

УДК 621.313:536.2.24:539.2

**В. Ф. БОЛЮХ, С. В. ОЛЕКСЕНКО, И. С. ЩУКИН****ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ТИПА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Разработаны компьютерные модели линейных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типов. Для преобразователей, обеспечивающих наибольшую скорость на участке рабочего хода с использованием исходных параметров, ограничений и вектора варьируемых параметров, получены геометрические параметры. Показаны особенности электромеханических характеристик и магнитных полей полученных преобразователей. Для оценки эффективности линейных электромеханических преобразователей введен интегральный показатель, учитывающий скоростные и силовые показатели, КПД, магнитные поля рассеяния и максимальную величину тока индуктора. Установлено, что практически для всех стратегий выбора наиболее эффективным электродинамический преобразователь, а наименее эффективным является электромагнитный преобразователь.

**Ключевые слова:** линейный электромеханический преобразователь ударного действия, индукционно-динамический преобразователь, электромагнитный преобразователь, электродинамический преобразователь, стратегия выбора.

**Введение.** Линейные электромеханические преобразователи ударного действия (ЛЭПУД) широко используются в промышленных и научно-технических системах, где необходим высокоскоростной разгон исполнительного элемента (ИЭ) на относительно коротком рабочем участке [1–4]. Такие преобразователи применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и др., в авиационной и космической технике, в исследовательских установках, например, для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты [5–11]. Особенно актуальна задача обеспечения высокой скорости на коротком рабочем участке для быстродействующих электрических аппаратов [12]. Для этого разрабатываются линейные электромеханические преобразователи комбинированного действия, использующие силы различной природы, например электродинамические силы отталкивания и электромагнитные силы притяжения. [13]. Хотя при этом конструкция преобразователя становится довольно сложной.

Особенностью рассматриваемых ЛЭПУД является то, что они работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия [14]. Наиболее эффективными типами ЛЭПУД являются индукционно-динамические (ИДП), электродинамические (ЭДП) и электромагнитные (ЭМП) электромеханические преобразователи [15, 16]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от импульсного источника, как правило, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). В указанных типах ЛЭПУД основное отличие состоит в конструкции подвижного якоря, который обеспечивает разгон исполнительного элемента (ИЭ).

В ИДП якорь представляет собой электропроводящий массивный диск, в котором индуцируются вихревые токи от индуктора, вследствие чего между ними возникает электродинамическая сила отталкивания. В ЭДП якорь представляет собой подвижную обмотку, которая электрически связана с индуктором, т.е. пита-

ется одним и тем же током, вследствие чего между ними также возникает электродинамическая сила отталкивания. В ЭМП якорь представляет собой ферромагнитный элемент, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора.

Учитывая значительный уровень импульсных магнитных полей, в рассматриваемых ЛЭПУД целесообразно использовать наружный ферромагнитный экран (ФЭ). Этот экран должен быть выполнен из материала с пониженной электропроводностью, например, из магнитодиэлектрика.

Однако, как показывают исследования [17], рассматриваемые ЛЭПУД обеспечивают различные силовые и скоростные показатели и возбуждают различные величины магнитных полей рассеяния в окружающее пространство, что сказывается на их экологических показателях. Кроме того, указанные преобразователи имеют различную массу активных элементов, различную конструктивную сложность или надежность функционирования, а также различную величину тока возбуждения индуктора, что важно для электронной системы управления. Вследствие этого для выбора того или иного типа ЛЭПУД необходимо учитывать множество различных разнородных факторов. Таким образом необходимо решать многопараметрическую оптимизационную задачу по выбору наиболее эффективного типа ЛЭПУД.

**Цель статьи.** Разработка методики выбора соответствующего типа высокоскоростного ЛЭПУД при определенных условиях и ограничениях с учетом основных силовых, скоростных, конструктивных, массогабаритных и экологических показателей.

**Математическая модель ударных преобразователей.** Для расчетов рабочих процессов и параметров ЛЭПУД индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типа, проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.4*, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов [18]. Указанные преобразователи имеют осевую симметрию, что позволяет использовать двухмерную математическую модель с пространственно-распределенными параметрами.

Електромагнітні процеси ЛЭПУД описуються дифференціальним рівнянням в циліндричеській системі координат  $(rz)$  при допомозі векторного магнітного потенціала  $\vec{A} = (\vec{A}_r, \vec{A}_z)$ :

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \vec{H} - \sigma \cdot \vec{V} \times \vec{B} = \vec{J}_e, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – електропровідність, адаптивно учитывающая температури индуктора, якоря или ФЭ;

$\mu_0$  – магнітна постійна;

$\vec{V}$  – швидкість переміщення якоря;

$\vec{J}_e$  – густина струму в вузлі;

$\vec{B}$  – індукція магнітного поля  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ ;

$\vec{H}$  – напруженість магнітного поля.

Ток в индукторе  $i_1$  описується рівнянням:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \vec{B}) - \sigma \vec{V} \times \vec{B} = \frac{i_1 N_1}{s_1}, \quad (2)$$

где  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність;

$N_1$  – кількість витків индуктора;

$s_1$  – площа сечення витка индуктора.

Значення аксіальної складової сили, діючої на якорь ЛЭПУД, визначається за допомогою тензора натягнення Максвелла  $T$ :

$$f_z = 2\pi r \int \vec{n} \cdot T dS, \quad (3)$$

где  $\vec{n}$  – вектор зовнішньої нормалі до поверхні інтегрування  $dS$ .

Система рівнянь (1–3) містить початкові умови:

$$\vec{A}_{t=0}(\vec{A}_r, \vec{A}_z) = \vec{A}(0,0), \quad (4)$$

і граничні умови на границі розрахункової області:

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0. \quad (5)$$

Механічні процеси ЛІЕП при урахуванні середовища, сил тертя і впливу буферного (возвратного) елемента можна описати рівнянням [19]:

$$f_z(t, z) = (m_2 + m_e) \frac{dV}{dt} + K_p \Delta Z(t) + K_T V(t) + 0,125\pi \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t) \quad (6)$$

где  $m_2, m_e$  – маса якоря і ІЕ відповідно;

$K_p$  – коефіцієнт пружності буферного елемента;

$\Delta Z(t)$  – зміщення якоря з ІЕ;

$K_T$  – коефіцієнт динамічного тертя;

$\gamma_a$  – густина середовища переміщення;

$\beta_a$  – коефіцієнт аеродинамічного опору середовища, в якій відбувається переміщення якоря з ІЕ;

$D_{ex2}$  – максимальний діаметр якоря;

$f_z(t, z)$  – електродинамічні або електромагнітні сили, діючі на якорь з боку индуктора.

Для визначення температур активних елементів (індуктор і електропровідний якорь) і пасивних елементів (ФЭ і ферромагнітний якорь) ЛЭПУД використовуються рівняння [20]:

$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left( \frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot K_v \cdot \rho_n(T) \quad (7)$$

$$c_m(T) \cdot \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

где  $n=1,2$  – індекси, що відносяться до индуктору і електропровідному якорю відповідно;

$m=3,4$  – індекси, що відносяться до ФЭ і ферромагнітному якорю відповідно;

$c(T)$  – середня удільна теплоємність;

$\gamma$  – середня густина матеріалу;

$j(t)$  – густина струму активного елемента;

$\lambda(T)$  – коефіцієнт теплопровідності;

$K_v$  – коефіцієнт заповнення активного елемента;

$\rho(T)$  – удільний опір активного елемента.

Система рівнянь (7, 8) доповнюється граничними умовами на поверхні  $\xi$ . На охолоджуваній поверхні використовуються граничні умови третього роду, що описують процес теплоотдачі:

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_\xi - T_0), \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коефіцієнт теплоотдачі;

$n$  – нормаль до поверхні;

$T_0$  – температура середовища.

На границі контакту активних і пасивних елементів використовуються граничні умови четвертого роду:

$$T_n(r_\xi, z_\xi, t) = T_m(r_\xi, z_\xi, t); \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n}. \quad (10)$$

На осі симетрії ЛЭПУД використовуються граничне умови другого роду:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_\xi = 0. \quad (11)$$

Коефіцієнт теплопровідності индуктора або якоря ЭДП вздовж відповідних осей визначається за формулою

$$\lambda_w = \frac{\lambda_p \lambda_i \lambda_k (h_p + 2h_i + h_k)}{h_p \lambda_i \lambda_k + 2h_i \lambda_p \lambda_k + h_k \lambda_p \lambda_i}, \quad (12)$$

где  $\lambda_p, \lambda_i, \lambda_k$  – коефіцієнти теплопровідності провідника, ізоляції і епоксидного компаунда, відповідно;

$h_p, h_i, h_k$  – товщина провідника, ізоляції і компаунда в вибраному напрямку відповідно.

Решення системи рівнянь (1–12) виробляється методом BDF (*backward differentiation formula*) з фік-

сированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

**Методика выбора параметров преобразователя.** Рассмотрим ЛЭПУД индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типов, имеющие коаксиальную конфигурацию и содержащие ФЭ, который охватывает индуктор с торцевой и наружной боковых сторон. Подвижный якорь указанных преобразователей обеспечивает разгон ИЭ одинаковой массы. Для возбуждения индуктора используется один и тот же ЕНЭ с электронной схемой, формирующей апериодический импульс тока. Индуктор плотно намотан из медной шины, якорь ИДП выполнен в виде сплошного диска из технической меди, а якорь ЭМП и ФЭ выполнены из магнитодиэлектрика с магнитными свойствами стали Ст.10.

В последующих представлениях результатов расчета используем следующие индексы активных элементов: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ФЭ, содержащий основание 3а; внешнюю обечайку 3б и внутренний цилиндр 3с.

В процессе работы будем оценивать усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B_s$ , определяется на расчетной поверхности, расположенной на расстоянии  $2\Delta Z_0$  от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии  $4\Delta Z_0$  от верхней стороны индуктора, где  $\Delta Z_0$  – величина рабочего хода якоря.

Для синтеза параметров указанных типов ЛЭПУД используем:

**Исходные параметры:**

- Объем статической части  $\Theta=2,64 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$ ;
- Рабочий ход якоря  $\Delta Z_0=10 \text{ мм}$ ;
- Исходное расстояние между индуктором и якорем  $\delta=1,0 \text{ мм}$  (ИДП, ЭДП),  $\delta=10 \text{ мм}$  (ЭМП);
- Масса ИЭ  $m_e=0,5 \text{ кг}$ ;
- Емкость ЕНЭ  $C=2850 \text{ мкФ}$ ;
- Напряжение ЕНЭ  $U_0=400 \text{ В}$ ;
- Коэффициент заполнения  $K_v=0,88$ ;
- Толщина изоляционной прокладки  $\xi=1,0 \text{ мм}$ ;
- Внутренний диаметр якоря  $D_{in2}=10 \text{ мм}$  (ИДП, ЭДП),  $D_{in2}=4 \text{ мм}$  (ЭМП);
- Усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B_s < 60 \text{ мТл}$ ;
- Внутренний диаметр индуктора  $D_{in1} > 10 \text{ мм}$  (ИДП, ЭДП);
- Диаметр максимальный  $D_{ex} < 120 \text{ мм}$ ;
- Высота внутреннего цилиндра ФЭ ЭМП  $H_{3c} = H_{3b}$ .

**Зависимые параметры:**

- Высота преобразователя  $H = \lceil 4\pi^{-1} \Theta D_{ex}^{-2} \rceil$ ;
- Количество витков индуктора ( $k=1$ ) и якоря ЭДП ( $k=2$ )  $N_k = \lceil (D_{exk} - D_{ink}) s_k^{-1} \cdot H_k \cdot K_v \rceil$ ;
- Внутренний диаметр обечайки ФЭ  $D_{in3b} = D_{ex1} + 2\xi$  (ИДП, ЭДП).
- Внешний диаметр внутреннего цилиндра ФЭ  $D_{ex3c} = D_{in1} - 2\xi$ .

**Ограничения параметров:**

- Внешний диаметр индуктора  $D_{ex1} < D_{ex}$ ;
- Высота индуктора  $H_1 < H$ ;
- Внешний диаметр якоря  $D_{ex2} < D_{ex}$ ;
- Высота якоря  $H_2 < H - (H_1 + \delta + \xi)$ ;

- Высота дискового основания ФЭ  $H_{3a} < H - (H_2 + H_1 + \delta + \xi)$ ;
- Высота обечайки ФЭ  $H_{3b} < H - (H_2 + \delta + \xi)$ ;
- Внешний диаметр обечайки ФЭ  $D_{ex3b} < D_{ex}$ ;
- Высота внутреннего цилиндра ФЭ  $H_{3c} < H - (H_2 + \delta + \xi)$ ;
- Сечение шины индуктора  $s_1$ , якоря ЭДП  $s_2$  (из набора стандартных сечений).

Вектор варьируемых параметров можно представить следующим образом:

$$\Xi = \{D_{ex1}, D_{in1}, H_1, s_1, D_{ex2}, H_2, s_2, H_{3a}, H_{3b}, D_{ex3b}\}. \quad (13)$$

В качестве целевой функции используем максимальную среднюю скорость якоря  $V_s$  с ИЭ на участке рабочего хода.

Стратегия нахождения решения  $m$  переменных заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, обеспечивающего стягивание области параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров [21].

Для глобальной оптимизации используем генетические алгоритмы, основанные на механизмах популяционной генетики. Каждому атрибуту объекта в фенотипе соответствует один ген в генотипе, представляющий собой битовую строку фиксированной длины. Признак разбивается на тетрады, преобразуемые по коду Грея. При кодировании бинарной строкой из  $l$  битов переменной  $x_k$ , которая принадлежит отрезку  $[x_{\min}, x_{\max}]$ , каждая строка  $s_k$  выражает значение переменной  $x_k$ :

$$x_k = x_{\min} + s_k(x_{\max} - x_{\min})/2^l, \quad (14)$$

где  $s_k$  – значение бинарного числа, кодируемого этой строкой.

Генетические алгоритмы можно представить следующим образом:

$$GA = (P^0, m, l, S, Q, \eta, \xi), \quad (15)$$

где  $P^0 = (a_1^0, \dots, a_m^0)$  – исходная популяция;

$a_i^0$  – решение задачи в виде хромосомы,

$i = \overline{1, m}$ ;  $m$  – размер популяции;

$l$  – длина каждой хромосомы популяции;

$S$  – оператор отбора;

$Q$  – отображение, определяющее рекомбинацию (кроссовер, мутация);

$\eta$  – функция оптимальности;

$\xi$  – критерий останова.

Работа генетических алгоритмов представляет итерационный процесс, на каждом цикле которой реализуется операторы отбора, кроссовера и мутации. Оператор отбора  $S$  порождает промежуточную популяцию  $R'$  из популяции  $P'$  посредством отбора и генерации новых копий элементов  $P'$ :  $R' = S(P')$ .

Функция оптимальности  $\eta$ , обеспечивающая обратную связь от результатов оптимизации в течение поколения  $t$ , используется для отбора индивидуумов

популяції. Отбор производится на основании вероятностей  $p_s(a'_i)$ , вычисленных для каждого индивида:

$$p_s(a'_i) = \eta(a'_i) / \sum_{j=1}^m \eta(a'_j) \quad (16)$$

После завершения отбора элементу  $a'_i \in R^l$  выбирается партнер из  $R^l$  для рекомбинации и строится новая хромосома.

Кроссовер с вероятностью  $p_c$  обеспечивает:

- случайный выбор партнеров для скрещивания

$$a_1 = (a_{1,1} \dots a_{1,l}) \in R^l, a_2 = (a_{2,1} \dots a_{2,l}) \in R^l;$$

- случайный выбор точки кроссовера  $x \in \{1, \dots, l-1\}$ ;

- формирование двух новых индивидуумов

$$a'_1 = (a_{1,1} \dots a_{1,x} a_{2,x+1} \dots a_{2,l}) \text{ и}$$

$$a'_2 = (a_{2,1} \dots a_{2,x} a_{1,x+1} \dots a_{1,l}).$$

Мутация обеспечивает:

- случайный выбор с вероятностью  $p_m$  позиций  $\{x_1, \dots, x_k\} \subseteq \{1, \dots, l\}$  внутри битовой строки  $a = (a_1 \dots a_l) \in R^l$ , подверженной мутации;

- формирование нового индивидуума

$$a = (a_1 \dots a_{x_1-1} \overline{a_{x_1}} a_{x_1+1} \dots a_{x_i-1} \overline{a_{x_i}} a_{x_i+1} \dots a_l),$$

$$(i = \overline{1, k}).$$

В качестве метода локальной оптимизации для поиска минимума критерия оптимальности  $\Phi(X)$  в  $n$ -мерном евклидовом пространстве  $R^n$

$$\min \Phi(X) = \Phi(X^*) = \Phi^*, \quad X \in R^n \quad (17)$$

используется метод Нелдера-Мида, осуществ-

ляющий изменение текущего симплекса. В результате отражения  $k$ -й вершины симплекса с координатами вершин  $X_i^r, i \in [1, n+1]$ , образуется симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_i^r, i \in [1, n+1], i \neq k, X_k^{r+1} = 2X_c^r - X_k^r, \quad (18)$$

где  $X_c^r = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq k}^{n+1} X_i^r$  – вектор координат центра тяжести

остальных вершин симплекса. После выполнения редукции вершин симплекса  $X_i^r$  к вершине  $X_k$  получаем симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_i^r + \gamma(X_i^r - X_k^r), i \in [1, n+1], i \neq k, X_k^{r+1} = X_k^r, \quad (19)$$

где  $\gamma \in (0, 1)$ ,  $\gamma \approx 0,5$  – коэффициент редукции.

После операции сжатия симплекса  $X_i^r$  в направлении  $(X_k^r - X_c^r)$  получаем симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_i^r, i \in [1, n+1], i \neq k, X_k^{r+1} = X_c^r + \beta(X_k^r - X_c^r), \quad (20)$$

где  $\beta \in (0, 1)$ ,  $\beta \approx 0,4 - 0,6$  – коэффициент сжатия.

В операции растяжения симплекса  $X_i^r$  в направлении  $(X_k^r - X_c^r)$  получаем симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_i^r, i \in [1, n+1], i \neq k, X_k^{r+1} = X_c^r + \alpha(X_k^r - X_c^r), \quad (21)$$

где  $\alpha \approx 2,8 - 3,0$  – коэффициент растяжения.

На основании соотношений представленного алгоритма [22] разработана компьютерная программа и получены параметры рассматриваемых типов ЛЭ-ПВД, которые обеспечивают максимальную скорость на участке рабочего хода при заданных условиях и ограничениях (табл.1).

Таблица 1 – Параметры ИДД, ЭДД и ЭМД

Показатель	Обозначение	ИДД	ЭДД	ЭМД
		Величина		
<b>индуктор</b>				
Внешний диаметр	$D_{ex1}$ , мм	100	100	54
Внутренний диаметр	$D_{in1}$ , мм	10	10	29
Высота	$H_1$ , мм	10	5,2	24
Количество витков индуктора	$N_1$ , шт.	71	67	322
Сечение шины индуктора	$S_1$ , мм <sup>2</sup>	5,65	3,0	1,0
<b>якорь</b>				
Внешний диаметр	$D_{ex2}$ , мм	100	100	76
Высота	$H_2$ , мм	3,0	3,1	5,0
Количество витков якоря	$N_2$ , шт.	-	65	-
Сечение шины якоря	$S_2$ , мм <sup>2</sup>	-	1,6	-
<b>ФЭ</b>				
Высота дискового основания	$H_{3a}$ , мм	8	8	23
Высота обечайки	$H_{3b}$ , мм	24	24	46
Внешний диаметр обечайки	$D_{ex3b}$ , мм	118	118	76

Рассмотрим электромеханические характеристики полученных преобразователей с распределением магнитных полей в момент максимума тока. На рис.1 представлены показатели ИДП, на рис.2 – пока-

затели ЭДП, а на рис.3 – показатели ЭМП при величине рабочего хода якоря  $\Delta Z_0 = 10$  мм. На данных рисунках обозначены 1 – индуктор, 2 – якорь, 3 – ФЭ и представлены  $V$  – скорость перемещения якоря с ИЭ,

$j_1$  – плотность тока в индукторе;  $j_2$  – усредненная плотность тока в электропроводящем якоре ИДП;  $f_z$  – электродинамическая (электромагнитная) сила, действующая на якорь;  $F_z = \int f_z(t, z)dt$  – импульс силы, действующий на подвижный якорь.

Во всех преобразователях наблюдается импульсный аperiodический импульс тока в индукторе. В ИДП и ЭДП максимальная величина тока индуктора примерно одинакова и составляет 1,2 кА, а в ЭМП величина этого тока существенно ниже и составляет 0,23 кА.

Сила  $f_{zm}$ , действующая на подвижный якорь, также имеет выраженный импульсный характер. Максимальная величина силы  $f_{zm}$  в ИДП составляет примерно 11,1 кН, в ЭДП – 13,5 кН, а в ЭМП существенно ниже – 3,3 кН. Однако за счет различной длительности электромагнитных процессов наибольшая величина импульса силы  $F_z$  достигается в ЭМП – 39,9 Н·с, в то время как в ИДП – 7,7 Н·с, а в ЭДП – 9,4 Н·с.

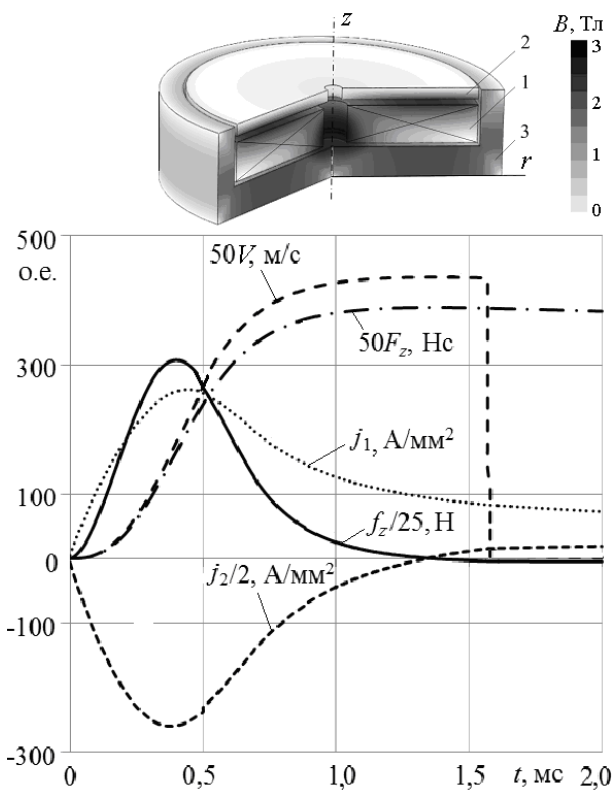


Рис.1 – Электромеханические характеристики ИДП и распределение магнитного поля в момент максимума тока

Во всех представленных преобразователях после прохождения расстояний рабочего хода  $\Delta Z_0 = 10$  мм якорь останавливается и его скорость становится нулевой. Однако на величине рабочего хода скорости имеет различный характер изменения в различных типах ЛЭПУД. В ИДП скорость быстро возрастает примерно до момента времени 1 мс, достигая максимального значения 8,94 м/с, после чего практически не изменяется до момента времени 1,76 мс, при котором достигается величина рабочего хода.

В ЭДП скорость практически все время возрастает, достигая максимального значения 10,64 м/с, с не-

большим замедлением после 1,0 мс до момента времени 1,35 мс, при котором достигается величина рабочего хода.

В ЭМП скорость на всем рабочем участке ускоренно возрастает, достигая максимального значения 6,42 м/с в момент времени 5,53 мс при прохождении якром величины рабочего хода.

Учитывая различное время прохождения рабочего хода, средняя скорость якоря в ИДП составляет 5,69 м/с, в ЭДП – 8,45 м/с, а в ЭМП существенно ниже и составляет лишь 1,81 м/с. Таким образом, с этой точки зрения наилучшим является ЭДП, а наихудшим – ЭМП.

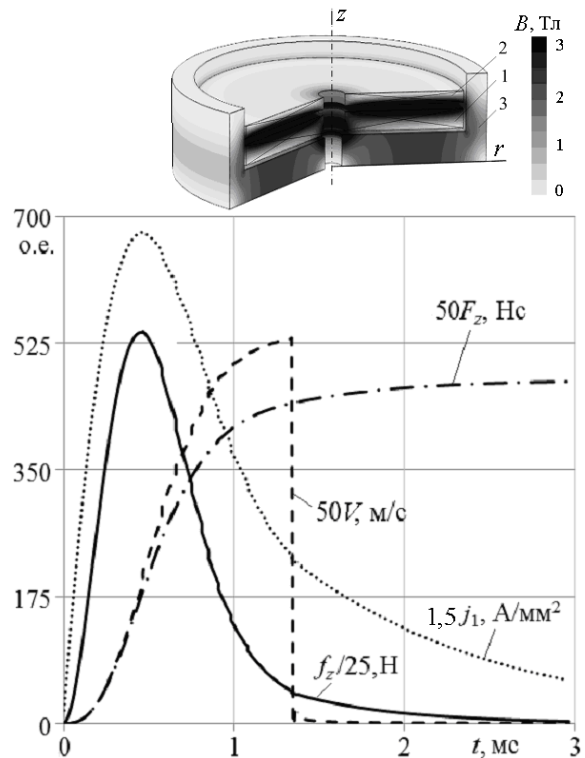


Рис.2 – Электромеханические характеристики ЭДП и распределение магнитного поля в момент максимума тока

Усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B_s$ , определяемое на расчетной поверхности в момент максимума тока индуктора, в ИДП составляет 49,2 мТл, в ЭДП – 13 мТл, а в ЭМП – 55 мТл. Таким образом, с этой точки зрения наилучшим является ЭДП, а наихудшим – ЭМП.

В табл.2 представлены относительные показатели ИДП и ЭДП (отмечены звездочкой), которые отнесены к соответствующим показателям ЭМП при величине рабочего хода якоря  $\Delta Z_0$ . Здесь представлены значения максимальной плотности тока в индукторе  $j_{1m}$ , максимальные значения ЭДУ  $f_m$ , максимальная  $V_m$  и средняя  $V_s$  скорости якоря с ИЭ, усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B_s$ , масса меди  $m_{cu}$  и масса активных элементов  $m$ , величина импульса силы  $F_z = \int f_z dt$ ; КПД преобразователя  $\eta = (m_2 + m_e) \times V_m^2 C^{-1} U_0^{-2}$ ; максимальная плотность тока в индукторе  $j_{1m}$ , радиальные  $G_r$  и аксиальные  $G_z$  габариты, максимальный ток индуктора  $I_{1m}$ , значение которого важно для электронной системы возбуждения.

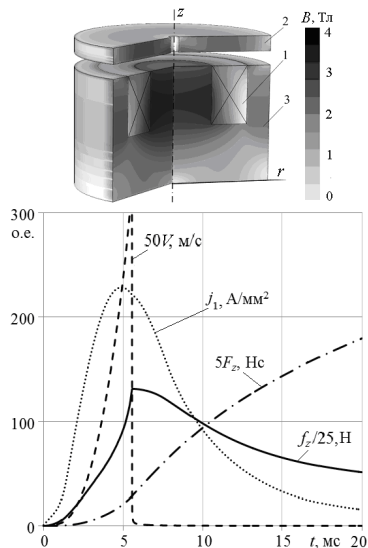


Рис.3 – Електромеханічні характеристики ЕМП і розподілення магнітного поля в момент максимуму току

Таблиця 2 – Відносительні значення ІДП і ЕДП при ΔZ0=10 мм

	$f_m^*$ , Н	$F_z^*$ , Нс	$B_s^*$ , мТл	$V_m^*$ , м/с	$V_s^*$ , м/с	$\eta^*$ , %	$G_z^*$ , мм	$G_r^*$ , мм	$m^*$ , кг	$m_{cu}^*$ , кг	$j_{1m}^*$ , А/мм²	$I_{1m}^*$ , А
ІДП	3,375	0,214	0,894	1,392	3,143	1,101	0,55	1,552	0,593	2,292	0,984	5,555
ЕДП	4,116	0,265	0,236	1,657	4,094	1,432	0,55	1,552	0,449	1,141	1,777	5,327

**Сравнительный анализ ИДП, ЭДП и ЭМП.**

Анализируя полученные параметры синтезированных ЛЭПУД сложно отдать предпочтение тому или иному типу, поскольку на эффективность помимо скоростных влияет целый ряд показателей, в том числе, силовые показатели, КПД, магнитные поля рассеяния и максимальная величина тока индуктора.

Исходя из этого, эффективность ЛЭПУД будем оценивать с помощью интегрального показателя

$$K = k_s \left\{ \alpha_1 \frac{f_m}{f_{m0}} + \alpha_2 \frac{F_z}{F_{z0}} + \alpha_3 \frac{V_s^*}{V_{s0}^*} + \alpha_4 \frac{\eta}{\eta_0} + \alpha_5 \frac{B_{s0}^*}{B_s^*} + \alpha_6 \frac{m_0}{m} + \alpha_7 \frac{I_{10}}{I_1} \right\}, \quad (22)$$

где  $k_s$  – коэффициент надежности ЛЭПУД;

$\alpha_1$  – весовой коэффициент, учитывающий максимальную электродинамическую (электромагнитную) силу, действующую на якорь  $f_m$ ;

$\alpha_2$  – весовой коэффициент, учитывающий величину импульса силы, действующего на якорь  $F_z$ ;

$\alpha_3$  – весовой коэффициент, учитывающий среднюю скорость якоря с ИЭ на участке перемещения  $V_s$ ;

$\alpha_4$  – весовой коэффициент, учитывающий КПД ЛЭПУД  $\eta$ ;

$\alpha_5$  – весовой коэффициент, учитывающий поле рассеяния  $B_s$ ;

$\alpha_6$  – весовой коэффициент, учитывающий массу ЛЭПУД  $m$ ;

$\alpha_7$  – весовой коэффициент, учитывающий максимальное значение тока индуктора  $I_1$ .

Указанные показатели нормированы к соответствующим показателям ЭМП, значения которого обо-

Анализируя магнитные поля можно отметить следующие закономерности. В ИДП наибольшее магнитное поле концентрируется в зазоре между индуктором и электропроводящим якорем. При этом на наружной поверхности якоря поле практически полностью экранировано. В ЭДП наибольшее магнитное поле концентрируется между якорем и индуктором, по которым протекает один и тот же ток. При этом частично магнитное поле выходит за поверхность якоря. В ЭМП максимальное магнитное поле возникает во внутреннем цилиндрическом сердечнике, который охватывается индуктором. При этом наблюдается значительное поле рассеяния за поверхностью ферромагнитного якоря.

Средняя скорость якоря существенно зависит от величины рабочего хода якоря  $\Delta Z_0$  (рис.4). Так, при увеличении рабочего хода  $\Delta Z_0$  от 10 до 25 мм средняя скорость в ИДП возрастает от 5,69 до 7,31 м/с, в ЭДП указанная скорость также возрастает, но уже от величины 7,41 до 9,84 м/с. При этом средняя скорость якоря в ЭМП уменьшается от 1,81 до 1,09 м/с.

значены дополнительным индексом 0. Все весовые коэффициенты связаны соотношением

$$\sum_{i=1}^7 \alpha_i = 1. \quad (23)$$

Показатели, учитываемые весовыми коэффициентами  $\alpha_1$ – $\alpha_4$ , должны быть максимальными, а показатели, учитываемые весовыми коэффициентами  $\alpha_5$ – $\alpha_7$  – минимальными. В таком случае, наиболее эффективным типом ЛЭПУД будет тот, у которого интегральный показатель  $K$  будет максимальным.

На основании экспертных оценок выбираем коэффициент надежности для ИДП  $k_s=0,95$ , для ЭДП –  $k_s=0,8$ , для ЭМД –  $k_s=1,0$ . Пониженная надежность ИДП объясняется конструкцией медного якоря, выполненного в виде тонкого диска. Еще более низкая надежность ЭДП объясняется наличием подвижного токосъемного контакта между индуктором и якорем и конструкцией якоря (многовитковый, замоноличенный эпоксидной смолой).

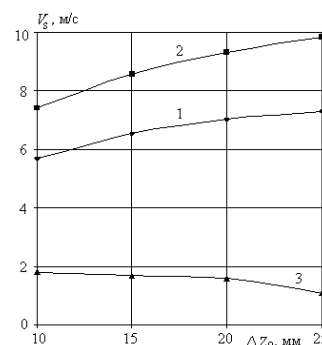


Рис. 4 – Средняя скорость якоря в зависимости от величины рабочего хода

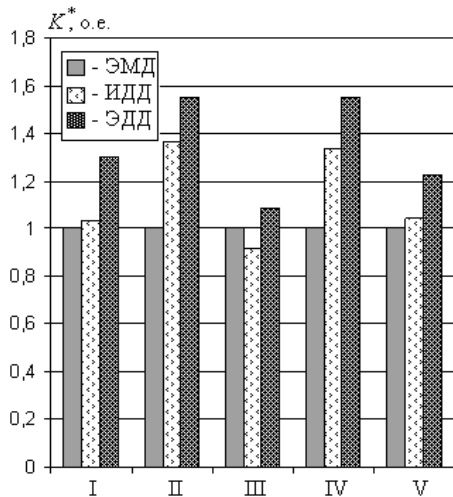


Рис. 5 – Относительные значения интегрального показателя эффективности типов ЛЭПУД для различных вариантов стратегии выбора

Таблица 3 – Значение весовых коэффициентов

	Вариант стратегии выбора				
	I	II	III	IV	V
$\alpha_1$	0,1	<b>0,25</b>	0,1	0,1	0,1
$\alpha_2$	0,1	0,1	<b>0,25</b>	0,1	0,1
$\alpha_3$	0,1	0,1	0,1	<b>0,25</b>	0,1
$\alpha_4$	0,1	0,1	0,0	0,1	<b>0,25</b>
$\alpha_5$	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05
$\alpha_6$	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05
$\alpha_7$	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05

Стратегия выбора типа ЛЭПУД определяется значениями весовых коэффициентов, которые задаются на основании экспертных оценок. В таблице 3 представлены значения весовых коэффициентов для вариантов стратегии выбора типа ЛЭПУД.

Вариант I учитывает равнозначность всех показателей ЛЭПУД. Вариант II учитывает повышенный приоритет максимальной электродинамической (электромагнитной) силы  $f_m$ , вариант III – величины импульса силы  $F_z$ , вариант IV – средней скорости якоря с ИЭ  $V_s$ , вариант V – КПД ЛИЭП  $\eta$ . В вариантах II-V учитывается пониженный приоритет поля рассеяния  $B_s$ , массы преобразователя  $m$  и максимального значения тока индуктора  $I_1$ .

Практически во всех стратегиях выбора наименее эффективным является ЭМП, а наиболее эффективным – ЭДП. Исключение составляет стратегия выбора III, при которой наивысший приоритет отдан величине импульса силы  $F_z$ . В данном варианте наименее эффективным является ИДП, в то время как эффективность ЭДП остается наибольшей.

На рис.5 представлены относительные значения интегрального показателя эффективности  $K^*$  типов ЛЭПУД для различных вариантов стратегии выбора, при условии, что для ЭМП данный показатель равен 1.

В наиболее важном варианте стратегии выбора IV с точки зрения поставленной задачи обеспечения наибольшей скорости на участке рабочего хода по сравнению с ЭМП эффективность ИДП выше на 33,4 %, а эффективность ЭДП выше на 54,9 %.

**Выводы.** Разработаны 2D компьютерные модели линейных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типов. Для преобразователей, обеспечивающих наибольшую скорость на участке рабочего хода с использованием исходных параметров, ограничений и вектора варьируемых параметров, получены геометрические параметры.

Стратегия нахождения параметров преобразователей заключается в совместном использовании глобального и локального методов оптимизации. Для глобальной оптимизации использованы генетические алгоритмы, основанные на механизмах популяционной генетики, а в качестве метода локальной оптимизации использован метод Нелдера-Мида, осуществляющий изменение текущего симплекса.

Показаны особенности электромеханических характеристик и магнитных полей полученных преобразователей.

Для оценки эффективности линейных электромеханических преобразователей введен интегральный показатель, учитывающий скоростные и силовые показатели, КПД, магнитные поля рассеяния и максимальную величину тока индуктора. Установлено, что практически для всех стратегий выбора наиболее эффективным электродинамический преобразователь, а наименее эффективным является электромагнитный преобразователь.

**Список литературы:** 1. Афонин А.А., Гребеников В.В. Электродинамические системы повышенного быстродействия // Техническая электродинамика. – 1994. - № 5. – С.23-29. 2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. - № 2. – С. 37-43. 3. Балковой А.П., Костин А.В., Мягких А.С. и др. Особенности проектирования гаммы прямых линейных электроприводов для машиностроения // Электротехника. – 2013. - № 7. – С.13-20. 4. Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al. Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. - Vol. 49. №5 - P. 2229–2232. 5. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. – 1989. - № 1. – С. 25-26. 6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era // IEEE Trans. Magnetics. – 2005. - № 1, Vol. 41. – P. 158-164. 7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // IEEE Trans. Magnetics. – 2003. - № 1, Vol. 39. – P. 310-313. 8. Liao M., Zabbar Z., Czarkowski D. et al. The design of a coil-gun as a rapid-fire grenade launcher // IEEE Trans. Magnetics. – 1999. - № 1, Vol. 35. – P. 148-153. 9. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. - 2010. - № 1. – С. 22-28. 10. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micro-meteoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Trans. Magnetics. – 1991. - № 1, Vol. 27. – P. 607-610. 11. Таммишевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. - № 12. – С. 52–57. 12. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. - Vol. 48, №11. - P. 3315-3318. 13. Atmadi A. M. S., Sloot J. G. J. Hybrid Switching: A Review of Current Literature. //IEEE Proceedings of EMPD'98. – 1998. – Vol. 2. P. 683-688. 14. Болух В.Ф., Коритченко К.В. Основні напрямки розвитку електромеханічних імпульсних прискорювачів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. - № 4. – С. 7-13. 15. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. - January 2014. – Vol. 56, Issue 10, P. 1098-1104. 16. Bo-

*lyukh V. F., Luchuk V. F., Rassokha M. A., Shchukin I.S.* High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – Vol. 82, № 2. – P. 104–110. **17.** *Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукін І.С.* Сравнительный анализ ударных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электро-динамического и электромагнитного типа // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2014. – № 38. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 30–44. **18.** *Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукін І.С.* Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С.20–27. **19.** *Болух В.Ф., Рассоха М.А.* Влияние наружного электромагнитного экрана на эффективность ударного электромеханического преобразователя дисковой конфигурации // Електротехніка. – 2010. – № 10. – С. 31–38. **20.** *Bolyukh V.F., Shchukin I.S.* The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – Vol. 83, № 10. – P. 571 – 576. **21.** *Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G.* Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering. – 2004. – Vol. 75. – № 12. – P. 1–11. **22.** *Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I.* Temperature field in the vacuum chamber of a ballistic gravimeter // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 55, № 3. – P. 229–235.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Afonyn, A.A., and Hrebenyov V.V. "Elektrodynamicheskiye systemy povyshennoho bystrodeystviya". *Tekhnicheskaya Elektrodynamika*. No 5. 1994. 23–29. Print. **2.** Uharov, N.H., and Neyman V.Yu. "Tendentsyy razvityiya u pryomeneniya ruchnykh udarnykh mashyn s elektromekhanicheskym preobrazovaniem enerhiy" *Yzv. vuzov. Elektromekhanika*. No 2. 2002. 37–43. Print. **3.** Balkovoy, A.P., et al. "Osobennosti proektyrovaniya hammy pryamykh lyneynykh elektroprivodov dlya mashynostroeniya". *Elektrotekhnika* 7. 2013. 13–20. Print. **4.** Cho, D.J., et al. "Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch" *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 49. No 5. 2013. 2229–2232. Print. **5.** Kuznetsov, P.V., et al. "Ynduktsyonno-dynamicheskaya sistema ochystky sushyl'nogo oborudovaniya". *Molochnaya promyshlennost*. No 1. 1989. 25–26. Print. **6.** Fair, H.D. "Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 41. No 1. 2005. 158–164. Print. **7.** Reck, B. "First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 39. No 1. 2003. 310–313. Print. **8.** Liao, M., et al. "On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 35. No 1. 1999. 148–153. Print. **9.** Chemerys, V.T., V.F. Bolyukh and V.V. Mashtalir. "The project analysis of induction thruster parameters for

the field mortaring". *Suchasni informatsiyni tekh-nolohiyi u sferi bezpeky ta oborony*. No 1. 2010. 22–28. Print. **10.** Upshaw, J.L., and Kajs J.P. "Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 27. No 1. 1991. 607–610. Print. **11.** Tatmyshevskyy, K.V., and Kozlov S.A. "Mahnytno-ypul'snye ustanovky dlya uspytanyu yzdelyy avyakosmycheskoy tekhniky na udarnye vozdeystviya". *Avyakosmycheskoe pryoborostroye*. No 12. 2005. 52–57. Print. **12.** Bissal, A.J., Magnusson and G. Engdahl "Comparison of two ultra-fast actuator concept". *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 48. No 11. 2012. 3315–3318. Print. **13.** Atmadji, A.M.S., and Sloop J.G.J. "Hybrid Switching: A Review of Current Literature". *IEEE Proceedings of EMPD'98*. No 2. 1998. 683–688. Print. **14.** Bolyukh, V.F., and Korytchenko K.V. "Osnovni napyamky rozvytku elektromekhanichnykh impul'snykh pryskoryuvachiv". *Elektrotekhnika i elektromekhanika* 4. (2009): 7–13. Print. **15.** Bolyukh, V.F. and A.I. Vinnichenko "Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter". *Measurement Techniques*. No 56. January 2014. 1098–1104. Print. **16.** Bolyukh, V. F., V. F. Luchuk, M. A. Rassokha, I.S. Shchukin "High-efficiency impact electromechanical converter". *Russian electrical engineering*. Vol. 82. No 2. 2011. 104–110. Print. **17.** Bolyukh, V.F., S.V. Oleksenko and Y.S. Shchukyn "Sravnitel'nyy analiz udarnykh elektromekha-nycheskykh preobrazovateley ynduktsyonno-dynamicheskoho, elektrodynamicheskoho y elek-tromahnytnoho typu". *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser.: *Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhii*. Kharkiv: NTU «KhPI». No 38. 2014. 30–44. Print. **18.** Bolyukh, V.F., S.V. Oleksenko and Y.S. Shchukyn "Vlyyanye parametrov ferromahnytnoho serdechnyka na effektivnost' ynduktsyonno-dynamicheskoho dvyyhatelya". *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. No 6. 2012. 20–27. Print. **19.** Bolyukh, V.F., and M.A. Rassokha "Vlyyanye naruzhnoho elektromahnytnoho ekrana na effektivnost' udarnoho elektromekhanicheskoho preobrazovatelya diskovoy konfyhuratsyy". *Elektrotekhnika*. No 10. 2010. 31–38. Print. **20.** Bolyukh, V.F., and Y.S. Shchukin "The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode". *Russian electrical engineering*. Vol. 83. No 10. 2012. 571–576. Print. **21.** Bolyukh, V.F., L.I. Lysenko and E.G. Bolyukh "Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters". *Russian Electrical Engineering*. Vol. 75. No 12. 2004. 1–11. Print. **22.** Bolyukh, V.F., and Vinnichenko A.I. "Temperature field in the vacuum chamber of a ballistic gravimeter". *Measurement Techniques*. Vol. 55. No 3. 2012. 229–235. Print.

*Посмунила (received) 27.04.2015*

#### «Сведения об авторах /About the Authors»

**Болух Владимир Федорович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры общей электротехники; e-mail: [bolukh@kpi.kharkov.ua](mailto:bolukh@kpi.kharkov.ua)

**Bolyukh Vladimir Fedorovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of the Department General Electrical Engineering; e-mail: [bolukh@kpi.kharkov.ua](mailto:bolukh@kpi.kharkov.ua)

**Олексенко Сергей Владимирович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры общей электротехники; e-mail: [oleksenko\\_sergii@mail.ru](mailto:oleksenko_sergii@mail.ru)

**Oleksenko Sergey Vladimirovich** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», graduate student of General Electrical Engineering; e-mail: [oleksenko\\_sergii@mail.ru](mailto:oleksenko_sergii@mail.ru)

**Щукін Ігорь Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машины; e-mail: [tech@tetra.kharkiv.com](mailto:tech@tetra.kharkiv.com)

**Schukin Igor Sergeevich** – candidate of technical sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor of the Department Electrical Machines; e-mail: [tech@tetra.kharkiv.com](mailto:tech@tetra.kharkiv.com)