $I_2/I_1 \approx -M(t)/L_2$, можно получить эквивалентное затухание первичного контура, выраженное через его начальную индуктивность:

$$\delta_{1\text{экв}}(t) = \frac{R_{1\text{экв}}(t)}{L_1} = \frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2} k_0^2 \times \\ \times \exp(-2\alpha t) + 2\alpha k_0^2 \exp(-2\alpha t). \quad (7)$$

Выражение (7) является полным аналогом соотношения (6). Для начального момента времени ($t \rightarrow 0$) на основании (7) затухание равно

$$\delta_{1\text{экв}}(0) = \frac{R_{1\text{экв}}(0)}{L_1} = \frac{R_1}{L_1} + \frac{M_0^2}{L_1 L_2} \left(\frac{R_2}{L_2} + 2\alpha \right) = \\ = \delta_1(0) + k_0^2 [\delta_2(0) + 2\alpha], \quad (8)$$

где $\delta_1(0) = R_1(0)/L_1$; $\delta_2(0) = R_2(0)/L_2$ — начальное затухание соответственно для первичного и вторичного контура; 2α — затухание, вносимое в первичную цепь за счет электромеханического преобразования энергии при перемещении якоря. Из сравнения выражений (7) и (8) видно, что при изменении коэффициента связи приведенные к первичной цепи значения обеих составляющих затухания вторичного контура убывают со временем в равной мере. В качестве коэффициента приведения служит квадрат начального значения коэффициента связи.

Численное определение эквивалентного сопротивления первичного контура по результатам моделирования двухконтурной схемы ускорителя. Предварительно запишем уравнение (5) в обобщенных переменных, используя ту же систему относительных единиц, что и в работе [3] (далее индексом «разм» снабжены размерные значения переменных, индексом «баз» — базисные значения):

$$I_{1\text{разм}} = i_1 I_{1\text{баз}}; \quad I_{2\text{разм}} = i_2 I_{2\text{баз}}; \quad t_{\text{разм}} = \tau T; \\ U(t)_{\text{разм}} = u(\tau) U_{\text{баз}}; \quad M(z)_{\text{разм}} = M_0 \gamma(z);$$

текущая координата движущегося якоря $z_{\text{разм}} = z l_{\text{sol}}$; скорость движения якоря $v_{\text{разм}} = v v_{\text{баз}}$.

В качестве базисных значений выбираем величины: $I_{1\text{баз}} = C U_0 / T$ — базисный ток

первичного контура; $I_{2\text{баз}} = I_{1\text{баз}} (M_0 / L_2)$ — базисный ток вторичного контура; $T = \sqrt{L_1 C}$ — базисное время; l_{sol} — базисная длина (длина катушки индуктора); $v_{\text{баз}} = l_{\text{sol}} / T$ — базисная скорость; $U_{\text{баз}} = U_0$ — базисное напряжение.

Как и в работе [3], считаем, что питание индукционного ускорителя осуществляется путем разряда емкостного накопителя с начальным напряжением U_0 через катушку индуктора. Омические сопротивления контуров нормируются так же, как и в работе [3]:

$$R_1 = R_{1\text{эф}} = a_1 \sqrt{\frac{L_1}{C}}, \quad R_2 = R_{2\text{эф}} = a_2 \frac{L_2}{\sqrt{L_1 C}},$$

где a_1, a_2 — безразмерные сопротивления соответственно первичного и вторичного контура. После перехода к безразмерным переменным множитель перед током i_1 , представляющий собой эквивалентное сопротивление первичного контура, приобретает вид нормированной функции времени

$$a_{1\text{экв}} = \frac{R_{1\text{экв}}(t)}{\sqrt{\frac{L_1}{C}}} = a_1 - k_0^2 \frac{i_2}{i_1} a_2 \gamma(t) + \\ + k_0^2 v \frac{d\gamma(z)}{dz} \left(\frac{i_2}{i_1} - \gamma(t) \right). \quad (9)$$

После ввода в уравнение (9) безразмерных функций времени из решения полной системы уравнений двухконтурного ускорителя (т. е. величин, полученных с использованием расчетной модели, предложенной в работе [3]), а именно: токов i_1, i_2 , скорости движения якоря v , зависящих от времени безразмерных сопротивлений a_1, a_2 нормированной зависимости коэффициента магнитной связи от времени $\gamma(t)$ и текущей координаты якоря $\gamma(z)$, вычисляем эквивалентное сопротивление первичной цепи в нормированных значениях.

Это сопротивление изменяется в зависимости от безразмерного времени согласно кривой 1 на рис. 4. На этом же рисунке (кривая 2) показана составляющая эквивалентного сопротивления, не содержащая в качестве множителей величин a_1, a_2 , т. е. представляющая в формуле (9) слагаемое с коэффи-

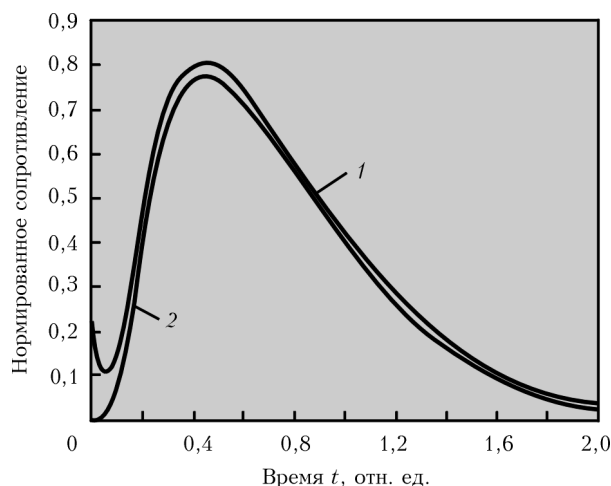


Рис. 4. Изменение эквивалентного сопротивления первичного контура как функции времени: 1 – суммарное эквивалентное сопротивление; 2 – составляющая эквивалентного сопротивления, обусловленная электромеханическим преобразованием энергии

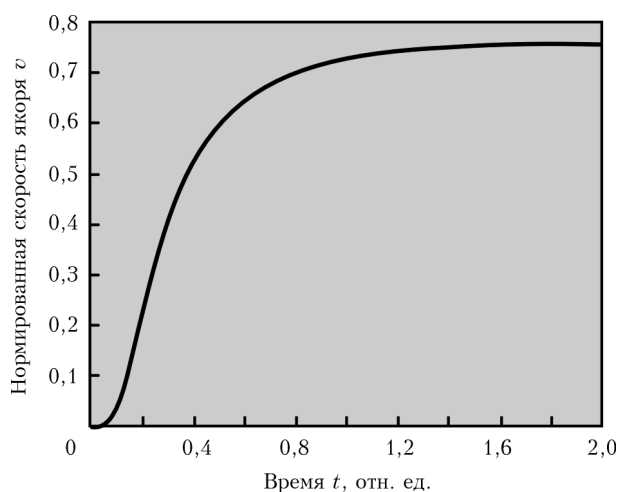


Рис. 5. Скорость якоря $v(t)$ как безразмерная функция времени

циентом $k_0^2 v \frac{d\gamma(z)}{dz} = k_0^2 \frac{d\gamma(t)}{dt}$. Для рассмотренного ускорителя на рис. 5 и 6 показаны кривая роста скорости якоря $v(t)$ и временная зависимость коэффициента трансформации для нормированных токов $K_i(t) = i_2/i_1$, полученные по данным численного моделирования двухконтурной схемы [3].

На рис. 7 изображена рассчитанная по реальным размерам элементов ускорителя нормированная кривая 1 зависимости коэффициента магнитной связи от перемещения, которая пересчитана в зависимость от безразмерного времени с использованием кривой роста скорости (рис. 5). На том же рисунке нанесена приближенная аппроксимирующая зависимость коэффициента связи от времени в виде затухающей экспоненты (кривая 2).

Анализ результатов исследования. Особенностью вблизи начала координат является кратковременный ее спад, который объясняется снижением сопротивлений обоих контуров за время формирования скин-слоя, после чего сопротивление возрастает за счет отбора энергии на выполнение механической работы по ускорению якоря (рис. 4, кривая 1). Результирующее активное сопротивление первичной цепи, определяющее диссипацию энергии на собственных сопротивлениях проводящих контуров, представлено разностью

ординат кривых 1, 2 на рис. 4. Кривая 2 демонстрирует изменение вносимого сопротивления, обусловленного исключительно электромеханическим преобразованием энергии. Колоколообразный характер этой кривой обусловлен перемножением возрастающей функции скорости и убывающей функции коэффициента связи. Аналогичная форма кривой 1 объясняется перемножением возрастающей функции коэффициента трансформации тока и убывающей функции коэффициента магнитной связи.

Анализ параметров одноконтурной схемы замещения позволяет раскрыть характер затухания, вносимого в первичный контур вследствие электромеханического преобразования энергии, и прогнозировать ожидаемую форму кривой разрядного тока в индукторе. До-

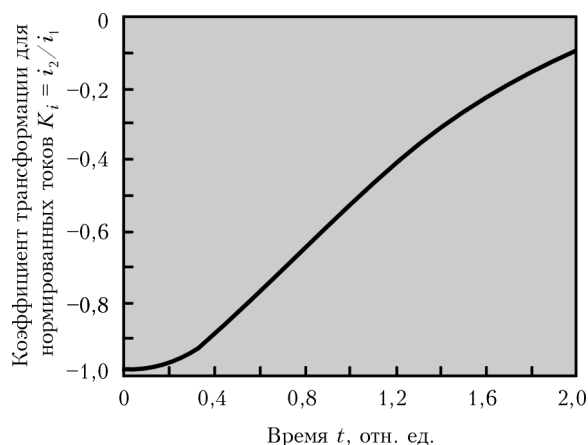


Рис. 6. Отношение токов i_2/i_1 как функция времени по результатам численного моделирования

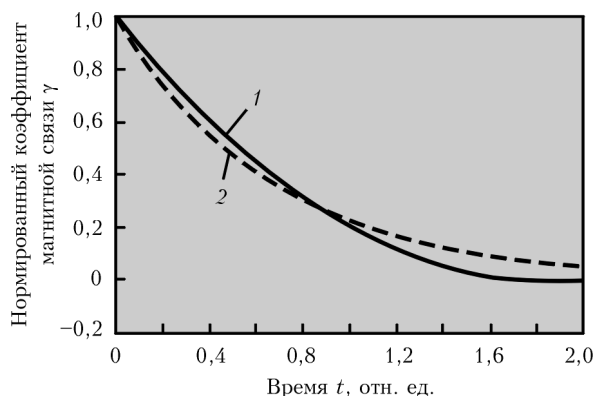


Рис. 7. Нормированная зависимость коэффициента магнитной связи от времени: 1 — результаты численного моделирования; 2 — приближенная аппроксимирующая зависимость в виде экспоненты $\gamma(t) = \exp(-\alpha t)$, $\alpha = 1,5$

полнительную ясность в особенности переходного процесса в первичной цепи создает анализ составляющих вносимого сопротивления на основе данных численного моделирования двухконтурной схемы ускорителя. Реальная картина изменения эквивалентного сопротивления первичной цепи на рис. 4 несколько

отличается от приближенной картины, полученной теоретическим путем (формулы (6), (7)), вследствие существенного влияния омического сопротивления на рост тока во вторичном контуре. Это отличие больше всего проявляется на начальном отрезке длительности процесса ускорения, однако в целом картина изменения вносимого сопротивления, полученная на основании приближенного теоретического анализа, качественно согласуется с изменением вносимого сопротивления по данным математического моделирования двухконтурной схемы. ⚡

1. Андреев А. Н., Бондалетов В. Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод // Электричество. — 1973. — № 10. — С. 36–41.
2. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. — Харків: НТУУ «ХПІ», 2006. — 260 с.
3. Чемерис В. Т., Маишталир В. В., Гусак Ю. А. Простой алгоритм для расчета индукционного ускорения электропроводящих тел в метательном устройстве // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2008. — № 4. — С. 40–49.



DEFENSE & SECURITY 2009
Tri-Service Asian Defense & Internal Security Event for Land, Sea & Air

4-7 November 2009, IMPACT Exhibition Centre, Bangkok, Thailand

Оборона и безопасность 2009

4-7 ноября 2009 г., Выставочный центр ИМПАКТ, Бангкок, Таиланд