

В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, И.С. Щукин

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЯКОРЯ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Розроблена математична модель лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача (ЛІЕП), яка описує швидкісні та взаємопов'язані електромагнітні та електромеханічні процеси, що проявляються при переміщенні якоря відносно індуктора. Показано, що при збільшенні висоти електропровідного, котушкового та ферромагнітного якорів ЛІЕП відбувається збільшення імпульсу сили. Найбільша швидкість розвивається в ЛІЕП з котушковим якорем, а найменша – в ЛІЕП з електропровідним якорем. В ЛІЕП з котушковим та ферромагнітним якорями реалізуються практично однакові значення імпульсу електродинамічної та електромагнітної сили, а в ЛІЕП з електропровідним якорем імпульс електродинамічної сили у 1,52 рази менший. Запропонований інтегральний показник ефективності, який у відносному вигляді враховує силові, швидкісні, енергетичні, електричні та польові показники. Визначено, що при усіх стратегіях оцінювання ефективності найбільш ефективним є ЛІЕП з котушковим якорем, а найменш ефективним є ЛІЕП з ферромагнітним якорем. Бібл. 11, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, математична модель, електропровідний, котушковий та ферромагнітний якорі, інтегральний показник ефективності, стратегія оцінювання ефективності.

Разработана математическая модель линейного импульсного электромеханического преобразователя (ЛИЭП), описывающая быстротекущие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора. Показано, что при увеличении высоты электропроводящего, катушечного и ферромагнитного якорей ЛИЭП происходит увеличение импульса силы. Наибольшая скорость развивается в ЛИЭП с катушечным якорем, а наименьшая – в ЛИЭП с электропроводящим якорем. В ЛИЭП с катушечным и ферромагнитным якорями реализуются практически одинаковые значения импульса электродинамической и электромагнитной силы, а в ЛИЭП с электропроводящим якорем импульс электродинамической силы в 1,52 раза меньше. Введен интегральный показатель эффективности, который в относительном виде учитывает силовые, скоростные, энергетические, электрические и полевые показатели. Установлено, что при всех стратегиях оценки эффективности наиболее эффективным является ЛИЭП с катушечным якорем, а наименее эффективным является ЛИЭП с ферромагнитным якорем. Библ. 11, табл. 3, рис. 2.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, математическая модель, электропроводящий, катушечный и ферромагнитный якоря, интегральный показатель эффективности, стратегия оценки эффективности.

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 и ударно-силовых устройств [1-4].

В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы, устройства для забивания свай и анкеров; в горной промышленности – бутобои, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – вибросейсмоисточники; в машиностроении – приводы станов холодной прокатки труб, прессы, молоты с большим диапазоном энергии удара; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и дозаторы. ЛИЭП применяются в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, уничтожения информации на цифровых носителях и др. Такие преобразователи используются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки, в авиационной и космической технике, в исследовательских установках, например, для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты. Актуальна задача обес-

печения высокой скорости для быстродействующих электрических аппаратов.

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, электродинамического и электромагнитного типов [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 электропроводящий якорь (ЭЯ) представляет собой относительно тонкий медный 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 подвижную катушку, которая электрически связана с индуктором, т.е. питается одним и тем же током, вследствие чего между ними также возникает электродинамическая сила отталкивания.

В ЛИЭП электромагнитного типа ферромагнитный якорь (ФЯ) представляет собой относительно

толстостенный диск, на который действует электромагнитная сила притяжения со стороны индуктора. Учитывая значительную индукцию магнитных полей, в ЛИЭП целесообразно использовать наружный ферромагнитный экран (ФЭ) с малой электропроводностью, выполненный либо из магнитодиэлектрика, либо с радиальными разрезами [6]. Указанный экран увеличивает магнитные поля в активной зоне ЛИЭП и уменьшает магнитные поля рассеяния, что важно для близко расположенных электронных устройств и обслуживающего персонала.

ЛИЭП с рассматриваемыми типами якоря обеспечивают различные силовые и скоростные показатели, создавая различные величины индукции магнитных полей рассеяния в окружающее пространство. ЛИЭП имеют различную массу активных элементов, конструктивную сложность, определяющую их надежность и величину тока возбуждения индуктора, что важно для электронной системы управления. Вследствие этого для обоснованного выбора типа якоря ЛИЭП необходимо учитывать множество различных разнородных показателей.

Задача выбора типа якоря для ЛИЭП является актуальной. Так в работе [2] рассматривается сравнительный анализ ЛИЭП с ЭЯ и КЯ, а в работе [7] – ЛИЭП с ЭЯ и с ФЯ. В этих работах анализируются только электромеханические характеристики ЛИЭП без учета надежности конструкции якоря, магнитных полей рассеяния, взаимосвязанных электрических, силовых, скоростных показателей и параметров подвижного якоря и наличия наружного ФЭ.

Исходя из этого, эффективность ЛИЭП целесообразно оценить при помощи интегрального показателя, который учитывает его силовые, скоростные, энергетические и электрические показатели, а также надежность конструкции якоря и магнитное поле рассеяния, негативно влияющее на близко расположенные электронные устройства и обслуживающий персонал. Однако до настоящего времени такие исследования не были проведены, что затрудняет осуществлять обоснованный и всесторонний выбор электропроводящего, ферромагнитного или катушечного якоря для ЛИЭП.

Целью статьи является оценка влияния параметров якоря ЛИЭП на его эффективность при учете силовых, скоростных, конструктивных и экологических показателей.

Математическая модель. В ЛИЭП при возбуждении от ЕНЭ возникают быстропотекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора. Реализация математической модели ЛИЭП с использованием теории электрических цепей не позволяет в полной мере описать совокупность пространственно-временных процессов [8]. Исходя из этого, используется 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 [3]. Для опре-

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

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

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость, зависящая от индукции магнитного поля B ферромагнитного материала; σ – электропроводность якоря и индуктора; j_n – плотность тока в активном элементе; $n = 1$ – индекс индуктора; $n = 2$ – индекс катушечного якоря.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

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

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

Ток в индукторе i_1 описывается уравнением:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int \frac{dA_1}{dt} dv = 0; \quad (3)$$

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

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

Электродинамические или электромагнитные 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, например пружины; k_T – коэффициент динамического сопротивления; γ_a – плотность воздуха; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{ex2} – внешний диаметр якоря; Δz – величина перемещения якоря.

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

При расчете предполагаем отсутствие механических перемещений (отдачи) индуктора, деформации элементов и строго аксиальное расположение и перемещение якоря относительно индуктора.

Решение системы (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 компьютерная модель ЛИЭП в программном пакете *Comsol Multiphysics*, который позволяет адаптивно изменять сетку и контролировать ошибки при работе с различными численными решателями [9]. 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.

Основные параметры ЛИЭП. Рассмотрим ЛИЭП с электропроводящим, катушечным и ферромагнитным якорями, и неизменными габаритами. ЛИЭП имеет коаксиальную конфигурацию и содержит ФЭ, охватывающий индуктор с торцевой и наружной боковых сторон [6]. 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, сечение медной шины $a \times b=1,8 \times 4,8$ мм², количество витков шины $N=46$ шт;

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

ЕНЭ: емкость $C=2850$ мкФ, напряжение $U_0=400$ В. Электронная система формирует апериодический импульс возбуждения индуктора с использованием обратного диода [5].

Масса ИЭ $m_e=0,5$ кг.

ЭЯ выполнен в виде массивного диска из технической меди, а ФЭ и ФЯ выполнены из магнетодиэлектрика с магнитными свойствами стали Ст.10. КЯ и индуктор выполнены с одинаковыми геометрическими параметрами и намотаны медной шиной. В табл. 1 представлены отличающиеся параметры элементов ЛИЭП, обусловленные типом якоря.

Влияние высоты якоря на показатели ЛИЭП. Электромеханические характеристики ЛИЭП с ЭЯ, КЯ и ФЯ представлены в работе [10]. Рассмотрим влияние высоты якорей указанных типов на ЛИЭП на максимальную скорость V_m и величину импульса электродинамической или электромагнитной силы, действующей на якорь. Несмотря на различное строение подвижного якоря в рассматриваемых преобразователях, в них можно реализовать различную высоту при сохранении остальных параметров. Высота ЭЯ и ФЯ определяется

высотой медного и ферромагнитного дисков соответственно. Высота КЯ определяется шириной шины при неизменном количестве ее витков.

Таблица 1

Отличающиеся параметры ЛИЭП

Показатель, обозначение, единица измерения	Тип якоря ЛИЭП		
	КЯ	ФЯ	ЭЯ
Высота индуктора, H_1 , мм	5	10	10
Внешний диаметр якоря, D_{ex2} , мм	100	118	100
Внутренний диаметр якоря, D_{in2} , мм	10	0	6
Высота якоря, H_2 , мм	5	5	2,5
Начальное расстояние между индуктором и якорем, Δz_0 , мм	1	5	1
Масса якоря, m_2 , кг	0,345	0,535	0,205
Высота обечайки ФЭ, мм H_{3b}	24	21	24

При этом сечение шины индуктора остается неизменным. Введем безразмерный геометрический параметр, характеризующий высоту якоря:

$$\varepsilon = \frac{H_2}{H_1}. \quad (7)$$

Рассмотрим диапазон изменения высоты якорей, в котором находится максимум скорости якоря с ИЭ V_m (рис. 1). При увеличении высоты якоря во всех ЛИЭП происходит увеличение импульса силы F_z . При изменении геометрического параметра ε КЯ от 0,2 до 1,2 величина импульса силы F_z возрастает в 2,03 раза. При изменении геометрического параметра ε ФЯ от 0,4 до 1,4 величина F_z возрастает в 2,52 раза. А при изменении параметра ε ЭЯ от 0,1 до 0,5 величина F_z возрастает в 1,94 раза. Таким образом, при увеличении высоты рассматриваемых типов якоря в ЛИЭП величина импульса ЭДУ F_z возрастает, но в разной мере.

При увеличении высоты якоря происходит и увеличение его массы. Это обуславливает то, что, максимальная скорость якоря с ИЭ V_m от указанной высоты имеет более сложную зависимость. Максимальные значения скоростей рассматриваемых типов якорей ЛИЭП реализуются при различной их высоте, которая для них является наиболее рациональной. Наименее низким, с этой точки зрения, является ЭЯ ($H_2=2,2$ мм), а наиболее высоким – ФЯ ($H_2=10,5$ мм). В КЯ максимальная скорость реализуется при якоря, рациональная высота которого $H_2=6,1$ мм.

В табл. 2 представлены значения импульса силы F_z и максимальной скорости V_m якоря при рациональной его высоте, которая представлена в виде геометрического параметра ε . Как следует из полученных результатов, при рациональной высоте якоря наибольшая скорость развивается в ЛИЭП с КЯ, а наименьшая – в ЛИЭП с ЭЯ. В ЛИЭП с КЯ и ФЯ реализуются практически одинаковые значения импульса электродинамической и электромагнитной силы, в то время как в ЛИЭП с ЭЯ импульс электродинамической силы в 1,52 раза меньше.

На рис. 2 показано распределение индукции магнитного поля в момент максимума силы в ЛИЭП с различными типами якорей. В ЛИЭП с ЭЯ наибольшая индукция магнитного поля имеет место в зазоре между индуктором и якорем. При этом на наружной

поверхности якоря поле практически полностью экранировано. В ЛИЭП с КЯ наибольшая индукция магнитного поля появляется между якорем и индуктором, по которым протекает один и тот же ток. При этом частично магнитное поле выходит за поверх-

ность якоря. В ЛИЭП с ФЯ максимальная индукция магнитного поля возникает во внутреннем цилиндрическом сердечнике, который охватывается индуктором. При этом наблюдается значительная индукция поля рассеяния.

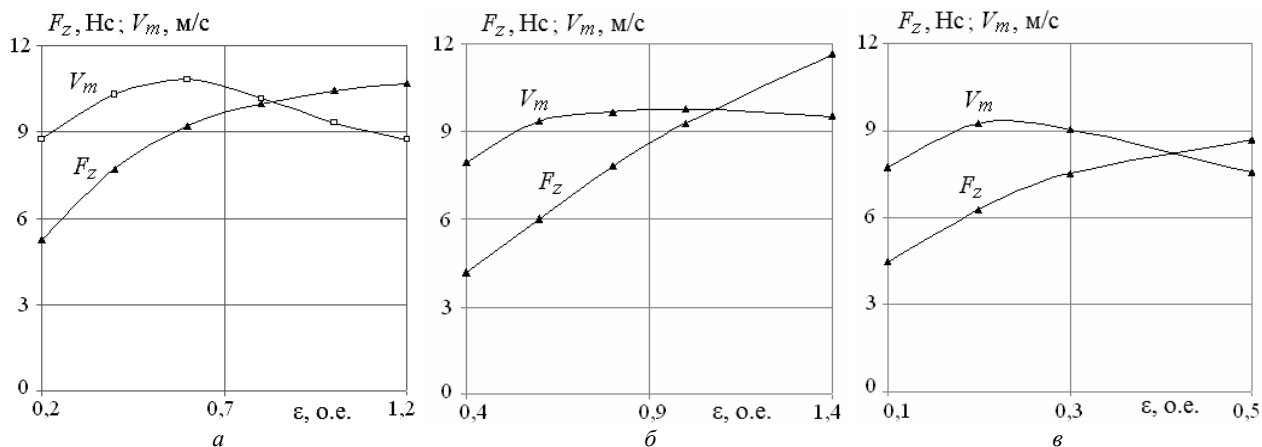


Рис. 1. Изменение импульса силы F_z и максимальной скорости V_m якоря с ИЭ в зависимости от величины параметра ϵ для: КЯ (а), ФЯ (б), ЭЯ (в)

Таблица 2
Значения F_z и V_m ЛИЭП с различными типами якорей при рациональном значении параметра ϵ

Тип якоря	ϵ^* , о.е.	F_z , Нс	V_m , м/с
ЭЯ	0,22	6,1	9,32
КЯ	0,61	9,3	10,82
ФЯ	1,05	9,3	9,75

Как показывают расчеты, электромеханические процессы протекают наиболее быстро в ЛИЭП с КЯ, а

ток в индукторе и электродинамические силы принимают наибольшие значения. В ЛИЭП с ФЯ электромеханические процессы протекают наиболее медленно, причем максимальная величина электромагнитных сил здесь наименьшая. Скорости ЛИЭП с КЯ и ЭЯ, где действуют электродинамические силы отталкивания, после резкого начального возрастания практически не меняются. В ЛИЭП с ФЯ, где действует электромагнитная сила притяжения, указанная скорость постоянно растет до момента соударения якоря с ФЭ.

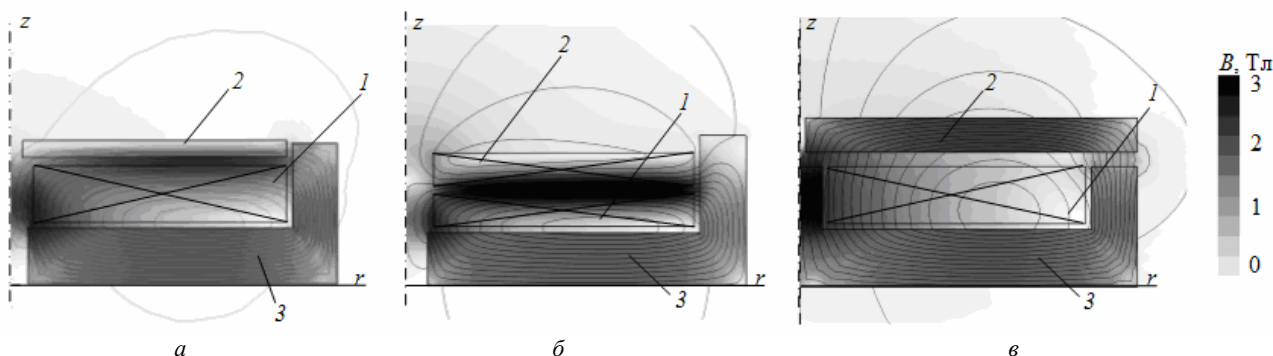


Рис. 2. Распределения индукций магнитных полей в ЛИЭП с ЭЯ (а), КЯ (б) и ФЯ (в) в момент максимума силы: 1 – индуктор, 2 – якорь, 3 – ФЭ

Оценка эффективности ЛИЭП. Для оценки ЛИЭП с различными типами якорей, имеющих рациональную высоту, при которой развивается наибольшая скорость якоря с ИЭ, введем интегральный показатель эффективности K^* [11]. Этот показатель в относительном виде учитывает силовые, скоростные, энергетические, электрические и полевые (индукция магнитного поля рассеяния) показатели:

$$K^* = \beta \left(\alpha_1 j_{zm}^* + \alpha_2 V_m^* + \alpha_3 W_{kin}^* + \frac{\alpha_4}{j_{1m}^*} + \frac{\alpha_5}{B_{ex}^*} \right), \quad (8)$$

где j_{1m} – максимальная плотность тока в индукторе, f_{zm} – максимальное значение силы, действующей на

подвижный якорь со стороны индуктора, V_m – максимальное значение скорости якоря с ИЭ, W_{kin} – кинетическая энергия, развиваемая ЛИЭП, B_{ex} – усредненное значение индукции магнитного поля рассеяния, β – коэффициент надежности якоря, α_j – весовые коэффициенты соответствующих показателей ЛИЭП, удовлетворяющие соотношению:

$$\sum_{j=1}^5 \alpha_j = 1. \quad (9)$$

Усредненное значение индукции магнитного поля рассеяния B_{ex} рассчитывается на контуре, расположенном на расстоянии $2H_1$ от нижней торцевой и

боковой сторон и на расстоянии $4H_1$ от верхней стороны индуктора.

Все показатели ЛИЭП нормированы относительно ЛИЭП с ЭЯ и отмечены звездочками. Таким образом, интегральный показатель эффективности ЛИЭП с ЭЯ $K^*=1$.

Используем коэффициенты надежности для ФЯ $\beta = 1,2$, для ЭЯ $\beta = 1$, для КЯ $\beta = 0,8$. Повышенная надежность ФЯ обусловлена конструкцией массивного ферромагнитного диска. Более низкая надежность ЭЯ обусловлена менее устойчивой к электродинамическим силам конструкции тонкостенного медного диска. Еще более низкая надежность КЯ обусловлена наличием подвижного контакта между индуктором и якорем, который выполнен в виде многовитковой катушки, компаундированной эпоксидной смолой.

Рассмотрим несколько вариантов стратегии оценки эффективности ЛИЭП (табл. 3). Приоритетность показателя ЛИЭП оценивается величиной соответствующего весового коэффициента α_j .

Таблица 3

Варианты стратегии оценки и значения интегрального показателя эффективности ЛИЭП с ФЯ и с КЯ, о.е.

Вариант	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	K^* (с ФЯ)	K^* (с КЯ)
I	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,703	1,518
II	0,4	0,15	0,15	0,15	0,15	0,656	1,556
III	0,15	0,4	0,15	0,15	0,15	0,676	1,335
IV	0,15	0,15	0,4	0,15	0,15	0,720	1,474
V	0,15	0,15	0,15	0,4	0,15	0,829	1,218
VI	0,15	0,15	0,15	0,15	0,4	0,631	2,004
VII	0,35	0,1	0,1	0,1	0,35	0,584	2,043
VIII	0,1	0,35	0,1	0,1	0,35	0,605	1,822

В варианте стратегии VII, при котором наивысший приоритет отдан амплитуде силы, действующей на якорь, и величине индукции магнитного поля рассеяния, эффективность ЛИЭП с ФЯ наименьшая, а эффективность ЛИЭП с КЯ – наибольшая. В варианте стратегии V, при котором наивысший приоритет отдан величине импульса тока индуктора, эффективность ЛИЭП с ФЯ наибольшая, а эффективность ЛИЭП с КЯ наименьшая.

Таким образом, при всех стратегиях оценки эффективности наиболее эффективным является ЛИЭП с КЯ, даже несмотря на его конструктивную сложность, а наименее эффективным является ЛИЭП с ФЯ, хотя он является конструктивно наиболее простым.

Выводы.

1. Разработана математическая модель ЛИЭП, описывающая быстропротекающие и взаимосвязанные электромагнитные и электромеханические процессы, проявляющиеся при перемещении якоря относительно индуктора, который возбуждается от ЕНЭ.

2. Показано, что при увеличении высоты электропроводящего, катушечного и ферромагнитного якорей ЛИЭП происходит увеличение импульса силы.

3. Наибольшая скорость развивается в ЛИЭП с КЯ, а наименьшая – в ЛИЭП с ЭЯ. В ЛИЭП с КЯ и ФЯ реализуются практически одинаковые значения импульса электродинамической и электромагнитной силы, в то время как в ЛИЭП с ЭЯ импульс электродинамической силы в 1,52 раза меньше.

4. С использованием интегрального показателя эффективности, который в относительном виде учитывает силовые, скоростные, энергетические, электрические и полевые показатели, установлено, что при всех стратегиях оценки наиболее эффективным является ЛИЭП с КЯ, даже несмотря на его конструктивную сложность, а наименее эффективным является ЛИЭП с ФЯ, хотя он является конструктивно наиболее простым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2005. – vol.41. – no.1. – pp. 171-175. doi: [10.1109/tmag.2004.839283](https://doi.org/10.1109/tmag.2004.839283).
- 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. doi: [10.1109/tmag.2012.2198447](https://doi.org/10.1109/tmag.2012.2198447).
- 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. doi: [10.3103/s1068371211020027](https://doi.org/10.3103/s1068371211020027).
- Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). – 2013, 10-13 June, Stockholm. – Paper 608. doi: [10.1049/cp.2013.0834](https://doi.org/10.1049/cp.2013.0834).
- Болух В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
- 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. doi: [10.3103/s1068371215070044](https://doi.org/10.3103/s1068371215070044).
- Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – №5. – С. 46-48.
- D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. 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. doi: [10.1109/tmag.2013.2272561](https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2272561).
- Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.
- Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №3. – С. 31-40. doi: [10.20998/2074-272X.2015.3.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.05).
- Болух В.Ф., Кочерга А.И., Щукин И.С. Многокритериальный выбор параметров наружного экрана линейного импульсного электромеханического преобразователя // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. – №25(101). – С. 106-116.

REFERENCES

- Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol.41, no.1, pp. 171-175. doi: [10.1109/tmag.2004.839283](https://doi.org/10.1109/tmag.2004.839283).
- 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. doi: [10.1109/tmag.2012.2198447](https://doi.org/10.1109/tmag.2012.2198447).
- 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. doi: **10.3103/s1068371211020027**.
4. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, 10-13 June, Stockholm, Paper 608. doi: **10.1049/cp.2013.0834**.
5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induksionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
6. 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. doi: **10.3103/s1068371215070044**.
7. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulse electromechanical converters electromagnetic and induction types. *Technical Electrodynamics*, 2016, no.5, pp. 46-48. (Rus).
8. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. 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. doi: **10.1109/tmag.2013.2272561**.
9. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. Available at: <http://www.comsol.com> (accessed 05 May 2015).
10. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds. *Electrical engineering & electro-mechanics*, 2015, no.3, pp. 31-40. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.3.05**.
11. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Shchukin I.S. Multicriterial selection of parameters of the external screen of a linear pulse electromechanical transducer. *Electrotechnic and computer systems*, 2017, no.25(101), pp. 106-116. (Rus).

Поступила (received) 20.09.2017

Болух Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Кочерга Александр Иванович¹, аспирант,
Шукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, A.I. Kocherga¹, I.S. Schukin^{1,2}

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Firm Tetra, LTD,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Influence of armature parameters of a linear pulse electromechanical converter on its efficiency.

Purpose. The evaluation of the effect of armature parameters on the efficiency of a linear pulsed electromechanical converter, taking into account the power, speed, constructive and environmental parameters. **Methodology.** First, the height of the electrically conductive, coil and ferromagnetic armature of a linear pulse electromechanical converter is determined, at which the highest velocity develops. An integral efficiency index is introduced, which takes into account, in a relative way, the power, speed, energy, electrical and field characteristics of the converter. Variants of the efficiency evaluation strategy are used that take into account the priority of each indicator of a linear pulse electromechanical converter using the appropriate weighting factor in the integral efficiency index.

Results. A mathematical model of a linear pulsed electromechanical converter is developed. It is established that as the height of the electroconductive, coil and ferromagnetic armature increases, the force pulse increases. The greatest speed develops with the use of a coil armature, and the smallest with an electroconductive armature. In the converter with coil and ferromagnetic armature, practically the same values of the electrodynamic and electromagnetic force pulse are realized, while in the converter the electrodynamic force is 1.52 times smaller in the converter by the electrically conductive armature. It is established that with all efficiency evaluation strategies, the converter with a coil armature is the most effective, even in spite of its constructive complexity, and the converter with a ferromagnetic armature is the least effective, although it is constructively the simplest. **Originality.** For the first time, using the integral efficiency index, which takes into account the power, speed, energy, electrical and field indices in a relative way, it is established that with all efficiency evaluation strategies, the converter with a coil armature is the most effective, and the converter with a ferromagnetic anchor is the least effective. **Practical value.** The height of the electrically conductive, coil and ferromagnetic armature of a linear pulse electromechanical converter is determined, at which the highest speed develops. It is shown that when using an electrically conductive armature, the value of the electrodynamic force pulse is lower than when using a coil and ferromagnetic armature. It is established that the converter with a coil armature is the most efficient, and the converter with a ferromagnetic armature is the least effective. References 11, tables 3, figures 2.

Key words: linear pulse electromechanical converter, mathematical model, electrically conductive, coil and ferromagnetic armature, integral efficiency index, efficiency evaluation strategy.