

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА НА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

*Проведені експериментальні дослідження впливу параметрів ферромагнітного осердя на електромеханічні показники лінійного індукційно-динамічного перетворювача. Розроблена експериментальна установка, яка дозволяє визначати електромеханічні параметри перетворювача на протязі робочого процесу. Виготовлене ферромагнітне осердя з чотирма радіальними розрізами, яке дозволяє регулювати висоту основи та зовнішньої обичайки. Визначені геометричні параметри осердя, які забезпечують найбільшу швидкість якоря. При певних параметрах ферромагнітне осердя підвищує ефективність перетворювача до 50 %. Експериментальні дослідження з похибкою до 6 % підтверджують теоретичні розрахунки.*

*Проведены экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя. Разработана экспериментальная установка, позволяющая определять электромеханические параметры преобразователя в течение рабочего процесса. Изготовлен ферромагнитный сердечник с четырьмя радиальными разрезами, позволяющий регулировать высоту основания и наружной обечайки. Установлены геометрические параметры сердечника, обеспечивающего наибольшую скорость якоря. При определенных параметрах ферромагнитный сердечник повышает эффективность преобразователя до 50%. Экспериментальные исследования с погрешностью до 6 % подтверждают теоретические расчеты.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Линейные индукционно-динамические преобразователи (ЛИДП) применяются для обеспечения ударных механических импульсов значительной величины и высокоскоростного разгона различных объектов на коротком активном участке.

ЛИДП используются в быстродействующих электрических аппаратах и электромагнитных клапанах ответственного исполнения, в мобильных перфораторах и ударных устройствах различного назначения. Они применяются для систем очистки и разгрузки емкостей, бункеров и фильтров, для быстродействующих форсунок топливной аппаратуры, для испытательных стендов на ударные воздействия, для перспективных баллистических лазерных гравиметров, для пусковых систем и катапульт различного назначения, для сейсмических источников, предназначенных для поиска полезных ископаемых и зондирования Земли. ЛИДП разрабатываются для противообледенительных систем самолетов, ЛЭП и др. объектов. В качестве ускорителей ЛИДП разрабатываются для устройств дополнительного ускорения подвижных объектов, для защиты объектов и помещений от нежелательного в них проникновения. Перспективными сферами их применения являются защита информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе, разработка пусковых аэрокосмических установок и систем метеоритной защиты Земли. В промышленности ЛИДП используются для ударно-конденсаторной сварки, штамповки, клепально-сборочных работ, для электродинамической сепарации и измельчения порошков, для магнитного импульсного уплотнения порошков входящих в композиционные составы и др. [1-11].

Как правило, ЛИДП выполняются без ферромагнитного сердечника (ФС), что обусловлено быстрым протеканием рабочего процесса, значительными величинами возбуждаемых импульсных магнитных полей и ограничениями по массогабаритным показателям. Однако ФС, охватывающий неподвижный

индуктор, который возбуждается от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), может существенно перераспределить магнитные поля в ЛИДП, снижая рассеяние в окружающее пространство и увеличивая поле в активной зоне якоря [12]. Тем самым может улучшиться электромагнитная совместимость с близко расположенными электронными устройствами и экологическая чистота для окружающего персонала, а также могут повыситься электромеханические показатели ЛИДП. Однако указанные положительные эффекты могут произойти только при определенных параметрах ФС [13].

Существенным фактором, ограничивающим применение ФС в ЛИДП, является отсутствие эффективных математических моделей и целенаправленных экспериментальных исследований, ориентированных на выбор параметров ФС. Известные математические модели ЛИДП используют либо постоянство магнитной проницаемости, либо линейность кривой намагничивания и отсутствие насыщения стали ФС, либо равномерность распределения индуцированного тока по сечению массивного якоря, либо не учитывают тепловые процессы и изменяемое сопротивление среды при движении якоря с исполнительным элементом. Эти допущения искажают физику быстропротекающих электромагнитных, механических и тепловых процессов, что влияет на результаты расчетов. А известные экспериментальные исследования используют, как правило, ФС неизменной конфигурации, что не позволяет судить о влиянии его формы на электромеханические показатели ЛИДП.

Таким образом, теоретические исследования по выбору конфигурации ФС должны быть согласованы с экспериментальными исследованиями.

Целью статьи является экспериментальное исследование влияния геометрических параметров ФС на электромеханические параметры коаксиального

ЛИДП, содержащего неподвижный индуктор, возбуждаемый от ЕНЭ апериодическим импульсом, и массивный медный якорь, к которому прикреплен стальной или керамический ударный диск.

В качестве основного исполнения принимаем ЛИДП без ФС, основные параметры которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ЛИДП основного исполнения

Показатель	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора, мм	$D_{ex1}$	100
Внутренний диаметр индуктора, мм	$D_{in1}$	10
Высота индуктора, мм	$H_1$	10
Внешний диаметр якоря, мм	$D_{ex2}$	100
Внутренний диаметр якоря, мм	$D_{in2}$	10
Высота якоря, мм	$H_2$	3
Исходное расстояние между индуктором и якорем, мм	$\delta$	0,5
Количество витков индуктора, шт	$N_1$	46
Сечение шины индуктора, мм <sup>2</sup>	$a \times b$	1,8×4,8
Масса якоря со стальным ударным диском, кг	$m_1$	0,48
Масса якоря с керамическим ударным диском, кг	$m_2$	0,43
Емкость ЕНЭ, мкФ	$C$	1660
Напряжение ЕНЭ, В	$U_0$	310

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 показана экспериментальная установка для исследования ЛИДП.

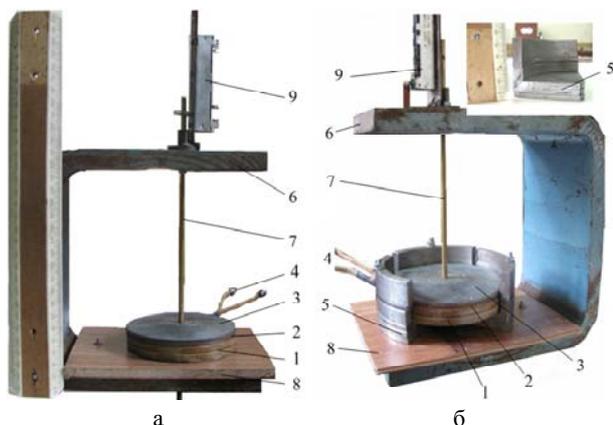


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИДП основного исполнения (а) и ЛИДП с ФС (б)

Индуктор 1 ЛИДП состоит из многovitковой обмотки, намотанной из медной шины в два слоя и выполненной монолитной при помощи пропитки эпоксидной смолой. Дисковый якорь 2 выполнен из технической меди. К якорю прикрепляется либо ферромагнитный стальной (рис. 2), либо немагнитный керамический (рис. 3) ударные диски 3.



Рис. 2. Якорь ЛИДП с прикрепленным к нему стальным ударным диском: вид снизу (а) и сверху (б)

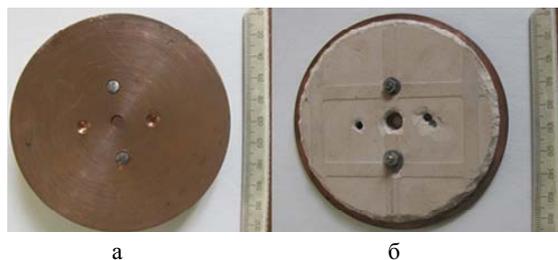


Рис. 3. Якорь ЛИДП с прикрепленным к нему керамическим ударным диском: вид снизу (а) и сверху (б)

Индуктор посредством токовводов 4 соединяется с ЕНЭ. Индуктор коаксиально устанавливается в составной ФС 5, выполненный с четырьмя радиальными разрезами (рис. 1,б).

Экспериментальная установка содержит каркас 6, выполненный из стальной плиты С-образной формы. Между верхней и нижней стенками каркаса 6 подвижно установлен направляющий латунный стержень 7, проходящий через центральные отверстия индуктора и якоря. Индуктор установлен на немагнитическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 9. К верхней стенке каркаса крепится демпфирующая пружина (на фото отсутствует). Направляющий стержень соединен с ударным диском и подвижным контактом датчика перемещений.

На рис. 4 представлена электрическая схема экспериментальной установки.

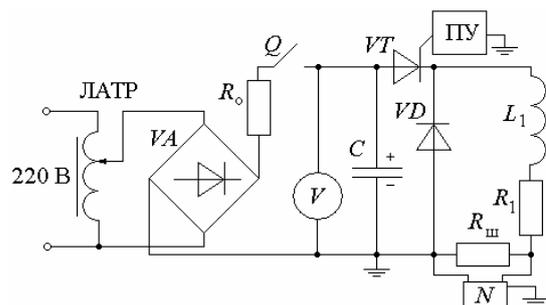


Рис. 4. Электрическая схема экспериментальной установки для исследования ЛИДП

Питание экспериментальной установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и регулируется автотрансформатором ЛАТР. После трансформатора напряжение поступает на выпрямитель VA, после чего осуществляется заряд ЕНЭ С - батареи электролитических конденсаторов. При достижении необходимого зарядного напряжения  $U_0$  ЕНЭ отключается от сети ключом Q. При подаче сигнала с пускового устройства ПУ тиристор VT открывается, ЕНЭ разряжается на индуктор с активным сопротивлением  $R_1$  и индуктивностью  $L_1$ . При этом генерируется импульсное магнитное поле, которое в начале переходного процесса индуцирует ток противоположного направления в якорь. Между якорем и индуктором возникают электродинамические усилия (ЭДУ), обеспечивающие перемещение якоря с ударным диском и направляющим стержнем в вертикальном направлении. При помощи электронного осциллографа N снимаются показания резистивного датчика перемещений, а при помощи измерительного шун-

та  $R_{ш}$  типа 75ШСММЗ-200-0,5 на осциллографе измеряется токовый импульс в индукторе.

Для формирования аperiодического полярного импульса тока индуктор шунтирован обратным диодом  $VD$ .

С использованием расчетной методики [10] были получены электромеханические характеристики ЛИДП основного исполнения, которые представлены на рис. 5. На этом рисунке представлены изменяемые во времени: плотность тока в индукторе  $j_1$ , усредненная по сечению плотность тока в якоре  $j_2$ , величина  $f_z$  и импульс  $F_z$  электродинамических усилий (ЭДУ), которые действуют на якорь, перемещаемый на расстояние  $z$  относительно индуктора со скоростью  $V_z$ .

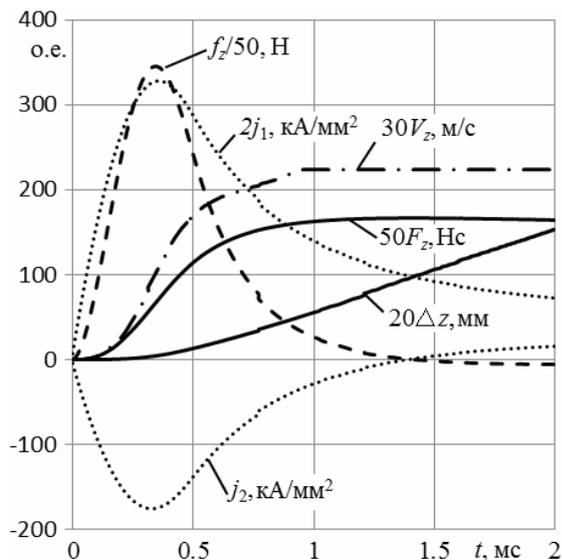


Рис. 5. Электромеханические характеристики ЛИДП основного исполнения

В момент времени  $t=1,4$  мс после начала рабочего процесса индуцированный ток в якоре меняет полярность, что изменяет характер его силового воздействия: начальное отталкивание сменяется последующим притяжением, однако вследствие значительного уменьшения магнитной взаимосвязи между индуктором и якром после перемещения последнего это воздействие незначительно.

На рис. 6 представлено распределение силовых линий и индукции магнитного поля в индукторе 1 и якоре 2 в момент максимума ЭДУ ЛИДП основного исполнения.

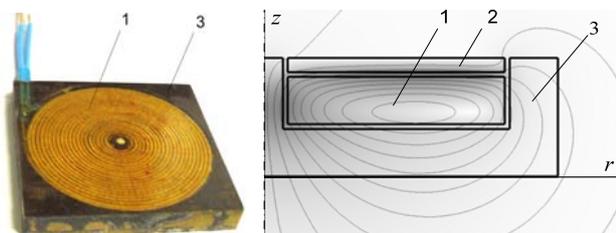


Рис. 6. Индуктор ЛИДП основного исполнения (а) и распределение индукции магнитного поля в момент максимума ЭДУ при наличии якора (б)

Индексом 3 на рис. 6 обозначен немагнитный стеклотекстолитовый каркас индуктора. Как можно увидеть, в ЛИДП основного исполнения магнитное

поле концентрируется в зазоре между индуктором и якром, достигая величины индукции 2,4 Тл. Отметим, что такая величина превышает значение индукции насыщения основных электротехнических сталей.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИДП С ФС

Для расчета характеристик ЛИДП с ФС было проведено компьютерное моделирование с помощью программного пакета *COMSOL Multiphysics 4.4*, в основу которого заложен метод конечных элементов.

Для этого в цилиндрической системе координат  $\{r, z\}$  рассматривался векторный магнитный потенциал  $A$  с использованием условия Дирихле на внешних границах расчетной области

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

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость материала ФС, зависящая от индукции магнитного поля  $B$ ;  $\gamma$  – электропроводность элементов ЛИДП.

Составляющие вектора магнитной индукции находились по известным соотношениям:

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

Плотность тока в якоре и ФС определялись по известному выражению

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

ЭДУ, действующие на якорь с ударным диском, охваченные замкнутым контуром с площадью сечения  $S$ , рассчитывались следующим образом:

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

При расчете переходных электромагнитных и электродинамических процессов ЛИДП предполагалось отсутствие механической отдачи индуктора и ФС.

#### ВЛИЯНИЕ ФС НА ПОКАЗАТЕЛИ ЛИДП

Проведем анализ работы ЛИДП при использовании ФС, выполненного из стали Ст.10. Если ФС выполнен массивным (сплошным), то эффективность ЛИДП падает. Это связано с тем, что возникающие в ФС вихревые токи экранируют проникновение магнитного поля в его глубину (рис. 7,а).

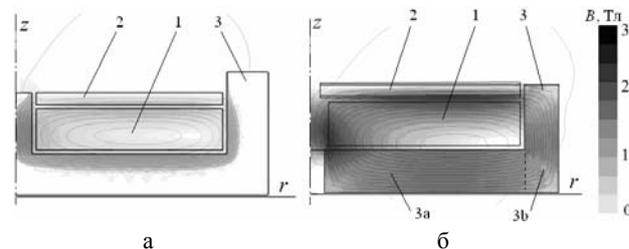


Рис. 7. Распределение магнитного поля в ЛИДП с массивным (а) и шихтованным (б) ФС в момент максимума ЭДУ

Кроме того, вихревые токи в ФС при взаимодействии с током индуктора снижают силовые показатели ЛИДП. Таким образом, для того, чтобы ФС эффективно проводил магнитный поток и не ухудшал электромеханические показатели ЛИДП, его электропроводность для вихревых токов должна быть минималь-

но возможной. Это достигается с помощью нескольких радиальных разрезов ФС или выполнения его шихтованным. В дальнейшем при расчетах будем рассматривать ФС с нулевой электрической проводимостью. А в экспериментальных исследованиях использовался коаксиальный ФС с четырьмя радиальными разрезами. На рис. 1,б представлен ФС, охватывающий индуктор, у которого одна из четвертей сердечника вынута и показана сверху.

В поперечном сечении коаксиальный ФС 3 комбинированной формы можно представить состоящим из дискового основания 3а, охватывающего индуктор 1 снизу, и наружной обечайки 3б, охватывающей индуктор с наружной поверхности (рис. 7,б). На рис. 7,б показано распределение магнитного поля в момент максимума ЭДУ для ЛИДП с ФС, имеющего нулевую электропроводность. Рассматриваемый ФС усиливает и концентрирует магнитное поле в зоне якоря, смещая область с низким уровнем поля к основанию ФС. При этом магнитное поле практически мало выходит в окружающее пространство, т.е. осуществляется экранирование полей рассеяния.

Указанный ФС, представляемый совокупностью  $i$ -ых цилиндрических участков, где  $i=\{a, b\}$ , можно описать геометрическими параметрами: внешним диаметром  $D_{ex3i}$ , внутренним диаметром  $D_{in3i}$  и высотой  $H_{3i}$   $i$ -го участка. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией толщиной  $\delta=1$  мм.

Геометрические параметры ФС опишем безразмерными параметрами:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}. \quad (5)$$

Каждая из четырех разрезанных частей ФС состоит из наружной обечайки, формируемой тремя элементами, которые на рис. 8 обозначены буквами а, б, в. Указанные элементы обечайки а, б, в характеризуются геометрическими параметрами, соответственно,  $\varepsilon_a=1,0$ ,  $\varepsilon_b=0,4$ ,  $\varepsilon_v=0,8$ . Дисковое основание каждой разрезанной части ФС формируется тремя одинаковыми элементами г, каждый из которых характеризуется геометрическим параметром  $\chi=0,5$ . Все элементы фиксируются между собой при помощи крепежных элементов д.

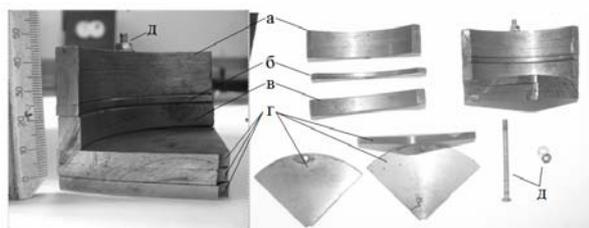


Рис. 8. Элементы четверти составного ФС

В табл. 2 представлены варианты исполнений конструкций ФС с различными геометрическими параметрами  $\chi$  и  $\varepsilon$ . Исполнение 0 соответствует ЛИДП без ФС. В исполнениях 1с...6с якорь соединен со стальным ударным диском, а в исполнениях 7к и 8к – с керамическим ударным диском.

На рис. 9 показаны экспериментальные ЛИДП исполнениями 1с, 2с и 4с (табл. 2.)

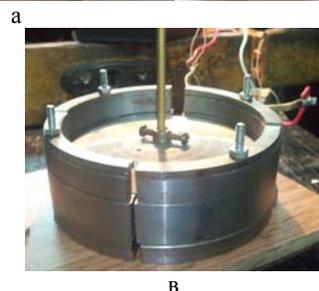


Рис. 9. Экспериментальные ЛИДП исполнениями 1с (а), 2с (б) и 4с (в)

На рис. 10 показан ЛИДП основного исполнения (без ФС), у которого якорь соединен с керамическим ударным диском.

Для ЛИДП с каждым исполнением ФС при помощи электронного осциллографа одновременно измерялся ток в индукторе  $i_1$  и перемещения якоря с ударным диском  $\Delta z$ .



Рис. 10. ЛИДП основного исполнения (без ФС) с керамическим ударным диском

На рис. 11 показаны осциллограммы указанных величин для ЛИДП без ФС (исполнение 0), для ЛИДП, у которого ФС содержит только дисковое основание (исполнение 1с) и для ЛИДП, у которого ФС содержит дисковое основание и наружную обечайку (исполнение 3с).

Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 2.

Таблица 2

Исполнение	$m_a$ , кг	$\chi$ , о,е,	$\varepsilon$ , о,е,	$t_m$ , мс	$t_r$ , мс	$I_{1m}$ , кА	$\Delta z(t)$ , мм при $t^*$			$V_0$ , м/с	
							0,75 мс	1,5 мс	5,0 мс	Эксперимент	Расчет
							0	0,48	0,0	0,0	0,20
1с	0,48	1,0	0,0	0,195	3,0	1,760	1,00	4,0	17	3,4	4,05
2с	0,48	1,0	1,0	0,19	3,0	1,713	1,40	4,8	21	4,2	4,3
3с	0,48	1,0	1,4	0,185	2,6	1,706	1,50	5,0	22	4,4	4,4
4с	0,48	1,0	2,2	0,19	2,5	1,766	1,50	5,1	21,5	4,3	4,4
5с	0,48	0,5	1,4	0,19	3,0	1,760	1,40	4,4	19	3,8	4,2
6с	0,48	1,5	1,4	0,19	3,0	1,920	1,55	5,1	22,5	4,5	4,4
7к	0,43	0,0	1,0	0,195	3,0	2,080	1,40	4,0	16,0	3,2	3,5
8к	0,43	1,0	1,4	0,19	3,6	1,973	1,70	5,4	22,5	4,5	4,7

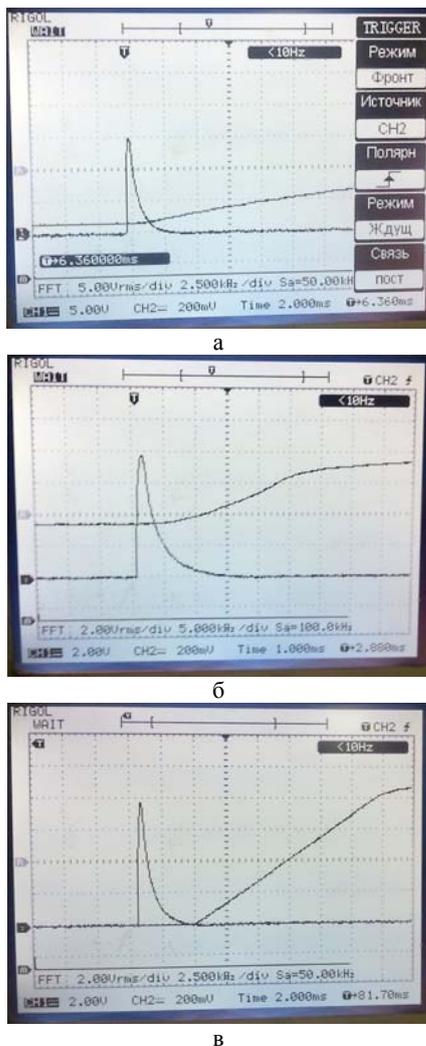


Рис. 11. Осциллограммы тока индуктора и перемещения якоря ЛИДП исполнений: 0 (а), 1с (б) и 3с (в)

В ней представлены амплитуда импульса тока в индукторе  $I_{1m}$ , время достижения током индуктора максимального значения  $t_m$ , длительность положительного полупериода тока индуктора  $t_+$ , перемещение якоря  $\Delta z$  в момент времени  $t^*$ , измеренная и рассчитанная средние скорости якоря с ударным диском  $V_0$  на участке перемещения.

Полученные результаты показывают, что применение ФС с геометрическими параметрами, указанными выше, повышает эффективность ЛИДП.

На рис. 12 показана зависимость средней скорости якоря с ударным стальным диском в зависимости от геометрических параметров ФС. На рис.12 представлены экспериментальные 1 и расчетные 2 значения  $V_0$  для ЛИДП с ФС, экспериментальные 3 и расчетные 4 значения для ЛИДП без ФС. Наибольшая средняя скорость  $V_0$  достигается при геометрических параметрах ФС  $\chi=1$  и  $\varepsilon=1.4$ . Для этого ЛИДП скорость якоря с ударным диском возрастает на 47 % по сравнению с ЛИДП основного исполнения (без ФС). Необходимо отметить, что применение ФС незначительно уменьшает ток в индукторе (до 6 %), уменьшает время достижения током индуктора максимального значения (до 8 %), увеличивает длительность положительного полупериода тока индуктора (до 30 %).

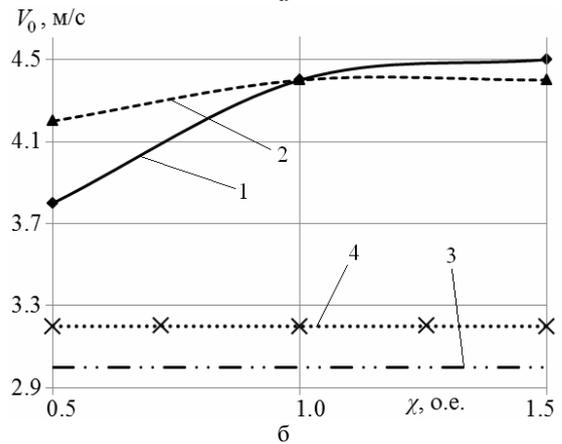
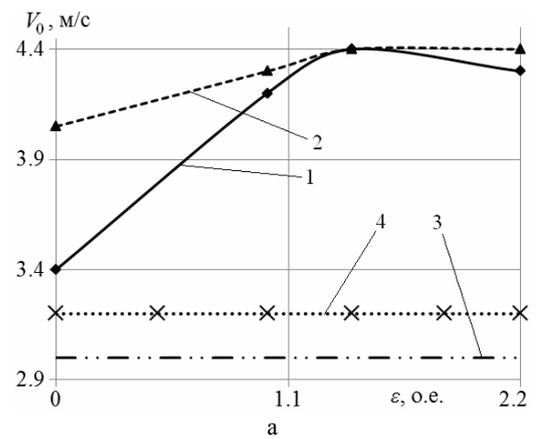


Рис. 12. Зависимость средней скорости якоря ЛИДП от высоты внешней обечайки ФС при  $\chi=1$  (а) и от высоты дискового основания ФС при  $\varepsilon=1,4$  (б)

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов. При этом относительная погрешность не превышает 6 %.

Как показывают экспериментальные и расчетные результаты, ЛИДП с керамическим ударным диском обеспечивает большую скорость, чем ЛИДП со стальным ударным диском (см. исполнения 3с и 8к в табл. 2). Наибольшую скорость обеспечивает ЛИДП с керамическим якорем, у которого ФС имеет следующие геометрические параметры  $\chi=1,0$ ,  $\varepsilon=1,4$ . По сравнению с ЛИДП основного исполнения средняя скорость такого преобразователя за счет ФС увеличивается на 50 %.

## ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования, которые согласуются между собой с точностью до 6 %, показали, что ФС с четырьмя радиальными разрезами повышает эффективность ЛИДП. Установлены геометрические параметры ФС, обеспечивающего наибольшую среднюю скорость якоря. По сравнению с ЛИДП основного исполнения без ФС средняя скорость якоря возрастает до 50 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol.35. – №1. – pp. 262-267.
2. 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.

3. 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.
4. Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // *Measurement Techniques*. – Vol.56. – Issue 10. – pp. 1098-1104.
5. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – №2. – С. 5-10.
6. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol.48. – №11. – pp. 3315-3318.
7. Bissal A., Magnusson J., Salinas E. et al. On the design of ultra-fast electromechanical actuators: a comprehensive multi-physical simulation model // 6th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF). – 19-21 June 2012. – pp. 1-4.
8. Косцов Э.Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов // *Автометрия*. – 2012. – Т.48. – №4. – С. 93-103.
9. 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.
10. 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.
11. Чемерис В.Т. Многоступенчатый индукционный ускоритель макростел: поиск технических решений // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2011. – № 3(40). – С. 45-56.
12. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – №6. – С. 20-27.
13. 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 // *Proceedings of the 13<sup>th</sup> cryogenics 2014 IIR international conference*. – Praha, Czech Republic. – 7-11 April, 2014. – Paper ID: 012. – pp. 268-275.

**REFERENCES:** 1. Walls W.A., Weldon W.F., Pratap S.P. et al. Application of electromagnetic guns to future naval platforms. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, vol.35, no.1, pp. 262-267. 2. 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 oborony – Modern information technologies in the field of security and defense*, 2010, no.1(7), pp. 22-28. 3. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter low frequency mechanical vibrations for monitoring, measuring and dispensing multifractional liquid products mass. *Electrical engineering*, 2013, no.8, pp. 48-52. 4. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, no.10, pp. 1098-1104. 5. 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. 6. 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. 7. Bissal A., Magnusson J., Salinas E. et al. On the design of ultra-fast electromechanical actuators: a comprehensive multi-physical simulation model. *6th Int. Conf. on Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF)*, 19-21 June 2012, pp. 1-4. 8. Koscov E.G. A microelectromechanical accelerator solid objects. *Avtometriya – Avtometriya*, 2012, vol.48, no.4, pp. 93-103. 9. 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. 10. 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. 11. Chemeris V.T. Multistage induction accelerator macrobodies: technical solutions. *Artilleriiskoe i strelkovoe vooruzhenie – Artillery and small arms*, 2011, no.3(40), pp. 45-56. 12. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Influence of ferromagnetic core parameters on induction-type dynamic motor efficiency. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.6, pp. 20-27. 13. 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. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> cryogenics 2014 IIR int. conf.* Praha, Czech Republic, 7-11 April, 2014, Paper ID: 012, pp. 268-275.

*Поступила (received) 15.05.2014*

*Болюх 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  
<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*

**Experimental study of ferromagnetic core parameters influence on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter.**

Experimental studies of ferromagnetic core parameters action on electromechanical characteristics of a linear induction-dynamic converter are conducted. An experimental installation is designed and built to determine the converter electromechanical parameters during its operation. A ferromagnetic core with four radial slots made allows regulating the height of the base and the outer shell. The core geometric parameters providing the highest speed of the armature are specified. Under certain parameters, the ferromagnetic core increases the converter efficiency up to 50%. The experimental results confirm the analytical studies within 6 % error.

*Key words – linear induction-dynamic converter, core, experimental studies, electromechanical characteristics.*