

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК И ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ**

*Розроблені комп'ютерні моделі лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів коаксіальної конфігурації з ферромагнітним осердям. Виконано вибір параметрів індукційно-динамічного, електродинамічного та електромеханічного перетворювачів, що забезпечують максимальні ударні навантаження та швидкості. Проведений порівняльний аналіз ефективності зазначених перетворювачів за допомогою інтегрального показника. Показано, що індукційно-динамічний перетворювач не є найкращим ні за якою стратегією вибору. Електромагнітний перетворювач є найбільш ефективнішим для силової дії, а електродинамічний перетворювач – для забезпечення найбільшої швидкості. Бібл. 26, табл. 3, рис. 9.*

*Ключові слова:* лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, індукційно-динамічний, електродинамічний, електромагнітний перетворювачі, синтез параметрів, інтегральний показник ефективності.

*Разработаны компьютерные модели линейных импульсных электромеханических преобразователей коаксиальной конфигурации с ферромагнитным сердечником. Проведен выбор параметров индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного преобразователей, обеспечивающих максимальные ударные нагрузки и скорости. Проведен сравнительный анализ эффективности данных преобразователей с помощью интегрального показателя. Показано, что индукционно-динамический преобразователь не является лучшим ни по одной из стратегий выбора. Электромагнитный преобразователь является наиболее эффективным для силового воздействия, а электродинамический преобразователь – для обеспечения наибольшей скорости. Библ. 26, табл. 3, рис. 9.*

*Ключевые слова:* линейный импульсный электромеханический преобразователь, индукционно-динамический, электродинамический, электромагнитный преобразователи, синтез параметров, интегральный показатель эффективности.

**Введение.** Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) применяются для создания значительных ударных нагрузок и высокоскоростного разгона исполнительных элементов (ИЭ) на коротком активном участке во многих областях науки и техники [1]. Так, в строительстве применяются различные электромагнитные молоты и перфораторы для разрушения монолитно-бетонных оснований, устройства для погружения свай и анкеров [2, 3]. В горнодобывающей промышленности используются бутобои различной мощности, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – сейсмоисточники различной мощности и возмущающей силы; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара и т.п. [4, 5]. Для авиационной, ракетно-космической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители массивных объектов [6, 7]. ЛИЭП используются для ударно-конденсаторной сварки, импульсной штамповки, клепально-сборочных работ, для электродинамической сепарации и измельчения порошков, для магнитно-импульсного уплотнения порошков входящих в композитные составы и др. [8-10]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научно-технологические пусковые установки [11, 12]. Высокоскоростные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в защитных электрических аппаратах, в топливной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и т.д. [13-15]. ЛИЭП применяются для очистки вагонов, трюмов, фильтров и иных емкостей от остатков продуктов и налипших материалов, в противообледенительных системах самолетов, ЛЭП и иных ответственных объектов [16, 17]. Перспективными

сферами использования ЛИЭП являются устройства дополнительного ускорения подвижных объектов, защита помещений и ответственных объектов от нежелательного в них проникновения, уничтожение информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе, баллистическая гравиметрия и др. [18-21].

ЛИЭП обеспечивают непосредственное преобразование энергии импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в кинетическую энергию с линейным перемещением ИЭ. При этом можно выделить силовые ЛИЭП, которые предназначены для создания значительных ударных нагрузок, и скоростные ЛИЭП, которые предназначены для создания высоких скоростей ИЭ. ЛИЭП существенно отличаются от традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия и характеризуются [1]:

- импульсным, возвратно-поступательным циклическим или однократным режимом работы;
- прерывистым характером преобразования энергии за счет наличия холостого или обратного хода и длительной паузы в течение рабочего цикла;
- относительно большой продолжительностью накопления энергии от импульсного источника по отношению к длительности рабочего периода;
- импульсным режимом возбуждения индуктора;
- интенсивными электромагнитными нагрузками во время рабочего периода, значительно превышающими аналогичные показатели электродвигателей с продолжительным режимом работы.

Наиболее эффективными типами ЛИЭП, предназначенными для создания ударных нагрузок и высоких скоростей, являются индукционно-динамические (ИДП), электродинамические (ЭДП) и электромаг-

нитные (ЭМП) преобразователи [22]. Во всех указанных типах ЛИЭП осуществляется кратковременное возбуждение неподвижного индуктора от импульсного источника. Возникающее при этом магнитное поле индуктора обуславливает электродинамические или электромагнитные силы, приводящие к линейному перемещению якоря с ИЭ.

Рассматриваемые типы ЛИЭП, как правило, имеют коаксиальную конфигурацию и в основном отличаются строением подвижного якоря. В ИДП якорь представляет собой электропроводящий, как правило, массивный медный диск, в котором индуцируются вихревые токи от магнитного поля индуктора, вследствие чего между якорем и индуктором возникает электродинамическая сила отталкивания. В ЭДП якорь представляет собой подвижную многовитковую обмотку, которая электрически связана с индуктором, вследствие чего между ними в зависимости от направления их намотки возникает электродинамическая сила отталкивания или притяжения. В ЭМП якорь представляет собой ферромагнитный элемент, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора.

В ИДП и ЭДП якорь перемещается от индуктора до соударения с упором, ограничивающим его рабочий ход. В ЭМП величина рабочего хода якоря задается путем исходного удаления его в аксиальном направлении на заданное расстояние от индуктора. Индукторы рассматриваемых типов преобразователей и якорь ЭДП выполнены, как правило, в виде монолитных многовитковых плотно уложенных медных обмоток, пропитанных эпоксидным компаундом.

Учитывая значительный уровень импульсных магнитных полей, возбуждаемых индуктором, в рассматриваемых типах ЛИЭП целесообразно использовать ферромагнитный сердечник (ФС), охватывающий индуктор [23]. Для эффективной работы данный ФС должен обладать минимальной электропроводностью для вихревых токов, что реализуется выполнением его, например из магнитодиэлектрика. Такой ФС способен сконцентрировать магнитное поле в активной зоне между индуктором и якорем и существенно уменьшить поле рассеяния, что важно с точки зрения электромагнитной совместимости и экологической чистоты ЛИЭП.

В качестве импульсного источника целесообразно использовать ЕНЭ с электронной схемой, формирующей аperiодический импульс тока в индукторе (индуктор шунтирован обратным диодом), что позволяет применять электролитические конденсаторы с высокими удельными параметрами.

**Целью статьи** является оценка эффективности ИДП, ЭДП и ЭМП, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей, при возбуждении аperiодическим импульсом тока от ЕНЭ и наличии ФС.

**Математическая модель ЛИЭП.** Для исследования рабочих процессов и показателей рассматриваемых типов ЛИЭП разработаны компьютерные 2D модели в программном пакете *COMSOL Multiphysics* 4.4, в основу которого заложен метод конечных элементов. Электромагнитные процессы ЛИЭП описы-

ваются дифференциальным уравнением в цилиндрической системе координат ( $r, z$ ) при помощи векторного магнитного потенциала  $\bar{A} = (\bar{A}_r, \bar{A}_z)$ :

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

где  $\sigma$  – электропроводность, адаптивно учитывающая температуры индуктора, якоря или ФС;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\bar{V}$  – скорость перемещения якоря;  $\bar{J}_e$  – плотность тока в узле;  $\bar{B}$  – индукция магнитного поля  $\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$ ;  $\bar{H}$  – напряженность магнитного поля.

Ток в индукторе  $i_1$  описывается уравнением:

$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \bar{B}) - \sigma \bar{V} \times \bar{B} = \frac{i_1 N_1}{S_1}, \quad (2)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $N_1$  – число витков индуктора;  $S_1$  – площадь сечения витка индуктора.

Значение аксиальной составляющей силы, действующей на якорь ЛИЭП, определяется посредством тензора натяжения Максвелла  $T$ :

$$f_z = 2\pi r \int_{\partial \Omega} \bar{n} \cdot T dS, \quad (3)$$

где  $\bar{n}$  – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования  $dS$ .

Система уравнений (1-3) содержит начальные условия:

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

и граничные условия на границе расчетной области:

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

Механические процессы ЛИЭП при учете окружающей среды, сил трения и воздействия буферного (возвратного) элемента можно описать уравнением [24]:

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

где  $m_2$ ,  $m_e$  – масса якоря и ИЭ соответственно;  $K_p$  – коэффициент упругости буферного элемента;  $\Delta Z(t)$  – перемещение якоря с ИЭ;  $K_T$  – коэффициент динамического трения;  $\gamma_a$  – плотность среды перемещения;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления среды, в которой происходит перемещение якоря с ИЭ;  $D_{ex2}$  – максимальный диаметр якоря;  $f_z(t, z)$  – электродинамические или электромагнитные силы, действующие на якорь со стороны индуктора.

Для определения температур активных элементов (индуктора и электропроводящего якоря) и пассивных элементов (ФС и ферромагнитного якоря) ЛИЭП используются уравнения [25]:

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

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

где  $n = 1, 2$  – индексы, относящиеся к индуктору и электропроводящему якорю соответственно;  $m = 3, 4$  – индексы, относящиеся к ФС и ферромагнитному якорю соответственно;  $c(T)$  – усредненная удельная теплоемкость;  $\gamma$  – усредненная плотность материала;  $j(t)$  – плотность тока активного элемента;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $K_v$  – коэффициент заполнения активного элемента;  $\rho(T)$  – удельное сопротивление активного элемента.

Система уравнений (7, 8) дополняется граничными условиями на поверхности  $\xi$ . На охлаждаемой поверхности используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

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

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $n$  – нормаль к поверхности;  $T_0$  – температура окружающей среды.

На границе контакта активных и пассивных элементов используются граничные условия четвертого рода:

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

На оси симметрии ЛИЭП используются граничное условие второго рода:

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

Коэффициент теплопроводности индуктора или якоря ЭДП вдоль соответствующих осей определяется по формуле

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

где  $\lambda_p, \lambda_i, \lambda_k$  – коэффициенты теплопроводности проводника, изоляции и эпоксидного компаунда, соответственно;  $h_p, h_i, h_k$  – толщина проводника, изоляции и компаунда в выбранном направлении соответственно.

Решения системы уравнений (1-12) производится методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO. На рис. 1 показана компьютерная геометрическая модель ИДП.

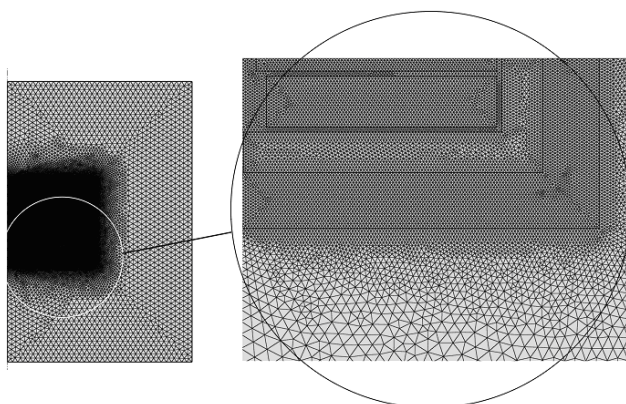


Рис. 1. Компьютерная геометрическая модель ИДП

**Постановка задачи параметрического синтеза ИДП, ЭДП и ЭМП.** Рассмотрим задачу параметрического синтеза высокоэффективных силовых и скорост-

ных ИДП, ЭДП и ЭМП путем выбора их параметров. Указанные типы ЛИЭП обеспечивают максимальную ударную нагрузку (индекс F) и максимальную скорость (индекс V). Исходя из этого введем соответствующие обозначения, например, ИДП-F – силовой индукционно-динамический преобразователь, обеспечивающий максимальный импульс силы, или ЭДП-V – скоростной электродинамический преобразователь, обеспечивающий максимальную скорость.

Основными параметрами ЛИЭП являются следующие:

#### Геометрические параметры индуктора

Внешний диаметр  $D_{ex1}$ , внутренний диаметр  $D_{in1}$  и высота  $H_1$ . Площадь сечения медной шины  $S_1 = a_1 \cdot b_1$ , количество витков  $N_1$  и коэффициент заполнения  $K_v = 0,88$ . Толщина изоляционной прокладки  $\xi$ .

#### Геометрические параметры якоря

Внешний диаметр  $D_{ex2}$ , внутренний диаметр  $D_{in2}$  и высота  $H_2$ . Площадь сечения меди для ИДП или медной шины для ЭДП  $S_2 = a_2 \cdot b_2$ . Количество витков  $N_2$  и коэффициент заполнения  $K_v = 0,88$  для ЭДП.

#### Геометрические параметры ФС (рис. 2)

Высота дискового основания  $H_{3a}$ , обечайки  $H_{3b}$  и внутреннего цилиндра  $H_{3c}$ . Внешний  $D_{ex3a}$  и внутренний  $D_{in3a}$  диаметры основания. Внешний  $D_{ex3b}$  и внутренний  $D_{in3b}$  диаметры наружной обечайки. Внешний  $D_{ex3c}$  и внутренний  $D_{in3c}$  диаметры внутреннего цилиндра. ФС выполнен из магнитоэлектрика с магнитными свойствами стали Ст.10.

#### Массогабаритные параметры

Исходное расстояние между индуктором и якорем  $\delta$ . Рабочий ход якоря с ИЭ  $\Delta Z$  (для ЭМП  $\delta = \Delta Z$ ). Масса преобразователя  $m$ , якоря  $m_2$ , ИЭ  $m_e$  и меди активных элементов  $m_{cu}$ . Габаритные диаметр  $D_{ex}$  и высота  $H_{ex}$ .

#### Параметры ЕНЭ

Емкость  $C$  и зарядное напряжение  $U_0$ .

Для параметрического синтеза высокоэффективных ЛИЭП используем постоянные, зависимые и варьируемые параметры при учете заданных ограничений и постоянстве габаритного объема преобразователя  $0,25\pi D_{ex}^2 H_{ex} = 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$  [26].

#### Постоянные параметры

$\Delta Z = 10$  мм;  $\delta = 1,0$  мм (ИДП и ЭДП),  $\delta = 10$  мм (ЭМП);  $m_e = 0,5$  кг;  $C = 2850$  мкФ;  $U_0 = 400$  В;  $K_v = 0,88$ ;  $\xi = 1$  мм.

#### Зависимые параметры

$$N_1 = \left\lfloor 0,5(D_{ex1} - D_{in1})H_1 K_v a_1^{-1} b_1^{-1} \right\rfloor;$$

$$N_2 = \left\lfloor 0,5(D_{ex2} - D_{in2})H_2 K_v a_2^{-1} b_2^{-1} \right\rfloor;$$

$D_{in3b} = D_{ex1} + 2\xi$ ;  $D_{ex3a} = D_{in3b}$ ;  $D_{ex3c} = D_{in1} - 2\xi$ ;  $D_{ex3c} = D_{in3a}$ ;  
 $D_{in2} = D_{ex3c} + 2\xi$ .

#### Ограничения параметров

$D_{ex1} \leq 100$  мм;  $D_{ex3b} < D_{ex}$ ;  $D_{in1} < D_{ex1}$ ;  $D_{in2} < D_{ex2}$ ;  $D_{ex2} < D_{ex}$ ;  
 $H_1 < H_{ex}$ ;  $H_2 < H_{ex} - (H_1 + \delta + \xi)$ ;  $H_{3a} < H_{ex} - (H_2 + H_1 + \delta + \xi)$ ;  
 $H_{3b} < H_{ex}$ ;  $D_{ex3b} > D_{in3b}$ ;  $H_{3c} < H_{ex} - (H_2 + H_1 + \delta + \xi)$ ;  $D_{in3c} < D_{ex3c}$ .

#### Основные показатели

Максимальное значение электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь  $f_{zm}$ ; величина импульса силы  $F_z = \int f_z dt$ ; максимальное  $V_m$  и усредненное на интервале движения  $V_c$

значение скорости якоря с ИЭ; КПД ЛИЭП  $\eta = (m_2 + m_e) V_m^2 C^{-1} U_0^{-2}$ ; максимальная плотность тока в индукторе  $j_{1m}$ ; усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B^*$ , определяемое на поверхности 4, расположенной на расстоянии  $2H_1$  от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии  $4H_1$  от верхней стороны индуктора ИДП (рис. 2).

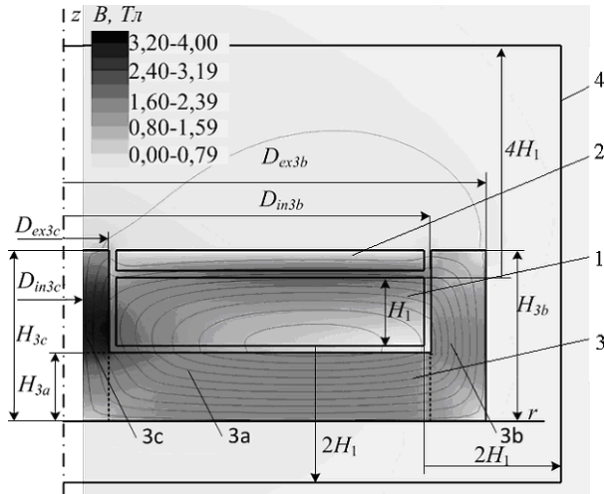


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля в ИДП в момент максимума электродинамической силы: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ФС, состоящий из дискового основания 3а, наружной обечайки 3б и внутреннего цилиндра 3с; 4 – поверхность определения усредненного значения магнитного поля рассеяния  $B^*$

Для выбора параметров высокоэффективных ЛИЭП использован метод Монте-Карло. Параметрический синтез ЛИЭП проводим при условии обеспечения максимального силового воздействия (импульс силы  $F_z$  максимален) и скорости (скорость  $V$  максимальна). Параметры синтезированных ЛИЭП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры синтезированных ЛИЭП

Элемент	Параметр	Преобразователи		
		ИДП-Ф/ ИДП-В	ЭДП-Ф/ ЭДП-В	ЭМП-Ф/ ЭМП-В
Индуктор	$D_{ex1}$ , мм	100	100	54
	$D_{in1}$ , мм	10	10	29
	$H_1$ , мм	10	5	23
	$N_1$ , шт.	46	33	322
	$S_1$ , мм <sup>2</sup>	8,64	3,0	1,0
Якорь	$D_{ex2}$ , мм	100	100	76
	$D_{in2}$ , мм	10	10	4
	$H_2$ , мм	6/3	5/3	10/6
	$N_2$ , шт.	-	33	-
	$S_2$ , мм <sup>2</sup>	270/135	3,0/1,6	-
ФС	$H_{3a}$ , мм	8	8	23
	$H_{3b}$ , мм	24	24	46
	$D_{ex3b}$ , мм	118	118	76
	$D_{in3a}$ , мм	0	8	28
	$H_{3c}$ , мм	-	-	46
	$D_{in3c}$ , мм	-	-	0
	$D_{ex3c}$ , мм	-	-	28

### Электрохимические характеристики ЛИЭП.

На рис. 3-5 представлены электрохимические характеристики синтезированных ИДП, ЭДП и ЭМП, которые при заданных условиях и ограничениях развивают максимальные импульс силы  $F_z$  и скорость  $V_m$ . Можно отметить следующие особенности полученных преобразователей.

В ИДП в течение рабочего процесса ток в индукторе сохраняет полярность. Но поскольку индуцированный ток в якоре плотностью  $j_2$  через определенное время меняет полярность, то электродинамическая сила отталкивания  $f_z$  меняет направление и становится силой притяжения. Однако этот эффект проявляется после прохождения якорем с ИЭ расстояния, равного величине рабочего хода и существенно не влияет на характер скорости  $V$ . Заметим, что после прохождения якорем расстояния, равного величине рабочего хода, импульс силы  $F_z$  ИДП почти не изменяется, поскольку ток в индукторе практически затухает. Скорость  $V$  к концу рабочего хода якоря прекращает свой рост и даже несколько уменьшается в скоростном ИДП-В.

В ЭДП как в индукторе, так и в якоре протекает один и тот же ток, что обуславливает неизменность полярности электродинамической силы отталкивания  $f_z$ . Причем после прохождения якорем с ИЭ расстояния, равного величине рабочего хода, в данном преобразователе сохраняется довольно значительный ток. Вследствие этого импульс силы  $F_z$  продолжает возрастать, особенно заметно в силовом ЭДП-Ф. Скорость  $V$  к концу рабочего хода якоря существенно замедляет свой рост, принимая максимальное значение в конце рабочего процесса.

Характер электрохимических процессов в ЭМП существенно отличается от характера указанных процессов в ИДП и ЭДП. В этом преобразователе при перемещении ферромагнитного якоря с ИЭ электромагнитная сила притяжения  $f_z$ , а соответственно и их скорость  $V$  возрастают ускоренно, достигая максимального значения в конце рабочего процесса. После остановки якоря ток в индукторе сохраняет довольно значительную величину. При неподвижном якоре ток в индукторе и электромагнитная сила притяжения  $f_z$  плавно затухают, в то время как импульс силы  $F_z$  продолжает возрастать до окончательного затухания силы.

Наиболее быстро электрохимические процессы протекают в ИДП, а наиболее медленно – в ЭМП. Наибольшая величина сил  $f_z$ , действующих на якорь со стороны индуктора, наблюдается в ИДП, а наименьшая – в ЭМП. Электродинамические силы отталкивания  $f_z$  в ИДП и ЭДП примерно одной величины, в то время как электромагнитные силы притяжения  $f_z$  в ЭМП в 3-4 раза меньше. Однако из-за различной длительности электрохимических процессов величина импульса силы  $F_z$  в ЭМП в 4-5 раз больше, чем в других преобразователях, причем наименьшая величина импульса силы  $F_z$  наблюдается в ИДП.

Максимальная скорость якоря с ИЭ  $V_m$  развивается в ЭДП, а наименьшая – в ЭМП. При этом в ИДП и ЭДП скорость в начале рабочего процесса резко возрастает, а в ЭМП скорость возрастает к концу рабочего процесса при соударении с индуктором. Вследствие этого средняя скорость  $V_{cp}$  в ЭМП в 3-4 раза меньше.

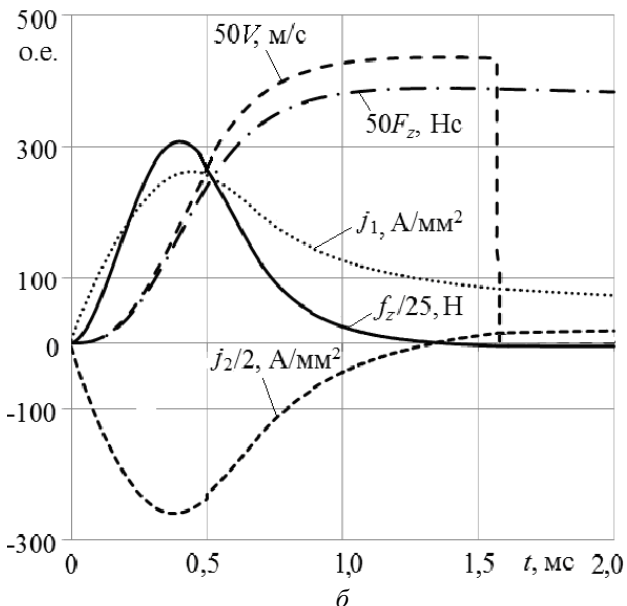
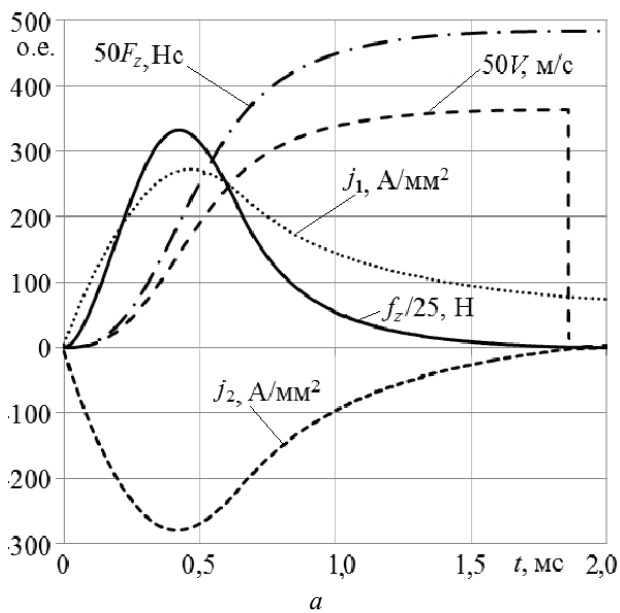


Рис. 3. Электромеханические характеристики ИДП-F (а) и ИДП-V (б)

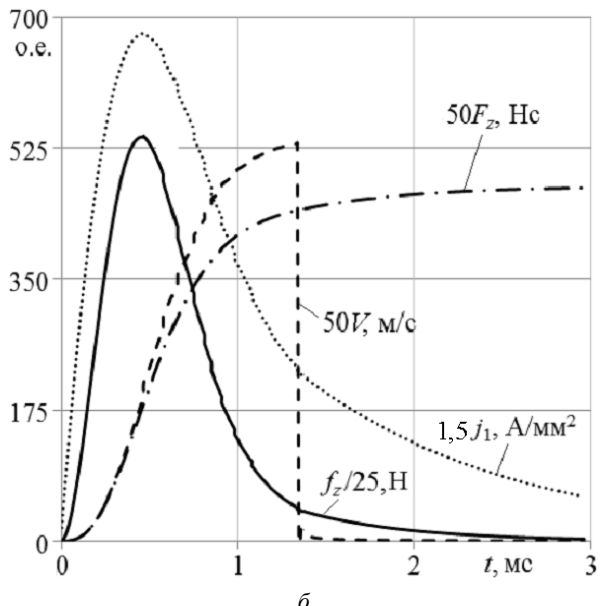
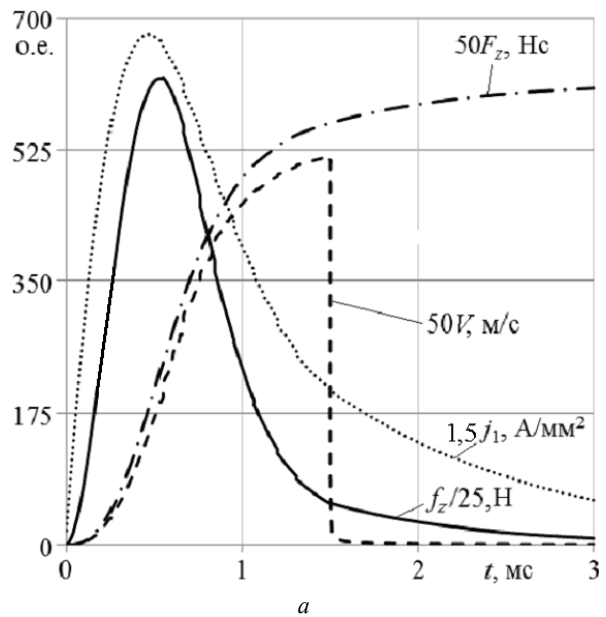


Рис. 4. Электромеханические характеристики ЭДП-F (а) и ЭДП-V (б)

**Магнитные поля ЛИЭП.** При работе ЛИЭП возбуждает сильные магнитные поля, индукция которых превышает индукцию насыщения ферромагнитного сердечника и якоря. В ИДП наибольшее магнитное поле концентрируется в зазоре между индуктором и электропроводящим якорем (рис. 6). При этом на наружной поверхности ФС магнитное поле практически полностью экранировано. Наибольшая величина поля рассеяния наблюдается в области электропроводящего якоря. В силовом ИДП-F поле рассеяния практически на 30 % меньше, чем в скоростном преобразователе ИДП-V.

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 (рис. 7). Уровень полей рассеяния в ЭДП в 2,5-3 раза ниже, чем в ИДП. Причем наименьшее поле рассеяния наблюдается в скоростном преобразователе ЭДП-V.

В ЭМП максимальное значение индукции магнитного поля возникает во внутреннем цилиндре ФС, который охватывается индуктором (рис. 8). При этом наблюдается значительное поле рассеяния за поверхностью ферромагнитного якоря. Индукция магнитного поля рассеяния в ЭМП примерно такая же, как и в ИДП. При этом наибольшее рассеяние магнитного поля наблюдается в радиальном направлении в области воздушного зазора.

В табл. 2 представлены электромеханические и магнитные показатели ЛИЭП: максимальное значение электродинамической или электромагнитной силы  $f_{zm}$ , действующей на якорь, величина импульса силы  $F_z$  в конце рабочего процесса, максимальное  $V_m$  и среднее  $V_{cp}$  значение скорости якоря с ИЭ на участке движения, усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B^*$  в момент максимума тока в индукторе, максимальное значение плотности тока в индукторе  $j_{1m}$ , масса меди индуктора и якоря  $m_{cu}$  и КПД преобразователя  $\eta$ .

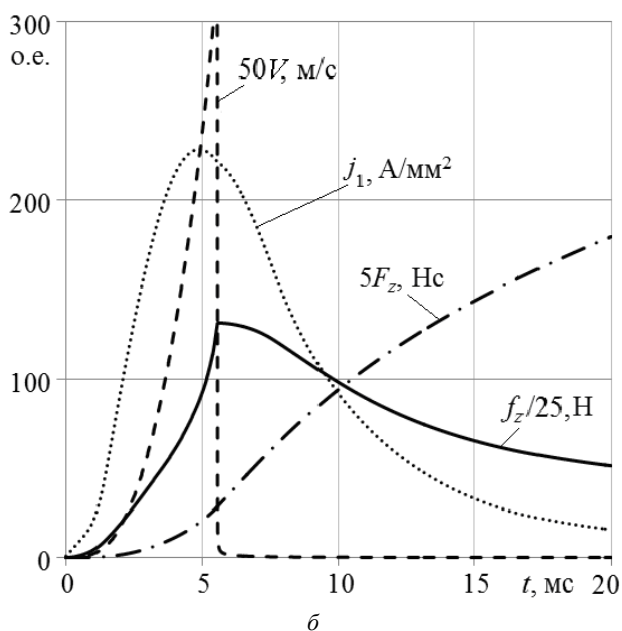
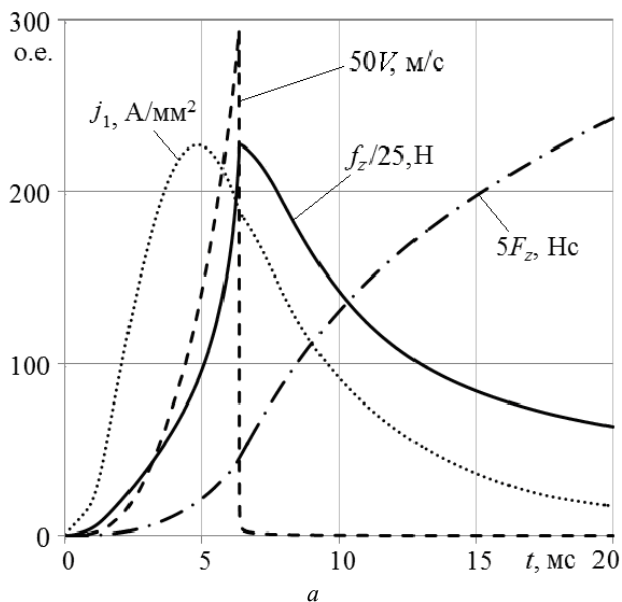


Рис. 5. Электромеханические характеристики ЭМП-F (а) и ЭМП-V (б)

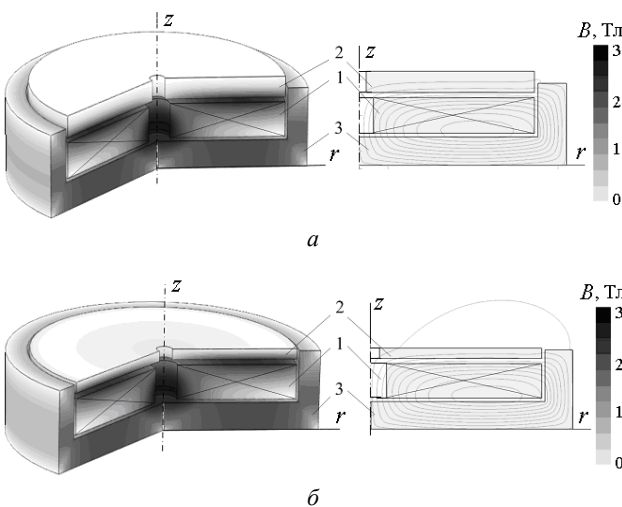


Рис. 6. Распределение магнитных полей в ИДП-F (а) и ИДП-V (б) в момент максимума тока в индукторе

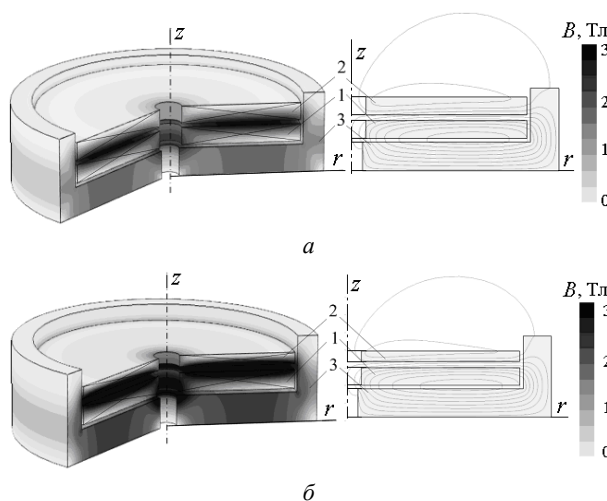


Рис. 7. Распределение магнитных полей в ЭДП-F (а) и ЭДП-V (б) в момент максимума тока в индукторе

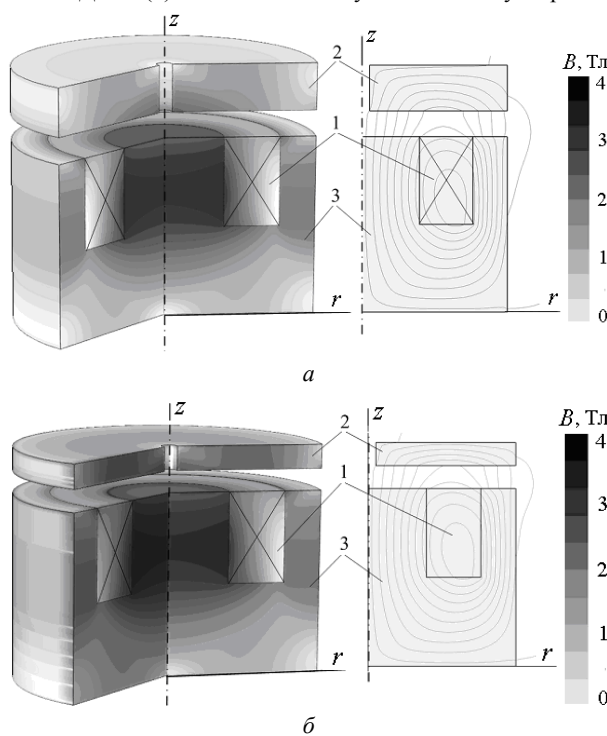


Рис. 8. Распределение магнитных полей в ЭМП-F (а) и ЭМП-V (б) в момент максимума тока в индукторе

Таблица 2

Электромеханические и полевые показатели ЛИЭП

Показатель	ИДД-F	ИДД-V	ЭДД-F	ЭДД-V	ЭМД-F	ЭМД-V
$f_{zm}$ , кН	16,62	15,38	15,49	13,53	5,69	3,29
$F_{z^*}$ , Нс	9,67	7,68	12,12	9,43	48,51	35,91
$V_{m2}$ , м/с	7,28	8,72	10,32	10,64	6,89	6,42
$V_{cp2}$ , м/с	5,38	6,37	6,67	7,41	1,58	1,81
$B^*$ , мТл	41,93	59,03	16,21	13,01	43,61	54,99
$J_{1m2}$ , А/мм <sup>2</sup>	272,5	261,7	442,5	406,5	227,3	228,7
$m_{ст2}$ , кг	1,09	0,89	0,68	0,55	0,39	0,39
$\eta$ , %	10,6	6,3	8,2	8,5	7,0	5,9

Анализируя представленные разнородные показатели сложно отдать предпочтение тому или иному типу ЛИЭП, поскольку их эффективность определяется рядом разнородных силовых, скоростных, магнитных, массогабаритных и токовых показателей. Исходя из этого, будем оценивать эффективность преобразователя комплексно с учетом выбранной

стратегии, отдающей предпочтение одним показателям и/или игнорировании иных.

### Сравнительный анализ ИДП, ЭДП и ЭМП.

Эффективность ЛИЭП оценим с помощью интегрального показателя

$$K^* = K_s \left\{ \beta_1 \frac{f_{zm}}{f_{zm0}} + \beta_2 \frac{F_z}{F_{z0}} + \beta_3 \frac{V_m}{V_{m0}} + \beta_4 \frac{V_c}{V_{c0}} + \beta_5 \frac{\eta}{\eta_0} + \beta_6 \frac{B_0^*}{B^*} + \beta_7 \frac{j_{1m0}}{j_{1m}} + \beta_8 \frac{m_{Cu0}}{m_{Cu}} + \beta_9 \frac{D_{ex0}}{D_{ex}} + \beta_{10} \frac{H_{ex0}}{H_{ex}} \right\}, \quad (13)$$

где  $K_s$  – коэффициент надежности ЛИЭП;  $\beta_1$  – весовой коэффициент, учитывающий максимальную электродинамическую силу, действующую на якорь  $f_{zm}$ ;  $\beta_2$  – весовой коэффициент, учитывающий величину импульса силы, действующего на якорь  $F_z$ ;  $\beta_3$  – весовой коэффициент, учитывающий максимальную скорость якоря с ИЭ  $V_m$ ;  $\beta_4$  – весовой коэффициент, учитывающий среднюю скорость якоря на участке перемещения  $V_c$ ;  $\beta_5$  – весовой коэффициент, учитывающий КПД ЛИЭП  $\eta$ ;  $\beta_6$  – весовой коэффициент, учитывающий поле рассеяния  $B^*$ ;  $\beta_7$  – весовой коэффициент, учитывающий максимальное значение плотности тока в индукторе  $j_{1m}$ ;  $\beta_8$  – весовой коэффициент, учитывающий массу меди в ЛИЭП  $m_{Cu}$ ;  $\beta_9$  – весовой коэффициент, учитывающий габаритный диаметр ЛИЭП  $D_{ex}$ ;  $\beta_{10}$  – весовой коэффициент, учитывающий габаритную высоту ЛИЭП  $H_{ex}$ .

Указанные показатели нормированы к соответствующим показателям ИДП, значения которого обозначены с дополнительным индексом «0». Все весовые коэффициенты связаны соотношением

$$\sum_{i=1}^{10} \beta_i = 1. \quad (14)$$

Показатели, учитываемые весовыми коэффициентами  $\beta_1 - \beta_5$ , должны быть максимальными, а показатели, учитываемые весовыми коэффициентами  $\beta_6 - \beta_{10}$  – минимальными. В таком случае, наиболее эффективным типом ЛИЭП будет тот, у которого интегральный показатель  $K^*$  будет максимальным.

На основании экспертных оценок для ИДП выбираем коэффициент надежности  $K_s = 1$ , для ЭДП –  $K_s = 0,8$ , для ЭМД –  $K_s = 0,9$ . Пониженная надежность ЭМП объясняется соударением якоря с индуктором, что негативно влияет на механическое состояние активных элементов и акустическим шумом повышенной интенсивности. Еще более низкая надежность ЭДП объясняется наличием подвижного токосъемного контакта между индуктором и якорем и конструкцией якоря (многовитковый, замоналиченый эпоксидной смолой).

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

Вариант 1 учитывает равнозначность всех показателей ЛИЭП. Вариант 2 учитывает повышенный (четырёхкратный) приоритет максимальной электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь  $f_{zm}$  при игнорировании скорости

якоря и массы меди. Вариант 3 учитывает повышенный приоритет величины импульса силы, действующего на якорь  $F_z$ , при игнорировании массогабаритных показателей. Вариант 4 учитывает повышенный приоритет максимальной скорости якоря с ИЭ  $V_m$  при игнорировании силовых показателей и радиальных габаритов. Вариант 5 учитывает повышенный приоритет средней скорости якоря на участке перемещения  $V_c$  при игнорировании силовых показателей и максимальной плотности тока в индукторе. Вариант 6 учитывает повышенный приоритет КПД ЛИЭП  $\eta$  при игнорировании массогабаритных показателей. Вариант 7 учитывает повышенный приоритет поля рассеяния  $B^*$  при игнорировании массогабаритных показателей. Вариант 8 учитывает повышенный приоритет максимальной плотности тока в индукторе  $j_{1m}$  при игнорировании максимальных значений силы и скорости якоря с ИЭ и высоты ЛИЭП.

Таблица 3

Значения весовых коэффициентов

	Вариант стратегии выбора							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\beta_1$	0,1	<b>0,4</b>	0,1	0	0	0,1	0,1	0
$\beta_2$	0,1	0,1	<b>0,4</b>	0	0	0,1	0,1	0,1
$\beta_3$	0,1	0	0,1	<b>0,4</b>	0,1	0,1	0,1	0
$\beta_4$	0,1	0	0,0	0,1	<b>0,4</b>	0,1	0,1	0,1
$\beta_5$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,4</b>	0,1	0,1
$\beta_6$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,4</b>	0
$\beta_7$	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	<b>0,4</b>
$\beta_8$	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,1
$\beta_9$	0,1	0,1	0	0	0,1	0	0	0,1
$\beta_{10}$	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0	0	0,1

При анализе силовых ЛИЭП, которые предназначены для обеспечения максимального силового воздействия (рис. 9,а) и скоростных ЛИЭП, которые предназначены для обеспечения наибольшей скорости (рис. 9,б) можно сделать следующие выводы.

При равнозначности всех показателей как силовых так и скоростных ЛИЭП наиболее эффективным является ЭМП (вариант 1).

Для обеспечения максимальной электродинамической (электромагнитной) силы, действующей на якорь  $f_{zm}$ , при игнорировании скорости якоря и массы меди эффективность ЭМП и ИДП примерно одинакова, а эффективность ЭДП примерно на 13 % ниже (вариант 2).

Для обеспечения наибольшей величины импульса силы  $F_z$  при игнорировании массогабаритных показателей эффективность ЭМП примерно в 2,2 раза выше, чем у остальных преобразователей (вариант 3).

При приоритете максимальной  $V_m$  и средней  $V_c$  скорости якоря с ИЭ и игнорировании силовых показателей наиболее эффективным является ЭДП-V, а наименее эффективным – ЭМП-V (варианты 4 и 5). При приоритете КПД  $\eta$  и игнорировании массогабаритных показателей ЛИЭП эффективность ЭМП и ИДП примерно одинакова. При этом эффективность силового ЭДП-F на 11 % ниже, а эффективность скоростного ЭДП-V – на 14 % выше (вариант 6).

При приоритете поля рассеяния  $B^*$  и игнорировании массогабаритных показателей наиболее эффективным является ЭДП (вариант 7).

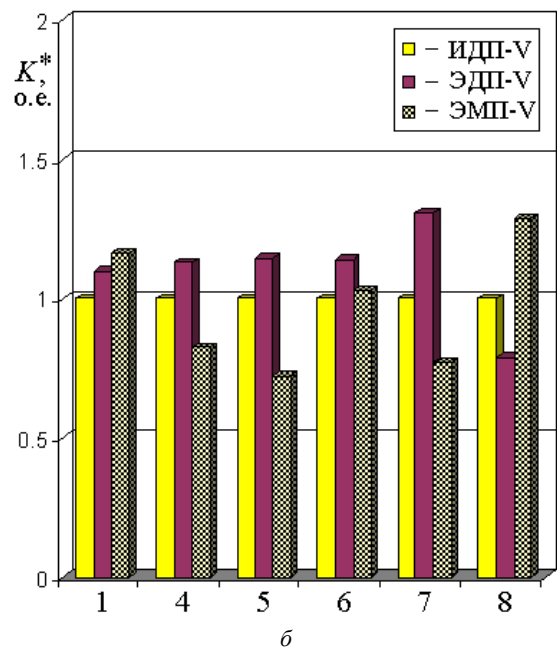
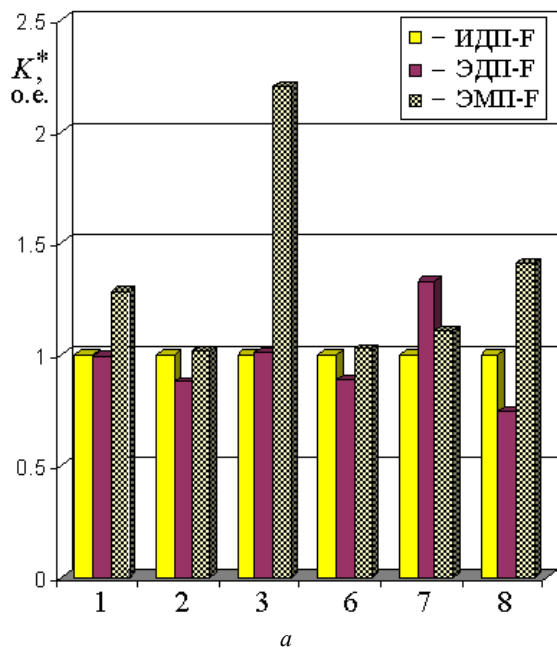


Рис. 9. Значения интегрального показателя эффективности при различных вариантах стратегии выбора типа силовых (а) и скоростных (б) ЛИЭП

При приоритете максимальной плотности тока в индукторе  $j_{1m}$  и игнорировании максимальных значений силы и скорости якоря с ИЭ и высоты наиболее эффективным является ЭМП, а наименее эффективным – ЭДП (вариант 8).

Можно отметить, что ни по одной из стратегий выбора ИДП не является лучшим. Для обеспечения наибольшего силового воздействия наиболее эффективным является силовой ЭМП-F, а для обеспечения наибольшей скорости – скоростной ЭДП-V.

#### Заключение.

Разработаны компьютерные 2D модели ЛИЭП коаксиальной конфигурации с ферромагнитным сердечником в программном пакете *COMSOL Multiphysics* 4.4, учитывающие взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и магнитные поля.

Проведен синтез параметров высокоэффективных ИДП, ЭДП и ЭМП, обеспечивающих максимальные ударные нагрузки и скорости для ИЭ.

Проведен сравнительный анализ эффективности ИДП, ЭДП и ЭМП с помощью интегрального показателя, учитывающего максимальную величину и импульс электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь, максимальную и среднюю скорость якоря, КПД и массогабаритные показатели преобразователя, поле рассеяния, максимальное значение плотности тока в индукторе.

На основании восьми стратегий выбора установлены наиболее эффективные типы силовых и скоростных ЛИЭП. Показано, что ни по одной из стратегий выбора ИДП не является лучшим. Для обеспечения наибольшего силового воздействия наиболее эффективным является ЭМП, а для обеспечения наибольшей скорости – ЭДП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болюх В.Ф., Шукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – №2. – С. 37-43.
3. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предельным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. – 2003. – №2. – С. 30-36.
4. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотрakov Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. – 2001. – №2. – С. 28-32.
5. Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка. – 2001. – №2. – С. 3-6.
6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – vol.41. – №1. – pp. 158-164.
7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – vol.39. – №1. – pp. 310-313.
8. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом // Сварочное производство. – 2009. – №2. – С. 33-35.
9. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – №2. – pp. 104-110.
10. Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // Электротехника. – 2013. – №8. – С. 48-52.
11. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Transactions on Magnetics. – 1991. – vol.27. – №1. – pp. 607-610.
12. Косцов Э.Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов // Автoметрия. – 2012. – Т.48. – №4. – С. 93-103.
13. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system «Krioblast» increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices // Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering



Congress and Exposition. - Volume 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering. - November 15-21, 2013. - San Diego, CA, USA. - Code 105847. - 10 pgs.

14. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // *IEEE Transactions on Magnetics*. - 2012. - vol.48. - №11. - pp. 3315-3318.

15. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // *Авиакосмическое приборостроение*. - 2005. - №12. - С. 52-57.

16. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // *Электротехника*. - 2002. - №11. - С. 24-28.

17. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // *Молочная промышленность*. - 1989. - №1. - С. 25-26.

18. Татмышевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // *Современные технологии безопасности*. - 2005. - №4. - С. 8-11.

19. 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(7). - С. 22-28.

20. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя // *Электротехника і електромеханіка*. - 2008. - №2. - С. 5-10.

21. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // *Measurement Techniques*. - 2014. - vol.56. - iss.10. - pp. 1098-1104.

22. Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ ударных электромеханических преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типа // *Вісник НТУ «ХП»*. - 2014. - №38(1081). - С. 30-44.

23. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // *Refrigeration Science and Technology*. - 13<sup>th</sup> International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics. - Prague, Czech Republic. - April 7-11, 2014. - Code 106226. - 2014. - pp. 268-275.

24. Bolyukh V. F. Inductive dynamic motor // *Russian electrical engineering*. - 2000. - vol.71. - part 10. - pp. 39-48.

25. 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. - pp. 571-576.

26. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // *Russian Electrical Engineering*. - 2004. - vol.75. - №12. - pp. 1-11.

#### REFERENCES

1. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).

2. Ugarov G.G., Neiman V.Y. Trends in the development and use of hand-held drum machines with electromechanical energy conversion. *Izvestia vuzov. Elektromekhanika – Proceedings of the universities. Electromechanics*, 2002, no.2, pp. 37-43. (Rus).

3. Neiman V.Y. Analysis of the processes of energy conversion of linear electromagnetic machines with preliminary accumulation of magnetic energy in dynamic modes. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2003, no.2, pp. 30-36. (Rus).

4. Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrakov D.V. Development of effective technological devices for magnetic elastopulsed cutting-punching thin materials. *Metalloobrabotka – Metal Processing*, 2001, no.2, pp. 28-32. (Rus).

5. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.J. Wave phenomena in electromagnetic emitters and the formation of complex acoustic signals. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2001, no.2, pp. 3-6. (Rus).

6. Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol.41, no.1, pp. 158-164. doi: 10.1109/tmag.2004.838744.

7. Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, vol.39, no.1, pp. 310-313. doi: 10.1109/tmag.2002.805921.

8. Strizhakov E.L., Neskromnyi S.V., Merkulov R.V. Impact capacitor welding with pulsed magnetic drive. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Engineering*, 2009, no.2, pp. 33-35. (Rus).

9. 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. doi: 10.3103/s1068371211020027.

10. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter low frequency mechanical vibrations for monitoring, measuring and dispensing multifractional liquid products mass. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2013, no.8, pp. 48-52. (Rus).

11. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, vol.27, no.1, pp. 607-610. doi: 10.1109/20.101103.

12. Kosov E.G. A microelectromechanical accelerator solid objects. *Avtometriia – Avtometriya*, 2012, no.4, vol.48, pp. 93-103. (Rus).

13. Bolyukh V.F., Katkov I.I. Cryogenic cooling system «Krioblast» increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices // *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 8B: Heat Transfer and Thermal Engineering*, November 15-21, 2013. San Diego, CA, USA. Code 105847, 10 pgs. doi: 10.1115/imece2013-62383.

14. 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. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.

15. Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A. Magnetic pulse installation for testing products for aerospace shock effects. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace Instrument*, 2005, no.12, pp. 52-57. (Rus).

16. Tyutkin V.A. Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 2002, no.11, pp. 24-28. (Rus).

17. Kuznetsov P.V., Tolmachev N.S., Kharitonov V.D. Induction-dynamic system cleaning drying equipment. *Molochnaia promyshlennost' – Dairy Industry*, 1989, no.1, pp. 25-26. (Rus).

18. Tatmyshevsky K.V., Marychev S.N., Kozlov S.A. Magnetic pulse propelling means defeat for active protection systems objects of particular importance. *Sovremennye tekhnologii bezopasnosti – Modern security technology*, 2005, no.4, pp. 8-11. (Rus).

19. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring. *Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta obrony – Modern information technologies in the field of security and defense*, 2010, no.1(7), pp. 22-28.

20. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V. F., Shchukin I.S. Device for computer information security from unauthorized access on the basis of an induction-dynamic motor. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2008, no.2, pp. 5-10. (Rus).

21. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, iss.10, pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.
22. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of electromechanical transducers shock induction-dynamic, electromagnetic and electrodynamic type // *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 30-44. (Rus).
23. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Refrigeration Science and Technology. 13<sup>th</sup> International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics*. Prague, Czech Republic, April 7-11, 2014. Code 106226. pp. 268-275.
24. Bolyukh V.F. Inductive dynamic motor. *Russian electrical engineering*, 2000, vol.71, part 10, pp. 39-48.
25. 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, no.10, pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
26. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2004, vol.75, no.12, pp. 1-11.

Поступила (received) 26.02.2015

Болух Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Олексенко Сергей Владимирович<sup>1</sup>, аспирант,  
Щукин Игорь Сергеевич<sup>1,2</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076427,  
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, oleksenko\_sergii@mail.ru

<sup>2</sup> ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh<sup>1</sup>, S.V. Oleksenko<sup>1</sup>, I.S. Schukin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Firm Tetra, LTD,  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### **Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds.**

*Considered linear impulse electromechanical converters (LIEC) are used to create a significant impact and high-acceleration actuators on a short active site. The most effective types of LIEC are induction-dynamic (IDC), electro-dynamic (EDC) and electro-magnetic (EMC) converters. In all these types of short-term excitement LIEC carried briefly of the inductor from a pulsed source. This occurs when the magnetic field of the inductor causes the electro-dynamic or electromagnetic forces, leading to a linear movement of the armature. However, the issue at evaluating the effects of IDC, EDC and EMC, for creating a shock simultaneously with high speed to the specified criteria in the presence of ferromagnetic core virtually unexplored. The paper presents the simulated computer-WIDE 2D model of LIEC of coaxial configuration with ferromagnetic core by using software package COMSOL Multiphysics 4.4, taking into account the related electro-magnetic, thermal, and magnetic fields. In addition a synthesis of high-performance IDC, EDC and EMC to ensure maximum impact and speed of the operating element, whereby the comparative analysis of the effectiveness of the IDC, EDC and EMC via an integral index, taking into account the maximum value and momentum of electro-dynamic or electromagnetic force acting on the armature, maximum and average speed armature, efficiency, mass and dimensions performance transducer stray field, the maximum current density in the inductor is carried out. On the basis of the eight selection policies set the most efficient types of power and speed LIEC. It is shown that any one of the strategies IDC selection is not the best. To ensure maximum impact force is the most effective EMC and to ensure the greatest speed – EDC. References 26, tables 3, figures 9.*

**Key words:** linear impulse of electromechanical converter, induction-dynamic, electrodynamic, electromagnetic converters, the synthesis parameters, the integral efficiency index.