

УДК 621.313:536.2.24:539.2

В. Ф. БОЛЮХ, А. И. КОЧЕРГА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ИНДУКЦИОННОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПОВ

Визначено характер розподілення індукції магнітного поля у лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах (ЛЕП) індукційного та електромагнітного типів при використанні для ферромагнітного якоря та екрану реальної сталі, магнітодіелектрика та ідеальної сталі, що мають нульову електропровідність. Встановлено вплив видів ферромагнітних матеріалів на їх електромеханічні характеристики. Запропоновано інтегральний показник ефективності, який враховує ККД, швидкісні, силові та електричні показники ЛЕП, та варіанти стратегії оцінки ефективності. Показано, що за усіма варіантами стратегії найменш ефективним є ЛЕП електромагнітного типу, якорь та ферромагнітний екран (ФЕ) якого виконані з магнітодіелектрика. Встановлено, що ФЕ ЛЕП індукційного типу доцільно виготовляти з реальної сталі, а ФЕ та якорь ЛЕП електромагнітного типу доцільно виготовляти з ідеальної сталі, що має мінімальну електропровідність.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, перетворювач індукційного типу, перетворювач електромагнітного типу, ферромагнетик, реальна сталь, магнітодіелектрик, ідеальна сталь.

Установлен характер распределения индукции магнитного поля в линейных импульсных электромеханических преобразователях (ЛИЭП) индукционного и электромагнитного типов при использовании для ферромагнитного якоря и экрана реальной стали, магнитодиэлектрика и идеальной стали, которые имеют нулевую электропроводность. Установлено влияние видов ферромагнитных материалов на их электромеханические характеристики. Предложены интегральный показатель эффективности, учитывающий КПД, скоростные, силовые и электрические показатели ЛИЭП, и варианты стратегии оценки эффективности. Показано, что по всем вариантам стратегии наименее эффективным является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ферромагнитный экран (ФЭ) которого выполнены из магнитодиэлектрика. Установлено, что ФЭ ЛИЭП индукционного типа целесообразно изготавливать из реальной стали, а ФЭ и якорь ЛИЭП электромагнитного типа целесообразно изготавливать из идеальной стали, которая имеет минимальную электропроводимость.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, преобразователь индукционного типа, преобразователь электромагнитного типа, ферромагнетик, реальная сталь, магнитодиэлектрик, идеальная сталь.

Purpose. The aim of the article is to estimate the influence of the type of ferromagnet - magnetodielectric, ideal and real steel, on the power, speed and electrical parameters of the linear pulsed electromechanical converter (LPEC) of induction and electromagnetic types. **Methodology.** The mathematical model of LSET using the finite element method, which takes into account spatio-temporal electromagnetic and electromechanical parameters and indices, is developed and implemented in the Comsol Multiphysics software package. The integral efficiency index has been introduced, taking into account the power, speed, energy, and environmental (induction of the magnetic scattering field) indicators. **Results.** A mathematical model of the LPEC has been developed, which describes fast and interconnected electromagnetic and electromechanical processes, manifested when the armature moves relative to the inductor. The character of the magnetic field induction distribution in LPEC of induction and electromagnetic types is established when using for a ferromagnetic anchor and a screen of real steel, a magnetodielectric and an ideal steel that have zero electrical conductivity. For these LPEC versions, the influence of the types of ferromagnetic materials on their electromechanical characteristics has been established. An integral efficiency index is proposed that takes into account the efficiency, speed, power and electrical parameters of the LPEC, and variants of the efficiency evaluation strategy. It is shown that for all strategy options the least effective is the LPEC of electromagnetic type, the armature and screen of which are made of a magnetodielectric. It is established that the induction-type LPEC screen should be made of real steel, and the screen and the electromagnetic-type LPEC anchor should be made of an ideal steel that has a minimum electrical conductivity. **Originality.** It was established for the first time that the least effective is a LPEC of electromagnetic type, the armature and screen of which are made of a magnetodielectric. Ferromagnetic screen LPEC induction type is expedient to make of real steel, and the shield and the anchor of LPEC electromagnetic type is expediently made of an ideal steel that has a minimum electrical conductivity. **Practical value.** The character of the magnetic field induction distribution in LPEC of induction and electromagnetic types is established when using for a ferromagnetic anchor and a screen of real steel, a magnetodielectric and an ideal steel that have zero electrical conductivity. For these LPEC versions, the influence of the types of ferromagnetic materials on their electromechanical characteristics has been established. An integral efficiency index is proposed that takes into account the efficiency, speed, power and electrical parameters of the LPEC, and variants of the efficiency evaluation strategy.

Keywords: Linear pulsed electromechanical converter, converter of induction type, converter of electromagnetic type, ferromagnet, real steel, magnetodielectric, ideal steel.

Введение. Одними из перспективных устройств современной электромеханики являются линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП), которые обеспечивают высокую скорость исполнительного элемента (ИЭ) на коротком активном участке, и/или создают мощные силовые импульсы при незначительном его перемещении. ЛИЭП используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей, ударно-силовых устройств и исполнительных узлов различных устройств и приборов [1 - 6].

Особенностью рассматриваемых ЛИЭП является то, что они работают с коротким рабочим циклом и ударной нагрузкой, которая многократно превышает нагрузку традиционных линейных электродвигателей продолжительного действия. Наиболее широко

применяются ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, имеющие коаксиальную конфигурацию [5]. В этих преобразователях происходит электромагнитное взаимодействие подвижного якоря с неподвижным индуктором, возбуждаемым от импульсного источника, как правило, емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). В указанных типах ЛИЭП основное отличие состоит в конструкции подвижного якоря, который обеспечивает разгон ИЭ.

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

В ЛИЭП электромагнитного типа

ферромагнитный якорь представляет собой относительно толстостенный стальной диск, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора. Учитывая значительную индукцию магнитных полей, в ЛИЭП целесообразно использовать наружный ферромагнитный экран (ФЭ) [7]. Как правило, указанный экран увеличивает индукцию магнитного поля в активной зоне ЛИЭП, повышая его электромеханические показатели, уменьшает величину тока в индукторе, что важно для электронной системы возбуждения, и уменьшает индукцию магнитного поля рассеяния в окружающее пространство, что важно для близко расположенных электронных устройств и обслуживающего персонала [8].

Однако при этом возникает вопрос о выборе вида ферромагнетика для ферромагнитного экрана в обоих типах преобразователей, а также для якоря в ЛИЭП электромагнитного типа.

В качестве основных видов ферромагнетиков рассмотрим реальную сталь, магнитодиэлектрик и идеальную сталь. Будем полагать, что и реальная и идеальная стали имеют одинаковую кривую намагничивания. Но при этом реальная сталь имеет определенную электропроводность, а в идеальной стали она равна нулю. Заметим, что низкую электропроводность идеальной стали можно обеспечить, например, путем создания специальных радиальных разрезов, препятствующих протеканию индуцированных вихревых токов [9]. В качестве магнитодиэлектрика используем феррит, обладающий отличной от стали кривой намагничивания и нулевой электропроводностью. В качестве реальной и идеальной стали выбираем Ст10, а в качестве магнитодиэлектрика – феррит 6000НМ.

Задача выбора вида ферромагнетика для ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов является актуальной. Ферромагнетик влияет на электромеханические характеристики, магнитные поля рассеяния, электрические, силовые и скоростные показатели ЛИЭП. Все это не позволяет комплексно оценить эффективность того или иного вида ферромагнитного материала для ЛИЭП рассматриваемых типов.

Целью статьи является оценка влияния вида ферромагнетика – магнитодиэлектрика, идеальной и реальной стали, на силовые, скоростные и электрические показатели ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов.

Математическая модель. В ЛИЭП при возбуждении от ЕНЭ возникают быстропротекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно неподвижного индуктора. Реализация математической модели ЛИЭП с использованием теории электрических цепей не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [10, 11]. Исходя из этого, используется 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 [3].

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

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

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля B ферромагнетика;

σ – электропроводность якоря и индуктора.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

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

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

Ток в индукторе i_1 описывается уравнением:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_l}{dt} dv = 0; \quad (3)$$

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

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.

Электродинамические в ЛИЭП индукционного типа или электромагнитные в ЛИЭП электромагнитного типа силы, действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

где S – площадь, ограничивающая поперечное сечение якоря;

n – единичный вектор нормали к поверхности якоря.

Импульс силы, определяющий силовое воздействие на якорь со стороны индуктора, описывается выражением:

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

Скорость V_z якоря с ИЭ вдоль оси z описывается уравнением [3]:

$$(m_2 + m_e) \frac{dv_z}{dt} = f_z(z) - k_p \Delta z(t) - k_T V_z(t) -$$

$$-0,125\pi\gamma_a\beta_a D_{ex2}^2 v_z^2(t), \quad (6)$$

где m_2 - масса якоря;

m_e - масса ИЭ;

k_p - коэффициент упругости буферного элемента;

k_T - коэффициент динамического сопротивления;

γ_a - плотность воздуха;

β_a - коэффициент аэродинамического сопротивления среды перемещения якоря;

D_{ex2} - внешний диаметр якоря;

Δz - величина перемещения якоря.

Система уравнений (1) – (6) описывает электромеханические процессы в ЛИЭП при начальных условиях: напряжение ЕНЭ $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$; $\Delta z(0)=0$; $V_z(0)=0$, где.

При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещение якоря относительно индуктора. Пренебрегаем сопротивлением подводящих и соединительных проводов, а также считаем обратный диод, формирующий апериодический импульс тока в индукторе, идеальным.

Решение системы уравнений (1) – (6) получаем 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 задачи была разработана расчетная компьютерная модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, которая позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [12].

Моделирование электрических процессов осуществлялось физическими модулями «Electrical circuit», который рассчитывал переходные электрические процессы, и «Magnetic fields», который рассчитывал параметры ЛИЭП на основе магнитного поля с учетом перемещения электропроводящего якоря. Моделирование магнитных процессов также осуществлялось физическим модулем «Magnetic fields», в котором электромагнитный процесс описывается системой дифференциальных уравнений для каждого узла сеточного разбиения.

Математическая модель ЛИЭП реализуется в следующей последовательности:

– выбираются физические задачи «Magnetic fields» и «Electrical circuit», размерность задачи $2D$, тип модели *time-dependent* и метод расчета;

– формируется геометрия ЛИЭП и определяются расчетные области физических задач;

– задаются исходные данные в виде величин и функций, описывающих взаимосвязи между параметрами, например, кривая намагничивания ферромагнитного материала;

– задаются начальные и граничные условия рассматриваемых физических задач;

– выполняется дискретизация расчетных областей с учетом геометрической модели ЛИЭП;

– выбирается метод решения *PARDISO* и проводятся численные расчеты.

Решение мультифизической математической модели ЛИЭП производится методом *BDF* (*backward differentiation formula*) или методом *Generalized alpha* с плавающим шагом и ограничениями по времени. Это обусловлено изменением величины погрешности расчета в зависимости от выбранного шага. Решение задачи начинается с шага по времени на 6 порядков меньше, чем максимально установленный шаг. Этот шаг автоматически варьируется в зависимости от условий сходимости и показателей относительной погрешности полученных решений.

Основные параметры ЛИЭП. Рассмотрим ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов с одинаковыми габаритными размерами. Указанные ЛИЭП имеют коаксиальную конфигурацию и содержат ФЭ, охватывающий индуктор с торцевой и наружной боковых сторон [7]. Якорь выполнен в форме плоского диска, одна из сторон которого обращена к индуктору, а вторая взаимодействует с ИЭ. Основные параметры ЛИЭП:

Индуктор: внешний диаметр $D_{ex1}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1}=10$ мм, высота $H_1 = 10$ мм, сечение медной шины $a \times b=1,8 \times 4,8$ мм², количество витков шины $N=46$ шт. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами;

ФЭ: высота дискового основания $H_{3a}=8$ мм, внешний диаметр обечайки $D_{ex3b}=118$ мм, внутренний диаметр обечайки $D_{in3b}=102$ мм;

ИЭ: масса $m_e=0,5$ кг;

Рабочий ход якоря – 10 мм;

ЕНЭ: емкость $C=2850$ мкФ, напряжение заряда $U_0=400$ В.

Возбуждение индуктора ЛИЭП осуществляется от ЕНЭ апериодическим импульсом, что позволяет использовать полярные конденсаторы. Для создания такого импульса индуктор шунтирован обратным диодом [3].

Магнитное поле рассеяния, создаваемое ЛИЭП, будем оценивать при помощи усредненного значения индукции магнитного поля B_{ex} на контуре, расположенном на расстоянии $2H_1$ от нижней торцевой и боковой сторон и на расстоянии $4H_1$ от верхней стороны индуктора.

Базовый вариант ЛИЭП. В качестве базового варианта используем ЛИЭП индукционного типа без ФЭ, у которого якорь, выполненный в виде массивного диска из технической меди, имеет следующие параметры: внешний диаметр $D_{ex2}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2}=6$ мм, высота $H_2=2,5$ мм. Начальное расстояние между индуктором и якорем $\Delta z_0=1$ мм.

На рис. 1 представлены распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе и электромеханические характеристики базового варианта ЛИЭП. Плотность тока в индукторе j_1 имеет характер полярного импульса.

Плотность индуцированного тока в якоря j_2 также имеет импульсный характер, которая в первоначальный момент времени противоположна плотности тока индуктора. Но через определенный

момент времени (примерно через 2 мс) индуцированный ток якоря меняет полярность.

Вследствие этого электродинамическая сила f_z , действующая на якорь, через указанное время меняет характер воздействия: отталкивание сменяется притяжением, хотя и многократно меньшей величины. Заметим, что перемещение якоря с ИЭ под действием электродинамической силы отталкивания начинается примерно через 0,25 мс после начала процесса возбуждения индуктора.

ЛИЭП индукционного типа с ФЭ. Рассмотрим влияние указанного выше вида ферромагнетика для ФЭ на электромеханические показатели ЛИЭП индукционного типа. На рис. 2 представлена половина общего вида ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, у которого якорь переместился относительно индуктора.

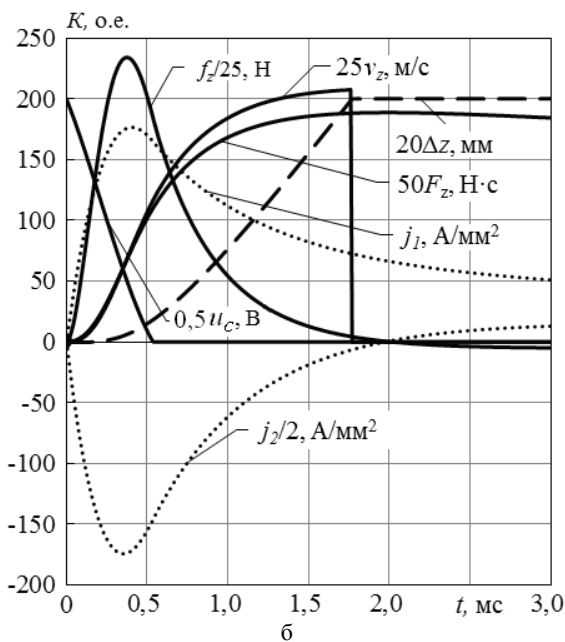
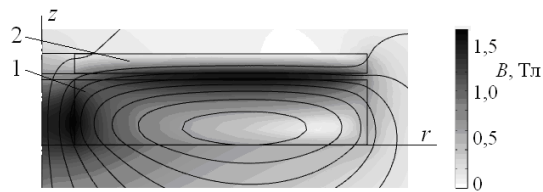


Рис. 1 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) базового варианта ЛИЭП: 1 – индуктор, 2 – якорь

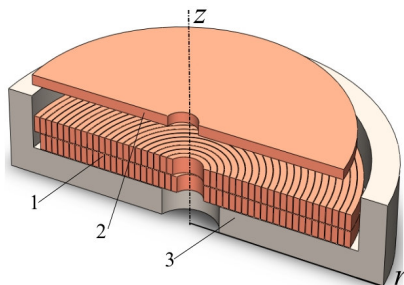


Рис. 2 – ЛИЭП индукционного типа с ФЭ

Во всех последующих рисунках выполнены единые обозначения: 1 – индуктор, 2 – электропроводящий якорь, 3 – ФЭ.

Данный преобразователь имеет такие же параметры якоря, как и у базового варианта ЛИЭП, но дополнительно содержит ФЭ, высота обечайки которого $H_{3б}=24$ мм.

Если ФЭ выполнен из реальной стали, то индуцированные в нем вихревые токи препятствуют проникновению в его массив магнитного поля (рис. 3, а).

По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП ФЭ, выполненный из реальной стали, многократно (практически в 43 раза) снижает величину индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} . Однако при этом величина максимальной плотности тока в индукторе уменьшается на 4,7%, а в якорь – на 13,4%. Вследствие этого, величина электродинамической силы f_z , действующей на якорь, уменьшается на 7,2 %, а средняя скорость якоря на участке перемещения снижается на 3,5 %. Указанно снижение рабочих показателей объясняется размагничивающим воздействием, которое оказывают индуцированные в ФЭ вихревые токи на магнитное поле в активной зоне ЛИЭП.

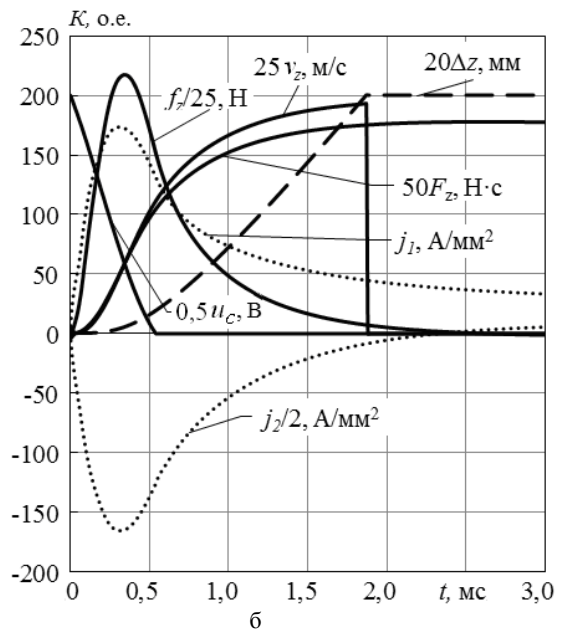
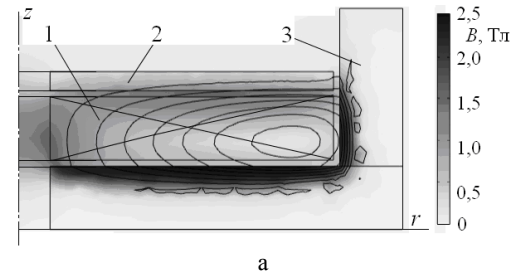


Рис. 3 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, выполненным из реальной стали

При использовании магнитодиэлектрика и идеальной стали в качестве ферромагнетика для ФЭ основные электромеханические характеристики имеют практически такой же вид, как при использовании

реальной стали. Но характер распределения магнитного поля при этом меняется (рис. 4).

При использовании идеальной стали магнитное поле практически полностью концентрируется в ФЭ, а максимальная величина индукции магнитного поля достигает 2,5 Тл. При использовании магнитодиэлектрика магнитное поле выходит за наружную поверхность ФЭ, а максимальная величина индукции магнитного поля не превышает 1,5 Тл.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, выполненным из идеальной стали, величина индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} снижается существенно – в 10,4 раза, а в ЛИЭП с ФЭ, выполненным из магнитодиэлектрика, величина индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} снижается слабее – в 1,4 раза.

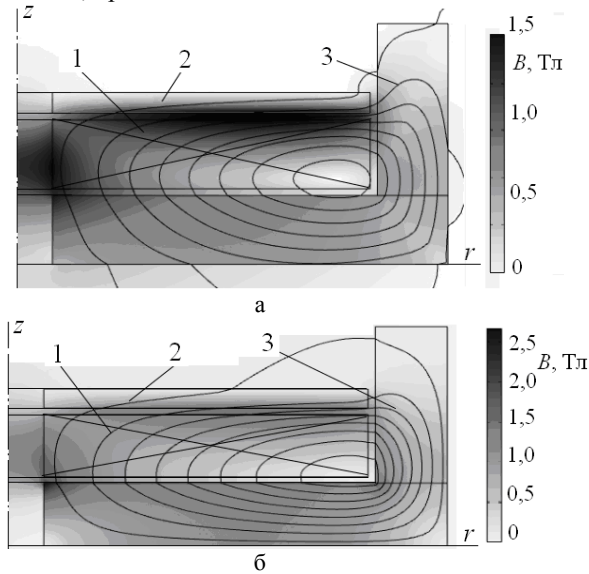


Рис. 4 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе ЛИЭП индукционного типа с ФЭ, выполненного из магнитодиэлектрика (а) и идеальной стали (б)

В обоих вариантах величина плотности тока в индукторе снижается по сравнению с базовым вариантом: при использовании ФЭ из магнитодиэлектрика незначительно – на 9,3 %, а при использовании ФЭ из идеальной стали значительно – на 32,6 %.

По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП ФЭ увеличивает как величину импульса электродинамической силы F_z , так и скорость якоря с ИЭ V_z . Если ФЭ изготовлен из магнитодиэлектрика, то импульс силы F_z возрастает на 13,2%, а скорость V_z – на 9%. Если ФЭ изготовлен из идеальной стали, то импульс силы F_z возрастает на 23%, а скорость V_z – на 13 %.

ЛИЭП электромагнитного типа. Рассмотрим ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитный якорь имеет следующие параметры: внешний диаметр $D_{ex2}=118$ мм, внутренний диаметр $D_{in2}=0$ мм, высота $H_2=5$ мм. Начальное расстояние между индуктором и якорем $\Delta z_0=10$ мм. Именно эта величина формирует рабочий ход якоря. Высота обечайки ФЭ $H_{3b}=21$ мм (рис. 5). Будем рассматривать ЛИЭП, у которого и якорь и экран выполнены из одинакового ферромагнетика.

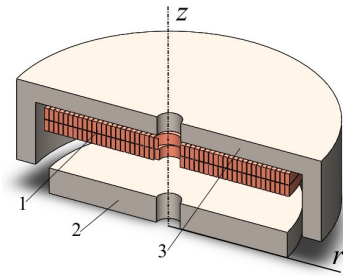


Рис. 5 – ЛИЭП электромагнитного типа

В ЛИЭП электромагнитного типа при изготовлении якоря и ФЭ из реальной стали магнитное поле проникает только в ту часть, которая обращена к индуктору (рис. 6, а). В этих областях индуцируются вихревые токи, которые экранирует проникновение магнитного поля в массив якоря и ФЭ.

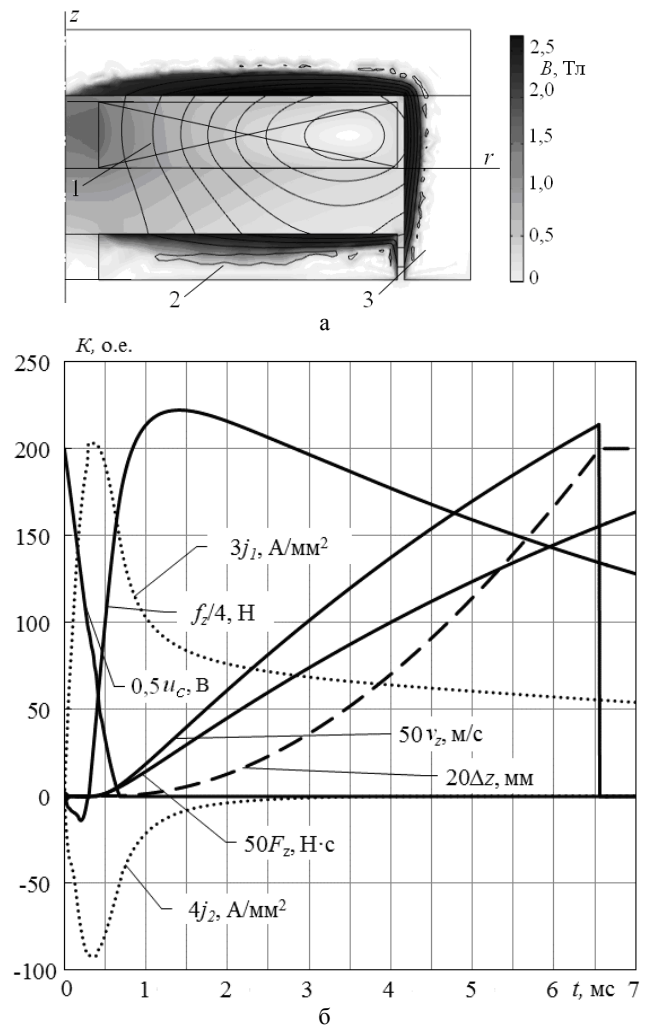


Рис. 6 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП электромагнитного типа с якорем и ФЭ, выполненными из реальной стали

Индукцированные токи в якорь, помимо препятствования проникновению магнитного поля в его массив, приводят к возникновению электродинамической силы отталкивания в начальный момент. Эта сила противоположна силе электромагнитного притягивания и является нежелательной. На рис. 6, б показана плотность тока, индуцированного в якорь j_2 , которая затухает примерно до момента времени 2,5 мс, в то

время как плотность тока в индукторе j_1 действует и после 6,5 мс, когда якорь совершает соударение с индуктором.

В целом электромеханические процессы в ЛИЭП электромагнитного типа существенно более продолжительные, чем в ЛИЭП индукционного типа. Причем, из-за наличия тормозной (отрицательной) электродинамической силы, действующей на ферромагнитный якорь, его перемещение начинается примерно через 1 мс после начала возбуждения индуктора.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитные элементы изготовлены из реальной стали, максимальное значение плотности тока в индукторе уменьшается на 74,5 %, а максимальная величина электромагнитной силы, действующей на якорь, уменьшается в 14,3 раз. Но за счет более длительного воздействия на якорь импульс этой силы уменьшается намного меньше – на 24,2 %. Из-за большей массы и меньшего импульса силы скорость якоря уменьшается в 2,6 раз по сравнению с базовым вариантом ЛИЭП.

Достоинством данного преобразователя является то, что по сравнению с базовым вариантом ЛИЭП величина индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} снижается значительно – в 17,8 раз.

При выполнении якоря и ФЭ из магнетодиэлектрика распределение магнитных полей и электромеханические характеристики ЛИЭП электромагнитного типа претерпевают определенные изменения (рис. 7).

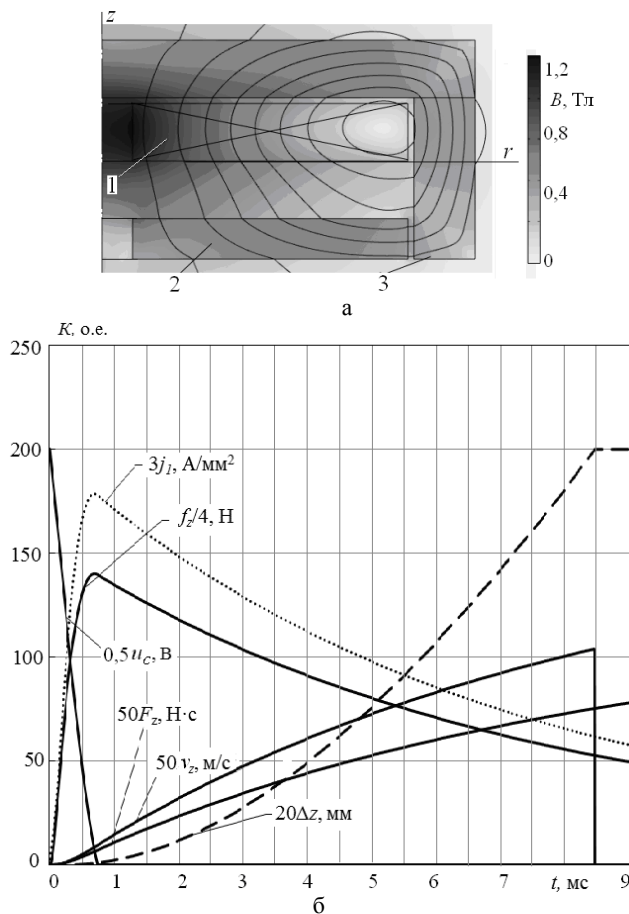


Рис. 7 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП электромагнитного типа с якорем и ФЭ, выполненными из магнетодиэлектрика

Величина индукции магнитного поля уменьшается по сравнению с рассмотренным выше вариантом. Это поле проникает во весь объем ферромагнитных элементов. Причем значительная его часть рассеивается в окружающее пространство. По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП величина индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} снижается лишь в 4,8 раза.

Электромагнитная сила притяжения в данном преобразователе не меняет своей полярности и возрастает с самого начала процесса возбуждения индуктора. Вследствие этого перемещение якоря начинается раньше – примерно через 0,6 мс после начала возбуждения индуктора.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитные элементы изготовлены из магнетодиэлектрика, плотность тока в индукторе уменьшается почти в 2 раза, а максимальная величина электромагнитной силы, действующей на якорь, уменьшается значительно – в 20,8 раз. Но за счет более длительного воздействия на якорь импульс этой силы уменьшается только в 2,1 раз. Из-за большей массы и меньшего импульса силы скорость якоря уменьшается почти в 3 раза.

При выполнении якоря и ФЭ из идеальной стали распределение магнитных полей и электромеханические характеристики ЛИЭП электромагнитного типа изменяются следующим образом (рис. 8).

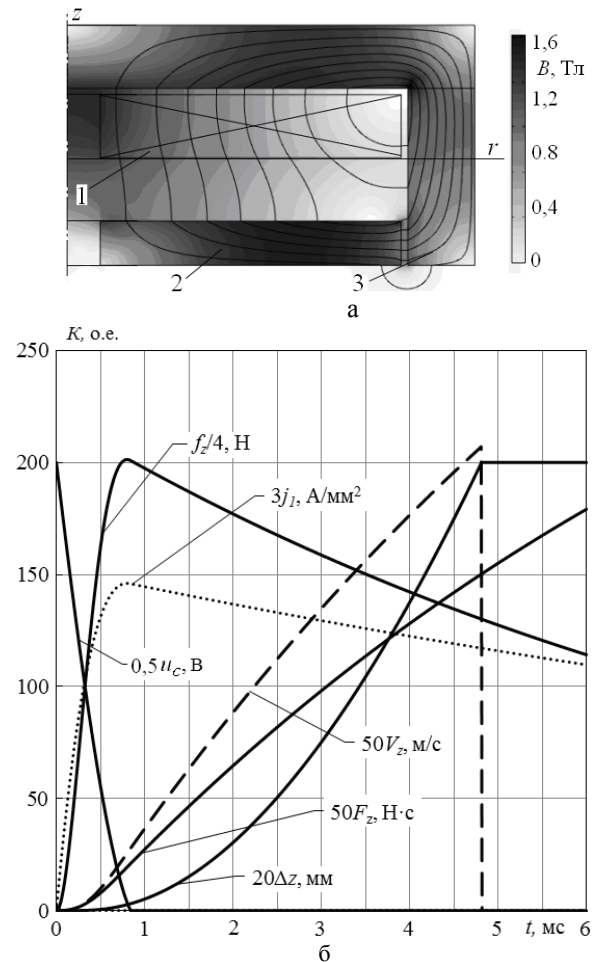


Рис. 8 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока в индукторе (а) и электромеханические характеристики (б) ЛИЭП электромагнитного типа с якорем и ФЭ, выполненными из идеальной стали

Величина индукции магнитного поля увеличивается по сравнению с вариантом выполнения ферромагнитных элементов из магнитодиэлектрика. Это поле проникает во весь объем ферромагнитных элементов, концентрируясь с ними, и существенно меньше рассеивается в окружающее пространство. По сравнению с базовым вариантом ЛИЭП величина индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} снижается значительно – в 13,5 раз.

Электромагнитная сила притяжения возрастает и не меняет своей полярности, вследствие этого перемещение якоря начинается ранее, чем у рассмотренных выше вариантов – примерно через 0,5 мс после начала возбуждения индуктора.

По сравнению с базовым вариантом в ЛИЭП электромагнитного типа, у которого ферромагнитные элементы изготовлены из идеальной стали, плотность тока в индукторе уменьшается почти в 3,6 раз, максимальная величина электромагнитной силы, действующей на якорь, уменьшается в 8 раз. Но за счет более длительного воздействия на якорь импульс этой силы увеличивается на 35,4 %. Однако из-за большей массы скорость якоря уменьшается почти в 2,3 раза.

Таким образом, можно отметить более сильное влияние ферромагнетиков на показатели ЛИЭП электромагнитного типа по сравнению с ЛИЭП индукционного типа. Однако в целом сложно отдать предпочтение тому или иному виду ферромагнетика из-за его различного влияния на основные показатели ЛИЭП.

Оценка эффективности видов ферромагнетиков для ЛИЭП. Для оценки применения различных видов ферромагнетиков для ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов, используем интегральный показатель эффективности K^* [13]. Этот показатель в относительном виде учитывает КПД $\eta = (m_2 + m_e) V_m^2 C^{-1} U_0^{-2}$ [3], скоростные, силовые и электрические показатели ЛИЭП:

$$K^* = \alpha_1 \cdot \eta^* + \alpha_2 \cdot V_m^* + \alpha_3 \cdot F_z^* + \alpha_4 \cdot (I_{1m}^*)^{-1}, \quad (7)$$

где I_{1m}^* – максимальный ток в индукторе,
 V_m^* – максимальное значение скорости якоря с ИЭ,

α_j – весовые коэффициенты соответствующих показателей ЛИЭП, удовлетворяющие соотношению:

$$\sum_{j=1}^4 \alpha_j = 1 \quad (8)$$

Все показатели ЛИЭП нормированы относительно базового варианта и отмечены звездочками. Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП, которые представлены в табл. 1. Приоритетность показателя ЛИЭП оценивается величиной соответствующего весового коэффициента α_j .

Таблица 1 – Варианты стратегий оценки эффективности ЛИЭП

Весовые коэффициенты	Варианты стратегий				
	I	II	III	IV	V
α_1	0,25	0,55	0,15	0,15	0,15
α_2	0,25	0,15	0,55	0,15	0,15
α_3	0,25	0,15	0,15	0,55	0,15
α_4	0,25	0,15	0,15	0,15	0,55

В варианте стратегии оценки эффективности ЛИЭП I используются одинаковые приоритеты для КПД, максимальных значений скорости якоря с ИЭ, импульса силы и величины тока в индукторе. В варианте II наивысший приоритет отдан КПД преобразователя, в варианте III – максимальной скорости якоря, в варианте IV – максимальному импульсу силы, а в варианте V – минимальной величине тока в индукторе.

В табл. 2 представлены значения интегрального показателя эффективности для следующих вариантов преобразователей: ЛИЭП индукционного типа, ФЭ которого выполнен из реальной стали (1), из магнитодиэлектрика (2) и из идеальной стали (3); ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из реальной стали (4), из магнитодиэлектрика (5) и из идеальной стали (6).

Таблица 2 – Значения интегрального показателя эффективности ЛИЭП, о.е.

Варианты ЛИЭП	Варианты стратегий				
	I	II	III	IV	V
1	1.061	0.983	1.023	1.192	1.046
2	1.001	1.028	0.972	1.008	0.994
3	0.975	0.994	0.919	0.979	1.010
4	0.783	0.550	0.623	0.792	1.167
5	0.437	0.287	0.343	0.376	0.742
6	1.158	0.807	0.836	1.128	1.860

Необходимо отметить, что по всем вариантам стратегии наименее эффективным является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из магнитодиэлектрика.

Наиболее эффективными ЛИЭП являются:

- по варианту стратегии I с одинаковым приоритетом рассматриваемых показателей является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из идеальной стали;
- по варианту стратегии II с наивысшим приоритетом КПД – ЛИЭП индукционного типа, ФЭ которого выполнен из магнитодиэлектрика;
- по вариантам III и IV с наивысшими приоритетами для скорости якоря и действующего на него импульса силы – ЛИЭП индукционного типа, ФЭ которого изготовлен из реальной стали;
- по варианту стратегии V с наивысшим приоритетом тока в индукторе – ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из идеальной стали.

Таким образом, анализируя полученные интегральные показатели эффективности можно сделать следующие выводы:

- ФЭ ЛИЭП индукционного типа целесообразно изготавливать из реальной стали. Причем такой экран является наиболее технологичным и конструктивным;
- ФЭ и якорь ЛИЭП электромагнитного типа целесообразно изготавливать из идеальной стали, которая имеет минимальную электропроводимость.

Выводы. Разработана математическая модель ЛИЭП, описывающая быстропротекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря

относительно индуктора, который возбуждается от ЕНЭ.

Установлен характер распределения индукции магнитного поля в ЛИЭП индукционного и электромагнитного типов при использовании для ферромагнитного якоря и экрана реальной стали, магнитодиэлектрика и идеальной стали, которые имеют нулевую электропроводность.

Для указанных исполнений ЛИЭП установлено влияние видов ферромагнитных материалов на их электромеханические характеристики.

Предложены интегральный показатель эффективности, учитывающий КПД, скоростные, силовые и электрические показатели ЛИЭП, и варианты стратегии оценки эффективности.

Показано, что по всем вариантам стратегии наименее эффективным является ЛИЭП электромагнитного типа, якорь и ФЭ которого выполнены из магнитодиэлектрика.

Установлено, что ФЭ ЛИЭП индукционного типа целесообразно изготавливать из реальной стали, а ФЭ и якорь ЛИЭП электромагнитного типа целесообразно изготавливать из идеальной стали, которая имеет минимальную электропроводимость.

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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Болюх В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 5. – С. 46–48.
- Bolyukh V., Omelchenko A., Vinnichenko A. A ballistic laser gravimeter for a symmetrical measurement method with the inductive-dynamic catapult and auto-seismic vibration preventing // *Proceedings 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM-2016)*. – State Research Center of the Russian Federation. – Saint Petersburg, Russian Federation. – 12-15 April 2016. Code 121590. – 2016. – P. 113-118.
- 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.
- Болюх В.Ф. Многокритериальный выбор параметров наружного экрана линейного импульсного электромеханического преобразователя / В.Ф. Болюх, А.И. Кочерга, И.С. Щукин // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. – № 25 (101). – С. 106–116.
- Болюх В.Ф. Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2015. – № 13 (1122). – С.45-60.
- 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.
- Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.
- Bolyukh V.F. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters / V.F. Bolyukh, L.I. Lysenko, E.G. Bolyukh // *Russian Electrical Engineering*. – 2004. – Vol. 75. – № 12. – P. 1-11.

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.
- 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.
- 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.
- 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., 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., Omelchenko A., Vinnichenko A. A ballistic laser gravimeter for a symmetrical measurement method with the inductive-dynamic catapult and auto-seismic vibration preventing // *Proceedings 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM-2016)*. – State Research Center of the Russian Federation. – Saint Petersburg, Russian Federation. – 12-15 April 2016. Code 121590. – 2016. – P. 113-118.
- 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., Kocherger A.I., Shchukin I.S. Mnogokriterial'nyy vybor parametrov naruzhnogo ekrana lineynogo impul'snogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya [Multicriteria selection of the parameters of the external screen of a linear pulse electromechanical converter] *Electrical and computer systems*, 2017, no 25 (101), pp. 106 – 116.
- Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. Vliyaniye chisla radial'nykh razrezov ferromagnitnogo ekrana na pokazateli lineynogo induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelya [Influence of the number of radial sections of a ferromagnetic screen on the indices of a linear induction-dynamic converter] *Vistnyk NTU "KPI": Problems of improving electric tricycles and machines. theory and practice*, 2015, No 13 (1122). – P. 45-60.
- 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.
- Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.
- Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*. – 2004. – Vol. 75. – № 12. – P. 1-11.

Поступила (received) 01.10.2017

Ефективність використання різних видів ферромагнетиків у лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачах індукційного та електромагнітного типів / В. Ф. Болюх, О. І. Кочерга // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 29–37. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-3944.

Эффективность использования различных видов ферромагнетиков в линейных импульсных электромеханических преобразователях индукционного и электромагнитного типов / В. Ф. Болюх, А. И. Кочерга // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 29–37. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2079-3944.

Efficiency of use of various types of ferromagnets in linear pulse electromechanical converters of induction and electromagnetic types / V.F., Bolyukh, A.S. Kocherga // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 29–37. – Bibliography: 13. – ISSN 2079-3944.

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.