

В. Ф. БОЛЮХ, А. И. КОЧЕРГА, И. С. ЩУКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УДАРНО-СИЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ

З використанням математичної моделі показано, що в комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах (ЛІЕП) ударно-силової дії максимальна величина та імпульс результуючої силової електродинамічної та електромагнітної дії вищі, ніж у ЛІЕП індукційного, електродинамічного та електромагнітного типу. Найменша густина струму в індукторі спостерігається у ЛІЕП електромагнітного типу, найвищі силові показники створює комбінований ЛІЕП електромагнітно-електродинамічного типу, найменші значення індукції магнітного поля розсіювання виникають в комбінованому ЛІЕП електромагнітно-індукційно-електродинамічного типу. Встановлено, що найбільш ефективним являється комбінований ЛІЕП електромагнітно-індукційно-електродинамічного типу з паралельним з'єднанням індуктора та котушкового якоря.

Ключові слова: лінійний ударний електромеханічний перетворювач, комбінований перетворювач ударно-силової дії, електропровідний якор, катушковий якор, феромагнітний якор, критерій ефективності.

С использованием математической модели показано, что в комбинированных линейных импульсных электромеханических преобразователях (ЛИЭП) ударно-силового действия максимальная величина и импульс результирующего силового электродинамического и электромагнитного воздействия выше, чем в ЛИЭП индукционного, электродинамического и электромагнитного типа. Наименьшая плотность тока в индукторе наблюдается в ЛИЭП электромагнитного типа, наивысшие силовые показатели развивает комбинированный ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа, наиболее низкие значения индукции магнитного поля рассеяния возникают в комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа. Установлено, что наиболее эффективным является комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и катушечного якоря.

Ключевые слова: линейный ударный электромеханический преобразователь, комбинированный преобразователь ударно-силового действия, электропроводящий якорь, катушечный якорь, ферромагнитный якорь, критерий эффективности.

Purpose. Evaluation and comparison of the efficiency of various combined linear pulse electromechanical converters (LPEC) of impact-force action with regard to electrical, power and environmental indicators. **Methodology.** A mathematical model is developed and implemented in the software package Comsol Multiphysics, which describes the spatio-temporal electromagnetic and electromechanical processes of combined shock-power LIEP. Using the efficiency criterion, which takes into account the electric, power and field indicators in a relative manner, a comparative analysis of various LPEC. **Results.** It has been established that in the combined LPEC of electromagnetic-induction type, LPEC of electromagnetic-electrodynamical type and LPEC of electromagnetic-induction-electrodynamical type, the maximum magnitude and impulse of the resultant force action is higher than for LPEC of induction, electrodynamic and electromagnetic types. **Originality.** Using the mathematical model, it is shown that in the combined LPEC of shock-force action the maximum value of the resulting power electrodynamic and electromagnetic action is higher than in the LPEC of induction, electrodynamic and electromagnetic type. The lowest current density in the inductor is observed in the LPEC of the electromagnetic type, the best power indicators are developed by the combined LPEC of electromagnetic-electrodynamical type, the lowest values of the induction of the magnetic scattering field appear in the combined LPEC of electromagnetically-induction-electrodynamical type. **Practical value.** For all variants of the evaluation strategy, the most effective is the combined LPEC of electromagnetic-induction-electrodynamical type with a parallel connection of the inductor and the coil armature, and the worst is the electromagnetic-type LPEC.

Keywords: linear pulse electromechanical converters, combined shock-force converter, electroconductive anchor, coil anchor, ferromagnetic anchor, efficiency criterion.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП), которые обеспечивают мощные силовые импульсы, 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 анкером; в горной промышленности – бутобой, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – вибросейсмоисточники; в машиностроении – прессы с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы. Такие преобразователи используются 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). 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].

Одним из путей совершенствования ударно-силовых устройств является разработка комбинированных ЛИЭП, объединяющих якоря преобразователей основных типов [8]. В комбинированном ЛИЭП коаксиальной конфигурации ФЯ располагается с одной стороны неподвижного индуктора, а ЭЯ и КЯ – с противоположной стороны. В таком случае можно обеспечить однонаправленное действие электродинамических и электромагнитных сил на объект воздействия. При этом возникает вопрос об эффективности различных комбинированных ЛИЭП ударно-силового действия при учете различных показателей их работы.

Постановка задачи. Необходимо оценить и сравнить эффективность различных комбинированных ЛИЭП ударно-силового действия при учете электрических, силовых и экологических показателей.

Математическая модель ЛИЭП. В ЛИЭП ударно-силового действия при возбуждении индуктора от ЕНЭ возникают быстротекущие 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 двумерную 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; σ_m – электропроводность m -го активного элемента; j_m – плотность тока в m -ом активном элементе; $m=1, 2, 3$ – индексы индуктора, ЭЯ и ФЯ соответственно.

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

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

где \bar{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:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_1}{dt} dv = 0; \\ \frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0, \quad (4)$$

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_1 – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем индуктора.

Аксиальные электродинамические силы, действующие на КЯ и ЭЯ, и электромагнитные силы, действующие на ФЯ, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

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

где S – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря.

Импульс аксиальных электродинамических (электромагнитных) сил, 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]:

$$c_m(T) \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) + j_m^2 k_z \rho_m(T); \\ c_k(T) \gamma_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k(T) \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_k}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

где $c(T)$ – усредненная удельная теплоемкость; γ – 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 ξ . На охлаждаемых

поверхностях используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

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

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

На границе контакта элементов ЛИЭП – граничные условия четвертого рода:

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

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

Решение системы (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 производится методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

Исходные параметры ЛИЭП.

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

Комбинированный ЛИЭП (рис.1 – рис. 3) содержит неподвижный индуктор 1, ЭЯ 2, ФЯ 3,

ударный исполнительный элемент 4 и силовой согласующий элемент 5, передающий силовое воздействие от ФЯ 3 на элемент 4. При использовании ЛИЭП электродинамического типа неподвижный индуктор 1i и КЯ 1a могут соединяться последовательно или параллельно.

ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа.

На рис. 1a представлен комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа, у которого индуктор 1 взаимодействует с ЭЯ 2 и ФЯ 3. На рис. 1б представлены распределения плотностей тока j и индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП в момент максимума тока в индукторе. На рис. 1в представлены электромеханические характеристики данного ЛИЭП. Плотность тока в ЭЯ по сечению распределена неравномерно. Максимальная ее величина имеет место в средней части, обращенной к индуктору. 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.

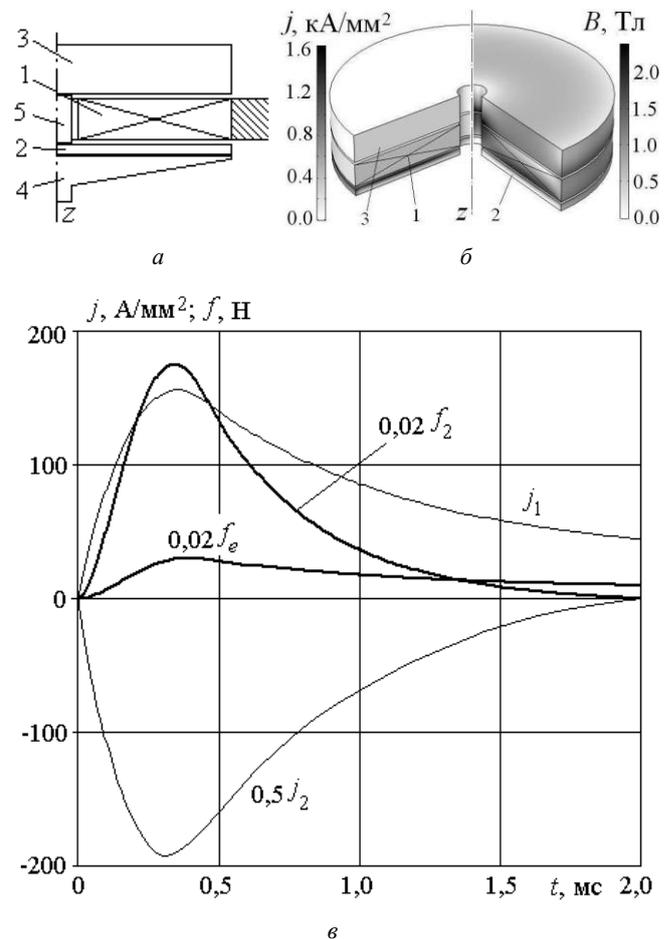


Рис. 1 – Конструктивное исполнение (а), распределение плотностей токов и магнитного поля (б), электромеханические характеристики (в) комбинированного ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа

Изменение плотности тока в индукторе j_1 во времени происходит в форме апериодического полярного импульса с максимальной величиной

156 А/мм². Усредненная по сечению плотность тока в ЭЯ j_2 также имеет форму импульса с максимальной величиной 385 А/мм². Однако этот импульс через 2 мс меняет полярность.

В начальный момент времени на ЭЯ со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_2 , максимальная величина которой составляет $f_{2m}=8,77$ кН. Причем эта сила через 2 мс меняет направление воздействия. Электромагнитная сила f_e , действующая на ФЯ со стороны индуктора, все время сохраняет направление воздействия. Однако ее максимальная величина существенно меньше $f_{em}=1,54$ кН и затухание этой силы происходит более медленно, чем электродинамической силы f_2 .

К концу рабочего процесса импульс электродинамической силы составляет $F_2=5,42$ Н·с, а электромагнитной силы $F_e=3,49$ Н·с. Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,21 раза выше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 5,65 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Что касается импульса силы, то здесь ситуация несколько иная. В комбинированном ЛИЭП импульс силы в 1,82 раза выше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 1,22 раза выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Это свидетельствует о перспективности данного комбинированного ЛИЭП ударно-силового действия.

ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа. На рис. 2а представлена конструктивная схема ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа, у которого индуктор li взаимодействует с КЯ $1a$ и с ФЯ 3. В данном преобразователе индуктор и КЯ соединены параллельно. На рис. 2б представлены распределения индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП в момент максимума тока в индукторе. А на рис. 2в представлены электромеханические характеристики данного ЛИЭП.

Максимальные значения индукции магнитного поля B возникают в средней части зазора между индуктором и КЯ. Причем эта величина индукции превышает аналогичную величину в ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа.

Изменение плотности токов в индукторе и в КЯ j_{1a} во времени происходит в форме аperiodического полярного импульса с коротким передним и длинным задним фронтом. При этом максимальные значения плотностей токов в индукторе и КЯ различны: в индукторе $j_{1im}=177,7$ А/мм², а в КЯ $j_{1am}=204,7$ А/мм². Меньшее значение плотности тока в индукторе можно объяснить магнитным воздействием на него смежно расположенного ФЯ.

Электромагнитная f_e и электродинамическая f_{1a} силы во времени изменяются так же, как и указанные выше плотности токов. На КЯ со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_{1a} , максимальная величина которой составляет $f_{1am}=13,03$ кН. Электромагнитная сила f_e , действующая на ФЯ со стороны индуктора,

значительно меньше и ее максимальная величина составляет лишь $f_{em}=1,19$ кН.

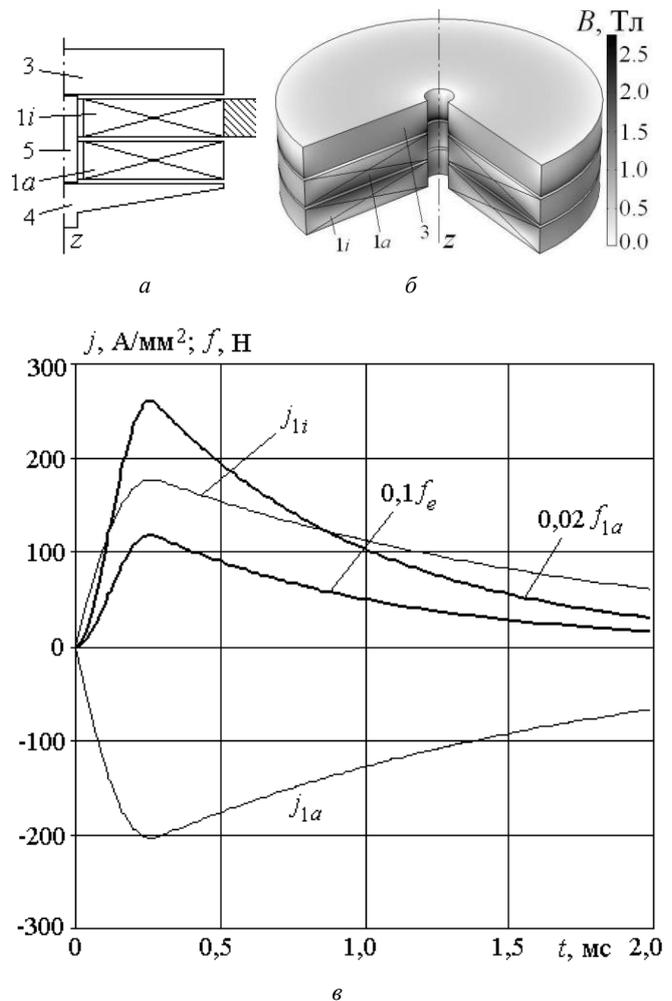


Рис. 2 – Конструктивное исполнение (а), распределение магнитного поля (б) и электромеханические характеристики (в) комбинированного ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа

К концу рабочего процесса импульс электродинамической силы составляет $F_{1a}=12,25$ Н·с, а электромагнитной силы $F_e=1,2$ Н·с. Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,1 раза выше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и в 7,8 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. В комбинированном ЛИЭП импульс силы в 1,21 раза выше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и почти в 2 раза выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа. На рис. 3а представлена конструктивная схема ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа, у которого индуктор li взаимодействует с ФЯ 3 и с КЯ $1a$, который, в свою очередь, взаимодействует с ЭЯ 2. В данном преобразователе индуктор и КЯ соединены параллельно. На рис. 3б представлены распределения плотностей тока j и индукции магнитного поля B в активных элементах ЛИЭП в момент максимума тока в

индукторе. На рис. 3в представлены электромагнитные характеристики данного ЛИЭП.

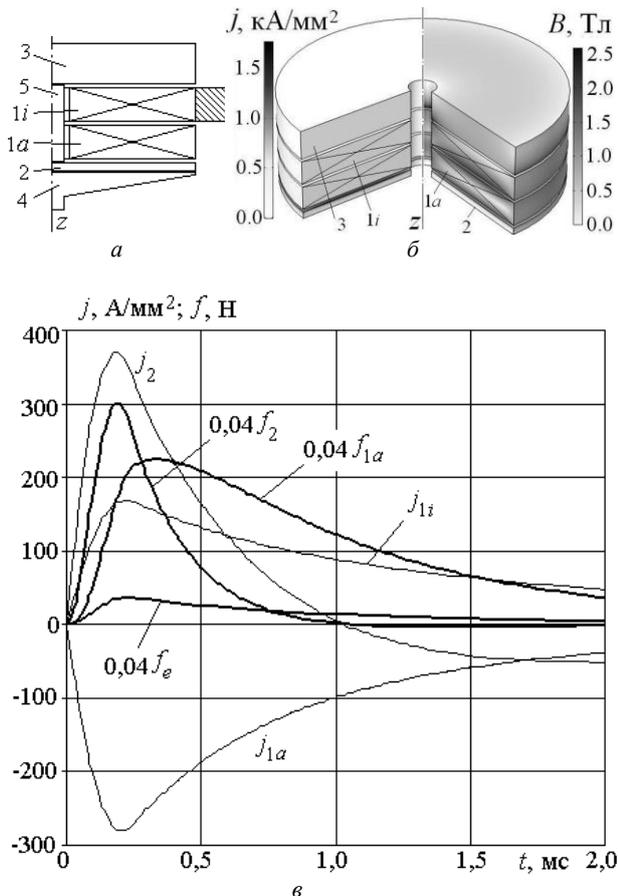


Рис. 3 – Конструктивное исполнение (а), распределение плотностей токов и магнитного поля (б), электромагнитные характеристики (в) комбинированного ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа

Наибольшая плотность тока возникает в ЭЯ, а именно, в средней части, обращенной к индуктору. Наибольшие значения индукции магнитного поля возникают в средней части зазора между индуктором и КЯ и между КЯ и ЭЯ. Изменение плотности токов в индукторе j_{1i} и в КЯ j_{1a} во времени происходит в форме аperiodического полярного импульса с коротким передним и длинным задним фронтами. При этом максимальные значения плотностей токов в индукторе и якоре различны: в индукторе $j_{1im} = 168,8 \text{ А/мм}^2$, а в КЯ $j_{1am} = 279,8 \text{ А/мм}^2$. Более высокое значение плотности тока в КЯ можно объяснить магнитным воздействием ФЯ на индуктор и воздействием ЭЯ на КЯ. Максимальная плотность тока в ЭЯ составляет $j_{2m} = 368,7 \text{ А/мм}^2$. Однако ток в ЭЯ после максимального значения уменьшается так быстро, что через 1 мс меняет полярность.

Поскольку полярности токов индуктора и ЭЯ одинаковы, а значит, между ними возникает сила притяжения, то это сказывается на силовых характеристиках данного ЛИЭП. Электромагнитная

f_e и электродинамическая f_{1a} силы в течение всего рабочего процесса сохраняют полярности, а электродинамическая сила f_2 после 1 мс практически исчезает. На КЯ со стороны индуктора действует электродинамическая сила отталкивания f_{1a} , максимальная величина которой составляет $f_{1am} = 5,58 \text{ кН}$. Электромагнитная сила f_e , действующая на ФЯ со стороны индуктора, значительно меньше и ее максимальная величина составляет $f_{em} = 0,92 \text{ кН}$. А максимальная величина электродинамической силы, действующей на ЭЯ, составляет $f_{1am} = 7,48 \text{ кН}$.

К концу рабочего процесса импульс электродинамической силы, действующий на КЯ, составляет $F_{1a} = 6,59 \text{ Н}\cdot\text{с}$, импульс электромагнитной силы, действующий на ФЯ $F_e = 0,89 \text{ Н}\cdot\text{с}$ и импульс электродинамической силы, действующий на ЭЯ – $F_2 = 2,45 \text{ Н}\cdot\text{с}$.

Заметим, что максимальная величина результирующего силового воздействия в рассматриваемом комбинированном ЛИЭП составляет $f_m = 13,12 \text{ кН}$, что больше аналогичной величины силы любого ЛИЭП основного типа, но меньше, чем у комбинированного ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа. А импульс силы ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа больше, чем в ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, но меньше, чем в ЛИЭП электродинамического типа.

Анализ эффективности ЛИЭП комбинированного типа. Рассмотрим следующие конструктивные исполнения ЛИЭП: № 1 – индукционного типа; № 2 – электромагнитного типа; № 3 – электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ; № 4 – электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ; № 5 – электромагнитно-индукционного типа (рис. 1); № 6 – электромагнитно-электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ; № 7 – электромагнитно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (рис. 2); № 8 – электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ; № 9 – электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (рис. 3).

В качестве базового варианта используем ЛИЭП электромагнитного типа, поскольку ФЯ присутствует во всех рассмотренных выше комбинированных ЛИЭП. В табл. 1 представлены относительные значения максимальной плотности тока индуктора j_{1m}^* , максимальной величины результирующей силы f_{zm}^* , величины импульса результирующей силы в конце рабочего процесса F_z^* и усредненной индукции магнитного поля рассеяния B_{ex}^* на контуре, расположенном на расстоянии $2D_{ex1}$ от центра индуктора.

Наименьшая плотность тока индуктора наблюдается в ЛИЭП электромагнитного типа (№ 2), а наибольшая – в ЛИЭП электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (№ 4). Наилучшие силовые показатели развивает

комбинированный ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа (№ 7), а наихудшие силовые показатели развивают ЛИЭП электромагнитного (№ 2) и индукционного (№ 1) типов. Наиболее низкие значения индукции магнитного поля рассеяния возникают в комбинированном ЛИЭП № 9, а наиболее высокие – в ЛИЭП электромагнитного типа (№ 2).

Таблица 1 – Относительные значения показателей ЛИЭП, о.е.

Схема ЛИЭП №	j_{1m}^*	f_{zm}^*	F_z^*	B_{ex}^*
1	2.20	4.65	0.67	0.654
2	1.00	1.00	1.00	1.000
3	1.80	3.88	1.01	0.452
4	2.44	7.14	1.62	0.252
5	1.87	5.65	1.22	0.457
6	1.63	4.37	1.27	0.270
7	2.12	7.82	1.97	0.438
8	1.70	4.49	1.22	0.288
9	2.02	7.21	1.44	0.190

Для того, чтобы провести всесторонний сравнительный анализ различных комбинированных ЛИЭП, 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 β – коэффициент надежности якоря; α_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.

Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП (табл. 2). Приоритетность показателя оценивается величиной безразмерного весового коэффициента α_j .

Таблица 2 – Варианты стратегии оценки эффективности ЛИЭП, о.е.

Варианты стратегий	α_1	α_2	α_3	α_4
I	0,25	0,25	0,25	0,25
II	0,4	0,2	0,2	0,2
III	0,2	0,4	0,2	0,2
IV	0,2	0,2	0,4	0,2
V	0,2	0,2	0,2	0,4

В табл. 3 в относительном виде представлены значения критериев эффективности K^*

конструктивных исполнений ЛИЭП при различных вариантах стратегии оценки их эффективности. Необходимо отметить, что по всем вариантам стратегии оценки наиболее худшим является ЛИЭП электромагнитного типа (№ 2). Более высокие показатели у ЛИЭП электродинамического типа с последовательным соединением индуктора и КЯ (№ 3), а еще более высокие – у ЛИЭП индукционного типа (№ 1). Однако все эти преобразователи уступают по эффективности ЛИЭП комбинированного типа и ЛИЭП электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ. По всем вариантам стратегии оценки наиболее эффективным является комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и КЯ (№ 9).

Таблица 3 – Значения интегральных показателей эффективности K^* ЛИЭП, о.е.

Схема ЛИЭП №	Вариант стратегии				
	I	II	III	IV	V
1	1.827	1.552	2.392	1.595	1.767
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	1.437	1.233	1.731	1.302	1.482
4	2.464	2.033	3.042	2.214	2.567
5	2.397	2.025	3.048	2.161	2.355
6	1.865	1.584	2.147	1.682	2.047
7	2.350	1.951	3.053	2.175	2.223
8	1.832	1.554	2.139	1.649	1.986
9	2.702	2.236	3.243	2.377	2.951

Таким образом, разработка комбинированных ударно-силовых ЛИЭП, использующих элементы ЛИЭП индукционного, электродинамического и электромагнитного типа, открывает широкие возможности по повышению их эффективности.

Выводы.

1. Разработана и реализована в программном пакете *Comsol Multiphysics* математическая модель, которая описывает пространственно-временные электромагнитные и электромеханические процессы комбинированном ЛИЭП ударно-силового действия.

2. В комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционного типа максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,21 раза выше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 5,65 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Импульс результирующей силы в 1,82 раза больше, чем в ЛИЭП индукционного типа и в 1,22 раза больше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

3. В комбинированном ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа максимальная величина результирующего силового воздействия в 1,1 раза выше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и в 7,8 раз выше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа. Импульс результирующей силы в 1,21 раза больше, чем в ЛИЭП электродинамического типа и почти в 2 раза больше, чем в ЛИЭП электромагнитного типа.

4. В комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа,

максимальная величина результирующего силового воздействия составляет 13,12 кН, что выше, чем аналогичная величина любого из ЛИЭП основного типа. Импульс силы данного ЛИЭП больше, чем у ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, но меньше, чем у ЛИЭП электродинамического типа.

5. Наименьшая плотность тока в индукторе наблюдается в ЛИЭП электромагнитного типа, наивысшие силовые показатели развивает комбинированный ЛИЭП электромагнитно-электродинамического типа, наиболее низкие значения индукции магнитного поля рассеяния возникают в комбинированном ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа.

6. С использованием критерия эффективности, который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые показатели, установлено, что по всем вариантам стратегии оценки наиболее эффективным является комбинированный ЛИЭП электромагнитно-индукционно-электродинамического типа с параллельным соединением индуктора и катушечного якоря.

Список литературы

- Balikci A. Improved performance of linear induction launchers / A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2005. – Vol. 41. – № 1. – P. 171–175.
- Chemerys V.T. Prospectives of new coilgun design development / V.T. Chemerys, V.F. Bolyukh // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2008. – № 3. – С. 44–52.
- Bissal A. Comparison of two ultra-fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48. – № 11. – P. 3315–3318.
- Young-woo J. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD / 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.
- Bolyukh V.F. High-efficiency impact electromechanical converter / V.F. Bolyukh, V.F. Luchuk, M.A. Rassokha, I.S. Shchukin // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 82. – № 2. – P. 104–110.
- Болюх В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукін // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 5. – С. 46–48.
- Болюх В.Ф. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия / В.Ф. Болюх, А.М. Марков, В.Ф. Лучук, И.С. Щукін // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 9–14.
- Болюх В.Ф. Сравнительный анализ конструктивных схем линейных ударных электромеханических преобразователей комбинированного типа / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукін // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 4. – С. 20–27.
- Li W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C.S. Koh // *14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*. – 2010. – P. 1–9.
- Lim D.K. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method / D.K. Lim, D.K. Woo, I.W. Kim // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – Vol. 49. – № 12. – P. 5749–5755.
- Bolyukh V.F. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction–dynamic converter / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko // *Russian Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 86. – № 7. – P. 425–431.
- Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // *Russian electrical engineering*. – 2012. – Vol. 83, № 10. – P. 571 – 576.
- Cmsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.

References (transliterated)

- Balikci A. Zabar Z., Birenbaum L. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no 1, pp. 171–175.
- Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Артиллерийское и стрелковое вооружение – Artillery and small arms*, 2008, no 3, pp. 44–52.
- 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.
- Young-woo J., Hyun-wook L., Seok-won L. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution»*, 2013, 10-13 June, Stockholm, Paper 608.
- 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.
- Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov [Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 46–48.
- Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S. Energeticheskiye protsessy i effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo deystviya [Energy processes and efficiency of an induction-dynamic shock transducer]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no 2, pp. 9–14.
- Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz konstruktivnykh skhem lineynykh udarnykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley kombinirovannogo tipa [Comparative analysis of constructive schemes of linear shock electromechanical converters of combined type]. *Electrotekhnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2015, no 4, pp.20–27.
- Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method, *14th biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*, 2010, pp. 1–9.
- Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W. Characteristic analysis and design of a Thomson coil actuator using an analytic method and a numerical method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 12, pp. 5749–5755.
- 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.
- Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // *Russian Electrical Engineering*, 2012, Vol. 83, no 10. – pp. 571 – 576.
- Cmsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.

Поступила (received) 27.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів ударно-силової дії / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга, І. С. Щукін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія:

"Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 59–66. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2409-9295.

Исследование комбинированных линейных импульсных электромеханических преобразователей ударно-силового действия / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга, И. С. Щукін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 59–66. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2409-9295.

Investigation of combined linear pulse electromechanical converters of impact-force action / V. F. Bolyukh, A. I. Kocherga, I. S. Shchukin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 59–66. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Болюх Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Болюх Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры общей электротехники, тел. (057)707-65-14; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Bolyukh Vladimir Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of chair of General Electrical Engineering, tel. +38 (057)707-64-27; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

Кочерга Олександр Іванович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

Кочерга Александр Иванович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри общей електротехніки, тел. (057)707-65-14; e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

Kocherga Aleksandr Ivanovych, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department "General Electrical Engineering", tel. +38 (057)707-64-27, e-mail: kocherga.oleksandr07@gmail.com.

Щукін Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, (057)707-65-14, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.

Щукін Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com

Shchukin Igor Sergeevich, PhD in Technical Sciences, Assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Assistant professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057)707-65-14; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.