УДК 621.313:536.2.24:539.2

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НАРУЖНОГО ЭКРАНА ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукин
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Аннотация. *Разработана математическая модель линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа. Установлено влияние магнитного, электромагнитного и магнитно-электромагнитного наружного экрана на показатели преобразователя. С использованием критерия эффективности, учитывающего значения КПД, массогабаритных показателей и индукции магнитного поля рассеяния показано, что комбинированный экран позволяет повысить эффективность преобразователя. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что магнитный экран с четырьмя радиальными разрезами повышает среднюю скорость якоря до 50 %.*

Ключевые слова: *линейный импульсный электромеханический преобразователь индукционного типа, магнитный экран, электромагнитный экран, магнитно-электромагнитный экран.*

Введение

Одним из перспективных направлений развития современной электромеханики является разработка линейных импульсных электромеханических преобразователей (ЛИЭП), которые обеспечивают высокую скорость исполнительного элемента (ИЭ) на коротком активном участке, и/или создают мощные силовые импульсы при незначительном перемещении. ЛИЭП используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств. В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы, устройства для забивания свай и анкеров; в горной промышленности – бутобои, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – вибросейсмоисточники; в машиностроении – приводы станов холодной прокатки труб, прессы, молоты с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители, дозаторы, насосы и т.п. ЛИЭП применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на ударные нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. [1-4].

ЛИЭП индукционного типа обеспечивает бесконтактное перемещение электропроводящего якоря относительно неподвижного индуктора, возбуждаемого от импульсного источника, например, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) с электронной системой формирования токового импульса. Как правило, ЛИЭП индукционного типа работают без наружного экрана. Вследствие этого возникает проблема электромагнитной совместимости с близко расположенными электронными устройствами или биологическими объектами. Применение наружного экрана позволяет уменьшить магнитные поля рассеяния, однако при этом возрастает масса и происходит изменение рабочих показателей ЛИЭП [5, 6]. Поэтому выбор параметров наружного экрана должен осуществляться комплексно с учетом различных его показателей и критериев.

Целью статьи является многокритериальная оценка влияния параметров наружного экрана на эффективность ЛИЭП индукционного типа.

1. Математическая модель ЛИЭП индукционного типа

В ЛИЭП индукционного типа при возбуждении от ЕНЭ возникают быстропротекающие электромагнитные, тепловые и механические процессы, сопровождающие перемещение якоря с ИЭ относительно индуктора. Реализация математической модели ЛИЭП с использованием теории электрических цепей не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [7,8]. Исходя из этого, разработана математическая модель ЛИЭП, которая использует метод конечных элементов.

Для определения электромагнитных параметров ЛИЭП в цилиндрической системе координат $\{r, z\}$ рассчитывается векторный магнитный потенциал A с помощью уравнения:

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

© Болюх В.Ф., Кочерга А.И., Щукин И.С., 2016

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

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

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

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

Ток в индукторе определяется с использованием уравнения:

$$(R_e + R_1)i_1 + L_e\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C}\int i_1 dt + \frac{N_1}{s_A}\int_\Omega \frac{dA_l}{dt}d\Omega = U_0; \qquad (3)$$

где R_e – активное сопротивление внешней цепи индуктора; R_1 – активное сопротивление индуктора; i_1 – ток индуктора; L_e – индуктивность внешней цепи индуктора; U_0 – напряжение заряда ЕНЭ; C – емкость ЕНЭ; N_1 – число витков индуктора; s_A – площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком; A_l – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; Ω – объем индуктора.

Электродинамические усилия (ЭДУ), действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z = 0{,}5\oint_S \left[H(B\cdot n) + B(H\cdot n) - n(H\cdot B)\right]ds, \qquad (4)$$

где S – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря; n – единичный вектор нормали к поверхности якоря.

Импульс ЭДУ, определяющий интегральное силовое воздействие на якорь, описывается выражением:

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

Скорость v_z якоря с ИЭ вдоль оси z описывается уравнением [9]:

$$(m_2 + m_i)\frac{dv_z}{dt} = f_z(z) - k_P\Delta z(t) - k_T v_z(t) - $$
$$- 0{,}125\pi\gamma_a\beta_a D_{ex2}^2 v_z^2(t), \qquad (6)$$

где m_2 - масса якоря; m_i - масса ИЭ; k_P - коэффициент упругости буферного элемента, например пружины; k_T - коэффициент динамического сопротивления; γ_a - плотность воздуха; β_a - коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{ex2} – внешний диаметр якоря; Δz – величина перемещения якоря.

Уравнения (1) – (6) описывают электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях: $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$; $\Delta z(0)=0$; $v_z(0)=0$, где u_c – напряжение ЕНЭ. При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещения якоря относительно индуктора.

Для определения температуры индуктора и якоря ЛИЭП используем полевую модель, которая позволяет на каждом временном шаге учесть пространственное распределение температур в активных (индуктор и якорь) и пассивных элементах ЛИЭП [10]:

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

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

где n=1, 2 – индексы индуктора и якоря соответственно; m = 3, 4 – индексы каркаса индуктора и силового диска соответственно; $c(T)$ - усредненная удельная теплоемкость; γ - усредненная плотность материала; $j(t)$ - плотность тока активного элемента; $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности; k_z - коэффициент заполнения индуктора; $\rho(T)$ – удельное сопротивление активного элемента.

Эта система уравнений дополняется граничными условиями на поверхностях ξ. На охлаждаемых поверхностях используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

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

где α – коэффициент теплоотдачи; n – нормаль к поверхности.

На границе контакта индуктора с наружным экраном и якоря с ИЭ – граничные условия четвертого рода:

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

На оси симметрии ЛИЭП – граничное условие второго рода:

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

КПД ЛИЭП оценивается соотношением:

$$\eta = (m_2 + m_e)V_m^2 C^{-1} U_0^{-2}, \qquad (12)$$

где V_m – максимальная скорость якоря с ИЭ.

Решение системы (1) – (11) получено с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. При перемещении якоря используется «деформируемая» сетка. Для решения поставленной цели была разработана компьютерная модель ЛИЭП с наружным экраном в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [11]. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений.

2. ЛИЭП основного исполнения

Для решения поставленной цели используем ЛИЭП основного исполнения. Это ЛИЭП индукционного типа коаксиальной дисковой конфигурации без наружного экрана [9]. Данный ЛИЭП состоит из неподвижного индуктора, выполненного в виде многовитковой плотно намотанной медной обмотки. Параметры индуктора: внешний диаметр D_{ex1}=100 мм, внутренний диаметр D_{in1}=10 мм, высота H_1=10 мм, количество витков N_1=46 шт. медной шины сечением $a\times b$=1,8×4,8 мм^2. Якорь выполнен в виде медного диска с параметрами: внешний диаметр D_{ex2}=100 мм, внутренний диаметр D_{in2}=10 мм, высота H_2=3 мм. К якорю присоединен ИЭ массой m_e=0,275 кг. ЕНЭ имеет емкость C=2850 мкФ и зарядное напряжение U_0=400 В. Электронная система обеспечивает формирование полярного апериодического тока в индукторе, для чего последний шунтирован обратным диодом. Это позволяет использовать электролитические конденсаторы с повышенными удельными показателями.

Электромеханические процессы в ЛИЭП носят сложный пространственно-временной характер (рис.1). Плотность тока в индукторе j_1 во времени имеет форму полярного импульса. При этом в момент, когда напряжение ЕНЭ u_c достигает нулевого значения, изменяется скорость затухания тока индуктора, поскольку ток начинает протекать через обратный диод. Усредненная плотность тока в якоре j_2 через определенное время после начала работы (через 0,8 мс) меняет полярность. В результате этого ЭДУ f_z меняет направление воздействия на якорь с отталкивания на притяжение, что приводит к уменьшению импульса ЭДУ F_z и скорости якоря v_z. При этом перемещения якоря с ИЭ Δz начинается примерно через 0,2 мс и в течение 2 мс происходит практически линейно. На каждом временном шаге наблюдается существенная неравномерность распределения индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП. Наибольшая индукция магнитного поля возникает в области между индуктором и якорем. Однако это происходит только в определенные моменты времени, например, в момент действия максимальной ЭДУ. В последующем максимум индукции магнитного поля уменьшается и смещается в центральную часть индуктора.

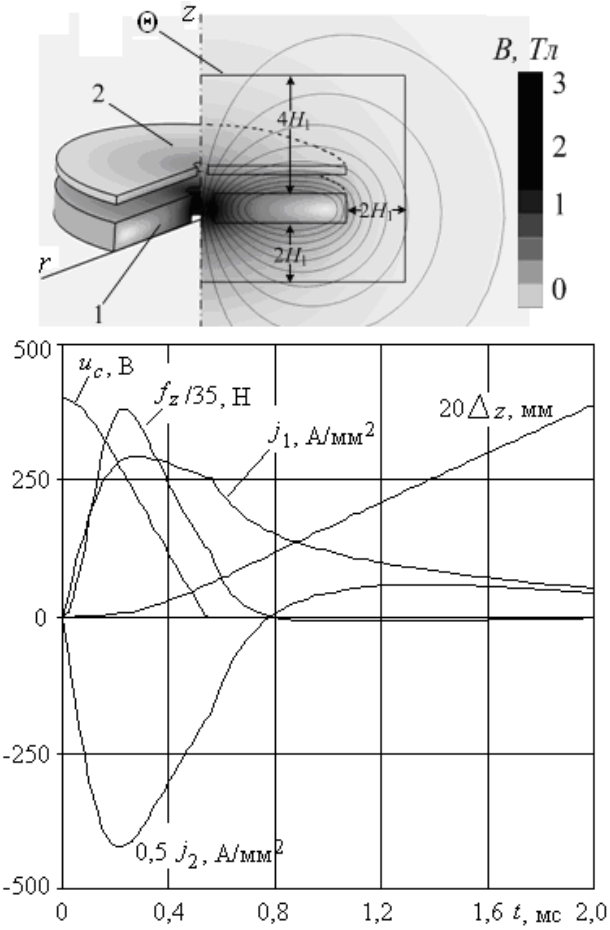


Рис. 1. Электромеханические характеристики и распределение магнитного поля ЛИЭП основного исполнения в момент t=1мс

На рис.1 также представлено распределение магнитного поля в момент t=1мс с указанием расположения границы фиксации поля рассеяния, где обозначено: 1 – неподвижный индуктор, 2 – электропроводящий якорь, Θ – условная граница измерения поля рассеяния, определяемая на расстоянии $2H_1$ от нижней и боковой и на расстоянии $4H_1$ от верхней стенок индуктора как усредненное значение индукции магнитного поля рассеяния B_{ex}.

3. Влияние параметров наружного экрана на показатели ЛИЭП

Рассмотрим работу ЛИЭП, у которого наружный экран выполнен магнитным (МЭ),

электромагнитным (ЭЭ) или комбинированным магнитно-электромагнитным (МЭЭ). ЭЭ выполнен из технической меди толщиной 1 мм. МЭ выполнен из ферромагнитного материала с магнитными свойствами стали ст.10, но обладающего нулевой электропроводностью, как магнитодиэлектрик. Рассмотрим влияние толщины стенок h МЭ и расстояния δ между ЭЭ и индуктором на основные показатели ЛИЭП. В качестве таких показателей используем поле рассеяния B_{ex}, КПД η, общую массу m, аксиальные G_z и радиальные G_r габариты ЛИЭП с наружным экраном. Геометрические размеры наружного экрана опишем безразмерными параметрами

$$\sigma_a = \frac{h}{H_1}; \quad \sigma_b = \frac{\delta}{H_1}. \qquad (13)$$

На рис.2,а показано распределение магнитного поля в момент максимума ЭДУ и зависимости показателей ЛИЭП от толщины стенок МЭ, а на рис.2,б аналогичные показатели в зависимости от расстояния между ЭЭ и индуктором. Магнитный экран усиливает, а электромагнитный экран ослабляет магнитное поле в пространстве между индуктором и якорем. Магнитное поле незначительно проникает за наружную поверхность магнитного экрана только при определенной толщине его стенок (σ_a>0,7-0,8). При использовании электромагнитного экрана магнитное поле также проникает за его наружную поверхность, уменьшаясь при удалении экрана от индуктора.

С увеличением толщины стенок МЭ происходит увеличение массы m ЛИЭП. При величине параметра σ_a=1,0 масса возрастает практически в 2,4 раза по сравнению с массой ЛИЭП основного исполнения. Однако при этом КПД повышается в 1,65 раз, а индукция магнитного поля рассеяния уменьшается более чем в 9 раз.

При увеличении расстояния между индуктором и ЭЭ происходит незначительное увеличение массы ЛИЭП, уменьшение индукции магнитного поля рассеяния и увеличение КПД. При величине параметра $\sigma_б$ =1,0 масса ЛИЭП увеличивается на 16 % по сравнению с массой ЛИЭП основного исполнения, что существенно меньше, чем при использовании МЭ. Однако при этом КПД уменьшается на 20 %, а индукция магнитного поля рассеяния уменьшается примерно в 3,8 раз.

Поскольку ЭЭ выполняется тонкостенным, то для него актуальной становится проблема механической устойчивости и деформации под действием ЭДУ.

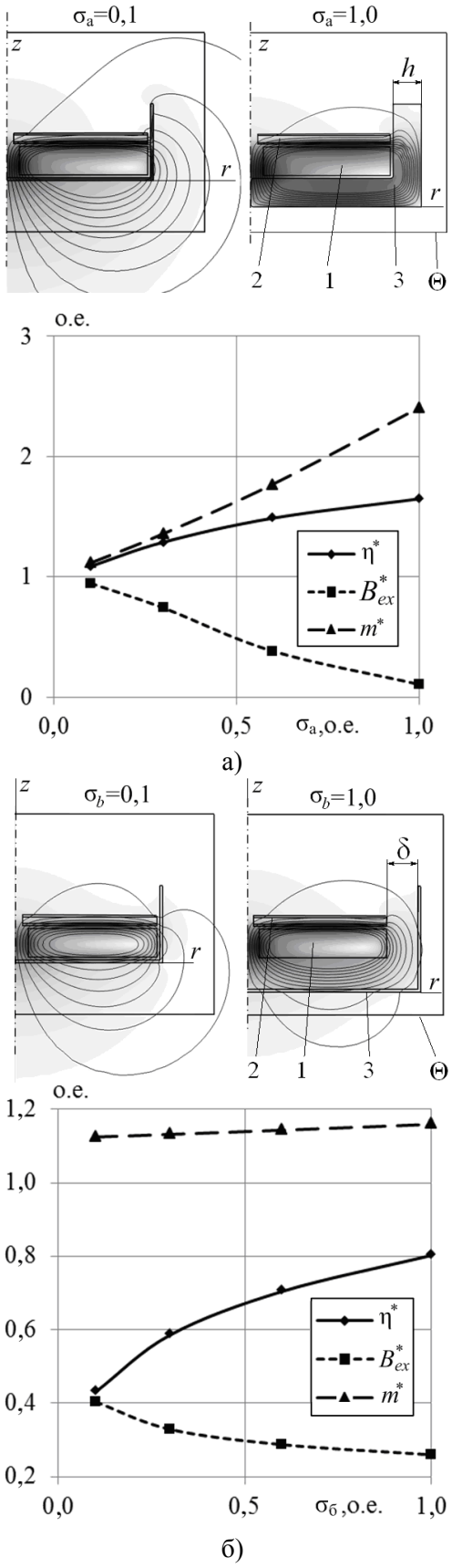


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля в момент максимума ЭДУ и зависимости показателей ЛИЭП от геометрических параметров МЭ (а) и ЭЭ (б): 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 –экран; Θ – граница расчета поля рассеяния

На рис.3 показано распределение удельных аксиальных ЭДУ f_z', действующих на нижнюю стенку ЭЭ, и распределение удельных радиальных f_r', действующих на боковую стенку ЭЭ. Указанные ЭДУ распределяются неравномерно по соответствующей поверхности с максимумом в области, расположенной напротив центра индуктора. Причем силы в аксиальном направлении f_z', действующие на нижнюю стенку ЭЭ, более чем на порядок превышают силы в радиальном направлении f_r', действующие на боковую стенку ЭЭ.

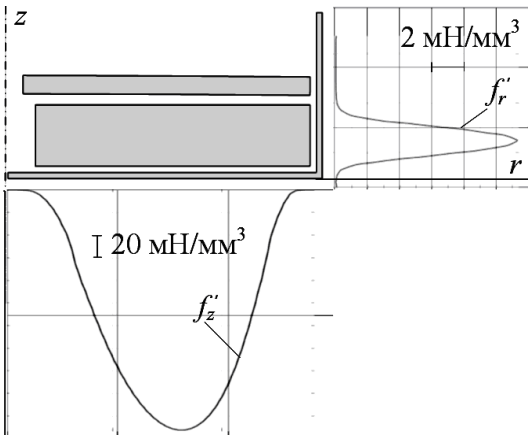


Рис.3. Распределение удельных ЭДУ действующих на стенки ЭЭ в момент времени t=0,4 мс при геометрическом параметре $\sigma_б$=0,1

Как показывают расчеты, каждый из рассмотренных экранов имеет свои преимущества и недостатки. Достоинство ЭЭ – незначительная масса и удовлетворительная эффективность экранирования магнитного поля, но только при удалении экрана от индуктора. А достоинство МЭ – повышение КПД ЛИЭП и высокая эффективность экранирования, но только при значительной толщине стенок.

Для того, чтобы обеспечить эффективное экранирование магнитного поля и высокий КПД при обеспечении минимальных массогабаритных показателей ЛИЭП рассмотрим комбинированный магнитно-электромагнитный экран (МЭЭ). Этот экран состоит из прилегающего к индуктору внутреннего МЭ, который охвачен наружным ЭЭ. В этом случае внутренний МЭ служит опорой для наружного тонкостенного (1 мм) ЭЭ, решая проблему его устойчивости от воздействия ЭДУ. На рис.4 показан ЛИЭП с комбинированным МЭЭ и пространственные распределения его плотности тока и магнитного поля.

Индукция магнитного поля рассеяния ЛИЭП с комбинированным экраном мала даже при небольшой толщине стенок внутреннего МЭ (σ_a=0,4). При увеличении толщины стенок внутреннего МЭ КПД и масса ЛИЭП увеличиваются.

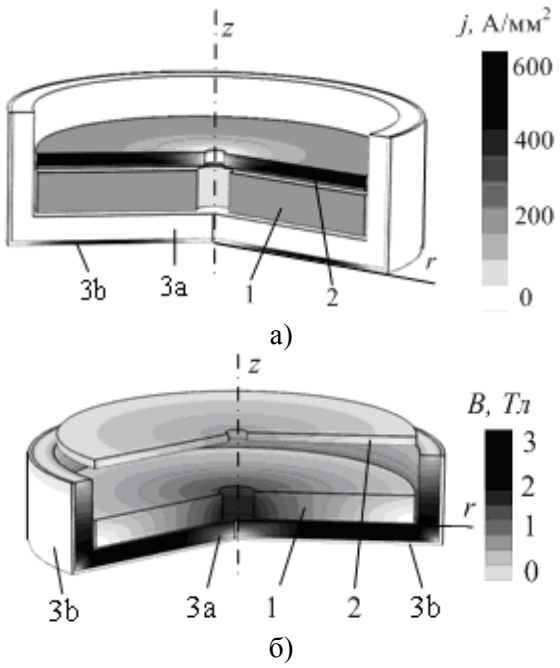


Рис.4. Распределение плотности тока в момент максимума ЭДУ (а) и индукции магнитного поля при t=2 мс (б) ЛИЭП с комбинированным экраном: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3a – внутренний МЭ; 3b – наружный ЭЭ

Однако индукция магнитного поля рассеяния в преобразователе с МЭЭ существенно меньше, чем при такой же толщине стенок МЭ (рис.5).

4. Многокритериальная оценка влияния параметров наружного экрана на показатели ЛИЭП

Задача выбора параметров наружного экрана является многокритериальной и должна учитывать различные показатели ЛИЭП: поле рассеяния B_{ex}, КПД η, общую массу m, аксиальные G_z и радиальные G_r габариты ЛИЭП. Исходя из этого, введем интегральный критерий эффективности наружного экрана ЛИЭП

$$K^* = \frac{\alpha_B}{B_{ex}^*} + \alpha_\eta \eta^* + \frac{\alpha_m}{m^*} + \frac{2\alpha_G}{G_z^* + G_r^*}, \qquad (14)$$

где α_j – весовые коэффициенты соответствующих параметров ЛИЭП, которые учитывают магнитное поле рассеяния α_B, КПД α_η, массу α_m и габариты α_G ЛИЭП. Указанные коэффициенты удовлетворяют соотношению:

$$\sum_{j=1}^{4} \alpha_j = 1. \qquad (15)$$

Рассматриваемые параметры ЛИЭП с наружным экраном представлены в относительном виде. Они нормированы относительно соответствующих параметров ЛИЭП основного исполнения и обозначены звездочкой сверху.

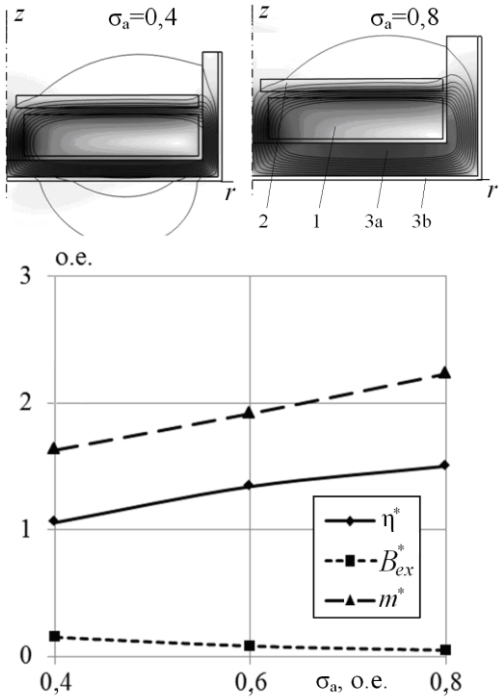


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля в момент максимума ЭДУ и зависимость относительных показателей ЛИЭП с комбинированным экраном от толщины стенок внутреннего МЭ: 1 – индуктор, 2 – якорь, 3а – внутренний МЭ, 3b – наружный ЭЭ

Рассмотрим четыре варианта I - IV стратегии оценки влияния наружного экрана на эффективность ЛИЭП, которые представлены в табл.1.

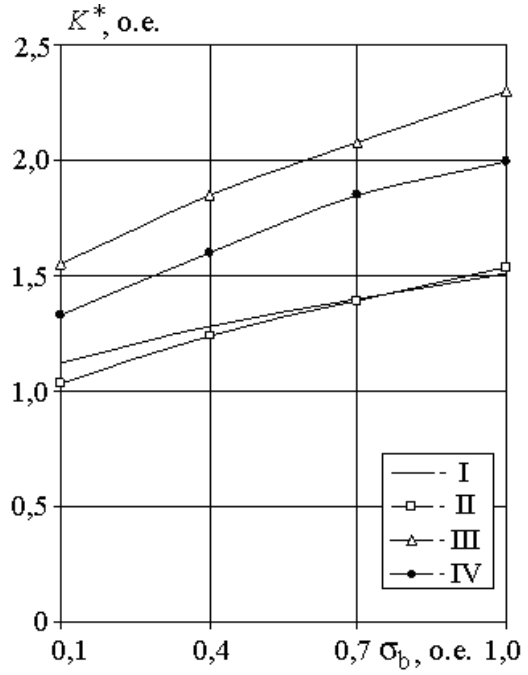
Таблица 1

Значения весовых коэффициентов для различных вариантов стратегии оценки наружного экрана ЛИЭП, о.е.

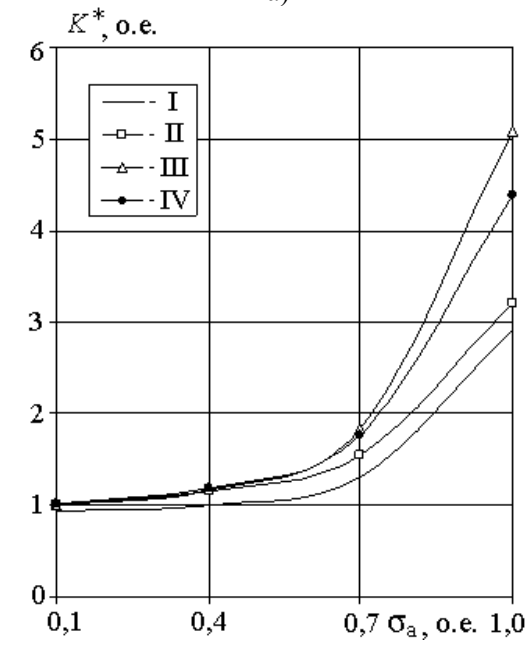
Вариант стратегии оценки	α_B	α_η	α_m	α_G
I	0.25	0.25	0.25	0.25
II	0.25	0.5	0.125	0.125
III	0.5	0.25	0,125	0.125
IV	0.4	0.4	0.1	0.1

Наличие ЭЭ при всех рассматриваемых стратегиях оценки увеличивает эффективность ЛИЭП (рис.6,а) С увеличением геометрического параметра σ_b критерий эффективности возрастает K^*, увеличиваясь в 1,5 – 2,25 раза при σ_b=1. Наибольшую эффективность показывает вариант стратегии III, при котором наивысший приоритет отдан магнитному полю рассеяния. А наименьшую эффективность демонстрируют варианты стратегии I с одинаковым приоритетом и вариант II с наивысшим приоритетом КПД.

При использовании МЭ наибольшую эффективность показывает вариант стратегии III, а наименьшую вариант I (рис.6,б). С увеличением геометрического параметра σ_a критерий эффективности МЭ возрастает K^*, повышаясь в 3 – 5 раз при σ_b=1. Это показывает большую эффективность МЭ по сравнению с ЭЭ, но только, если его геометрический параметр σ_a>0,75.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость критериев эффективности от геометрических параметров ЭЭ (а) и МЭ (б) при различных вариантах стратегии оценки

Однако наибольшую эффективность демонстрирует комбинированный МЭЭ (рис.7). Даже при относительно тонкостенной магнитной части (σ_a<0,3-0,4) эффективность ЛИЭП с комбинированным экраном выше, чем при использовании

магнитного экрана с такой же толщиной стенок или электромагнитного экрана, расположенного на расстоянии от индуктора с аналогичными габаритными размерами. Если же магнитная часть комбинированного экрана выполнена утолщенной (σ_a=0,7-0,8), то эффективность ЛИЭП повышается в 2-3 раза по сравнению с ЛИЭП, содержащего или МЭ, или ЭЭ с аналогичными габаритами.

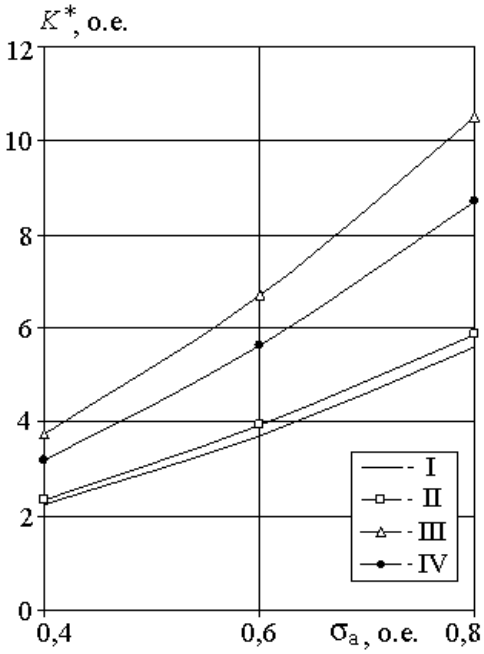
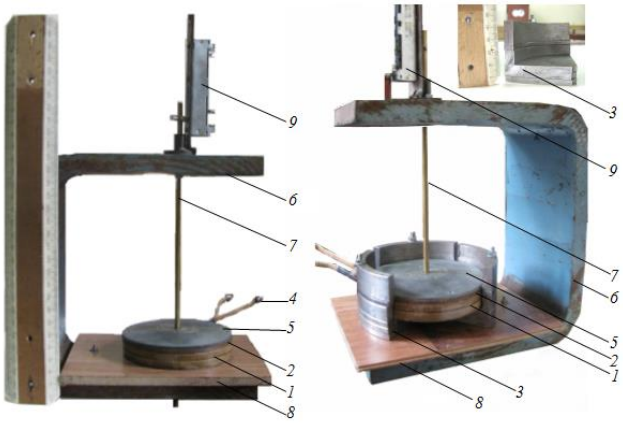


Рис. 7. Зависимость критерия эффективности комбинированного экрана от параметра σ_a

Таким образом, комбинированный магнитно-электромагнитный экран, по сравнению с МЭ и ЭЭ, позволяет существенно повысить эффективность ЛИЭП, прежде всего за счет уменьшения индукции магнитного поля рассеяния.

5. Экспериментальные исследования влияния геометрических параметров магнитного экрана на показатели ЛИЭП

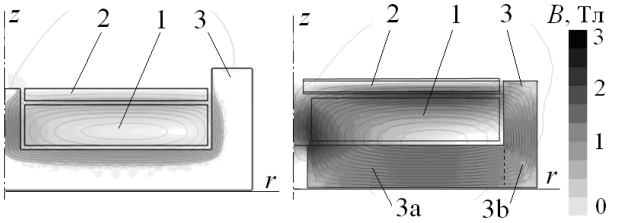
Для исследования влияния МЭ на показатели ЛИЭП была разработана экспериментальная установка (рис. 8) [12]. Индуктор 1 состоит из многовитковой обмотки (с параметрами N_1 = 46, H_1 = 10 мм, D_{in1} = 6 мм, D_{ex1} = 100 мм), намотанной из медной шины (сечением S_1 = 1,8×4,8 мм^2) в два слоя и выполненной монолитной при помощи пропитки эпоксидной смолой. Дисковый якорь 2 выполнен из технической меди (с параметрами D_{ex2}/D_{ex1} = 1, D_{in2}/D_{ex1} = 0,06, H_2/H_1 = 0,3). Обмотка индуктора посредством токовводов 4 соединяется с ЕНЭ (C = 1660 мкФ, U_0 = 310В) и коаксиально устанавливается в составной МЭ *3*, выполненный с четырьмя радиальными разрезами. 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 неметаллическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 9. К верхней стенке каркаса крепится демпфирующая пружина. Направляющий стержень соединен с силовым диском и подвижным контактом датчика перемещений.



а) б)

Рис. 8. Общий вид экспериментальной установки без (а) и с (б) МЭ

При выполнении МЭ из стали ст.10 магнитный поток практически не проникает в его массив из-за индуцированных вихревых токов (рис.9,а). Если этот экран выполнить из магнитодиэлектрика, то его эффективность существенно вырастет (рис.9,б). Однако выполнение такого экрана сопряжено с рядом технических трудностей. Исходя из этого, в экспериментальных исследованиях использовался МЭ, выполненный из стали Ст.10 с четырьмя радиальными разрезами, препятствующими протеканию индуцированного вихревого тока (рис.10,а).



а) б)

Рис. 9. Распределение индукции магнитного поля в момент максимума ЭДУ при использовании МЭ из стали (а) и магнитодиэлектрика (б)

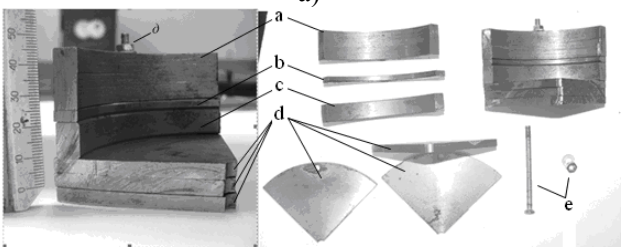
Каждая четверть МЭ состоит из наружной обечайки, формируемой тремя элементами, которые обозначены буквами *a*, *b*, *c* (рис. 10,б).

Высоты дискового основания H_{3a} и наружной обечайки H_{3b} МЭ характеризуются безразмерными геометрическими параметрами

$$\chi = H_{3a} H_1^{-1},\ \varepsilon = H_{3b} H_1^{-1}. \qquad (16)$$

Дисковое основание каждой четверти МЭ формируется тремя одинаковыми элементами *d*, каждый из которых характеризуется геометрическим параметром χ = 0,5. Все элементы фиксируются между собой при помощи крепежных элементов *e*.

а)



б)

Рис. 10. Общий вид ЛИЭП с МЭ (а) и элементы четверти части МЭ (б)

Были проведены экспериментальные исследования влияния геометрии МЭ на показатели ЛИЭП, у которого якорь соединен с силовым стальным диском. В табл. 2 представлены варианты ЛИЭП с МЭ, имеющие различные геометрические параметры χ и ε.

Таблица 2

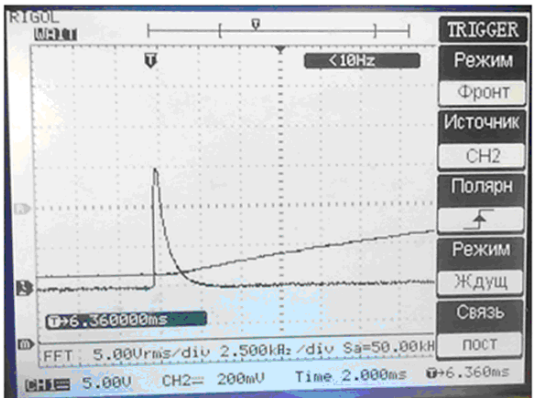
Результаты испытаний ЛИЭП

Вариант исполнения ЛИЭП	χ, о,е,	ε, о,е,	$t_{ЭДУm}$, мс	t^*, мс	j_{1m}, кА	V_c, м/с	
						Эксперимент	Расчет
0	0,0	0,0	0,205	2,0	1,813	3,0	3,2
1	1,0	0,0	0,195	3,0	1,760	3,4	4,05
2	1,0	1,0	0,190	3,0	1,713	4,2	4,3
3	1,0	1,4	0,185	2,6	1,706	4,4	4,4
4	1,0	2,2	0,190	2,5	1,766	4,3	4,4
5	0,5	1,4	0,192	3,0	1,760	3,8	4,2
6	1,5	1,4	0,195	3,0	1,920	4,5	4,4

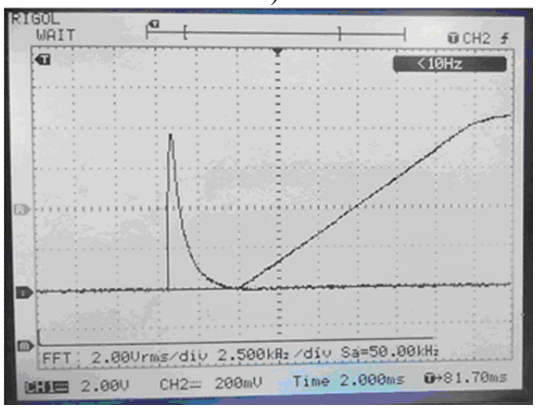
В табл.2 представлены измеренные значения: $t_{ЭДУm}$ – время максимума ЭДУ; t^* – время положительного воздействия ЭДУ на якорь; j_{1m} – максимальное значение плотности тока в индукторе. Исполнение 0 соответствует ЛИЭП основного исполнения без МЭ.

При помощи электронного осциллографа одновременно измерялись ток в обмотке индуктора i_1 и перемещение якоря с силовым диском Δz. На рис. 11 показаны осциллограммы указанных величин для ЛИЭП без ФЭ (вариант 0), для ЛИЭП, у которого МЭ содержит дисковое основание и наружную обечайку (вариант 3).

Представленные в табл. 2 результаты показывают, что применение МЭ повышает среднюю скорость якоря V_c за время рабочего цикла на 30-50 %. Расчетные результаты с точностью до 10 % согласуются с полученными экспериментальными данными. Более низкие значения средней скорости V_c, полученные при экспериментальных исследованиях, по сравнению с расчетными, объясняются наличием трения между направляющим стержнем и *C*-образным каркасом, отличиями между реальным и заложенным в расчет сопротивлением контактов и проводов электрической схемы.



а)



б)

Рис. 11. Осциллограммы тока индуктора и перемещения якоря вариантов исполнения ЛИЭП: 0 (а) и 3 (б)

Таким образом, проведенные экспериментальные и теоретические исследования, которые согласуются между собой с точностью до 6 %, показали, что МЭ с четырьмя радиальными разрезами повышает эффективность ЛИЭП. Установлено, что при определенных геометрических параметрах МЭ, помимо уменьшения магнитных полей рассеяния, обеспечивает повышение средней скорости якоря до 50 %.

Заключение

Разработана математическая модель ЛИЭП индукционного типа, которая описывает взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и механические процессы, имеющие место при быстром перемещении якоря относительно индуктора. Компьютерная модель ЛИЭП реализована в программном пакете *Comsol Multiphysics*, которая адаптивно изменяет расчетную сетку при перемещении якоря.

Установлено влияние магнитного, электромагнитного и комбинированного магнитно-электромагнитного наружного экрана на основные показатели ЛИЭП.

Показано, что относительно легкий электромагнитный экран уменьшает КПД ЛИЭП, в то время как относительно тяжелый магнитный экран его увеличивает. Индукция магнитного поля рассеяния уменьшается, а КПД повышается как при удалении электромагнитного экрана от индуктора, так и при увеличении толщины стенок магнитного экрана.

Для оценки влияния параметров наружного экрана использован критерий эффективности, учитывающий значения КПД, массогабаритных показателей и индукции магнитного поля рассеяния ЛИЭП. Показано, что комбинированный магнитно-электромагнитный экран позволяет существенно повысить эффективность ЛИЭП, прежде всего за счет уменьшения индукции магнитного поля рассеяния по сравнению с магнитным или электромагнитным экранами.

Экспериментальные и теоретические исследования, которые согласуются между собой с точностью до 6 %, показали, что МЭ с четырьмя радиальными разрезами повышает среднюю скорость якоря до 50 %.

Список литературы

1. Balikci, A. Improved performance of linear induction launchers [Text] / A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41. – № 1. – P. 171–75.
2. Young-woo, J. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD [Text] / J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won // Proceeding of the conf. "22-th international conference on electricity distribution". – 10–13 June 2013. – Stockholm, Paper 608.
3. Bolyukh, V. F. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter [Text] / V. F. Bolyukh, A. I. Vinnichenko // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 56. – № 10. – P. 1098–1104.
4. Bissal, A. Comparison of two ultra-fast actuator concept [Text] / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48. – № 11. – P. 3315–3318.
5. Bolyukh, V. F. Influence of external electromagnetic screen on efficiency of impact electromechanical converter of disk configuration [Text] / V. F. Bolyukh, M. A. Rassokha // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81. № 10. – P. 542–549.
6. Bolyukh, V. F. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter [Text] / V. F. Bo-lyukh, S. V. Oleksenko // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – № 7. – P. 425–431.
7. Li, W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method [Text] / W. Li, C .S. Koh // 14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation. – 2010. – P. 1–9.
8. Lim, D. K. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method [Text] / D. K. Lim, D. K. Woo, I. W. Kim et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49. – № 12. – P. 5749–5755.
9. Bolyukh, V. F. High-efficiency impact electromechanical converter [Text] / V. F. Bolyukh, V. F. Luchuk, M. A. Rassokha et al. // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82. – № 2. – P. 104–110.
10. Bolyukh, V. F. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode [Text] / V. F. Bolyukh, I. S. Shchukin // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – № 10. – P. 571–576.
11. Comsol Multiphysics modeling and simulation software [электронный ресурс] // режим доступу: http://www.comsol.com.
12. Болюх, В. Ф. Особенности экспериментальных исследований линейных электромеханических преобразователей ударного действия [Текст] / В. Ф. Болюх, С. В. Олексенко, И. С. Щукин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2016. – № 22 (98). – С. 116–121.

References

1. Balikci, A., Zabar Z., Birenbaum L., et al. (2005), "Improved performance of linear induction launchers", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 171– 75.
2. Young-woo, J., Hyun-wook, L., Seok-won, L. (2013), "High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD", *Proceeding of the conf.* "22-th international conference on electricity distribution",10–13 June, Stockholm, Paper 608.
3. Bolyukh, V.F., Vinnichenko,A.I. (2014), "Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter", *Measurement Techniques*, January, vol. 56, no. 10, pp. 1098–1104.
4. Bissal, A., Magnusson, J., Engdahl, G. (2012), "Comparison of two ultra-fast actuator concept", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3315–3318.
5. Bolyukh, V. F., Rassokha, M. A. (2010), "Influence of external electromagnetic screen on efficiency of impact electromechanical converter of disk configuration", *Russian Electrical Engineering*, vol. 81, no. 10, pp. 542–549.
6. Bolyukh, V. F., Oleksenko, S. V. (2015), "The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction–dynamic converter", *Russian Electrical Engineering*, vol. 86, no. 7, pp. 425–431.
7. Li, W., Koh, C. S. (2010), "Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method", *14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation*, pp. 1–9.
8. Lim, D. K., Woo, D. K., Kim, I. W. et al. (2013), "Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no.12, pp. 5749–5755.
9. Bolyukh, V. F., Luchuk, V. F., Rassokha, M. A. et al. (2011), "High-efficiency impact electromechanical converter", *Russian Electrical Engineering*, vol. 82, no. 2, pp. 104–110.
10. Bolyukh, V.F., Shchukin, I.S. (2012), "The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode", *Russian Electrical Engineering*, vol. 83, no. 10, pp. 571–576.
11. "Comsol Multiphysics modeling and simulation software", avaliable at: http://www.comsol.com.
12. Bolyukh, V. F., Oleksenko, S. V., Shchukin, I. S. (2016), "Features of the experimental study of linear electromechanical converter of impact action", ["Osobennosti eksperimental'nykh issledovaniy lineynykh elektromekhanicheskikh preobra-zovateley udarnogo deystviya"], *Electrotechnic and Computer Systems* no. 22 (98), pp. 116–121.

MULTICRITERIAL SELECTION OF PARAMETERS OF THE EXTERNAL SCREEN OF A LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL TRANSDUCER

V. F. Bolyukh , A. I. Kocherga, I. S. Shchukin

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Abstract. *Subject of research - linear pulse electromechanical transducer (LPET), operating as an accelerator and shock-power devices. Subject – study of the influence of parameters on the external screen LPET. The research method - simultaneous measurement of high-speed electrical and mechanical processes in LPET. The aim of the article is a multi-criteria evaluation of the effect of outdoor screen parameters on the efficiency of the LPET induction type. A mathematical model of a induction type LPET. The mathematical model describes the interconnected electromagnetic, thermal and mechanical processes, manifested by rapid movement of the armature relative to the inductor. It was found the influence of magnetic, electromagnetic and combined magnetic-electromagnetic outer screen on LPET indicators. It has been shown that relatively light electromagnetic shield reduces efficiency LPET, while the relatively heavy magnetic shield increases it. The magnetic stray field is reduced, and the efficiency increases when moving away from the screen electromagnetic inductor, and with increasing thickness of the magnetic shield walls. To evaluate the effect of external display settings used the criterion of effectiveness, considering its relative values of efficiency, weight, and stray fields. It has been shown that the combined magnetic-electromagnetic screen allows you to significantly increase the efficiency LPET, primarily by reducing the stray magnetic field compared to magnetic or electromagnetic screens. Experimental and theoretical studies are consistent with each other, up to 6 %, showed that the magnetic screen with four radial slits increases the average speed of the armature 50 %.*

Key words: *linear pulse electromechanical transducer, magnetic screen, electromagnetic screen, combined magnetic-electromagnetic screen, criterion of effectiveness, experimental and theoretical studies*

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО ЕКРАНУ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, І. С. Щукін
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. *Розроблена математична модель лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача індукційного типу. Встановлено вплив магнітного, електромагнітного та магнітно-електромагнітного зовнішнього екрану на показники перетворювача. З використанням критерію ефективності, що враховує значення ККД, масогабаритних показників та індукції магнітного поля розсіювання показано, що комбінований екран дозволяє підвищити ефективність перетворювача. Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що магнітний екран з чотирма радіальними розрізами підвищує середню швидкість якоря до 50 %.*

Ключові слова: *лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач індукційного типу, магнітний екран, електромагнітний екран, магнітно-електромагнітний екран.*

Получено 25.03.2017

Болюх Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Ул. Кирпичева, 2, Харьков, Украина, 61002, E-mail: vfbolyukh@gmail.com, тел. +38-057-70-76-427.

Vladimir Bolyukh, Dr. of Science, Professor of the Department "General Electrical Engineering", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ul. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002

ORCID ID: 0000-0001-9115-7828

Кочерга Александр Иванович, аспирант кафедры «Общая электротехника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Ул. Кирпичева, 2, Харков, Украина, 61002, E-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com, тел. +38-057-70-76-427.

Aleksandr Kocherga, graduate studentof of the Department "General Electrical Engineering", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ul. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002

ORCID ID: 0000-0002-0028-9532

Щукин Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Ул. Кирпичева, 2, Харков, Украина, 61002, E-mail: dir.960@gmail.com, тел. +38-057-714-09-43

Igor Shchukin, Ph.D., associate professor of the Department "Electric machines", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ul. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002

ORCID ID: 0000-0001-7982-8633