

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, А. П. Месенко, И. С. Щукин

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

**Аннотация.** Установлены особенности протекания электромагнитных процессов и определены электрические, магнитные и силовые показатели линейных импульсных электромеханических преобразователей комбинированного типа, включающих катушечный, ферромагнитный и один или два электропроводящий якоря. Выполнен сравнительный анализ различных преобразователей комбинированного типа с использованием критерия эффективности, который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые показатели.

**Ключевые слова:** линейный импульсный электромеханический преобразователь, преобразователь комбинированного типа, математическая модель, электропроводящий якорь, катушечный якорь, ферромагнитный якорь.

### Введение

Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) широко используются во многих отраслях науки и техники в качестве устройств ударно-силового действия [1 - 3].

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 – прессы с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки. ЛИЭП ударно-силового действия применяются в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. [4, 5].

Особенностью ЛИЭП ударно-силового действия является то, что они работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия. Основными типами ЛИЭП, которые находят наибольшее применение в различных устройствах и системах, являются индукционный, электродинамический и электромагнитный [3, 6]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от

импульсного источника, как правило емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). Наиболее широко применяются следующие ЛИЭП основных типов: индукционный, электродинамический и электромагнитный. Отличие в основных типах ЛИЭП состоит в конструкции якоря, который обеспечивает передачу силового воздействия на ударный исполнительный элемент.

В ЛИЭП индукционного типа электропроводящий якорь (ЭЯ) представляет собой относительно тонкий диск, в котором индуцируются вихревые токи от индуктора, вследствие чего между ними возникает электродинамическая сила отталкивания.

В ЛИЭП электродинамического типа катушечный якорь (КЯ) представляет собой многовитковую обмотку, которая последовательно или параллельно соединяется с индуктором. Направление токов в КЯ и индукторе таково, что между ними возникает электродинамическая сила отталкивания.

В ЛИЭП электромагнитного типа ферромагнитный якорь (ФЯ) представляет собой относительно толстый диск, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора. Для уменьшения вихревых токов ФЯ целесообразно выполнять с радиальными разрезами.

Основные типы ЛИЭП обеспечивают различные силовые показатели, создавая различные индукции магнитных полей рассеяния в окружающее пространство, что сказывается на их экологических показателях. Они имеют различные величины тока возбуждения индуктора, что важно для электронной системы возбуждения. Однако эффективность ЛИЭП основных типов недостаточно высока [7].

© Болюх В. Ф., Кочерга А. И., Месенко А. П., Щукин И. С., 2018

Одним из путей совершенствования ударно-силовых устройств является разработка ЛИЭП комбинированного типа, объединяющих якоря преобразователей основных типов [8]. В коаксиальном ЛИЭП комбинированного типа ФЯ располагается с одной стороны неподвижного индуктора, а ЭЯ и КЯ – с противоположной стороны. В таком случае можно обеспечить однонаправленное действие электродинамических (ЭДУ) и электромагнитных (ЭМУ) усилий на объект воздействия. При этом возникает вопрос об эффективности различных ЛИЭП комбинированного типа при учете различных показателей их работы.

Целью статьи является оценка эффективности различных ЛИЭП комбинированного типа при учете электрических, силовых и экологических показателей.

### 1. Математическая модель ЛИЭП

В ЛИЭП ударно-силового действия при возбуждении индуктора от ЕНЭ возникают быстропротекающие электромагнитные и механические процессы. Реализация математической модели ЛИЭП с использованием теории электрических цепей не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [9, 10]. Исходя из этого, разработана математическая модель ЛИЭП, которая основана на методе конечных элементов.

Поскольку рассматриваемые ЛИЭП имеют осевую симметрию, то целесообразно использовать двухмерную математическую модель с пространственно-распределенными параметрами [11]. Для определения электромагнитных параметров ЛИЭП в цилиндрической системе координат  $\{r, z\}$  рассчитывается векторный магнитный потенциал  $A$  из уравнения:

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

где  $\mu(B)$  – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля  $B$  для ФЯ;  $\sigma_m$  – электропроводность  $m$ -го активного элемента;  $j_m$  – плотность тока в  $m$ -ом активном элементе;  $m=1$  (1i), 2, 1a – индексы индуктора, ЭЯ и КЯ соответственно;  $k=3$  – индекс ФЯ.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r}; \quad B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничным условием системы выступает уравнение:

$$n \times A = 0, \quad (3)$$

где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Для ФЯ используется нелинейная кривая намагничивания  $B = f(H)$ . Ток в индукторе  $i_1$  (без КЯ) описывается системой уравнений:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{dt} dv = 0;$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0, \quad (4)$$

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

Аксиальные ЭДУ, действующие на КЯ и ЭЯ, и ЭМУ, действующие на ФЯ, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря.

Импульс аксиальных ЭДУ и/или ЭМУ, определяющий интегральное силовое воздействие на соответствующий якорь, описывается выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (6)$$

Для определения температуры активных элементов, влияющей на их активные сопротивления, используется полевая модель, которая позволяет на каждом временном шаге учитывать пространственные распределения температур в активных элементах ЛИЭП [12]:

$$c_m(T) \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) + j_m^2 k_z D_m(T);$$

$$c_k(T) \gamma_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k(T) \left( \frac{\partial^2 T_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_k}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

где  $c(T)$  – усредненная удельная теплоемкость;  $\gamma$  – усредненная плотность материала;  $j_m$  – плотность тока  $m$ -го элемента;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $k_z$  – коэффициент заполнения;

$\rho_m(T)$  – удельное сопротивление  $m$ -го элемента.

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

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda}(T_\xi - T_0), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $n$  – нормаль к поверхности.

На границе контакта элементов ЛИЭП – граничные условия четвертого рода:

$$T_m(r_\xi, z_\xi, t) = T_k(r_\xi, z_\xi, t); \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m\xi}}{\partial n} = \lambda_k \frac{\partial T_{k\xi}}{\partial n}. \quad (9)$$

На оси симметрии ЛИЭП – граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_\xi = 0. \quad (10)$$

Уравнения (1) – (10) описывают электромагнитные и электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях:  $u_c(0)=U_0$ ;  $i_1(0)=0$ , где  $u_c$  – напряжение ЕНЭ.

При расчете предполагается отсутствие механических перемещений и деформаций элементов, строго аксиальное расположение якорей относительно индуктора и отсутствие вихревых токов в ФЯ.

Решение системы уравнений (1) – (10) получаем с использованием метода конечных элементов при интегрировании по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира при интегрировании по времени. Для решения поставленной задачи была разработана компьютерная модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [13]. Расчетный шаг по времени автоматически варьировался в зависимости от условий сходимости и показателей погрешности полученных решений. Решение системы уравнений производилось методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

## 2. Исходные параметры ЛИЭП комбинированного типа

ЛИЭП комбинированного типа строятся на базе сочетания ряда якорей ЛИЭП основных типов. Рассмотрим ЛИЭП коаксиальной конфигурации, элементы которых имеют следующие параметры. Неподвижный индуктор содержит  $N_1=46$  витков медной шины сечением  $a \times b=1,8 \times 4,8$  мм<sup>2</sup> и выполнен с наружным диаметром  $D_{ex1}=100$  мм, внутренним диаметром  $D_{in1}=10$  мм и высотой  $H_1=10$  мм. ЭЯ выполнен в виде медного диска с наружным диаметром  $D_{ex2}=100$  мм, внутренним диаметром  $D_{in2}=10$  мм и высотой  $H_2=3$  мм. КЯ выполнен аналогично индуктору. Диск ФЯ выполнен из стали Ст10 с наружным диаметром  $D_{ex1}=100$  мм и высотой  $H_1=10$  мм. Индуктор возбуждается от ЕНЭ емкостью  $C=3000$  мкФ и напряжением  $U_0=400$  В полярным апериодическим импульсом (индуктор шунтирован обратным диодом) [5].

ЛИЭП комбинированного типа содержит неподвижный индуктор 1, ЭЯ 2, ФЯ 3, ударный исполнительный элемент 4, который воздействует на объект 5 (рис.1 – рис. 6). ФЯ 3 связан с исполнительным элементом при помощи силового согласующего элемента 6. Фиксаторы 7 удерживают объект 5 при ударно-силовом воздействии.

Для питания КЯ и индуктора используется один и тот же ЕНЭ. КЯ 1а может последовательно или параллельно соединяться с индуктором 1i, например, при помощи подвижных контактов.

## 3. Анализ показателей ЛИЭП комбинированного типа

Рассмотрим электрические, магнитные и силовые показатели ЛИЭП комбинированного типа. Распределение магнитного поля и плотности тока будем рассматривать в момент максимума тока в индукторе.

Особенность этих преобразователей состоит в наличии КЯ, ФЯ и одного или двух ЭЯ. При наличии двух ЭЯ они располагаются с противоположных сторон индуктора, так чтобы посредством подвижных фиксаторов 7 обеспечить дополнительное силовое воздействие на объект 5. ФЯ 7 располагается со стороны индуктора 1, противоположной направлению силового воздействия на объект 5.

**ЛИЭП с ЭЯ и ФЯ** (рис. 1). В данном преобразователе изменение плотности тока в индукторе  $j_1$  во времени происходит в форме апериодического полярного импульса с амплитудой 156 А/мм<sup>2</sup>. Усредненная по сечению плотность тока в ЭЯ  $j_2$  также имеет форму импульса с амплиту-

дой  $385 \text{ А/мм}^2$ . Однако этот импульс через 2 мс меняет полярность.

В этом преобразователе наибольшая плотность тока по сечению ЭЯ имеет место в средней части, обращенной к индуктору.

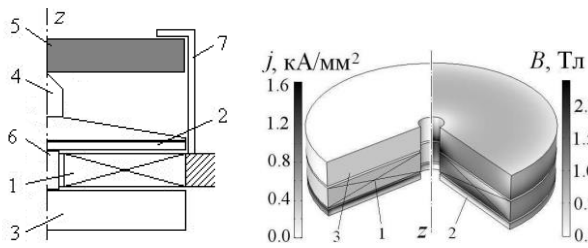


Рис. 1. Распределения плотности тока  $j$  и индукции магнитного поля  $B$  в ЛИЭП с ЭЯ и ФЯ

Максимальные значения индукции магнитного поля  $B$  возникают в средней части зазора между индуктором и ЭЯ. Кроме того значительная индукция магнитного поля наблюдается во внутренней зоне индуктора.

В начальный момент времени на ЭЯ со стороны индуктора действуют ЭДУ отталкивания  $f_2$ , максимальная величина которых составляет  $f_{2m}=8,77 \text{ кН}$ . Причем эти усилия через 2 мс меняют направление воздействия. ЭМУ притяжения  $f_e$ , действующие на ФЯ со стороны индуктора, все время сохраняют направление воздействия. Однако их максимальная величина существенно меньше и составляет  $f_{em}=1,54 \text{ кН}$ . Затухание ЭМУ  $f_e$  происходит более медленно, чем ЭДУ  $f_2$ .

К концу рабочего процесса импульс ЭДУ составляет  $F_2=5,42 \text{ Н}\cdot\text{с}$ , а импульс ЭМУ –  $F_e=3,49 \text{ Н}\cdot\text{с}$ . Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия (суммарная амплитуда ЭДУ и ЭМУ) в 1,21 раза больше, чем ЭДУ в ЛИЭП индукционного типа и в 5,65 раз больше, чем ЭМУ в ЛИЭП электромагнитного типа. Что касается импульса результирующих усилий, то здесь ситуация несколько иная. В данном ЛИЭП комбинированного типа импульс усилий в 1,82 раза больше, чем импульс ЭДУ в ЛИЭП индукционного типа и в 1,22 раза больше, чем импульс ЭМУ в ЛИЭП электромагнитного типа. Это свидетельствует о перспективности данного ЛИЭП для ударно силового воздействия.

**ЛИЭП с КЯ и ФЯ** (рис. 2). В этом преобразователе комбинированного типа индуктор  $1i$  взаимодействует с КЯ  $1a$  и с ФЯ 3. Рассмотрим ЛИЭП с параллельным соединением индуктора  $1i$  и КЯ  $1a$ .

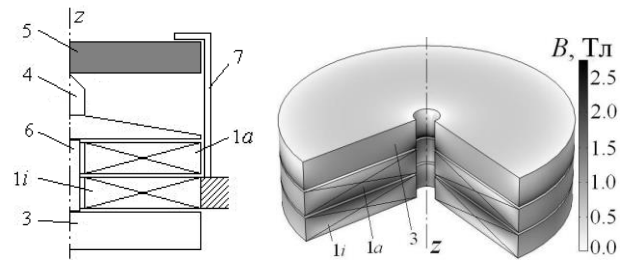


Рис. 2. Распределения плотности тока  $j$  и индукции магнитного поля  $B$  в ЛИЭП с КЯ и ФЯ

Изменения плотностей токов в индукторе  $j_{1i}$  и в КЯ  $j_{1a}$  во времени происходит в форме аперидического полярного импульса с коротким передним и длинным задним фронтами. При этом максимальные значения плотностей токов в индукторе и КЯ различны: в индукторе  $j_{lim}=177,7 \text{ А/мм}^2$ , а в КЯ  $j_{lam}=204,7 \text{ А/мм}^2$ . Меньшее значение плотности тока в индукторе можно объяснить магнитным воздействием на него со стороны смежно расположенного ФЯ 3.

Максимальные значения индукции магнитного поля  $B$  возникают в средней части зазора между индуктором и КЯ. Причем эта величина индукции превышает аналогичную величину в ЛИЭП комбинированного типа с ЭЯ и ФЯ.

Электромагнитные  $f_e$  и электродинамические  $f_{1a}$  усилия во времени изменяются таким же образом, как и указанные выше плотности токов. На КЯ со стороны индуктора действуют ЭДУ отталкивания  $f_{1a}$ , максимальная величина которых составляет  $f_{1am}=13,03 \text{ кН}$ . ЭМУ притяжения  $f_e$ , действующие на ФЯ со стороны индуктора, значительно меньше и их максимальная величина составляет лишь  $f_{em}=1,19 \text{ кН}$ .

К концу рабочего процесса импульс ЭДУ составляет  $F_{1a}=12,25 \text{ Н}\cdot\text{с}$ , а импульс ЭМУ –  $F_e=1,2 \text{ Н}\cdot\text{с}$ . Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,1 раза больше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и в 7,8 раз больше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. В данном ЛИЭП комбинированного типа импульс результирующих усилий в 1,21 раза больше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и почти в 2 раза больше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

**ЛИЭП с ЭЯ, КЯ и ФЯ** (рис. 3). В этом преобразователе индуктор  $1i$  взаимодействует с ФЯ 3 и с КЯ  $1a$ , который, в свою очередь, взаимодействует с ЭЯ 2. Индуктор и КЯ соединены параллельно.

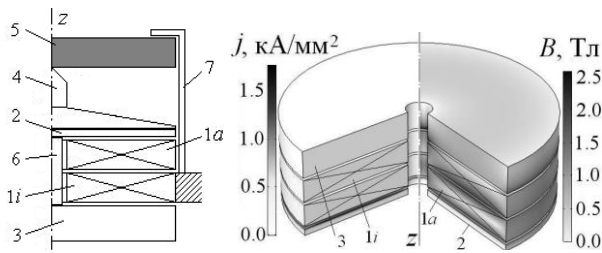


Рис. 3. Распределения плотности тока  $j$  и индукции магнитного поля  $B$  в ЛИЭП с ЭЯ, КЯ и ФЯ

Изменения плотностей токов в индукторе  $j_{1i}$  и в КЯ  $j_{1a}$  во времени происходит в форме аперидического полярного импульса с коротким передним и длинным задним фронтами. При этом максимальные значения плотностей токов в индукторе и якоре различны: в индукторе  $j_{1im}=168,8$  А/мм<sup>2</sup>, а в КЯ  $j_{1am}=279,8$  А/мм<sup>2</sup>. Большее значение плотности тока в КЯ можно объяснить магнитным воздействием ФЯ на индуктор и воздействием ЭЯ на КЯ. Максимальная плотность тока в ЭЯ составляет  $j_{2m}=368,7$  А/мм<sup>2</sup>. Ток в ЭЯ после достижения максимального значения уменьшается таким образом, что уже через 1 мс меняет полярность.

Наибольшая плотность тока возникает в ЭЯ, а именно, в средней части, обращенной к индуктору. Наибольшие значения индукции магнитного поля  $B$  возникают в средней части зазора между индуктором и КЯ а также между КЯ и ЭЯ.

Поскольку полярности токов индуктора и ЭЯ одинаковы, то между ними возникают ЭДУ притяжения. Это сказывается на силовых характеристиках данного ЛИЭП. Электромагнитные  $f_e$  и электродинамические  $f_{1a}$  усилия в течение всего рабочего процесса сохраняют полярности, а ЭДУ  $f_2$ , действующие на ЭЯ, после 1 мс практически исчезают. На КЯ со стороны индуктора действуют ЭДУ отталкивания  $f_{1a}$ , максимальная величина которых составляет  $f_{1am}=5,58$  кН. ЭМУ притяжения  $f_e$ , действующие на ФЯ со стороны индуктора, значительно меньше и их максимальная величина составляет  $f_{em}=0,92$  кН. А максимальная величина ЭДУ, действующих на ЭЯ, составляет  $f_{1am}=7,48$  кН.

К концу рабочего процесса импульс ЭДУ, действующий на КЯ, составляет  $F_{1a}=6,59$  Н·с, импульс ЭМУ, действующий на ФЯ –  $F_e=0,89$  Н·с и импульс ЭДУ, действующий на ЭЯ –  $F_2=2,45$  Н·с.

Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в рассматриваемом ЛИЭП комбинированного типа составляет  $f_m=13,12$  кН, что больше аналогичной величины силового воздействия любого ЛИЭП основного типа, но меньше, чем у ЛИЭП комбинированного типа с КЯ и ФЯ. Импульс результи-

рующих усилий ЛИЭП с ЭЯ, КЯ и ФЯ больше, чем в ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, но меньше, чем в ЛИЭП электродинамического типа.

**ЛИЭП с двумя ЭЯ** (рис. 4). В этом преобразователе усредненная по сечению максимальная плотность тока в индукторе составляет  $j_{1m}=266,7$  А/мм<sup>2</sup>, а в якорах –  $j_{2m}=390,2$  А/мм<sup>2</sup>. Это обуславливает возникновение противоположно направленных ЭДУ отталкивания переднего и заднего ЭЯ от индуктора.

Изменение плотности тока в индукторе имеет форму полярного аперидического импульса, в то время как плотности токов в якорах в течении 1,3 мс меняют полярности на противоположную.

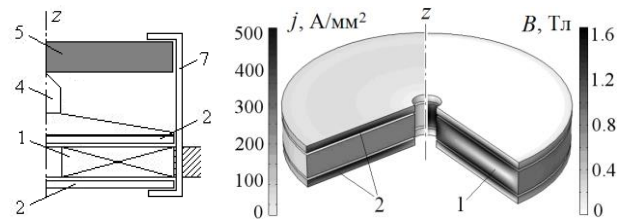


Рис. 4. Распределения плотности тока  $j$  и индукции магнитного поля  $B$  в ЛИЭП с двумя ЭЯ

Максимальные значения ЭДУ, действующих на каждый ЭЯ, составляют  $f_{2m}=8,55$  кН, а импульс ЭДУ составляет  $F_{22}=3,3$  Н·с. За счет фиксаторов 7 ЭДУ от обеих якостей оказывают суммарное силовое воздействие на объект 5. Максимальные плотности тока возникают на средних участках ЭЯ, обращенных к индуктору, а наибольшие значения индукции магнитного поля  $B$  возникают в центральной зоне индуктора и в смежных областях между индуктором и ЭЯ.

**ЛИЭП с ЭЯ и КЯ** (рис. 5). В этом преобразователе КЯ параллельно соединен с индуктором. Токи в индукторе и КЯ различаются из-за индукционного воздействия ЭЯ.

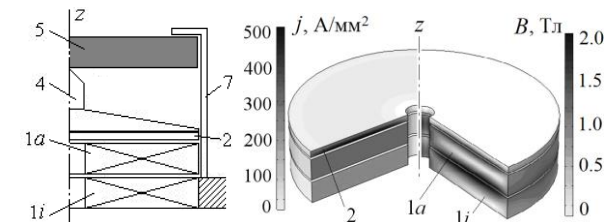


Рис. 5. Распределения плотности тока  $j$  и индукции магнитного поля  $B$  в ЛИЭП с ЭЯ и КЯ

Максимальные значения ЭДУ, действующих на ЭЯ, составляют  $f_{2m}=7,28$  кН, а на КЯ –  $f_{1am}=5,72$  кН. Соответствующие импульсы ЭДУ составляют  $F_{22}=2,35$  Н·с и  $F_{z1a}=6,04$  Н·с. Заметим, что ЭДУ, действующие на ЭЯ, за счет более короткого времени воздействия обуславливают меньший импульс ЭДУ к концу рабочего про-

цесса по сравнению с импульсом ЭДУ, действующим на КЯ. В данном ЛИЭП комбинированного типа максимальное значение индукции магнитного поля  $B$  в момент максимума тока в индукторе имеет место в области между индуктором и КЯ.

**ЛИЭП с двумя ЭЯ и КЯ** (рис. 6). В этом преобразователе с параллельным соединением КЯ и индуктора, токи в обоих ЭЯ и токи в индукторе и КЯ попарно равны между собой. При этом на электропроводящие якоря действуют противоположно направленные ЭДУ, максимальная величина которых составляет  $f_{2m}=6,42$ кН.

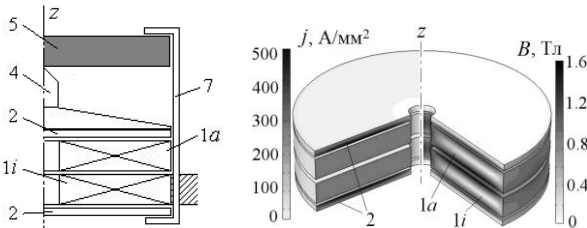


Рис. 6. Распределения плотности тока  $j$  и индукции магнитного поля  $B$  в ЛИЭП с КЯ и двумя ЭЯ

На КЯ действуют ЭДУ, максимальная величина которых составляет  $f_{1am}=4,09$  кН. Соответствующие импульсы ЭДУ, действующие на ЭЯ и КЯ, составляют  $F_{z2}=1,98$  Нс и  $F_{z1a}=4,07$  Нс. Максимальное значение индукции магнитного поля  $B$  в момент максимума тока в индукторе в данном ЛИЭП имеет место в области между индуктором и КЯ.

#### 4. Анализ эффективности ЛИЭП комбинированного типа

Рассмотрим следующие ЛИЭП: 1 – с двумя ЭЯ; 2 – с ЭЯ и ФЯ; 3 – с ЭЯ и КЯ; 4 – с двумя ЭЯ и КЯ; 5 – с КЯ и ФЯ; 6 – с ЭЯ, КЯ и ФЯ. Индуктор и КЯ соединяются последовательно (пос) и параллельно (пар).

В качестве базового варианта используем ЛИЭП индукционного типа. Для того, чтобы провести всесторонний сравнительный анализ различных ЛИЭП комбинированного типа введем критерий эффективности  $K^*$ , который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые (индукция магнитного поля рассеяния) показатели:

$$K^* = \beta \left( \frac{\alpha_1}{J_{1m}^*} + \alpha_2 f_{zm}^* + \alpha_3 F_z^* + \frac{\alpha_4}{B_{ex}^*} \right); \sum_{n=1}^4 \alpha_n = 1 \quad (11)$$

где  $\beta$  – коэффициент надежности якоря;  $\alpha_j$  – весовые коэффициенты показателей ЛИЭП.

Считая, что коэффициент надежности для ЛИЭП без КЯ составляет  $\beta=1$ , на основании экспертных оценок полагаем коэффициент надежности  $\beta=0,75$  для ЛИЭП с КЯ. Более низкая

надежность ЛИЭП с КЯ обусловлена наличием подвижного контакта между индуктором и КЯ, а также его выполнением в виде многовитковой обмотки.

Используем несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП (табл. 1). Приоритетность показателя оценивается величиной безразмерного весового коэффициента  $\alpha_j$ .

Таблица 1  
Значения весовых коэффициентов для различных вариантов стратегии оценки ЛИЭП, (в о.е.)

Варианты стратегий	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
I	0,25	0,25	0,25	0,25
II	<b>0,4</b>	0,2	0,2	0,2
III	0,2	<b>0,4</b>	0,2	0,2
IV	0,2	0,2	<b>0,4</b>	0,2
V	0,2	0,2	0,2	<b>0,4</b>

В табл. 2 в относительном виде представлены значения критериев эффективности  $K^*$  ЛИЭП комбинированного типа при различных вариантах стратегии оценки их эффективности.

Таблица 2  
Значения критериев эффективности  $K^*$  ЛИЭП комбинированного типа (в о.е.)

ЛИЭП	Соединение	Вариант стратегии				
		I	II	III	IV	V
1	-	1.569	1.393	1.659	1.544	1.679
2	-	1.410	1.364	1.371	1.492	1.414
3	пос	0.962	0.939	0.892	0.969	1.048
	пар	1.011	0.907	1.039	1.084	1.012
4	пос	4.028	3.348	3.442	3.438	5.883
	пар	2.155	1.832	2.024	1.988	2.778
5	пос	1.544	1.398	1.468	1.558	1.751
	пар	1.192	1.147	1.098	1.228	1.293
6	пос	1.340	1.227	1.324	1.513	1.296
	пар	1.237	1.192	1.131	1.274	1.352

Практически все преобразователи комбинированного типа имеют более высокую эффективность по сравнению с ЛИЭП индукционного типа. Из всех рассмотренных выше преобразователей наиболее эффективным является ЛИЭП с двумя ЭЯ и КЯ, причем более высокие показатели демонстрирует ЛИЭП с последовательным соединением КЯ и индуктора. Этот преобразователь по разным вариантам стратегии оценки в 3-5 и более раз более эффективен, чем ЛИЭП индукционного типа.



Наименее эффективными являются ЛИЭП комбинированного типа с ЭЯ и КЯ. При последовательном соединении КЯ с индуктором его эффективность ниже, чем при параллельном соединении. На основании представленных данных можно сделать вывод о перспективности ЛИЭП комбинированного типа.

### Заключение

Разработана математическая модель ЛИЭП комбинированного типа, включающая якоря преобразователей индукционного, электродинамического и электромагнитного типов. Математическая модель описывает взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и механические процессы ЛИЭП. Компьютерная модель ЛИЭП реализована в программном пакете *Comsol Multiphysics*.

Установлены особенности протекания электромагнитных процессов и определены электрические, магнитные и силовые показатели ЛИЭП комбинированного типа, включающие КЯ, ФЯ и один или два ЭЯ.

Выполнен сравнительный анализ различных ЛИЭП комбинированного типа с использованием критерия эффективности, который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые показатели.

Установлено, что практически все преобразователи комбинированного типа имеют более высокую эффективность по сравнению с ЛИЭП индукционного типа. Наиболее эффективным является ЛИЭП с двумя ЭЯ и КЯ, который последовательно соединен с индуктором. Этот преобразователь по разным вариантам стратегии оценки в 3-5 и более раз более эффективен, чем ЛИЭП индукционного типа.

### Список использованной литературы

1. Li, H. Research on Mechanical Reliability of a Permanent Magnetic Actuator for a 126kV Vacuum Circuit Breaker [Text] / H. Li, L. Sun, X. Yao et al. // Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). - Oct.25-28, 2015, Busan, Korea, P. 570-573.
2. Chemerys, V.T. Prospectives of new coilgun design development [Text] / V. T. Chemerys, V. F. Bolyukh // Артиллерийское и стрелковое вооружение. - 2008. - № 3. - С. 44-52.
3. 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.
4. 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.
5. Bolyukh, V.F. High-efficiency impact electromechanical converter [Text] / V. F. Bolyukh, V. F. Luchuk, M. A. Rassokha, I. S. Shchukin // Russian Electrical Engineering. - 2011. - Vol. 82. - № 2. - P. 104-110.
6. Болух, В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов [Text] / В. Ф. Болух, С. В. Олексенко, И. С. Щукин // Технічна електродинаміка. - 2016. - № 5. - С. 46-48.
7. Болух, В.Ф. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия [Text] / В. Ф. Болух, А. М. Марков, В. Ф. Лучук, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. - 2009. - № 2. - С. 9-14.
8. Болух, В. Ф. Сравнительный анализ конструктивных схем линейных ударных электромеханических преобразователей комбинированного типа [Text] / В. Ф. Болух, С. В. Олексенко, И. С. Щукин // Електротехніка і електромеханіка. - 2015. - № 4. - С.20-27.
9. Li, W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method [Text] / W. Li, C. S. Koh // 14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier. - 2010. - P. 1-9.
10. 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 // IEEE Transactions on Magnetics. - 2013. - Vol. 49. - № 12. - P. 5749-5755.
11. Bolyukh, V. F. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter [Text] / V. F. Bolyukh, S. V. Oleksenko // Russian Electrical Engineering. - 2015. - Vol. 86. - № 7. - P. 425-431.
12. 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.
13. Comsol Multiphysics modeling and simulation software [электронный ресурс] // режим доступа: <http://www.comsol.com>.

### References

1. Li, H., Sun, L., Yao, X., et al. (2015), "Research on Mechanical Reliability of a Permanent Mag-

- netic Actuator for a 126kV Vacuum Circuit Breaker”, *Proceeding of the “3rd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)”*, Busan, Korea, Oct. 25–28, pp. 570–573
2. Chemerys, V. T., Bolyukh, V. F. (2008), “Prospectives of new coilgun design development”, *Artilleriyskoye i strelkovoye vooruzheniye – Artillery and small arms*, no 3, pp. 44–52.
  3. 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.
  4. 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.
  5. Bolyukh, V. F., Luchuk, V. F., Rassokha, M. A., Shchukin, I. S. (2011), “High-efficiency impact electromechanical converter”, *Russian Electrical Engineering*, vol. 82, no. 2, pp. 104–110.
  6. Bolyukh, V. F., Oleksenko, S. V., Shchukin, I. S. (2016), “Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types”, [Srvnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov], *Technical Electrodynamics*, no. 5, pp. 46–48.
  7. Bolyukh, V. F., Markov, A. M., Luchuk, V. F., Shchukin, I. S. (2009), “Energy processes and efficiency of an induction-dynamic shock transducer”, [Energeticheskiye protsessy i effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo deystviya], *Electrotehnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, no 2, pp. 9–14.
  8. Bolyukh, V. F., Oleksenko, S. V., Shchukin, I. S. (2015), “Comparative analysis of constructive schemes of linear shock electromechanical converters of combined type”, [Srvnitel'nyy analiz konstruktivnykh skhem lineynykh udarnykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley kombinirovannogo tipa], *Electrotehnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, no 4, pp.20–27.
  9. Li, W., Koh, C. S. (2010), “Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method”, *14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*, pp. 1–9.
  10. Lim, D. K., Woo, D. K., Kim, I. W. (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.
  11. Bolyukh V. F., Oleksenko S. V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction–dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 7, pp. 425–431.
  12. 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.
  13. “Comsol Multiphysics modeling and simulation software” [Electrical resours], available at: <http://www.comsol.com>.

## INVESTIGATION OF LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL CONVERTERS OF COMBINED TYPE

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

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*

**Abstract.** A mathematical model of a linear pulsed electromechanical converter (LPEC) of a combined type is developed, including the anchors of inductive, electrodynamic and electromagnetic type converters. A two-dimensional mathematical model with spatially-distributed parameters and corresponding boundary conditions is used. The mathematical model describes the interrelated electromagnetic, thermal and mechanical processes that occur when the inductor is excited from a capacitive energy storage device. The computer model of LPEC is realized in the software package Comsol Multiphysics.

*In the presence of two electrically conductive anchors, they are located on opposite sides of the inductor, so that with the help of movable clamps provide additional power action on the object. The ferromagnetic anchor is located on the side of the inductor opposite to the direction of the force action on the object.*

*The features of the course of electromagnetic processes are determined and the main electric, magnetic and power indices of a number of LPECs of a combined type, including a coil, ferromagnetic and one or two electrically conductive anchors are determined.*



*It is established that the inductor current varies in time in the form of an aperiodic polar pulse, while the current in the electrically conducting armature changes polarity after a while. This affects the nature of the electrodynamic forces. The maximum current density along the section of the electrically conductive armature takes place in its middle part, facing the inductor. The maximum induction of the magnetic field occurs in the middle of the gap between the inductor and the armature.*

*A comparative analysis of various LPECs of a combined type was carried out using the efficiency criterion, which takes into account the electric, force and field (induction of the magnetic scattering field) indices in a relative form. Several variants of the strategy for assessing the effectiveness of the LPEC have been used, in which the priority of the corresponding indicator is estimated by the dimensionless weighting factor.*

*It is established that practically all converters of combined type have a higher efficiency in comparison with LPEC of induction type, which is accepted as a basic variant. The most effective is LPEC with two electrically conductive anchors and a coil anchor, which is connected in series with the inductor. This converter with different variants of the estimation strategy is 3-5 and more times more efficient than the LPEC of induction type.*

**Key words:** *linear pulse electromechanical converter, a converter of a combined type, a mathematical model, an electrically conductive anchor, a coil anchor, a ferromagnetic anchor.*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КОМБІНОВАНОГО ТИПУ

**В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, О.П. Месенко, І. С. Щукін**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Анотація.** *Розроблено математичну модель лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача (ЛІЕП) комбінованого типу, що включає якоря перетворювачів індукційного, електродинамічного та електромагнітного типів. Використовується двомірна математична модель з просторово-розподіленими параметрами та відповідними граничними умовами. Математична модель описує взаємопов'язані електромагнітні, теплові та механічні процеси, які відбуваються при збудженні індуктора від ємнісного накопичувача енергії. Комп'ютерна модель ЛІЕП реалізована в програмному пакеті Comsol Multiphysics.*

*При наявності двох електропровідних якорів вони розташовуються з протилежних сторін індуктора, так щоб за допомогою рухомих фіксаторів забезпечити додаткову силову дію на об'єкт впливу. Феромагнітний якір розташовується з боку індуктора, протилежного напрямку силовій дії на об'єкт впливу.*

*Встановлені особливості протікання електромагнітних процесів та визначено основні електричні, магнітні та силові показники ряду ЛІЕП комбінованого типу, які включають катушковий, феромагнітний і один або два електропровідних якорів. Встановлено, що струм індуктора змінюється у часі в формі аперіодичного полярного імпульсу, в той час як струм в електропровідному якорі через певний час змінює полярність, що впливає на характер електродинамічних зусиль. Максимальна щільність струму по перетину електропровідного якоря має місце в його середній частині, зверненої до індуктора. Максимальна індукція магнітного поля виникає в середній частині зазору між індуктором і якорем.*

*Виконано порівняльний аналіз різних ЛІЕП комбінованого типу з використанням критерію ефективності, який у відносному вигляді враховує електричні, силові і польові (індукція магнітного поля розсіювання) показники. Використано кілька варіантів стратегії оцінки ефективності ЛІЕП, в яких пріоритетність відповідного показника оцінюється величиною безрозмірного вагового коефіцієнту. Встановлено, що практично всі перетворювачі комбінованого типу мають більш високу ефективність у порівнянні з ЛІЕП індукційного типу, який прийнятий в якості базового варіанту. Найбільш ефективним є ЛІЕП з двома електропровідними якорями та катушковим якорем, який послідовно з'єднаний з індуктором. Цей перетворювач за різними варіантами стратегії оцінки в 3-5 і більше разів ефективніший, ніж ЛІЕП індукційного типу.*

**Ключові слова:** *лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, перетворювач комбінованого типу, математична модель, електропровідниковий якір, катушковий якір, феромагнітний якір.*

Получено 12.03.2018



**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, E-mail: vfbolyukh@gmail.com, tel. +38-057-70-76-427.

**ORCID ID:** 0000-0001-9115-7828



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

**Aleksandr Kocherga**, graduate student of the Department "General Electrical Engineering", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ul. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002, E-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com, tel. +38-057-70-76-427.

**ORCID ID:** 0000-0002-0028-9532



**Месенко Александр Петрович**, соискатель кафедры «Информационные технологии и системы колесных и гусеничных машин» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Ул. Кирпичева, 2, Харьков, Украина, 61002, E-mail: 14mes14@gmail.com, тел. +38-057-70-76-427.

**Aleksandr Mesenko**, applicant of the department "Information technologies and systems of wheeled and crawler machines", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Ul. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002, E-mail: 14mes14@gmail.com, tel. +38-057-70-76-427.

**ORCID ID:** 0000-0001-9595-1367



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

**ORCID ID:** 0000-0001-7982-8633