

В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, И.С. Щукин

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА И ЯКОРЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА

Розроблена ланцюгова математична модель лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача (ЛІЕП) електродинамічного типу. Отримано рекурентні співвідношення для розрахунку взаємопов'язаних електромагнітних, механічних і теплових процесів. Встановлено, що при збільшенні товщини квадратної мідної шини котушок індуктора і якоря від 1,0 до 2,5 мм збільшуються амплітуда і величина імпульсу електродинамічних зусиль (ЕДЗ). Максимальна швидкість якоря найбільша у ЛІЕП, котушки індуктора і якоря якого намотані шиною товщиною 1,5 мм. Найбільше значення ККД у ЛІЕП, котушки якого намотані шиною товщиною 2,0 мм. При збільшенні кількості шарів шини котушки індуктора амплітуда ЕДЗ знижується істотно, а величина імпульсу ЕДЗ – незначно. Внаслідок цього знижуються максимальна швидкість якоря, ККД і перевищення температури котушок. Найбільша амплітуда ЕДЗ реалізується в ЛІЕП при мінімальній кількості шарів шин котушок індуктора і якоря, а найбільша величина імпульсу ЕДЗ виникає при максимальній їх кількості. При цьому найбільші значення амплітуди і імпульсу ЕДЗ виникають за умови, коли число шарів шини котушок однакові. Найбільший ККД (21,82 %) реалізується в ЛІЕП, у якого котушки індуктора і якоря намотані в чотири шари квадратної шини товщиною 2,0 мм. На базі ЛІЕП електродинамічного типу була виготовлена і випробувана модель катапульти для запуску безпілотного літального апарату. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач електродинамічного типу, ланцюгова математична модель, рекурентні співвідношення, геометричні параметри котушок індуктора і якоря, електродинамічні зусилля, ККД.

Разработана ценная математическая модель линейного импульсного электромеханического преобразователя (ЛИЭП) электродинамического типа. Получены рекуррентные соотношения для расчета взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов. Установлено, что при увеличении толщины квадратной медной шины катушек индуктора и якоря от 1,0 до 2,5 мм увеличиваются амплитуда и величина импульса электродинамических усилий (ЭДУ). Максимальная скорость якоря наибольшая у ЛИЭП, катушки индуктора и якоря которого намотаны шиной толщиной 1,5 мм. Наибольшее значение КПД у ЛИЭП, катушки которого намотаны шиной толщиной 2,0 мм. При увеличении количества слоев шины катушки индуктора амплитуда ЭДУ уменьшается существенно, а величина импульса ЭДУ – незначительно. Вследствие этого снижаются максимальная скорость якоря, КПД и превышения температуры катушек. Наибольшая амплитуда ЭДУ реализуется в ЛИЭП при минимальном количестве слоев шин катушек индуктора и якоря, а наибольшая величина импульса ЭДУ возникает при максимальном их количестве. При этом наибольшие значения амплитуды и импульса ЭДУ возникают при условии, когда количество слоев шин катушек одинаковы. Наибольший КПД (21,82 %) реализуется в ЛИЭП, у которого катушки индуктора и якоря намотаны в четыре слоя квадратной шины толщиной 2,0 мм. На базе ЛИЭП электродинамического типа была изготовлена и испытана модель катапульти для запуска беспилотного летательного аппарата. Библ. 12, рис. 6.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь электродинамического типа, ценная математическая модель, рекуррентные соотношения, геометрические параметры катушек индуктора и якоря, электродинамические усилия, КПД.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) позволяют обеспечить высокую скорость исполнительного элемента (ИЭ) на коротком активном участке и/или создать мощные силовые импульсы при незначительном его перемещении [1-3]. Такие преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [4, 5]. Одним из перспективных представляется ЛИЭП электродинамического типа [6, 7]. В этом преобразователе, имеющем коаксиальную конфигурацию, неподвижный индуктор и ускоряемый якорь выполнены в виде монолитных дисковых катушек, которые пропитаны эпоксидной смолой. Соединенные последовательно индуктор и якорь плотно намотаны одной и той же медной шиной. В них возбуждается ток от импульсного источника питания, содержащего емкостной накопитель энергии (ЕНЭ) [4, 8]. Якорь соединяется с индуктором и с источником питания при помощи подвижных (гибких или скользящих) тоководов. Индуктор и якорь соединены

встречно по магнитному полю, вследствие чего между ним действуют электродинамические усилия (ЭДУ) отталкивания. Эти ЭДУ вызывают аксиальное перемещение якоря относительно неподвижного индуктора (рис. 1,а).

В процессе работы ЛИЭП происходит изменение магнитной связи между якорем и индуктором. Кроме того их активные сопротивления увеличиваются из-за нагрева импульсным током высокой плотности. Эти особенности рабочего процесса необходимо учитывать в математической модели ЛИЭП электродинамического типа [9]. При работе в динамическом режиме с быстрым изменением электромагнитных, механических и тепловых параметров эффективность ЛИЭП недостаточно высока, что связано, в частности, с отсутствием обоснований по выбору геометрических параметров активных элементов – катушек индуктора и якоря.

Целью статьи является исследование влияния геометрических параметров, а именно, количества слоев и сечения медной шини катушек индуктора и

© В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, И.С. Щукин

якоря на силовые и скоростные показатели ЛИЭП электродинамического типа.

Математическая модель. Рассмотрим математическую модель ЛИЭП электродинамического типа, в которой используются сосредоточенные параметры индуктора и якоря. Будем полагать, что неподвижный индуктор и ускоряемый якорь выполнены в виде коаксиально установленных круглых дисковых многовитковых катушек, которые плотно намотаны одной и той же медной шиной квадратного сечения.

Для учета взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов, а также ряда нелинейных зависимостей решения уравнений, описывающих указанные процессы, представим в рекуррентном виде [10].

При подаче пускового импульса на тиристор VS возбуждение индуктора и якоря осуществляется аperiodическим полярным импульсом от ЕНЭ C , шунтированного обратным диодом VD (рис. 1, б). Полагаем, что в импульсном источнике питания сопротивления диода VD и тиристора VS в прямом направлении пренебрежимо малы, а в обратном направлении их проводимости столь же малы.

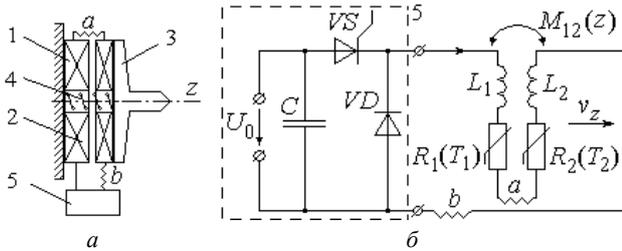


Рис. 1. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы ЛИЭП электродинамического типа: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ИЭ; 4 – возвратная пружина; 5 – источник питания; а, б – гибкие токовводы

Электрические процессы в ЛИЭП электродинамического типа на временном интервале $\{0, t_1\}$, где t_1 – время, при котором напряжение ЕНЭ $u_C = 0$, можно описать уравнением:

$$[R_1(T_1) + R_2(T_2)] \cdot i + \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt = 0, \quad u_C(0) = U_0, \quad (1)$$

где $n = 1, 2$ – индексы индуктора и якоря соответственно; R_n, T_n, L_n – активное сопротивление, температура и индуктивность n -го элемента; M_{12} – взаимная индуктивность между индуктором и якорем, перемещаемым вдоль оси z со скоростью v_z :

$$\frac{d\psi}{dt} = [L_1 - 2M_{12}(z) + L_2] \frac{di}{dt} - 2iv_z(t) \frac{dM_{12}}{dz}. \quad (2)$$

Подставляя уравнение (2) в (1) получаем:

$$\left(R_1(T_1) + R_2(T_2) - 2v_z(t) \frac{dM_{12}}{dz} \right) \cdot i + [L_1 - 2M_{12}(z) + L_2] \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t idt = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) представим в виде:

$$i = A_1 \exp(\alpha_1 t) + A_2 \exp(\alpha_2 t), \quad (4)$$

где A_1, A_2 – произвольные постоянные,

$$\alpha_{1,2} = -0,5 \frac{\Theta}{\Xi} \pm \left[0,25 \left(\frac{\Theta}{\Xi} \right)^2 - \frac{1}{\Xi C} \right]^{0,5} - \text{корни характеристического уравнения; } \Xi = L_1 - 2M_{12}(z) + L_2; \Theta = R_1(T_1) + R_2(T_2) - 2v_z(t) \frac{dM_{12}}{dz}.$$

Для представления решения в рекуррентном виде определим значения произвольных постоянных в момент времени t_k .

Если $\Theta > 2\sqrt{\Xi C^{-1}}$, то после ряда преобразований получаем:

$$A_{1,2} = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k) + \alpha_{2,1} \Xi \cdot i(t_k)}{\Xi \exp(\alpha_{1,2} t_k) (\alpha_{2,1} - \alpha_{1,2})}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (5) в уравнение (4) получаем выражение для тока:

$$i(t_{k+1}) = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\Xi(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(\alpha_1 \Delta t) - \exp(\alpha_2 \Delta t)] + \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t)], \quad (6)$$

где $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Напряжение на ЕНЭ:

$$u_C(t_{k+1}) = \frac{u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t)] + \Xi \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2^2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1^2 \exp(\alpha_2 \Delta t)] \quad (7)$$

Если $\Theta < 2\sqrt{\Xi C^{-1}}$, то корни характеристического уравнения представим в виде:

$$\alpha_{1,2} = -\delta \pm j\omega_1 = \omega_0 \exp(j(\pi \pm \theta)), \quad (8)$$

где $\delta = 0,5\Theta\Xi^{-1}$; $\theta = \arctg(4\Xi\Theta^{-2}C^{-1} - 1)^{0,5}$;

$$\omega_0 = (\Xi C)^{-0,5}; \quad \omega_1 = (\Xi^{-1}C^{-1} - 0,25\Theta^2\Xi^{-2})^{0,5}.$$

Подставляя значения корней (8) в уравнения (6) и (7) и учитывая, что

$$2j \sin(\omega_1 \Delta t) = \exp(j\omega_1 \Delta t) - \exp(-j\omega_1 \Delta t),$$

получаем:

$$i(t_{k+1}) = -\omega_1^{-1} \exp(-\delta \Delta t) \left\{ \Xi^{-1} [u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \sin(\omega_1 \Delta t) + \omega_0 i(t_k) \sin(\omega_1 \Delta t - \theta) \right\}. \quad (9)$$

Напряжение на ЕНЭ:

$$u_C(t_{k+1}) = -\omega_0 \omega_1^{-1} \exp(-\delta \Delta t) \left\{ [u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \times \sin(\omega_1 \Delta t - \theta) + i(t_k) \omega_0 \Xi \sin(\omega_1 \Delta t - 2\theta) \right\}. \quad (10)$$

Если $\Theta = 2\sqrt{\Xi C^{-1}}$, то $\delta = \omega_0$ и ток равен:

$$i(t_{k+1}) = \exp(-\delta \Delta t) \Delta t \left\{ i(t_k) \delta - \Xi^{-1} [u_C(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \right\}. \quad (11)$$

Напряжение на ЕНЭ:

$$u_C(t_{k+1}) = [u_C(t_k) - i(t_k) \Xi \delta + \Theta \cdot i(t_k)] (\delta \Delta t + 1) \times \exp(-\delta \Delta t) + i(t_k) (\Xi \delta - \Theta). \quad (12)$$

Ток в ЛИЭП на временном интервале $\{t_1, \infty\}$, изменяется по закону:

$$i(t_{k+1}) = i(t_k) \exp(-\Theta \Xi^{-1} \Delta t). \quad (13)$$

Механические процессы ЛИЭП можно описать уравнением:

$$i^2(t) \frac{dM}{dz} = (m_a + m_2) \frac{dv_z}{dt} + K_p \Delta z(t) + K_T v_z(t) + 0,125\pi\gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v_z^2(t), \quad (14)$$

где m_2 , m_a – масса якоря и ИЭ соответственно; K_p – коэффициент упругости возвратной пружины; $\Delta z(t)$ – величина перемещения якоря с ИЭ; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность среды перемещения; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{2m} – наружный диаметр ИЭ.

Эффективность аксиального силового воздействия на якорь будем оценивать величиной импульса ЭДУ [11]:

$$P_1 = \int F(z, t) dt, \quad (15)$$

где $F(z, t)$ – мгновенное значение аксиальных ЭДУ, действующих на якорь.

На основании уравнения (14) величину перемещения якоря с ИЭ можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$s(t_{k+1}) = s(t_k) + v_z(t_k) \Delta t + g \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (16)$$

где $v_z(t_{k+1}) = v_z(t_k) + g \Delta t / (m_a + m_2)$ – скорость якоря с ИЭ вдоль ос z ;

$$g = i^2(t_k) \frac{dM}{dz}(z) - K_p \Delta z(t_k) - K_T v_z(t_k) - 0,125\pi\gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v_z^2(t_k).$$

Тепловые процессы. При отсутствии перемещения якоря, что происходит либо до начала прямого хода, либо после обратного хода, между катушками индуктора и якоря существует тепловой контакт через изоляционную прокладку. Температуры n -ых активных элементов ЛИЭП электродинамического типа при этом можно описать рекуррентным соотношением [12]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \xi + (1 - \xi) \left[\pi^{-1} i_n(t_k) R_n(T_n) (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} + 0,25\pi T_0 D_{en} H_n \alpha_{Tn} + T_m(t_k) \lambda_a(T) d_a^{-1} \right] \left\{ 0,25\pi \alpha_{Tn} D_{en} H_n + \lambda_a(T) d_a^{-1} \right\}^{-1}, \quad (17)$$

$$\text{где } \xi = \exp \left\{ - \frac{\Delta t}{C_n(T_n) \gamma_n} \left(0,25 D_{en} \alpha_{Tn} + \frac{\lambda_a(T)}{d_a H_n} \right) \right\};$$

$\lambda_a(T)$ – коэффициент теплопроводности изоляционной прокладки; d_a – толщина прокладки; D_{en} , D_{in} – внешний и внутренний диаметры активных элементов соответственно; α_{Tn} – коэффициент теплоотдачи n -ого активного элемента; C_n – теплоемкость n -ого активного элемента

Температуры n -ых активных элементов при перемещении якоря и отсутствии теплового контакта между якорем и индуктором можно описать рекуррентным соотношением:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \chi + (1 - \chi) \left[T_0 + 4\pi^{-2} i_n(t_k) R_n(T_n) \alpha_{Tn}^{-1} \times D_{en}^{-1} H_n^{-1} (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} \right], \quad (18)$$

$$\text{где } \chi = \exp \left\{ - 0,25 \Delta t D_{en} \alpha_{Tn} C_n^{-1} (T_n) \gamma_n^{-1} \right\}.$$

Начальные условия математической модели ЛИЭП имеют следующий вид:

$$T_n(0) = T_0 - \text{температура } n\text{-ого активного элемента;}$$

$i_n(0) = 0$ – ток n -ого активного элемента;

$s(0) = s_0$ – исходное осевое расстояние между катушками якоря и индуктора;

$u_c(0) = U_0$ – напряжение ЕНЭ;

$v_z(0) = 0$ – скорость якоря вдоль оси z .

КПД ЛИЭП электродинамического типа будем оценивать соотношением:

$$\eta = 100 \frac{(m_2 + m_a) v_z^2 + K_p s^2}{C U_0^2} \%. \quad (19)$$

Основные параметры ЛИЭП электродинамического типа. Рассмотрим ЛИЭП, у которого подвижный якорь и неподвижный индуктор выполнены в форме плоских коаксиально установленных дисковых катушек. У якоря одна торцевая сторона обращена к индуктору, а вторая взаимодействует с ИЭ. Индуктор ($n=1$) и якорь ($n=2$) плотно намотаны K_{pn} слоями медной шины квадратного сечения толщиной a . Внешний диаметр n -го элемента $D_{en}=100$ мм, внутренний диаметр – $D_{in}=10$ мм. ЕНЭ имеет следующие параметры: емкость $C = 3$ мФ, напряжение $U_0=0,4$ кВ. Начальное расстояние между индуктором и якорем $s_0=1$ мм. Коэффициент упругости возвратной пружины $K_p=25$ кН/м. Масса ИЭ $m_a=0,25$ кг.

Исследуем влияние толщины a медной квадратной шины и количества K_{pn} ее слоев в катушках индуктора и якоря на характеристики и показатели ЛИЭП электродинамического типа. Именно эти параметры определяют число витков

$$N_n = Ent \left(0,5 \frac{D_{en} - D_{in}}{a + 2\delta} \right) K_{pn}$$

и аксиальную высоту

$$H_n = (a + 2\delta) K_{pn}$$

n -ых катушек при ограниченных радиальных размерах, где $Ent(f)$ – наибольшее целое число, не превосходящее f ; δ – толщина изоляции медной шины.

Исследование рабочих процессов ЛИЭП. Рассмотрим электрические и механические характеристики ЛИЭП электродинамического типа, у которого и катушки индуктора и якоря плотно намотаны в четыре слоя $K_{pn}=4$ квадратной шиной разной толщины (рис. 2). При увеличении толщины медной шины a от 1 до 2,5 мм количество витков каждой катушки N_n уменьшается от 160 до 68 шт, а аксиальная высота H_n увеличивается от 4,4 до 10,4 мм. При этом амплитуда тока i_m увеличивается значительно – от 0,30 до 1,56 кА, а амплитуда плотности тока j_m уменьшается незначительно – от 304,3 до 250,4 А/мм².

Увеличение толщины медной шины a меняет закономерности протекания электрических процессов: напряжение ЕНЭ u_c до нулевого значения уменьшается быстрее, а ток принимает форму выраженного импульса со значительным нарастанием переднего фронта и спаданием заднего фронта. При увеличении толщины медной шины a от 1 до 2,5 мм происходит увеличение силовых показателей ЛИЭП. Амплитуда ЭДУ F_m возрастает от 3,78 до 12,65 кН, а импульс ЭДУ P_1 возрастает от 4,52 до 9,16 Н·с. Однако скоростные показатели в зависимости от толщины шины не имеют однозначной закономерности.

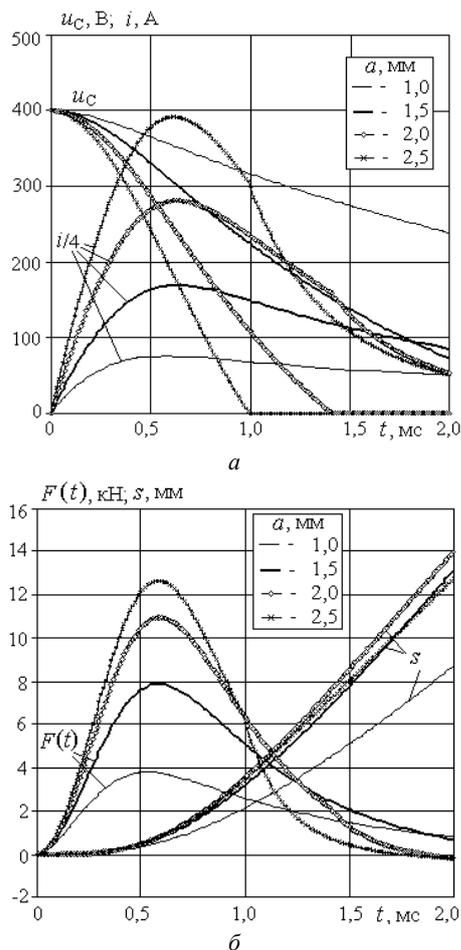


Рис. 2. Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛИЭП, катушки которого намотаны медной шиной различной толщины a

Максимальная скорость якоря V_m наибольшая у ЛИЭП, катушки которого намотаны шиной толщиной $a = 1,5$ мм, и составляет 11,24 м/с. Если шина имеет меньшую или большую толщину, то скорость снижается: при $a = 1$ мм – $V_m = 8,16$ м/с, а при $a = 2,5$ мм – $V_m = 9,44$ м/с.

Неоднозначную зависимость от толщины шины демонстрирует и КПД ЛИЭП электродинамического типа. Наибольшее значение КПД $\eta = 21,8$ % имеет ЛИЭП, у которого катушки индуктора и якоря намотаны шиной толщиной $a = 2$ мм. Если катушки намотаны более тонкой или более толстой шиной, то КПД снижается: при $a = 1,5$ мм $\eta = 20$ %, при $a = 2,5$ мм $\eta = 18,8$ %. Отметим, что если катушки намотаны еще более тонкой шиной $a = 1$ мм, то КПД принимает еще более низкое значение $\eta = 8,5$ %.

При увеличении толщины медной шины a от 1 до 2,5 мм превышения температуры катушек индуктора и якоря θ_n уменьшаются от 0,6 до 0,23 °С.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее эффективным является ЛИЭП электродинамического типа, у которого катушки индуктора и якоря намотаны медной шиной толщиной $a = 2$ мм. Количество витков каждой катушки $N_n = 84$ шт, а их аксиальная высота $H_n = 8,4$ мм.

Исследуем влияние количества слоев шины катушки индуктора K_{p1} на показатели ЛИЭП электроди-

намического типа. Очевидно, что при увеличении K_{p1} увеличивается и число витков N_1 и аксиальная высота H_1 катушки индуктора. Будем рассматривать ЛИЭП, у которого катушки индуктора и якоря намотаны медной шиной толщиной $a = 2$ мм. Катушка якоря намотана в два слоя, содержит число витков $N_2 = 22$ и имеет аксиальную высоту $H_2 = 4,2$ мм. Рассмотрим электрические и механические характеристики ЛИЭП, у которого катушка индуктора намотана несколькими слоями K_{p1} (рис. 3).

При увеличении количества слоев шины катушки индуктора K_{p1} в три раза (от 2 до 6) амплитуда тока i_m уменьшается почти в такой же пропорции (от 2,57 до 0,86 кА), а сам токовый импульс становится более растянутым из-за увеличения переднего и заднего фронтов. При увеличении параметра K_{p1} напряжение ЭНЭ u_c до нулевого значения уменьшается медленнее.

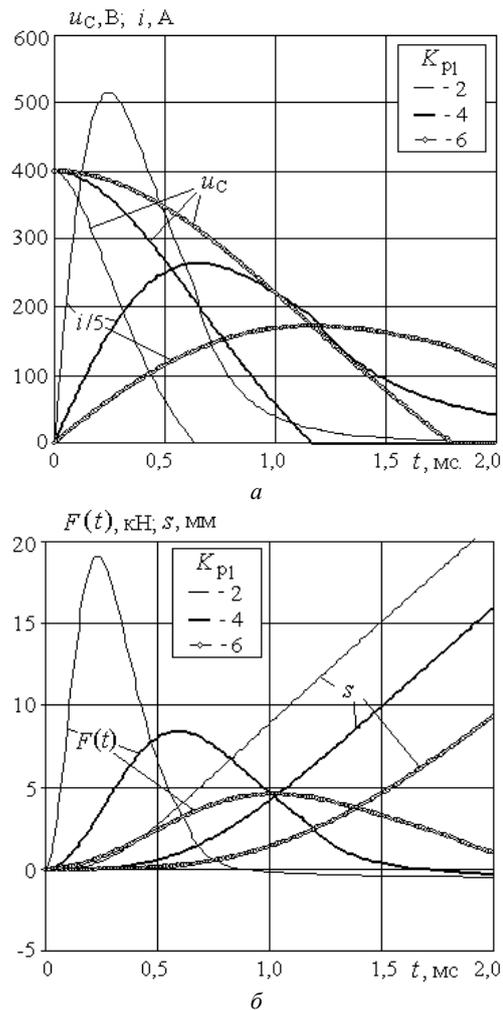


Рис. 3. Электрические (а) и механические (б) характеристики ЛИЭП, катушки которого намотаны шиной толщиной $a = 2$ мм при различном количестве слоев шины катушки индуктора K_{p1}

При увеличении количества слоев шины катушки индуктора K_{p1} в 3 раза амплитуда ЭДУ F_m уменьшается в 4,1 раза (от 18,72 до 4,57 кН), в то время как импульс ЭДУ P_1 уменьшается незначительно (от 6,79 до 5,69 Н·с). Вследствие этого снижаются максимальная скорость якоря с ИЭ V_m (от 12,54 до 10,53 м/с), КПД η (от 18,08 до 13,57 %) и превышения темпера-

туры катушек θ_n (от 0,73 до 0,3 °С). Указанные закономерности изменения максимальных скоростей V_m в зависимости от количества слоев шины катушки индуктора K_{p1} проявляются в изменении характера перемещения якоря с ИЭ s (рис.3,б).

Влияние количества слоев шины катушек индуктора и якоря на показатели ЛИЭП. Рассмотрим влияние взаимного соотношения количества слоев шины катушек индуктора K_{p1} и якоря K_{p2} толщиной $a = 2$ мм на показатели работы ЛИЭП электродинамического типа. Будем полагать, что максимальное количество слоев шины катушек $K_{p1} = K_{p2} = 6$.

С увеличением количества слоев шины катушек индуктора K_{p1} и/или якоря K_{p2} амплитуда тока i_m уменьшается, но в различной степени. Так, если количество слоев шины обеих катушек минимально $K_{p1} = K_{p2} = 1$, то $i_m = 5,8$ кА. Если количество слоев шины одной из катушек минимально, а второй максимально, то наблюдается следующая закономерность: при $K_{p1} = 1, K_{p2} = 6$ амплитуда тока уменьшается до величины $i_m = 0,865$ кА, при $K_{p1} = 6, K_{p2} = 1$ амплитуда тока уменьшается до величины $i_m = 0,846$ кА. Если количество слоев шины обеих катушек максимально $K_{p1} = K_{p2} = 6$, то амплитуда тока уменьшается в наибольшей степени (до значения $i_m = 0,7$ кА).

Аналогичные зависимости от количества слоев шины катушек индуктора K_{p1} и якоря K_{p2} наблюдаются у превышений температуры катушек. Максимальные превышения температуры ($\theta_{1,2} = 1,5$ °С) происходит при минимальном количестве слоев шины катушек $K_{p1} = K_{p2} = 1$, а наименьшее ($\theta_{1,2} = 0,21$ °С) – при максимальном количестве слоев шин $K_{p1} = K_{p2} = 6$. При $K_{p1} = 1$ и $K_{p2} = 6$ превышения температуры $\theta_{1,2} = 0,33$ °С, а при $K_{p1} = 6$ и $K_{p2} = 1$ превышения температуры $\theta_{1,2} = 0,31$ °С.

Соотношение числа слоев шин катушек существенно влияет на силовые показатели ЛИЭП электродинамического типа (рис. 4).

Амплитуда ЭДУ F_m наибольшая при минимальном количестве слоев шин катушек индуктора и якоря. При $K_{p1}=K_{p2}=1$ величина $F_m=30,34$ кН. При увеличении количества слоев шины одной из катушек указанная величина существенно снижается. Так, при $K_{p1}=1$ и $K_{p2}=6$ амплитуда ЭДУ $F_m=2,75$ кН, а при $K_{p1}=6$ и $K_{p2}=1$ амплитуда ЭДУ $F_m=2,34$ кН. Если же число витков шины катушек индуктора и якоря максимально $K_{p1}=K_{p2}=6$, то амплитуда ЭДУ увеличивается до $F_m=7,6$ кН. При этом можно отметить следующую закономерность: наибольшие значения амплитуды ЭДУ F_m наблюдаются при условии, когда число слоев шины катушек индуктора и якоря одинаковы.

Импульс ЭДУ P_1 имеет иную закономерность от соотношения числа слоев шины катушек индуктора и якоря. Наибольшая величина импульса ЭДУ имеет место при максимальном количестве слоев шины катушек. При $K_{p1}=K_{p2}=6$ величина $P_1=10,06$ Н·с. Если количество слоев шины индуктора и якоря минимальны, то величина импульса ЭДУ уменьшается более чем в два раза. При $K_{p1}=K_{p2}=1$ величина $P_1=4,49$ Н·с. Наибольшие значения импульса ЭДУ P_1 реализуются при равенстве количества слоев шины катушек индуктора и

якоря. Если количество слоев шины в одной из катушек максимально, а во второй минимально, то импульс ЭДУ уменьшается. При $K_{p1}=1$ и $K_{p2}=6$ импульс ЭДУ $P_1=4,06$ Н·с, а при $K_{p1}=6$ и $K_{p2}=1$ $P_1=3,3$ Н·с.

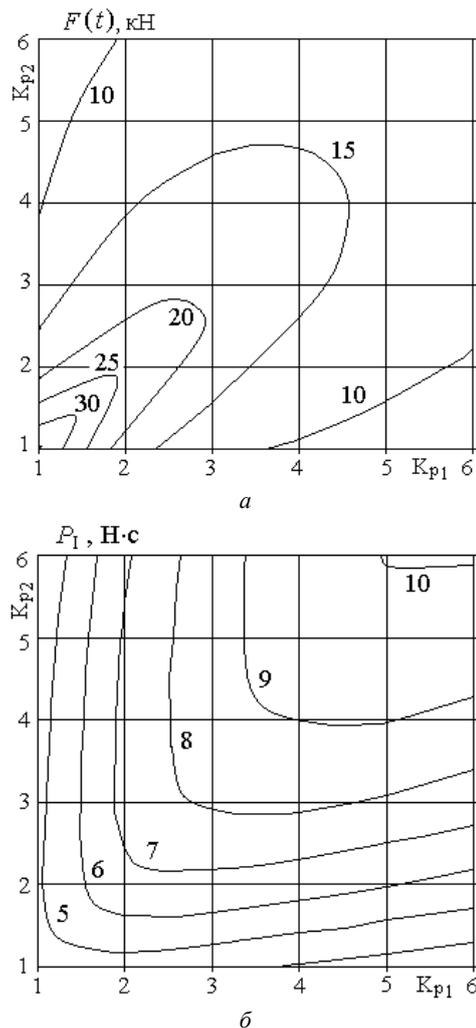


Рис. 4. Распределения максимальной величины (а) и импульса (б) ЭДУ в зависимости от соотношений числа слоев шины катушек индуктора и якоря ЛИЭП

Рассмотрим закономерность распределения КПД ЛИЭП электродинамического типа от соотношения количества слоев шины катушек индуктора и якоря при различной ее толщине a (рис. 5).

Наибольшие значения КПД реализуются при определенном соотношении K_{p1} и K_{p2} . Если толщина шины a равна 1,5 мм или 2 мм, то наибольшее значение КПД реализуется при $K_{p1}=K_{p2}=4$ и принимает значения $\eta = 20,01$ % и $\eta = 21,82$ % соответственно. Если толщина шины $a = 2,5$ мм, то наибольшее значение КПД ($\eta = 18,91$ %) реализуется при $K_{p1}=4$ и $K_{p2}=3$.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что существует оптимальная толщина медной шины $a = 2$ мм и соответствующее ей количество витков в каждом слое катушки индуктора и якоря. С точки зрения силовых показателей количество слоев шины катушек должно быть максимальным из рассматриваемого диапазона ($K_{p1}=K_{p2}=6$). С точки зрения эффективности ускорения ИЭ катушки должны иметь меньшее число слоев ($K_{p1}=K_{p2}=4$).

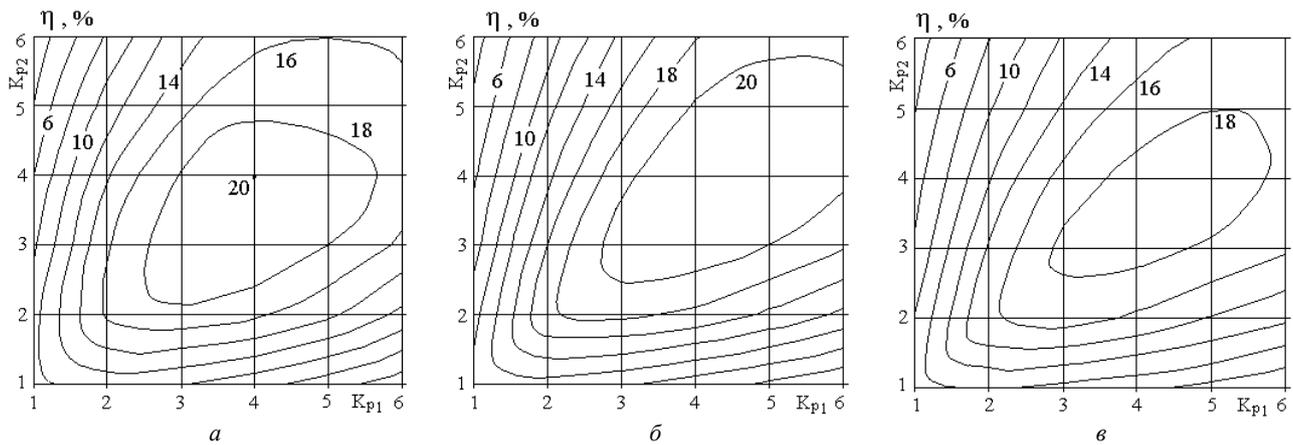


Рис. 5. Распределения КПД ЛИЭП в зависимости от соотношений количества слоев шины катушек индуктора и якоря при толщине шины a : 1,5 мм (а); 2 мм (б); 2,5 мм (в)

С учетом полученных соотношений на базе ЛИЭП электродинамического типа была изготовлена модель катапульты для запуска беспилотного летательного аппарата (БПЛА) (рис. 6).



Рис. 6. Модель катапульты для запуска БПЛА: 1 – направляющие пластины для перемещения БПЛА; 2 – БПЛА; 3 – направляющие пластины для перемещения токовводов катушки якоря; 4 – тормозная упорная стенка; 5 – тормозной упругий демпфер; 6 – разгонный выступ; 7 – катушка якоря; 8 – катушка индуктора; 9 – стартовая упорная стенка; 10 – токовводы катушек

В этой модели обе катушки индуктора и якоря намотаны медной шиной и компаундированы эпоксидной смолой в прямоугольном изоляционном каркасе. Катушка индуктора присоединена к стартовой упорной стенке, а катушка якоря выполнена с возможностью аксиального перемещения вдоль центральной направляющей.

Электрические выводы катушек индуктора и якоря расположены между двумя диэлектрическими направляющими пластинами и соединены гибкими проводами между собой и с источником питания. Торможение катушки якоря осуществляется при помощи упругого демпфера, прикрепленного к тормозной упорной стенке. К катушке якоря присоединен разгонный выступ, который толкает БПЛА.

Проведенные испытания модели с параметрами, установленными выше, подтвердили правомочность проведенных теоретических исследований по ЛИЭП электродинамического типа.

Выводы.

1. На базе разработанной цепной математической модели получены рекуррентные соотношения для расчета взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов ЛИЭП электродинамического типа.

2. Установлено, что при увеличении толщины квадратной медной шины катушек индуктора и якоря от 1 до 2,5 мм происходит увеличение амплитуды и импульса ЭДУ. Однако максимальная скорость якоря наибольшая у ЛИЭП, катушки которого намотаны шиной толщиной 1,5 мм. Наибольшее значение КПД демонстрирует ЛИЭП, у которого катушки намотаны шиной толщиной 2 мм.

3. При увеличении количества слоев шины катушки индуктора амплитуда ЭДУ уменьшается существенно, а величина импульса ЭДУ – незначительно. При этом снижаются максимальная скорость якоря, КПД и превышения температуры катушек индуктора и якоря.

4. Наибольшая амплитуда ЭДУ реализуется в ЛИЭП при минимальном количестве слоев шины катушек индуктора и якоря. Наибольшая величина импульса ЭДУ возникает при максимальном количестве слоев шин катушек. При этом наибольшие значения амплитуды и импульса ЭДУ возникают при условии, когда количество слоев шины обеих катушек одинаковы.

5. Наибольший КПД (21,82 %) реализуется в ЛИЭП, у которого катушки индуктора и якоря имеют четыре слоя квадратной шины толщиной 2 мм.

6. На базе ЛИЭП электродинамического типа изготовлена и испытана модель катапульты для запуска беспилотного летательного аппарата.

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.
- Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. – №1. – С. 24-27.
- Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Electric to mechanical energy conversion of linear ultrafast electromechanical actuators based on stroke requirements // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – vol.51. – no.4. – pp. 3059-3067. doi: 10.1109/tia.2015.2411733.
- Болух В.Ф., Шукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
- Bissal A., Eriksson A., Magnusson A., Engdahl G. Hybrid multi-physics modeling of an ultra-fast electro-mechanical actuator // Actuators. – 2015. – vol.4. – no.4. – pp. 314-335. doi: 10.3390/act4040314.
- Болух В.Ф., Олексенко С.В., Шукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических

преобразователей электромагнитного и индукционного типов // Технічна електродинаміка. – 2016. – №5. – С. 46-48.

7. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultrafast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – vol.48. – no.11. – pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.

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. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method // Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. – May 2010. – pp. 1-9. doi: 10.1109/cefc.2010.5481673.

10. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – no.1. – pp. 21-28. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.

11. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds // Electrical engineering & electromechanics. – 2015. – no.3. – pp. 31-40. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.05.

12. Bolyukh V.F., Schukin I.S. Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – no.5. – pp. 14-22. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.02.

REFERENCES

1. Balicki 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.

2. Tomashevsky D.N., Koshkin A.N. Modeling of linear impulse electric motors. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no.1, pp. 24-27. (Rus).

3. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Electric to mechanical energy conversion of linear ultrafast electromechanical actuators based on stroke requirements. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol.51, no.4, pp. 3059-3067. doi: 10.1109/tia.2015.2411733.

4. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).

5. Bissal A., Eriksson A., Magnusson A., Engdahl G. Hybrid multi-physics modeling of an ultra-fast electro-mechanical actuator. *Actuators*, 2015, vol.4, no.4, pp. 314-335. doi: 10.3390/act4040314.

6. 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).

7. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultrafast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol.48, no.11, pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.

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. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method. *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, May 2010, pp. 1-9. doi: 10.1109/cefc.2010.5481673.

10. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 21-28. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.

11. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads

and high speeds. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 31-40. doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.05.

12. Bolyukh V.F., Schukin I.S. Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 14-22. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.02.

Поступила (received) 05.03.2019

Болух Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
 Кашанский Юрий Владимирович¹, аспирант,
 Щукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +380 57 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com
²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +380 57 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, Yu.V. Kashanskij¹, I.S. Schukin^{1,2}
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
²Firm Tetra, LTD,
 2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Influence of geometrical parameters of the inductor and armature on the indicators of a linear pulse electromechanical converter of an electrodynamic type.

Purpose. The aim of the paper is to study the influence of geometrical parameters, namely, the number of layers and the cross section of the copper tire of the inductor and the armature coils on the power and speed indicators of a linear pulse electromechanical converter (LPEC) of an electrodynamic type. **Methodology.** On the basis of the developed chain mathematical model, recurrent relations are obtained for the calculation of interconnected electromagnetic, mechanical and thermal processes of LPEC of an electrodynamic type. The effect of the thickness of a square copper tire and the number of its layers in the inductor and armature coils on the characteristics and characteristics of electrodynamic LPEC is investigated. It is these parameters that determine the number of turns and the axial height of the coils with limited radial dimensions. **Results.** The influence of the geometrical parameters of the inductor and the armature coils with limited radial dimensions on the electrical and mechanical characteristics of LPEC of an electrodynamic type is established. It has been established that with an increase in the thickness of a rectangular cross-section of copper tire from 1 to 2.5 mm, an increase in the amplitude and pulse of electrodynamic forces (EF) occurs. However, the maximum speed of the armature is the highest at LPEC wound with a 1.5 mm thick tire. The highest efficiency value is demonstrated by LPEC, in which the inductor and armature coils are wound with a 2 mm thick tire. With an increase in the number of layers of the inductor coil tire, the amplitude of the EF decreases significantly, and the magnitude of the EF pulse decreases slightly. As a result, the maximum armature speed, efficiency and temperature rise of the coils are reduced. **Originality.** It is established that the largest amplitude of the EF is realized in LPEC with the minimum number of layers of tires of the inductor and armature coils. The largest value of the pulse EF occurs when the maximum number of layers of the inductor and the armature. In this case, the largest values of the amplitude and pulse of the EF occur under the condition that the number of tire layers of the inductor and the armature coils are the same. **Practical value.** It has been established that the greatest efficiency 21.82 % is realized in LPEC, in which the number of tire layers is 2 mm thick with inductor and armature coils are 4. A catapult model for launching an unmanned aerial vehicle was made and tested on the basis of LPEC of an electrodynamic type. References 12, figures 6.

Key words: linear pulse electromechanical converter of electrodynamic type, chain mathematical model, recurrent relations, geometrical parameters of inductor and armature coils, electrodynamic forces, efficiency.