

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В. Ф. БОЛЮХ, А. И. КОЧЕРГА, И. С. ЩУКИН

**ЛИНЕЙНЫЙ УДАРНЫЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-ИНДУКЦИОННОГО ТИПА**

Визначено характер електромеханічних процесів у лінійному ударному електромеханічному перетворювачі (ЛУЕП) електромагнітно-індукційного типу із зв'язаними та незв'язаними якорями. За допомогою інтегрального показника ефективності, що враховує сили, швидкісні, енергетичні та екологічні показники встановлено, що ЛУЕП електромагнітно-індукційного типу більш ефективний у порівнянні з ЛУЕП індукційного та електромагнітного типів. Запропонована конструктивна схема ЛУЕП електромагнітно-індукційного типу з незв'язаними якорями, що забезпечує лінійний та поворотний рух ударного елемента.

**Ключові слова:** лінійний ударний електромеханічний перетворювач, перетворювач електромагнітно-індукційного типу, електропровідний якорь, ферромагнітний якорь, зв'язані якоря, незв'язані якоря.

Установлен характер електромеханических процессов в линейном ударном електромеханическом преобразователе (ЛУЭП) электромагнитно-индукционного типа со связанными и несвязанными якорями. При помощи интегрального показателя эффективности, учитывающего силовые, скоростные, энергетические и экологические показатели установлено, что ЛУЭП электромагнитно-индукционного типа более эффективен по сравнению с ЛУЭП индукционного и электромагнитного типов. Предложена конструктивная схема ЛУЭП электромагнитно-индукционного типа с несвязанными якорями, обеспечивающая линейное и поворотное движение ударного элемента.

**Ключевые слова:** линейный ударный електромеханический преобразователь, преобразователь электромагнитно-индукционного типа, электропроводящий якорь, ферромагнитный якорь, связанные якоря, несвязанные якоря.

**Purpose.** Estimation of the efficiency of structural schemes of combined linear shock electromechanical transducer (LSET) of electromagnetic-induction type with associated and independent displacement of anchors, taking into account force, speed and environmental indicators. **Methodology.** The mathematical model of LSET using the finite element method, which takes into account spatio-temporal electromagnetic and electromechanical parameters and indices, is developed and implemented in the Comsol Multiphysics software package. The integral efficiency index has been introduced, taking into account the power, speed, energy, and environmental (induction of the magnetic scattering field) indicators. **Results.** It is established that in the induction-type LSET, electromagnetic processes occur at a higher speed and at higher electromechanical values compared with the electromagnetic-type LSET. In LSET electromagnetic-induction type with associated anchors, the character of electromechanical characteristics is similar to the character of the corresponding character of the LSET induction type, but with higher indices. In LSET with unconnected anchors, an electrodynamic repulsive force acts on the electrically conducting armature, the maximum magnitude of which is approximately an order of magnitude higher than the electromagnetic force of attraction acting on the ferromagnetic anchor. For all variants of the evaluation strategy, the design of the electromotive-induction type LSET is more effective than the induction and electromagnetic-type LSET. A constructive scheme of the electromagnetic-induction type LSET with unconnected anchors is proposed, which provides a linear-rotary motion of the impact element. **Originality.** For the first time, the LSET electromagnetic-induction type design with unbound electrically conductive and ferromagnetic anchors is proposed and justified, which allows to provide linear-rotary motion of the impact element. **Practical value.** It is established that in the LSET electromagnetic-induction type with unconnected anchors on the electrically conducting armature the electrodynamic repulsive force operates, the maximum value of which is approximately an order of magnitude higher than the electromagnetic force of attraction acting on the ferromagnetic armature. This causes a lower speed of the ferromagnetic armature than the speed of the electrically conductive armature.

**Keywords:** linear shock electromechanical transducer, transducer of electromagnetic-induction type, electroconductive anchor, ferromagnetic anchor, coupled anchors, unconnected anchors.

**Введение.** Одними из перспективных устройств электромеханики являются линейные ударные электромеханические преобразователи (ЛУЭП), которые обеспечивают высокую скорость исполнительного элемента на коротком активном участке, и/или создают мощные силовые импульсы при незначительном перемещении. ЛУЭП используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [1 - 4].

В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы, устройства для забивания свай и анкеров; в горной промышленности – бутобои, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – вибросейсмоисточники; в машиностроении – приводы станов холодной прокатки труб, прессы, молоты с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы. ЛУЭП применяются в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. Такие преобразователи

используются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки, в авиационной и космической технике, в исследовательских установках, например, для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты. Актуальна задача обеспечения высокой скорости на коротком рабочем участке для быстродействующих электрических аппаратов.

Особенностью рассматриваемых ЛУЭП является то, что они работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия. Наиболее широко применяемыми являются ЛУЭП индукционного и электромагнитного типов [2, 5]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от импульсного источника, как правило, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). В указанных типах ЛУЭП основное отличие состоит в конструкции подвижного якоря,

который обеспечивает разгон исполнительного элемента.

В ЛУЭП индукционного типа (ЛУЭП-И) электропроводящий якорь (ЭЯ) представляет собой относительно тонкий диск, в котором индуцируются вихревые токи от индуктора, вследствие чего между ними возникает электродинамическая сила отталкивания. В ЛУЭП электромагнитного типа (ЛУЭП-Э) ферромагнитный якорь (ФЯ) представляет собой относительно толстый диск, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора. Учитывая значительную индукцию магнитных полей, в рассматриваемых типах ЛУЭП целесообразно использовать наружный ферромагнитный экран (ФЭ) с малой электропроводностью, выполненный либо из магнитоэлектрика, либо с радиальными разрезами [6]. ФЭ позволяет улучшить экологические показатели ЛУЭП за счет снижения индукции магнитных полей рассеяния, что важно для близко расположенных электронных и биологических объектов.

Рассматриваемые типы ЛУЭП обеспечивают различные силовые и скоростные показатели, создавая различные индукции магнитных полей рассеяния в окружающее пространство, что сказывается на их экологических показателях. Они имеют различные массы активных элементов и величины тока возбуждения индуктора, что необходимо учитывать для электронной системы возбуждения.

Одним из путей совершенствования является разработка конструкций, объединяющая свойства ЛУЭП электромагнитного и индукционного типов. В таком комбинированном преобразователе электромагнитно-индукционного типа (ЛУЭП-ЭИ) ферромагнитный и электропроводящий якоря располагаются с противоположных сторон неподвижного индуктора. Однако при этом возникает вопрос о способах движения указанных якорей: совместном, при их механическом соединении, или независимо, при отсутствии указанного соединения. При этом анализ представленных конструкций ЛУЭП-ЭИ должен учитывать различные показатели их работы.

**Постановка задачи.** Оценка эффективности конструктивных схем комбинированных линейных ударных электромеханических преобразователей электромагнитно-индукционного типа со связанным и независимым перемещением якорей при учете силовых, скоростных и экологических показателей.

**Математическая модель ЛУЭП.** В ЛУЭП при возбуждении от ЕНЭ возникают быстропотекающие и взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора. Реализация математической модели ЛУЭП с использованием теории электрических цепей не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [7, 8]. Исходя из этого, разработана математическая модель ЛУЭП, которая основана на методе конечных элементов.

Поскольку рассматриваемые ЛУЭП имеют осевую симметрию, то целесообразно использовать двухмерную математическую модель с

пространственно-распределенными параметрами [3]. Для определения электромагнитных параметров ЛУЭП в цилиндрической системе координат  $\{r, z\}$  рассчитывается векторный магнитный потенциал  $A$  из уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля  $B$  ферромагнитного материала;  $\sigma$  – электропроводность якоря.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}; \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничными условиями системы выступает уравнение  $n \times A = 0$ , где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности. Для ферромагнитных материалов используется нелинейная кривая намагничивания  $B = f(H)$ .

Ток в индукторе  $i_1$  описывается уравнениями:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{dt} dv = 0;$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0, \quad (3)$$

где  $R_e$  – активное сопротивление внешней цепи;  $R_1$  – активное сопротивление индуктора;  $L_e$  – индуктивность внешней цепи;  $U_0$  – напряжение заряда ЕНЭ;  $C$  – емкость ЕНЭ;  $N_1$  – число витков индуктора;  $s$  – площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком;  $A_l$  – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура;  $V$  – объем индуктора.

Электродинамические силы, действующие на ЭЯ, и электромагнитные силы, действующие на ФЯ, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря.

Импульс электродинамических или электромагнитных сил, определяющий силовое воздействие на соответствующий якорь, описывается выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

Скорость  $v_z$  якоря с исполнительным элементом вдоль оси  $z$  описывается уравнением [3]:

$$(m_2 + m_e) \frac{dv_z}{dt} = f_z(z) - k_p \Delta z(t) - k_T v_z(t) - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{ex}^2 v_z^2(t), \quad (6)$$

где  $m_2$  – масса якоря;  $m_e$  – масса исполнительного элемента;  $k_p$  – коэффициент упругости буферного элемента, например пружины;  $k_T$  – коэффициент динамического сопротивления;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{ex2}$  – внешний диаметр якоря;  $\Delta z$  – величина перемещения якоря.

Уравнения (1)–(6) описывают электромеханические процессы в ЛУЭП при начальных условиях:  $u_c(0)=U_0$ ;  $i_1(0)=0$ ;  $\Delta z(0)=0$ ;  $v_z(0)=0$ , где  $u_c$  – напряжение ЕНЭ.

При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещение якорей относительно индуктора.

Решение системы (1) – (6) получаем с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка. Для решения поставленной задачи была разработана компьютерная модель ЛУЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [9]. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений. Решение системы уравнений производится методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

КПД ЛУЭП оцениваем соотношением [3]:

$$\eta = \frac{(m_2 + m_e) \cdot V_m^2}{C \cdot U_0^2}, \quad (7)$$

где  $V_m$  – максимальная скорость якоря с исполнительным элементом.

**ЛУЭП электромагнитного и индукционного типов.** Для оценки эффективности работы рассмотрим ЛУЭП-Э и ЛУЭП-И с одинаковыми габаритами и параметрами ЕНЭ. Электронная система формирует аperiodический однополярный импульс возбуждения индуктора [3]. Данные преобразователи, имеющие коаксиальную конфигурацию, содержат одинаковый ФЭ, охватывающий индуктор с торцевой и боковой сторон. Основные параметры ЛУЭП указанных типов представлены в табл. 1.

В рассматриваемых ЛУЭП индуктор намотан медной шиной. ЭЯ в ЛУЭП-И выполнен в виде массивного диска из технической меди, а ФЯ в ЛУЭП-Э и ФЭ выполнены из магнетодиэлектрика с магнитными свойствами стали Ст.10.

Будем рассматривать преобразователи, у которых рабочий ход якоря составляет  $\Delta Z=10$  мм. В ЛУЭП-И плотность тока в индукторе  $j_1$  имеет характер аperiodического полярного импульса с максимумом в 0,4 мс, в то время как импульс усредненной плотности

индуцированного тока в ЭЯ  $j_2$  через определенное время (2,5 мс) меняет свою полярность (рис. 1).

Таблица 1 – Параметры ЛУЭП

Показатель, обозначение, единица измерения	Величина
Внешний диаметр индуктора, $D_{ex1}$ , мм	100
Внутренний диаметр индуктора, $D_{in1}$ , мм	10
Высота индуктора, $H_1$ , мм	10
Внешний диаметр якоря, $D_{ex2}$ , мм	100
Внутренний диаметр якоря, $D_{in2}$ , мм	10
Высота якоря, $H_2$ , мм	3
Начальное расстояние между индуктором и якорем ЛУЭП-Э, $\Delta z_0$ , мм	10
Начальное расстояние между индуктором и якорем ЛУЭП-И, $\Delta z_0$ , мм	1
Количество витков индуктора, $N_1$ , шт	46
Сечение шины индуктора, $a \times b$ , мм <sup>2</sup>	1,8×4,8
Высота дискового основания ФЭ, $H_{3a}$ , мм	8
Высота обечайки ФЭ, мм $H_{3b}$	32
Внешний диаметр обечайки ФЭ, $D_{ex3b}$ , мм	118
Внутренний диаметр обечайки ФЭ, $D_{in3b}$ , мм	102
Емкость ЕНЭ, $C$ , мкФ	3000
Напряжение ЕНЭ, $U_0$ , В	400

Вследствие этого электродинамическая сила отталкивания  $f_z$  через указанное время приобретает характер притяжения, но незначительной величины. Импульс силы  $F_z$  возрастает до определенного времени (2 мс). Вследствие этого скорость ЭЯ  $V_z$  линейно возрастает на начальном участке рабочего хода, снижая темп роста на последнем участке. После достижения величины рабочего хода  $\Delta Z$  в момент 1,1 мс скорость  $V_z=0$ , а перемещение якоря  $\Delta z=10$  мм, оставаясь неизменными до окончания электромагнитного процесса.

В ЛУЭП-Э плотность тока в индукторе  $j_1$  имеет характер аperiodического полярного импульса с максимумом в момент 0,75 мс и более плавным затуханием, чем в ЛУЭП-И (рис. 2). Практически аналогичный характер приобретает и электромагнитная сила притяжения  $f_z$ , действующая на ФЯ. На всем участке рабочего хода  $\Delta Z=10$  мм скорость  $V_z$  и импульс силы  $F_z$  возрастают практически линейно. После достижения величины рабочего хода  $\Delta Z$  в момент 2,8 мс скорость  $V_z=0$ , а перемещение якоря  $\Delta z=10$  мм, оставаясь неизменными до окончания электромагнитного процесса.

Электромеханические характеристики ЛУЭП-И и ЛУЭП-Э заметно отличаются. В ЛУЭП-И электромагнитные процессы протекают с более высокой скоростью и при больших величинах электромеханических показателей по сравнению с ЛУЭП-Э. Максимальная величина тока индуктора в ЛУЭП-Э практически в 2,4 раза меньше, чем в ЛУЭП-И, что благоприятно для электронной системы управления преобразователей. Максимальная  $V_m$  и средняя  $V_c$  скорости якоря на участке  $\Delta Z=10$  мм в ЛУЭП-И примерно в два раза больше, чем в ЛУЭП-Э.

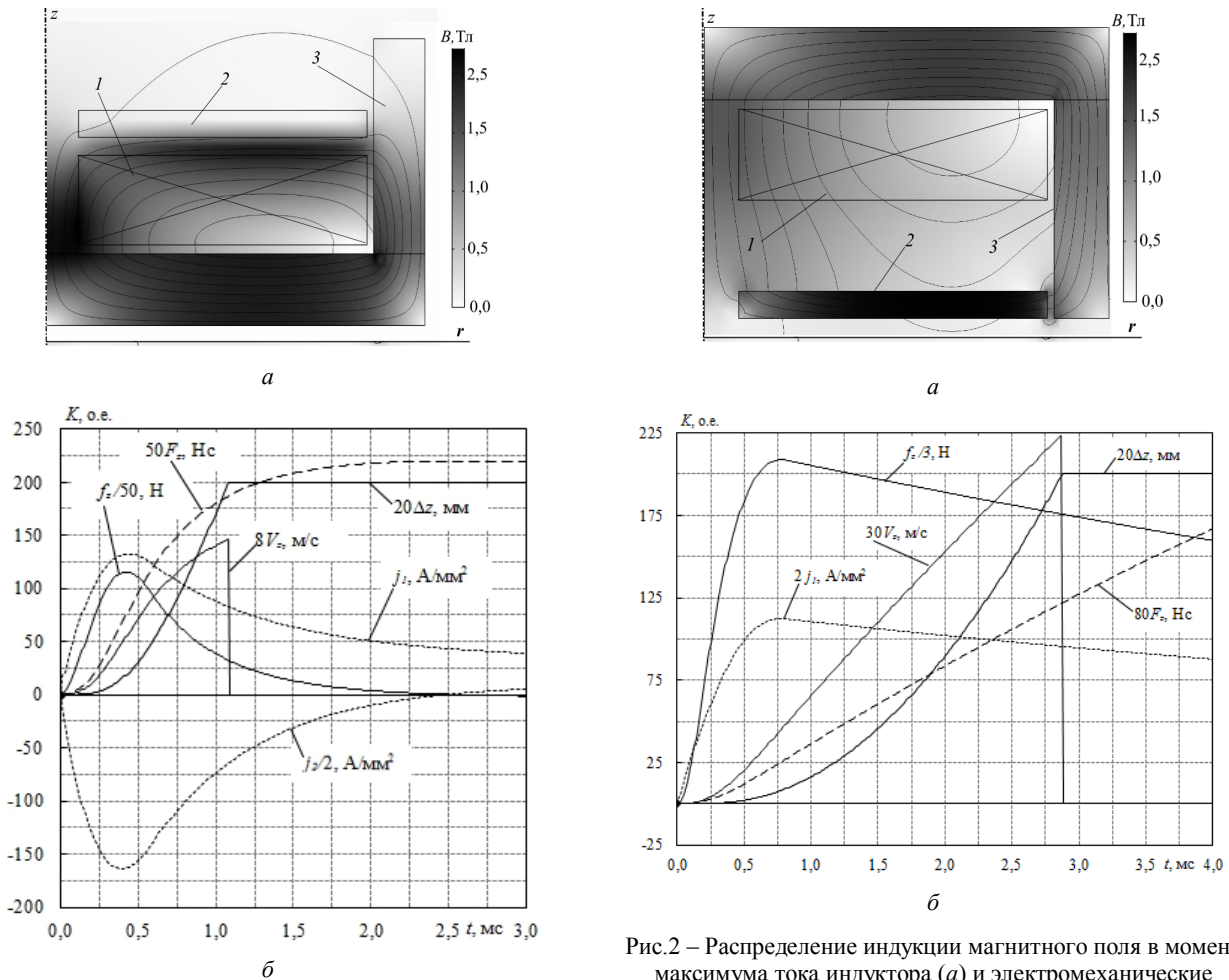


Рис. 1 – Магнитная система и характеристики ЛУЭП-И: а – распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора; б – электромеханические характеристики; 1 – индуктор, 2 – ЭЯ, 3 – ФЭ

Рис.2 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора (а) и электромеханические характеристики (б) ЛУЭП-Э: 1 – индуктор, 2 – ЭЯ, 3 – ФЭ

Таблица 2 – Показатели ЛУЭП-И и ЛУЭП-Э

Показатель	ЛУЭП-И		ЛУЭП-Э	
	без ФЭ	с ФЭ	без ФЭ	с ФЭ
$f_{zm}$ , кН	5,85	5,76	0,49	0,63
$F_z$ , Нс	3,78	4,40	1,63	2,54
$V_m$ , м/с	16,93	18,26	5,99	7,45
$V_c$ , м/с	9,19	9,25	3,03	3,47
$B_{ex}$ , мТл	9,71	0,84	13,39	2,17
$j_{1m}$ , А/мм <sup>2</sup>	177,0	132,5	101,0	56,1
$\eta$ , %	12,12	14,09	1,52	2,34

Максимальное значение электродинамической силы  $f_{zm}$ , действующей на ЭЯ, практически на порядок превышает аналогичную величину электромагнитной силы  $f_{zm}$ , действующей на ФЯ. Однако вследствие более продолжительного силового воздействия на ФЯ импульс силы  $F_z$  в ЛУЭП-И больше, чем в ЛУЭП-Э при отсутствии ФЭ в 2,3 раза, а при наличии ФЭ – в 1,7 раз. Кроме того, в ЛУЭП-И наблюдаются меньшие величины индукции магнитных полей рассеяния, чем в ЛУЭП-Э, что благоприятно с экологической точки зрения.

ФЭ оказывает положительное влияние на показатели ЛУЭП, обеспечивая повышение силовых и скоростных показателей, что проявляется и в повышенном КПД, при одновременном уменьшении максимальной плотности тока в индукторе  $j_{1m}$  и усредненной индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$  (табл. 2). Значение  $B_{ex}$  рассчитывается на условном контуре, расположенном на расстоянии  $2H_1$  от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии  $4H_1$  от верхней стороны индуктора.

Таким образом, можно отметить, что электромеханические показатели и эффективность ЛУЭП-И выше, чем ЛУЭП-Э.

**ЛУЭП электромагнитно-индукционного типа.** Рассмотрим работу ЛУЭП-ЭИ при наличии ФЭ, предполагая одинаковой величину перемещения ФЯ и ЭЯ как в связанном, та и в несвязанном состоянии ( $\Delta Z=10$  мм). Геометрические параметры якорей аналогичны рассмотренным выше. В связанном состоянии якоря механически соединены, например при помощи центральной неметаллической трубы (на

рис. не показана) и осуществляют совместное перемещение. А в несвязанном состоянии якоря перемещаются независимо друг от друга на расстояние рабочего хода.

В ЛУЭП-ЭИ со связанными якорями вид электромеханических характеристик во многом аналогичен виду соответствующих характеристик ЛУЭП-И (рис. 3). Сравнивая показатели данных преобразователей, можно отметить, что в ЛУЭП-ЭИ с ФЭ величина результирующей силы  $f_{zm}$ , действующей на комбинированный якорь, возрастает на 11 %, импульс силы  $F_z$  – на 18,5 %, максимальная скорость комбинированного якоря  $V_m$  – на 14%, а индукция магнитного поля рассеяния – на 83 %. При этом величина максимальной плотности тока в индукторе  $j_{1m}$  уменьшается на 7 %.

Увеличение индукции магнитного поля рассеяния обусловлено тем, что относительно тонкий ФЯ находится в насыщении и «пропускает» магнитного поле наружу сильнее, чем более толстое основание ФЭ.

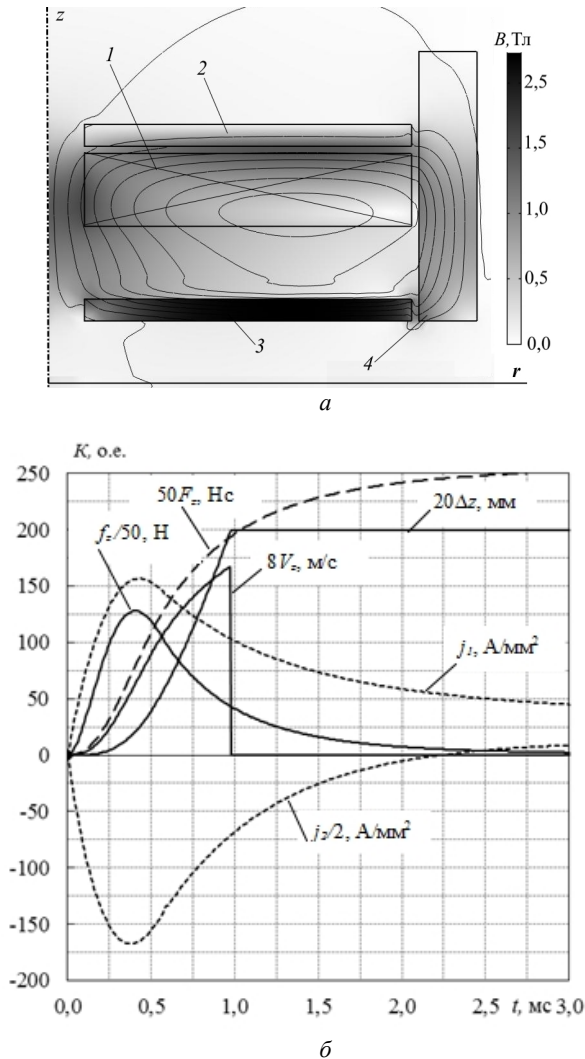


Рис.3 – Магнитная система и характеристики ЛУЭП-И со связанными якорями: а – распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора; б – электромеханические характеристики; 1 – индуктор, 2 – ЭЯ, 3 – ФЯ, 4 – ФЭ

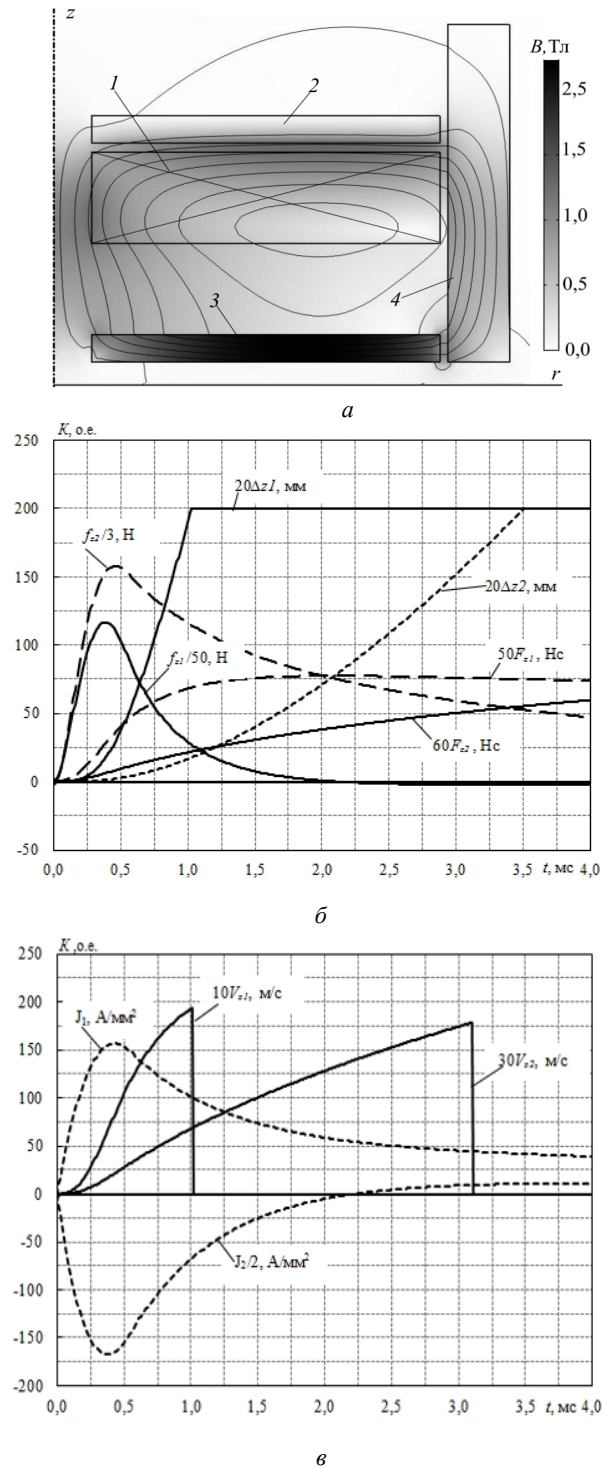


Рис.4 – Магнитная система и характеристики ЛУЭП-И с несвязанными якорями: а – распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора; б, в – электромеханические характеристики; 1 – индуктор, 2 – ЭЯ, 3 – ФЯ, 4 – ФЭ

В несвязанном состоянии ЭЯ и ФЯ в ЛУЭП-ЭИ перемещаются независимо друг от друга на расстояние рабочего хода  $\Delta Z=10$  мм (рис.4). При этом на ЭЯ действует электродинамическая сила отталкивания, максимальная величина которой примерно на порядок выше, чем электромагнитная сила притяжения, действующая на ФЯ. Это и обуславливает меньшую скорость ФЯ по сравнению со скоростью ЭЯ.



Как показывают расчеты суммарная величина импульса силы  $F_z$ , действующего на оба якоря, на 32 % превышает аналогичную величину, действующую на ЭЯ в ЛУЭП-И. В табл. 3 представлены параметры ЛУЭП-ЭИ при наличии и отсутствии ФЭ.

В рассматриваемых преобразователях используются как связанные, так и несвязанные ЭЯ и ФЯ. В варианте несвязанных якорей отдельно указаны величины  $f_{zm}$  и импульсы сил  $F_z$ , которые действуют на соответствующий якорь, а также максимальная  $V_m$  и средняя на рабочем участке  $V_c$  скорости этих якорей. Кроме того, в табл. 3 представлены усредненное значение индукции магнитного поля рассеяния  $B_{ex}$ , максимальное значение плотности тока в индукторе  $j_{1m}$  и масса активных элементов  $m_\Sigma$  ЛУЭП.

Использование двух якорей в ЛУЭП-ЭИ, а также применение ФЭ повышает электромеханические показатели преобразователей, однако при этом ухудшаются их массогабаритные показатели и увеличивается индукция магнитного поля рассеяния.

Таблица 3 – Показатели ЛУЭП-ЭИ

Показатель	без ФЭ		с ФЭ	
	не связанные	Связанные	не связанные	Связанные
	ЭЯ/ФЯ		ЭЯ/ФЯ	
$f_{zm}$ , кН	5,83/0,47	6,29	5,95/0,55	6,40
$F_z$ , Нс	3,87/1,22	4,71	4,17/1,65	5,21
$V_m$ , м/с	18,58/5,01	20,13	19,38/5,95	20,87
$V_c$ , м/с	9,66/2,85	10,10	9,79/3,21	10,19
$B_{ex}$ , мТл	8,66	8,56	3,24	3,11
$j_{1m}$ , А/мм <sup>2</sup>	167,16		156,65	
$m_\Sigma$ , кг	2,50		3,20	

Для того, чтобы комплексно оценить преимущества соответствующей конструктивной схемы ЛУЭП, введем интегральный показатель эффективности, учитывающий силовые, скоростные, энергетические и экологические (индукция магнитного поля рассеяния) показатели

$$K^* = \alpha_1 \eta^* + \frac{\alpha_2}{B_{ex}^*} + \alpha_3 F_z^* + \alpha_4 V_m^* + \frac{\alpha_5}{m_\Sigma^*}, \quad (8)$$

где  $\eta^*$  – относительное значение КПД,  $B_{ex}^*$  – относительное значение индукции магнитного поля рассеяния,  $F_z^*$  – относительное значение импульса силы, действующего на якорь,  $V_m^*$  – относительное значение максимальной скорости якоря,  $m_\Sigma^*$  – относительная масса активных элементов ЛУЭП,  $\alpha_j$  – весовые коэффициенты соответствующих показателей ЛУЭП, удовлетворяющие соотношению:

$$\sum_{j=1}^5 \alpha_j = 1. \quad (9)$$

При расчете относительных показателей в качестве базовых приняты показатели ЛУЭП-И без ФЭ. Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛУЭП (табл.4).

Таблица 4 – Варианты стратегии оценки эффективности ЛУЭП, о.е.

Вариант стратегии	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2	0,5	0,125	0,125	0,125	0,125
3	0,125	0,5	0,125	0,125	0,125
4	0,125	0,125	0,5	0,125	0,125
5	0,125	0,125	0,125	0,5	0,125
6	0,125	0,125	0,125	0,125	0,5

Приоритетность того или иного показателя ЛУЭП оценивается величиной соответствующего весового коэффициента  $\alpha_j$ . В варианте 1 стратегии оценки эффективности ЛУЭП КПД, индукция магнитного поля рассеяния, импульс силы, скорость якоря и масса активных элементов оцениваются равнозначно. В варианте 2 – приоритет отдан КПД, в варианте 3 – индукции магнитного поля рассеяния, в варианте 4 – импульсу силы, в варианте 5 – максимальной скорости, и в варианте 6 – массе активных элементов. Результаты расчета интегрального показателя эффективности  $K^*$  ЛУЭП-ЭИ со связанными и несвязанными якорями при отсутствии и наличии ФЭ представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Значения интегрального показателя эффективности  $K^*$  ЛУЭП-ЭИ

Вариант стратегии	без ФЭ		с ФЭ	
	Не связанные	Связанные	Не связанные	Связанные
1	1,17	1,13	1,56	1,52
2	1,17	1,18	1,46	1,46
3	1,15	1,13	2,10	2,12
4	1,23	1,17	1,55	1,46
5	1,25	1,15	1,54	1,41
6	1,03	1,01	1,15	1,13

Как показывают расчеты, все конструктивные схемы ЛУЭП-ЭИ являются более эффективными по сравнению с ЛУЭП-И. При этом в ЛУЭП-ЭИ без ФЭ с несвязанными якорями эффективность повышается до 25 %, а в варианте со связанными якорями – до 18 %. В ЛУЭП-ЭИ с ФЭ эффективность повышается в 2,1 раз в варианте стратегии оценки с наивысшим приоритетом индукции магнитного поля рассеяния.

Конструктивные схемы ЛУЭП-ЭИ со связанными якорями рассмотрены в работе [10]. Рассмотрим конструктивную схему ЛУЭП-ЭИ с несвязанными якорями, в которой обеспечивается помимо линейного, еще и вращательное движение ударного элемента, что важно для силового воздействия на объект деформации [11].

**Конструктивная схема ЛУЭП-ЭИ линейно-поворотного действия с несвязанными якорями.**

ЛУЭП-ЭИ содержит коаксиально расположенный индуктор 1, электропроводящий якорь 2, боек 3 и корпус 4 (рис. 5).

Индуктор в виде многовитковой обмотки дисковой формы выполнен совместно с внутренним каркасом 1а в виде монолитного элемента путем пропитывания эпоксидной смолой с последующим ее затвердеванием.

Боек 3 состоит из ударного диска 3а, направляющей части 3б и ударной части 3в, которая выступает из корпуса 4. Ударный диск 3а бойка соединен с ЭЯ 2, причем их смежные плоские поверхности прилегают между собой. Направляющая часть 3б бойка расположена в центральных направляющих отверстиях внутреннего каркаса 1а индуктора и ЭЯ 2.

Корпус 4 состоит из боковой цилиндрической стенки 4а, к которой присоединена задняя 4б и передняя 4в плоские стенки. На ударной части 3в бойка внутри корпуса 4 установлена возвратная аксиально-сжимаемая пружина 5, которая взаимодействует с ударным диском 3а бойка и передней плоской стенкой 4в корпуса.

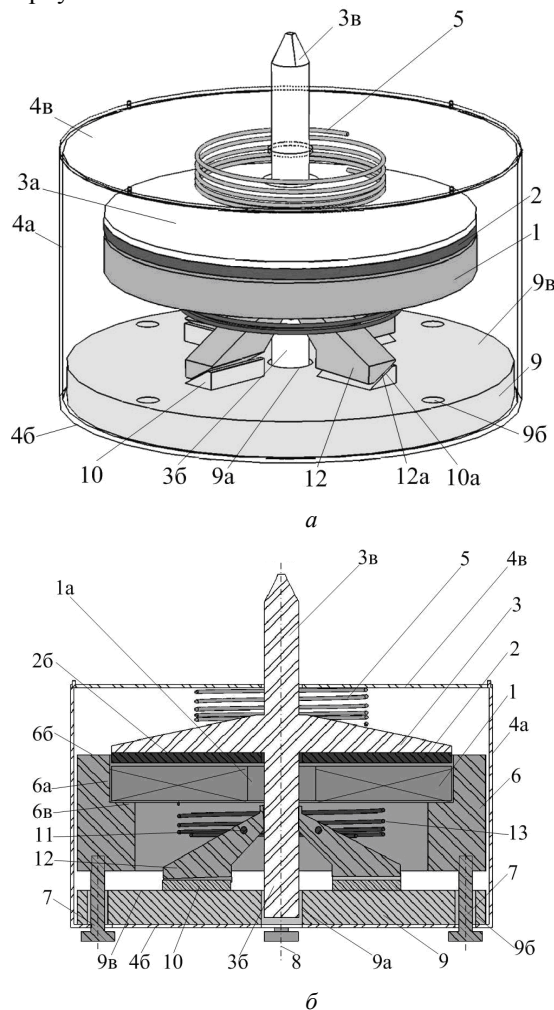


Рис.5 – ЛУЭП-ЭИ с несвязанными якорями:  
а – общий вид; б – поперечное сечение

Индуктор 1 и ЭЯ 2 расположены внутри коаксиально расположенного ФЭ 6 так, что их боковые сто-

роны охвачены внутренними стенками ба экрана. Передняя торцевая поверхность 6б ФЭ совпадает с внешней поверхностью 2б ЭЯ, прилегающей к ударному диску 3а бойка. Внутри ФЭ 6 выполнен внутренний выступ 6в, на котором фиксируется индуктор 1. ФЭ 6 при помощи ряда направляющих стоек 7 соединен с задней плоской стенкой 4б корпуса. Указанные стойки 7 размещены параллельно аксиальной оси 8 равномерно в тангенциальном направлении.

Между задней стенкой 4б корпуса и ФЭ 6 аксиально расположен подвижный ФЯ 9, который выполнен в форме плоского диска. У ФЯ 9 имеются центральное отверстие 9а, в котором расположена направляющая часть 3б бойка, и ряд аксиально-направляющих отверстий 9б, в каждом из которых расположена направляющая стойка 7.

На обращенной к индуктору поверхности 9в ФЯ закреплено четыре клинообразных толкателя 10, внешняя плоская поверхность 10а которых выполнена с наклоном относительно поверхности 9в ФЯ. Указанные толкатели расположены симметрично относительно центральной оси 8 и наклон поверхностей 10а относительно поверхности 9в ФЯ выполнен в одном тангенциальном направлении.

Между подвижным ФЯ 9 и индуктором 1 расположено соединительное звено 11, на котором установлены подвижные колодки 12, которые охватывают направляющую часть 3б бойка. Соединительное звено выполнено в виде квадрата, прямолинейные участки которого образуют оси вращения для подвижных колодок 12. Каждая колодка 12 размещена напротив клинообразного толкателя 10 так, что ее внешняя плоская поверхность 12а параллельна внешней плоской поверхности 10а толкателя. Соединительное звено 11 при помощи пружины 13 соединено с ФЭ 6. Внешние плоские поверхности колодок 12а и толкателей 10а выполнены с малым коэффициентом трения. А участки колодок 12, которые охватывают направляющую часть 3б бойка, выполнены с большим коэффициентом трения.

При поступлении сигнала на запуск в работу осуществляется разряд ЕНЭ и в индукторе 1 протекает импульсный ток. Возникающее при этом магнитное поле индуцирует в ЭЯ 2 вихревой ток. Взаимодействие магнитного поля индуктора 1 и тока ЭЯ 2 обуславливает электродинамические усилия, которые перемещают ЭЯ вместе с бойком 3 в направлении передней стенки 4в корпуса. При этом ударная часть 3в бойка своим заостренным концом воздействует на объект деформирования. При перемещении ЭЯ пружина 5 сжимается.

Магнитное поле индуктора, которое проходит через ФЭ 6 воздействует на ФЯ 9. Под действием электромагнитной силы притяжения ФЯ 9 по направляющим стойкам 7 перемещается к индуктору 1. Поскольку электромагнитная сила притяжения имеет меньшую величину, чем электродинамическая сила отталкивания, то перемещение ФЯ 9 осуществляется с запаздыванием по отношению к перемещению ЭЯ 2. При перемещении ФЯ 9 клинообразные толкатели 10 действуют на подвижные колодки 12. Колодки, пово-

рачиваясь вокруг прямолинейных участков соединительного звена 11, своими участками с высоким коэффициентом трения зажимают направляющую часть 3б бойка.

При этом внешние плоские поверхности 12а колодок скользят относительно плоских поверхностей 10а толкателей в одном тангенциальном направлении. Таким образом обеспечивается поворот бойка 3 и колодок 12, которые его зажимают, вместе с соединительным звеном 11 вокруг оси 8. При этом на боек 3 действует дополнительная аксиальная сила в направлении объекта воздействия. Из-за поворота соединительного звена 11 с колодками 12 пружина 13 сжимается.

После затухания магнитного поля индуктора 1 под действием пружины 5 боек 3 вместе с ЭЯ 2 возвращается в исходное положение. Под действием пружины 13 осуществляется поворот бойка 3 в противоположном тангенциальном направлении. При этом подвижные колодки 12 отпускают направляющую часть 3и бойка. После этого рабочий цикл повторяется. Таким образом предлагаемый ЛУЭП осуществляет линейное перемещение бойка с последующим поворотом вокруг оси и дополнительным силовым воздействием на объект деформации.

#### Выводы.

1. Разработана и реализована в программном пакете *Comsol Multiphysics* математическая модель линейного ударного электромеханического преобразователя с использованием метода конечных элементов, которая учитывает пространственно-временные электромагнитные и электромеханические параметры и показатели.

2. Установлено, что в преобразователе индукционного типа электромагнитные процессы протекают с более высокой скоростью и при больших величинах электромеханических показателей по сравнению с преобразователем электромагнитного типа.

3. Ферромагнитный экран с пониженной электропроводностью обеспечивает повышение силовых и скоростных показателей преобразователей, КПД при одновременном уменьшении максимальной плотности тока в индукторе и индукции магнитного поля рассеяния.

4. В преобразователе электромагнитно-индукционного типа со связанными якорями характер электромеханических характеристик аналогичен характеру соответствующих характеристик преобразователя индукционного типа, но с более высокими показателями. В преобразователе с несвязанными якорями на электропроводящий якорь действует электродинамическая сила отталкивания, максимальная величина которой примерно на порядок выше, чем электромагнитная сила притяжения, действующая на ферромагнитный якорь. Это обуславливает меньшую скорость ферромагнитного якоря по сравнению со скоростью электропроводящего якоря.

5. Введен интегральный показатель эффективности, учитывающий силовые, скоростные, энергетические и экологические (индукция магнитного поля рас-

сеяния) показатели. По всем вариантам стратегии оценки конструктивные схемы преобразователя электромагнитно-индукционного типа более эффективны по сравнению с преобразователями индукционного и электромагнитного типа.

6. Предложена конструктивная схема преобразователя электромагнитно-индукционного типа с несвязанными якорями, в которой обеспечивается линейно-поворотное движение ударного элемента.

#### Список литературы

- Balikci A. *Improved performance of linear induction launchers* / A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2005. – Vol. 41. – № 1. – P. 171-175.
- Bissal A. *Comparison of two ultra-fast actuator concept* / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48. – № 11. – P. 3315-3318.
- Bolyukh V.F. *High-efficiency impact electromechanical converter* / V.F. Bolyukh, V.F. Luchuk, M.A. Rassokha, I.S. Shchukin // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 82. – № 2. – P. 104-110.
- Young-woo J. *High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD* / J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won // *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution» (10-13 June 2013, Stockholm)*. – 2013. – P. 608.
- Болюх В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукін // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 5. – С. 46-48.
- Bolyukh V.F. *The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter* / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko // *Russian Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 86. – № 7. – P. 425-431.
- Li W. *Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method* / W. Li, C.S. Koh // *14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*. – 2010. – P. 1-9.
- Lim D.K. *Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method* / D.K. Lim, D.K. Woo, I.W. Kim // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – Vol. 49. – № 12. – P. 5749-5755.
- Comsol Multiphysics modeling and simulation software. – Режим доступа : <http://www.comsol.com>. – Дата обращения : 30 березня 2017.
- Болюх В.Ф. Сравнительный анализ конструктивных схем линейных ударных электромеханических преобразователей комбинированного типа / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукін // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 4. – С.20-27.
- Болюх В.Ф. Пат. 110909, Україна. Електромеханічний лінійно-поворотний перетворювач ударної дії / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко. – 2015.

#### References (transliterated)

- Balikci A. Zabar Z., Birenbaum L. *Improved performance of linear induction launchers*. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005, vol. 41, no 1, pp. 171–175.
- Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. *Comparison of two ultra-fast actuator concept*. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, vol. 48, no.11, pp. 3315-3318.
- Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. *High-efficiency impact electromechanical converter*. *Russian Electrical Engineering*. 2011, vol. 82, no. 2, pp. 104–110.
- Young-woo J., Hyun-wook L., Seok-won L. *High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD* *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution» (10-13 June, Stockholm)*. 2013, P. 608.
- Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. *Sravnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov* [Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 46-48.
- Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. *The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic*



- converter. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 7, pp. 425-431.
7. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method, *14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*. 2010, pp. 1-9.
  8. Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013, vol. 49, no. 12, pp. 5749-5755.
  9. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. Available at: <http://www.comsol.com>. (accessed 30.03.2017).
  10. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz konstruktivnykh skhem lineynykh udarnykh elektromekhanicheskikh preobrazovatelye kombinirovannogo tipa [Comparative analysis of constructive schemes of linear shock electromechanical converters of combined type]. *Electrotehnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2015, no 4, pp.20-27.
  11. Bolyukh V.F., e.a. *Elektromekhanichmy liniyno-povorotnyy peretvoryuvach udarnoyi diyi* [The electromechanical linear-rotary converter impact]. Patent UA, no 110909, 2015.

Поступила (received) 04.05.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Лінійний ударний електромеханічний перетворювач електромагнітно-індукційного типу / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, І. С. Щукін** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 131–139. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2409-9295.

**Линейный ударный электромеханический преобразователь электромагнитно-индукционного типа / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукін** // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 131–139. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2409-9295.

**Linear shock electromechanical converter of electromagnetic-induction type / V.F., Bolyukh, A.S. Kocherga, I.S. Shchukin** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 131–139. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2409-9295.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Болюх Володимир Федорович**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: [vfolyukh@gmail.com](mailto:vfolyukh@gmail.com).

**Болюх Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры общей электротехники, тел. (057)707-65-14; e-mail: [vfolyukh@gmail.com](mailto:vfolyukh@gmail.com).

**Bolyukh Vladimir Fedorovich**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of chair of General Electrical Engineering, tel. +38 (057)707-64-27; e-mail: [vfolyukh@gmail.com](mailto:vfolyukh@gmail.com).

**Кочерга Олександр Іванович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: [kocherga.oleksandr07@gmail.com](mailto:kocherga.oleksandr07@gmail.com).

**Кочерга Александр Иванович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри общей електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: [kocherga.oleksandr07@gmail.com](mailto:kocherga.oleksandr07@gmail.com).

**Kocherga Aleksandr Ivanovich**, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department "General Electrical Engineering", tel. +38 (057)707-64-27, e-mail: [kocherga.oleksandr07@gmail.com](mailto:kocherga.oleksandr07@gmail.com).

**Щукін Ігор Сергійович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, (057)707-65-14, e-mail: [tech@tetra.kharkiv.com](mailto:tech@tetra.kharkiv.com).

**Щукін Игорь Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: [tech@tetra.kharkiv.com](mailto:tech@tetra.kharkiv.com)

**Shchukin Igor Sergeevich**, PhD in Technical Sciences, Assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Assistant professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057)707-65-14; e-mail: [tech@tetra.kharkiv.com](mailto:tech@tetra.kharkiv.com).