

**В. Ф. БОЛЮХ**, д-р техн. наук., проф. НТУ «ХПИ»;  
**С. В. ОЛЕКСЕНКО**, асп. НТУ «ХПИ»;  
**И. С. ЩУКИН**, канд. техн. наук., доц. НТУ «ХПИ»

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДАРНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО, ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА**

Проведено компьютерное моделирование рабочих процессов ударных преобразователей. Показано, что наиболее эффективным является электродинамический преобразователь, а наименее эффективным – электромагнитный преобразователь. Для индукционно-динамического преобразователя проведены экспериментальные исследования и получено удовлетворительное согласие между измеренными и рассчитанными электромагнитными и механическими показателями.

**Ключевые слова:** ударный электромеханический преобразователь, индукционно-динамический преобразователь, электромагнитный преобразователь, электродинамический преобразователь.

### **Введение**

Индукционно-динамические (ИДП), электродинамические (ЭДП) и электромагнитные (ЭМП) преобразователи широко используются в промышленных, и научно-технических системах, где необходимы высокоскоростные линейные перемещения якоря с исполнительным элементом (ИЭ) [1-3]. Эти электромеханические преобразователи работают в ударном режиме с импульсной кратковременной нагрузкой, многократно превышающей электромагнитную нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия.

Указанные ударные преобразователи при относительно небольших массогабаритных параметрах и непосредственном преобразовании электрической энергии импульсного источника энергии в линейное перемещение якоря обеспечивают значительные силовые импульсы и ускорения ИЭ на коротком рабочем участке [4, 5].

Во всей этих электромеханических преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ).

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, 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.

### **Анализ литературы**

Во многих устройствах науки и техники применяются ударные электромеханические преобразователи с линейным перемещением ИЭ. В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы для разрушения монолитно-бетонных оснований, устройства для погружения свай и анкеров [2, 6]. 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. [7]. Для авиационной, ракетно-космической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители массивных объектов [8-10]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научно-технологические электромеханические пусковые установки [11, 12]. Ударные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и др. [13, 14]. Для прессования порошков, очистки вагонов, трюмов и иных емкостей от остатков продуктов и налипания материалов и др. применяются различные технологические ударные устройства [15].

Учитывая значительный уровень импульсных магнитных полей, для ударных электромеханических преобразователей целесообразно использовать наружный ферромагнитный экран (ФЭ), охватывающий индуктор. Будем считать электропроводность указанного экрана несущественной, что на практике реализуется выполнением его, например, из магнитодиэлектрика.

При этом возникает вопрос о выборе типа ударного преобразователя и основных геометрических параметров его якоря и ФЭ.

**Целью работы** является сравнение электромеханических показателей и магнитных полей рассеяния ИДП, ЭДП и ЭМП при различных геометрических параметрах якоря и ФЭ.

### **Математическая модель ударных преобразователей**

Для расчетов рабочих процессов ударных преобразователей индукционно-динамического, электродинамического и электромагнитного типа, возбуждаемых от ЕНЭ, проведено компьютерное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics 4.4, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов. Указанные преобразователи имеют осевую симметрию, что позволяет использовать 2D математическую модель.

С использованием условия Дирихле на границах расчетной области в цилиндрической системе координат рассчитывается векторный магнитный потенциал  $A$ :

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

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость ФЭ и якоря ЭМП;  $\gamma$  – электропроводность активных элементов преобразователей.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; \quad B_r = -\frac{dA}{dz}. \quad (2)$$

Локальная плотность тока на каждом участке массивного электропроводящего якоря в ИДП определяется по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (3)$$

Электродинамические усилия (ЭДУ), действующие на якорь, рассчитываются по формуле:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n)) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) dS. \quad (4)$$

где  $S$  – поверхность, ограничивающая подвижный якорь в плоскости  $\{r, z\}$ .

Для ФЭ и ферромагнитного якоря ЭМП используется нелинейная кривая намагничивания  $B = f(H)$ .

Импульс ЭДУ, действующий на подвижный якорь, определяется выражением:

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

Ток в индукторе определяется с использованием уравнения:

$$(R_e + R_1) i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{v} dt = U_0 \quad (6)$$

где  $R_e$  – активное сопротивление внешней цепи возбуждения;  $R_1$  – активное сопротивление индуктора;  $i_1$  – ток индуктора;  $L_e$  – индуктивность внешней цепи возбуждения;  $U_0$  – 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.

Скорость  $V$  якоря с ИЭ описывается уравнением [16]

$$(m_2 + m_e) \frac{dV}{dt} = f_z(z) - K_p \Delta Z(t) - K_T V(t) - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t) \quad (7)$$

где  $m_2$  – масса якоря;  $m_e$  – масса ИЭ;  $K_p$  – коэффициент упругости буферного элемента;  $K_T$  – коэффициент динамического сопротивления;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{ex2}$  – внешний диаметр якоря.

Уравнения (1) – (7) описывают электромеханические процессы в ударных преобразователях при начальных условиях  $\Delta Z(0)=0$ ;  $V(0)=0$ . При расчете предполагаем осевую симметрию преобразователя и отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора и ФЭ. При расчете взаимосвязанных переходных электромагнитных, электродинамических, механических и тепловых процессов предполагаем отсутствие деформации активных элементов преобразователей – индуктора, якоря и ФЭ. При этом учитываем пространственное распределение индуцированного тока по сечению электропроводящего якоря ИДП, магнитного и теплового поля, сопротивление окружающей среды при движении якоря на каждом временном шаге [16].

Значение КПД ударного электромеханического преобразователя оценим как отношение кинетической энергии движущихся масс к энергии ЕНЭ:

$$\eta = \frac{(m_2 + m_e) \cdot V_m^2}{C \cdot U_0^2} . \quad (8)$$

### **Основные параметры ударных преобразователей**

Для сравнительного анализа будем рассматривать ударные преобразователи с одинаковыми коаксиальными конфигурациями, габаритами и параметрами ЕНЭ. Данные преобразователи содержат одинаковый ФЭ, охватывающий индуктор с торцевой и наружной боковых сторон. Якорь выполнен в форме плоского диска, одна из сторон которого обращена к индуктору, а вторая взаимодействует с ИЭ. Основные параметры ударных преобразователей основного исполнения представлены в табл.1. Индуктор преобразователей намотан медной шиной. Якорь ИДП выполнен в виде сплошного диска из технической меди, а ФЭ и якорь ЭМП выполнены из стали марки Ст.10 (*АISI 1010, UNS G10100*).

На рис.1 показаны сечения и общий вид активных элементов ИДП, ЭДП и ЭМП основного исполнения с распределением магнитных полей в момент максимума ЭДУ, где обозначены: 1 – индуктор, 2 – подвижный якорь, 3 – ФЭ, содержащий дисковое основание 3а и наружную обечайку 3б. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФЭ заполнено изоляцией толщиной  $\delta=1$  мм.

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.

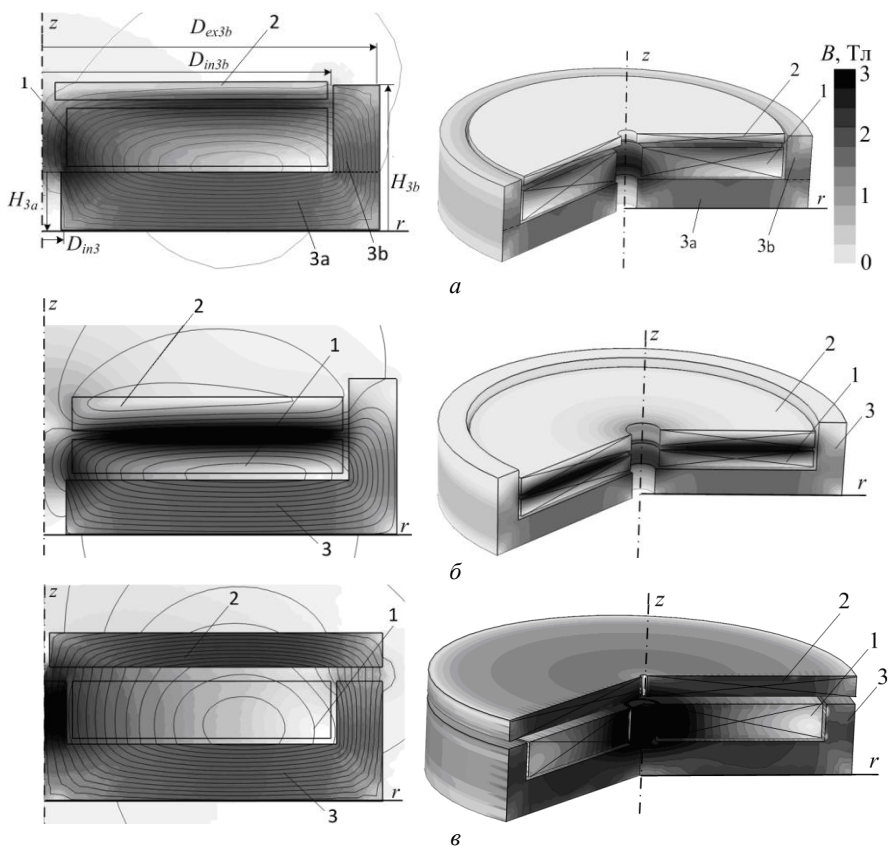


Рис.1 – Распределение магнитных полей в момент максимума ЭДУ:  
 а – ИДП, б – ЭДП, в – ЭМП.

На рис.2 показаны электромеханические и полевые характеристики ударных преобразователей основного исполнения без ФЭ. В качестве электромеханических характеристик выступают  $j_1$  – плотность тока в индукторе,  $f_z$  – ЭДУ, действующие на подвижный якорь со стороны индуктора, и  $V$  – скорость якоря с ИЭ. Полевая характеристика показывает изменение усредненного значения магнитного поля на расчетном контуре, расположенном на расстоянии  $2H_1$  от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии  $4H_1$  от верхней стороны индуктора (рис.3). Заметим, что при отсутствии ФЭ в ИДП основного исполнения (рис.3) наблюдаются значительные магнитные поля в окружающем пространстве, что нежелательно с точки зрения электромагнитной совместимости и экологической чистоты.

Таблица 1 – Параметры ЭДП, ИДП и ЭМП основного исполнения

Показатель	Обозначение	ЭДП	ЭМП	ИДП
		Величина		
Внешний диаметр индуктора	$D_{ex1}$ , мм	100		
Внутренний диаметр индуктора	$D_{in1}$ , мм	10		
Высота индуктора	$H_1$ , мм	5	10	
Внешний диаметр якоря	$D_{ex2}$ , мм	100	118	100
Внутренний диаметр якоря	$D_{in2}$ , мм	10,0		
Высота якоря	$H_2$ , мм	5	3	
Начальное расстояние между индуктором и якорем	$\delta$ , мм	1	3	1
Количество витков индуктора	$N_1$ , шт.	23	46	
Количество витков якоря	$N_1$ , шт.	23	-	
Сечение шины индуктора	$a \times b$ , мм <sup>2</sup>	1,8×4,8		
Масса якоря	$m_2$ , кг	0,345	0,535	0,205
Масса исполнительного элемента	$m_e$ , кг	0,5		
Высота дискового основания ФЭ	$H_{3a}$ , мм	8		
Высота обечайки ФЭ	$H_{3b}$ , мм	24	21	24
Внешний диаметр обечайки ФЭ	$D_{ex3b}$ , мм	118		
Внутренний диаметр обечайки ФЭ	$D_{in3b}$ , мм	102		
Емкость ЕНЭ	$C$ , мкФ	2850		
Зарядное напряжение ЕНЭ	$U_0$ , В	400		

В ЭДП электромеханические процессы протекают наиболее быстро, ток в индукторе и ЭДУ принимают наибольшие значения. В ЭМП электромеханические процессы протекают наиболее медленно, причем максимальная величина ЭДУ здесь наименьшая для всех преобразователей.

Скорости якоря с ИЭ в ЭДП и ИДП, где действуют ЭДУ отталкивания, после резкого начального возрастания практически не меняются. В ЭМП, где действует электромагнитная сила притяжения, указанная скорость постоянно растет до момента соударения якоря с ФЭ.

Наибольший уровень магнитных полей рассеяния наблюдается в ЭМП, а наименьший – в ЭДП.

В табл.2 представлены относительные показатели ЭДП и ЭМП основного исполнения, которые отнесены к соответствующим показателям ИДП. Здесь представлены относительные значения максимальной плотности тока в индукторе  $j_{1m}^*$ , максимальных ЭДУ  $f_{zm}^*$ , максимальной скорости  $V_m$ , максимального значения кинетической энергии  $W_{kin}^*$ , усредненного значения магнитного поля на расчетном контуре  $B_0^*$  и относительной массы якоря  $m_2^*$ .

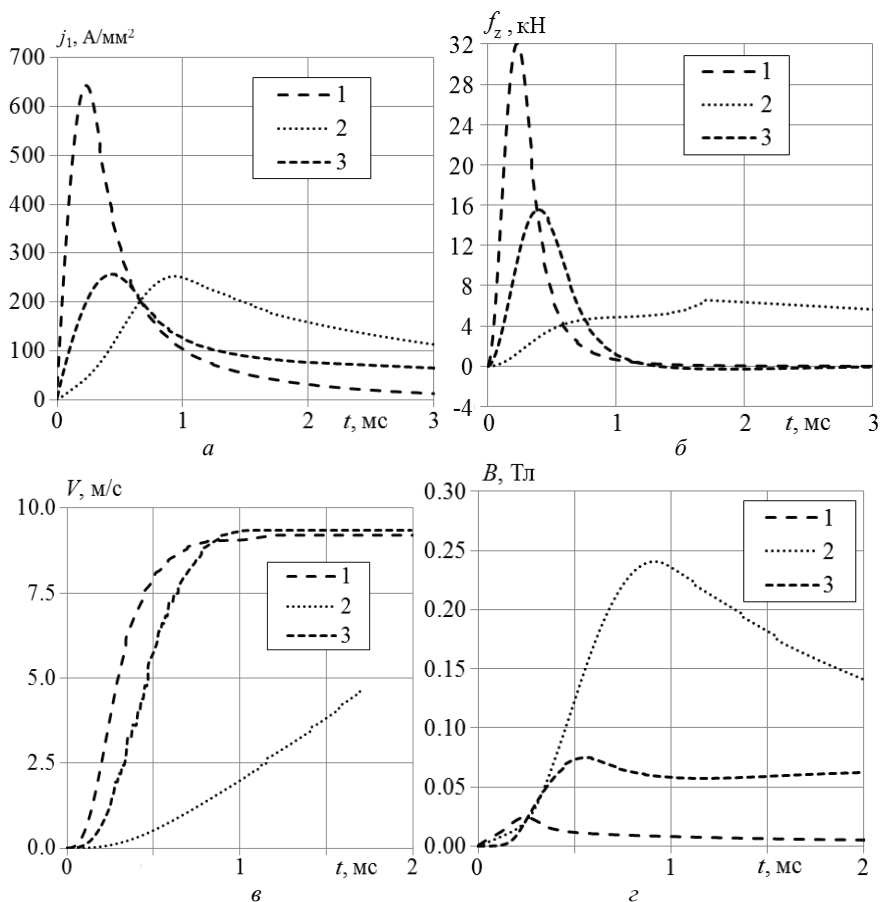


Рис.2 – Электромеханические *а, б*, *в* и полевые *з* характеристики ударных преобразователей: 1 – ЭДП; 2 – ЭМП; 3 – ИДП

Таблица 2 – Относительные показатели ЭДП и ЭМП основного исполнения

Тип преобразователя	$j_{1m}^*$ , о.е.	$f_{zm}^*$ , о.е.	$V_m^*$ , о.е.	$W_{kin}^*$ , о.е.	$B_0^*$ , о.е.	$m_2^*$ , о.е.	$K^*$ , о.е.
ЭДП	2,513	2,094	0,984	1,68	0,231	1,683	2,890
ЭМП	0,992	0,430	0,497	0,645	2,870	2,610	0,226

Для сравнительного анализа ударных преобразователей введем интегральный показатель эффективности

$$K^* = \frac{W_{kin}^*}{j_m^* \cdot B_0^*}. \quad (9)$$

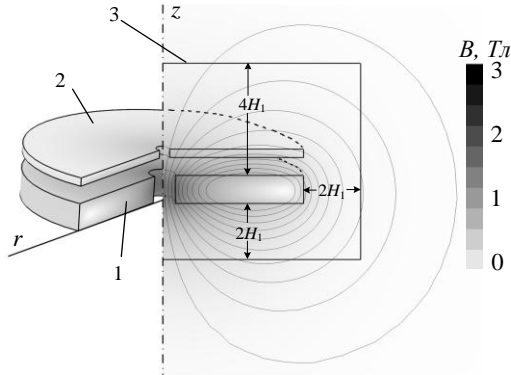


Рис. 3 – Распределение магнитного поля в ИДП основного исполнения без ФЭ через 1 мс после начала работы: 1 – индуктор, 2 – якорь, 3 – контур расчета усредненного магнитного поля рассеяния

По величине интегрального показателя  $K^*$  можно сделать вывод, что наиболее эффективным является ЭДП, а наименее эффективным – ЭМП основного исполнения.

#### Влияние высоты ФЭ на показатели ударных преобразователей

Параметры ФЭ влияют на величину магнитных полей в активной зоне и, особенно существенно, в окружающем пространстве ударного электромеханического преобразователя. Магнитные поля в активной зоне в значительной мере обуславливают эффективность работы преобразователя, а поля рассеяния в окружающем пространстве негативно влияют технические и биологические близко расположенные объекты. На рис.4 показано распределение магнитного поля в момент максимума ЭДУ в ИДП при различной толщине ФЭ. Тонкостенный экран (толщина стенок 1 мм) слабо экранирует поля рассеяния, в то время как толстостенный экран (толщина стенок 8 мм) практически полностью экранирует указанные поля, концентрируя их в активной зоне между индуктором и якорем.

Рассмотрим влияние высоты  $H_{3a}$  дискового основания ФЭ на основные показатели ударных электромеханических преобразователей. Для этого введем безразмерный геометрический параметр ФЭ:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1} \quad (10)$$

Для анализа будем использовать относительные показатели ударных преобразователей с ФЭ. В качестве базового варианта используем ИДП без ФЭ.



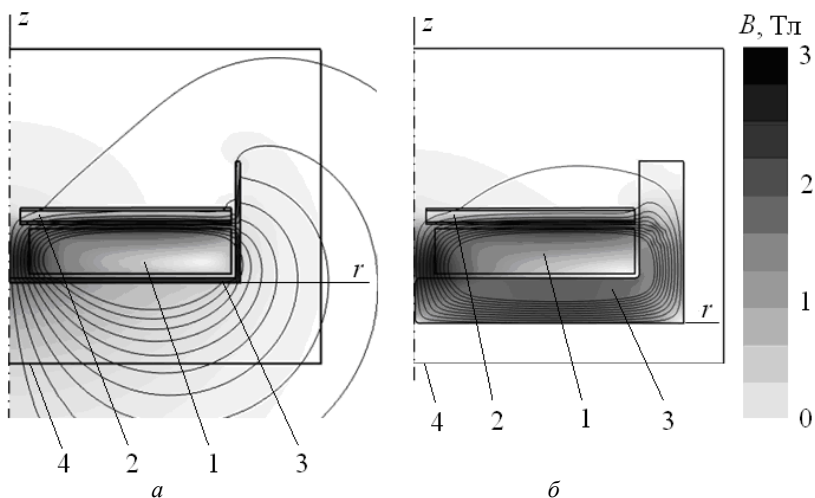


Рис. 4 – Распределение магнитного поля в ИДП в момент максимума ЭДУ при толщине ФЭ 1 мм *а* и 8 мм *б*: 1 – индуктор, 2 – якорь, 3 – ФЭ, 4 – расчетный контур

На рис.5 показаны относительные значения КПД  $\eta^*$  и усредненного магнитного поля рассеяния  $B^*$  на расчетном контуре ударных преобразователей в зависимости от безразмерного геометрического параметра ФЭ  $\chi$ .

При увеличении геометрического параметра  $\chi$  от 0 до 1 в ИДП происходит рост КПД на 65 % и уменьшение поля рассеяния в 3,7 раз. При аналогичном изменении параметра  $\chi$  в ЭДП происходит увеличение КПД на 43 %, а магнитное поле рассеяния уменьшается в 5,3 раза.

ЭМП эффективен только при наличии дискового основания ФЭ определенной толщины. При увеличении геометрического параметра ФЭ  $\chi$  от 0,2 до 1 в ЭМП происходит рост КПД на 44 % и уменьшение поля рассеяния на 22,6%. Таким образом, в зависимости увеличения высоты дискового основания ФЭ КПД преобразователя возрастает, причем наиболее существенно в ИДП, а магнитное поле рассеяния уменьшается, наиболее сильно в ЭДП.

#### **Влияние высоты якоря на показатели ударных преобразователей**

Несмотря на различное строение подвижного якоря в рассматриваемых ударных преобразователях, в них можно реализовать различную высоту при сохранении остальных параметров. В ИДП и ЭМП высота якоря определяется высотой, соответственно, медного и ферромагнитного дисков. В ЭДП высота якоря определяется, например, высотой шины при неизменном количестве ее витков. При этом сечение шины индуктора остается неизменным. Для анализа показателей ударных преобразователей введем безразмерный геометрический параметр якоря:

$$\varepsilon = \frac{H_2}{H_1} \quad (11)$$

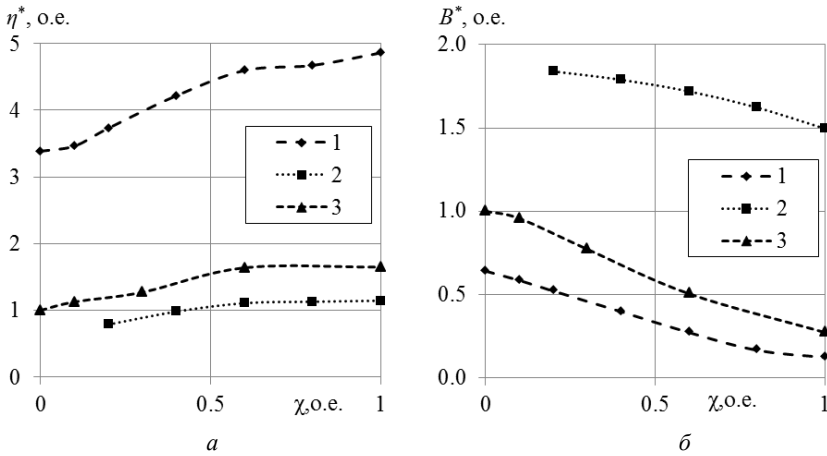


Рис.5 – Изменение относительных значений КПД  $\eta^*$  *a* и усредненного магнитного поля рассеяния  $B^*$  *б* в зависимости от параметра  $\chi$  для: 1 – ЭДП, 2 – ЭМП, 3 – ИДП.

Учитывая различное строение якорей ударных преобразователей, рассмотрим диапазон изменения их высоты таким, чтобы в нем находился максимум скорости якоря с ИЭ (рис.6). При увеличении высоты якоря во всех ударных преобразователях происходит увеличение импульса силы  $F_z$ . В ЭДП при изменении параметра  $\epsilon$  от 0,2 до 1,2 величина  $F_z$  возрастает в 2,03 раза. В ЭМП при изменении  $\epsilon$  от 0,4 до 1,4 величина  $F_z$  возрастает в 2,52 раза. В ИДП при изменении  $\epsilon$  от 0,1 до 0,5 величина  $F_z$  возрастает в 1,94 раза.

Максимальные значения скоростей якоря с ИЭ для различных электромеханических преобразователей реализуются при различной высоте якоря, которая для них является оптимальной. Наименее низким является оптимальный якорь ИДП ( $H_2=2,2$  мм), а наиболее высоким является оптимальный якорь ЭМП ( $H_2=10$  мм). В ЭДП максимальная скорость реализуется при якорю, высота которого  $H_2=3$  мм.

В табл. 3 представлены значения импульса силы  $F_z$  и максимальной скорости  $V_m$  якоря при оптимальном значении геометрического параметра  $\epsilon$ , при котором скорость якоря с ИЭ максимальна. Как следует из полученных результатов, при оптимальной высоте якоря наибольшая скорость развивается ЭДП, а наименьшая ИДП. В ЭДП и ЭМП при этом реализуются практически одинаковые значения импульса силы, в то время как в ИДП указанный импульс в 1,52 раза меньше.

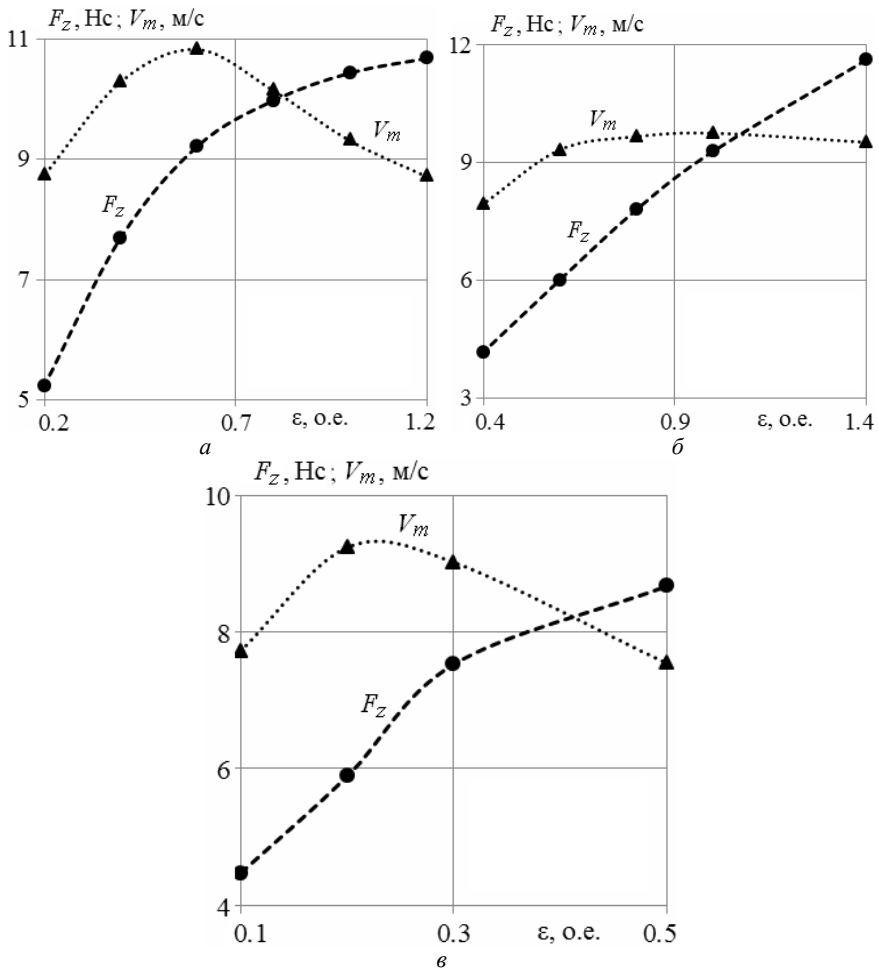


Рис.6 – Изменение импульса силы  $F_z$  и максимальной скорости  $V_m$  якоря с ИЭ в зависимости от геометрического параметра якоря  $\epsilon$  для: а – ЭДП; б – ЭМП; в – ИДП.

Таблица 3 – Значения импульса силы и максимальной скорости якоря при оптимальном значении параметра  $\epsilon$

Тип преобразователя	$\epsilon^*$ , о.е.	$F_z(\epsilon^*)$ , Hc	$V_m(\epsilon^*)$ , м/с
ИДП	0,22	6,1	9,32
ЭДП	0,61	9,3	10,82
ЭМП	1,05	9,3	9,75

## Экспериментальные исследования образца ИДП

Для проверки теоретических положений и результатов компьютерного моделирования были проведены экспериментальные исследования экспериментального образца ИДП на установке, показанной на рис.5, а.

Индуктор 1 намотан из медной шины в два слоя без внутренних соединений между собой с выводами от верхнего и нижнего слоя. Индуктор выполнен монолитным путем компаундирования витков эпоксидной смолой. Коаксиально с индуктором 1 расположен якорь 2, нижняя, обращенная к индуктору часть которого, выполнена в виде медного диска, а верхняя часть – в виде стального диска с выпуклой наружной поверхностью. Индуктор охвачен ФЭ 3, который представляет собой сборную конструкцию, позволяющую изменять высоту дисковой части  $H_{3a}$  ФЭ.

Для уменьшения вихревых токов ФЭ выполнен с четырьмя радиальными разрезами, одна из частей которого для демонстрации устройства экрана удалена от индуктора и расположена на верхней плоскости каркаса (рис.5,а).

К якорю 2 прикреплен направляющий латунный стержень 4, проходящий через центральное отверстие индуктора 1. Якорь взаимодействует с буферной пружиной 5, которая фиксирована относительно верхней плоскости силового каркаса 6. Между нижней плоскостью каркаса 6 и ФЭ размещена текстолитовая пластина 7. На верхней плоскости силового каркаса закреплен резистивный датчик перемещений 8, соединенный с направляющим стержнем 4. Для возбуждения индуктора импульсным током использовался ЕНЭ с емкостью  $C = 1660$  мкФ и напряжением  $U_0 = 310$  В. При помощи электронного осциллографа RIGOL DS 522M измерялся ток в индукторе ИДП и сигнал датчика перемещений при отталкивании якоря от индуктора (рис. 8).

Геометрические параметры экспериментального образца соответствуют параметрам ИДП основного исполнения (табл.1). В экспериментах использовался ФЭ с наружной обечайкой высотой 25 мм и наружным диаметром 118 мм при различной высоте дискового основания.

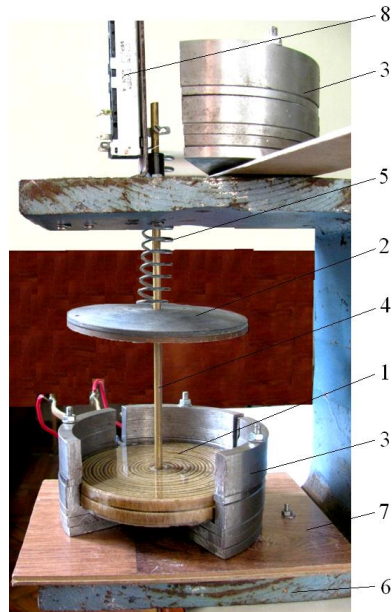


Рисунок 7 – Установка для исследований экспериментального образца ИДП

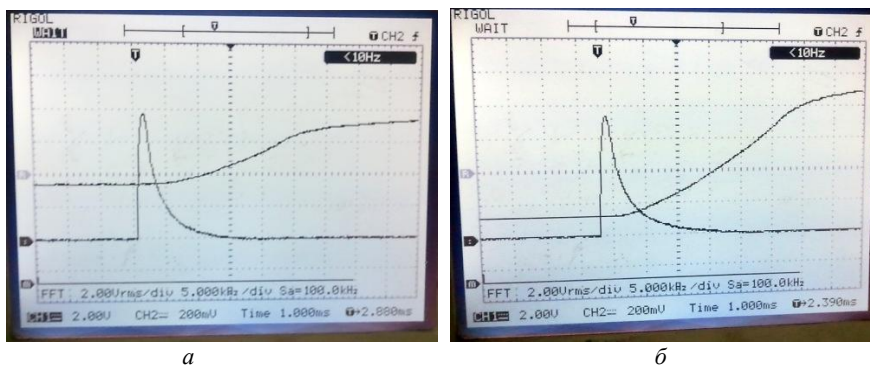


Рис.8 – Осциллограммы импульса тока индуктора и показаний датчика перемещений в ИДП при: а –  $\chi=0$ ; б –  $\chi=1,5$ .

В табл. 4 представлены экспериментальные и расчетные значения средней скорости якоря  $V_s$  на участке перемещения 100 мм, максимального тока индуктора  $I_{1m}$  и времени  $t_{1m}$ , при котором ток индуктора принимает максимальное значение. При значении параметра  $\chi=0$  ФЭ отсутствует.

Таблица 4 – Результаты экспериментальных и расчетных показателей экспериментального образца ИДП

Параметры ФЭ	Экспериментальные значения			Расчетные значения		
	$V_s$ , м/с	$I_{1m}$ , кА	$t_{1m}$ , мс	$V_s$ , м/с	$I_{1m}$ , кА	$t_{1m}$ , мс
0,0	3,00	1,72	0,29	3,12	1,82	0,30
0,5	4,15	1,41	0,34	4,20	1,45	0,34
1,0	4,35	1,30	0,35	4,40	1,37	0,36
1,5	4,45	1,29	0,35	4,45	1,36	0,36

Как следует из экспериментальных данных ФЭ в зависимости от геометрических параметров увеличивает скорость  $V_s$  до 47 %, уменьшает максимальный ток в индукторе до 35 % и увеличивает время  $t_{1m}$  до 21 % по сравнению с ИДП основного исполнения.

В целом, можно констатировать, что получено удовлетворительное согласие между измеренными и рассчитанными электромагнитными (до 10%) и механическими (до 5%) показателями ИДП, что свидетельствует о достоверности расчетной модели.

### Выводы

Проведено компьютерное моделирование рабочих процессов ударных преобразователей в программном пакете COMSOL Multiphysics 4.4.

Показано, что в ЭДП электромеханические процессы протекают наиболее быстро, ток в индукторе и ЭДУ принимают наибольшие значения при наименьшем уровне полей рассеяния. В ЭМП электромеханические

процессы протекают наиболее медленно, ток в индукторе и ЭДУ принимают наименьшие значения при наибольшем уровне полей рассеяния. По величине интегрального показателя наиболее эффективным является ЭДП, а наименее эффективным – ЭМП.

При увеличении высоты дискового основания ФЭ КПД преобразователей возрастает, наиболее существенно в ИДП, а магнитное поле рассеяния уменьшается, наиболее сильно в ЭДП.

При увеличении высоты якоря во всех преобразователях происходит увеличение импульсы силы. Максимальные значения скоростей якоря с ИЭ для различных преобразователей реализуются при различной высоте якоря: наименее низким является якорь ИДП, а наиболее высоким – якорь ЭМП.

Получено удовлетворительное согласие между измеренными и рассчитанными электромагнитными (до 10%) и механическими (до 5%) показателями образца ИДП.

**Список источников информации:** 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. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. - Vol. 48, №11. - P. 3315-3318. 6. Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. – 1989. - № 1. – С. 25-26. 7. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубki-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. – 2001. - № 2. – С. 28–32. 8. 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. 9. 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. 10. Liao M., Zabar Z., Czarkowski D. et al. On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher // IEEE Trans. Magnetics. – 1999. - № 1, Vol. 35. – P. 148-153. 11. 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. 12. Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Trans. Magnetics. – 1991. - № 1, Vol. 27. – P. 607-610. 13. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. - № 12. – С. 52–57. 14. Петленко Б.И. Оптимизация линейных электроприводов стенов для динамических испытаний автомобилей // Электрическое и электронное оборудование автомобилей, тракторов и их роботизированных производств. - М.: МАМИ, 1992. – С. 60-68. 15. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. - № 11. – С. 24-28. 16. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Электротехника и электромеханика. – 2012. - №6. – С.20-27.

**Bibliography (transliterated):**

1. Afonin A.A., Grebenikov V.V. Electrodynamic systems improved performance. Technical electro-dynamics. – 1994. - No 5. – P. 23-29. 2. Ugarov G.G., Neumann V.Y. Trends in the development

and application of hand shock machines with electromechanical energy conversion. Proceedings of Higher Education. Electromechanics. - 2002. - No 2. - P. 37-43. **3.** Balkovoj A.P., Kostin A.V., Mjagkih A.S. etc.. Design features range direct linear actuators for engineering. Electrical Engineering. - 2013. - No 7. - P. 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, No5 - P. 2229-2232. **5.** Bissal A., Magnusson J., Engdahl G., Comparison of two ultra-fast actuator concept. IEEE Transactions on Magnetics. - 2012. - Vol. 48, No11. - P. 3315-3318. **6.** Kuznetsov P.V., Tolmachev N.S., Kharitonov V.D. etc. Induction-dynamic cleaning drying equipment. Dairy industry. - 1989. - No 1. - P. 25-26. **7.** Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrakov D.V. Development of effective technological devices for magnetic elastoimpulsnoy cutting-punching sheet materials // Metal processing. - 2001. - No 2. - P. 28-32. **8.** Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era. IEEE Trans. Magnetics. - 2005. - No 1, Vol. 41. - P. 158-164. **9.** Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. IEEE Trans. Magnetics. - 2003. - No 1, Vol. 39. - P. 310-313. **10.** Liao M., Zabar Z., Czarkowski D. et al. On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher. IEEE Trans. Magnetics. - 1999. - No 1, Vol. 35. - P. 148-153. **11.** Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring. Modern information technologies in the field of security and defense. - 2010. - No 1. - P. 22-28. **12.** Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. IEEE Trans. Magnetics. - 1991. - No 1, Vol. 27. - P. 607-610. **13.** Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A. Magnetic pulse position for testing products for aerospace shock effects. Aerospace Instrument. - 2005. - No 12. - P. 52-57. **14.** Petlenko B.I. Optimization of linear electric stands for dynamic testing of vehicles. Electrical and electronic equipment in automobiles, tractors and robotic industries. - M.: MAMI, 1992. - P. 60-68. **15.** Tyutkin V.A. Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials. Electrical Engineering. - 2002. - No 11. - P. 24-28. **16.** Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Influence of parameters of the ferromagnetic core on the efficiency of induction-dynamic engine. Elektrotehnika & Elektromehanika. - 2012. - No 6. - P. 20-27.



**Болух Владимир Федорович**, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности «Криогенная техника» в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



**Олексенко Сергей Владимирович**. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» в 2011 г. Аспирант кафедры «Общая электротехника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2012 г. Научные интересы связаны с проблемами моделирования и расчета линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.



**Щукин Игорь Сергеевич**, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера по специальности «Инженерная электрофизика» в 1984 г. Диссертация кандидата технических наук по специальности электрические машины и аппараты в 1994 г. в Харьковском политехническом институте Доцент кафедры «Электрические машины» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 1996 г. Научные интересы связаны с разработкой, конструированием и охлаждением электромеханических преобразователей ударного типа.