

В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, И.С. Щукин

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНОМ ИМПУЛЬСНО-ИНДУКЦИОННОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ПОДВИЖНЫМ ИНДУКТОРОМ И ДВУМЯ ЯКОРЯМИ

Розроблена математична модель, яка описує електромеханічні процеси в лінійному імпульсно-індукційному електро-механічному перетворювачі з рухомим індуктором, що взаємодіє зі стаціонарним якорем (СЯ) та рухомим якорем (РЯ), який прискорює виконавчий елемент. Визначено вплив висот якорів на електромеханічні процеси в перетворювачі. Якщо висота СЯ у два рази більша за висоту РЯ, то на індуктор у початковий момент часу діють електродинамічні зусилля (ЕДЗ), які притискають його до СЯ, та переміщення індуктора починається з затримкою 0,35 мс. Якщо висота РЯ у два рази більша за висоту СЯ, то на індуктор в початковий момент часу діють ЕДЗ, які відштовхують його від СЯ, і його переміщення починається з затримкою 0,1 мс. Якщо висоти СЯ і РЯ є рівними, то до моменту часу 0,15 мс на індуктор практично не діють ЕДЗ, і переміщення індуктора відносно СЯ починається з затримкою 0,25 мс. Визначені комбінації геометричних параметрів якорів, при яких діють як найбільші, так і найменші імпульси ЕДЗ. Найбільші швидкості розвиває найбільш низький РЯ, причому висота СЯ на них практично не впливає. Зі збільшенням маси виконавчого елемента відбувається збільшення струмів в активних елементах перетворювача та зменшення швидкостей індуктора і РЯ. При цьому максимальні значення ЕДЗ, що діють на індуктор, зменшуються, а на якоря – збільшуються. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: лінійний імпульсно-індукційний електромеханічний перетворювач, математична модель, рухомий індуктор, стаціонарний якорь, рухомий якорь, електромеханічні процеси.

Разработана математическую модель, которая описывает электромеханические процессы в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе с подвижным индуктором, взаимодействующим со стационарным якорем (СЯ) и подвижным якорем (ПЯ), ускоряющим исполнительный элемент. Установлено влияние высот якорей на электромеханические процессы в преобразователе. Если высота СЯ в два раза больше высоты ПЯ, то на индуктор в начальный момент времени действуют электродинамические усилия (ЭДУ), прижимающие его к СЯ и перемещение индуктора начинается с задержкой 0,35 мс. Если высота ПЯ в два раза больше высоты СЯ, то на индуктор в начальный момент времени действуют ЭДУ, отталкивающие его от СЯ, и его перемещение начинается с задержкой 0,1 мс. Если высоты СЯ и ПЯ равны, то до момента времени 0,15 мс на индуктор практически не действуют ЭДУ и перемещение индуктора начинается с задержкой 0,25 мс. Установлены комбинации геометрических параметров якорей, при которых действуют как наибольшие, так и наименьшие импульсы ЭДУ. Наибольшие скорости развивает наиболее низкий ПЯ, причем высота СЯ на них практически не влияет. С увеличением массы исполнительного элемента происходит увеличение токов в активных элементах преобразователя и уменьшение скоростей индуктора и ПЯ. При этом максимальные значения ЭДУ, действующих на индуктор, уменьшаются, а на якоря – увеличиваются. Библ. 12, рис. 7.

Ключевые слова: линейный импульсно-индукционный электромеханический преобразователь, математическая модель, подвижный индуктор, стационарный якорь, подвижный якоря, электромеханические процессы.

Введение. Линейные импульсные электроме- ханические преобразователи предназначены для обеспечения высокой скорости исполнительного элемента на коротком активном участке, и/или для создания ударных силовых импульсов [1-4]. Такие преобразо- ватели используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [5-7]. Наиболее широко применяются линейные импульсно-индукционные электромеханические преобразователи (ЛИИЭП) коаксиальной конфигурации, в которых ускоряемый электропроводящий якорь бесконтактно взаимодействует с неподвижным индуктором [1, 2, 8]. При возбуждении многовиткового индуктора от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в электропроводящем якорю, выполненном в виде медного диска, индуцируются вихревые токи. Вследствие этого на якорь действуют электродинамические усилия (ЭДУ) отталкивания, вызывающие его аксиальное перемещение вместе с ИЭ относительно индуктора.

Однако при работе в динамическом режиме с быстрым изменением электромагнитных, механических и тепловых параметров силовые и скоростные показатели ЛИИЭП традиционной конструкции

недостаточно высоки [9]. Одним из путей повышения указанных показателей является разработка новых конструктивных схем ЛИИЭП [10, 11]. Поскольку в традиционной конструкции ЛИИЭП с якорем индукционно взаимодействует только одна сторона индуктора, то значительная часть магнитного поля с противоположной стороны индуктора рассеивается в окружающее пространство, негативно влияя на близко расположенные электронные и биологические объекты, и не используется для создания дополнительных электродинамических усилий (ЭДУ).

Рассмотрим конструктивную схему ЛИИЭП коаксиальной конфигурации, содержащую подвижный индуктор, охваченный с противоположных сторон двумя электропроводящими якорями (рис. 1). Один из якорей взаимодействует с неподвижным упором, а второй взаимодействует с исполнительным элементом, например, ударно-силовым устройством.

При возбуждении индуктора через гибкие или скользящие контакты от ЕНЭ С между индуктором и якорями возникают ЭДУ отталкивания, что приводит к перемещению подвижного якоря (ПЯ) относительно индуктора, который, в свою очередь, отталкивается

© В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, И.С. Щукин

относительно стационарного якоря (СЯ). При этом возникает вопрос о влиянии геометрических параметров якорей на электромеханические процессы в ЛИИЭП. Поскольку радиальные размеры якорей, как правило, соответствуют радиальным размерам индуктора, то возникает вопрос о влиянии аксиальных размеров электропроводящих якорей на силовые и скоростные показатели ЛИИЭП.

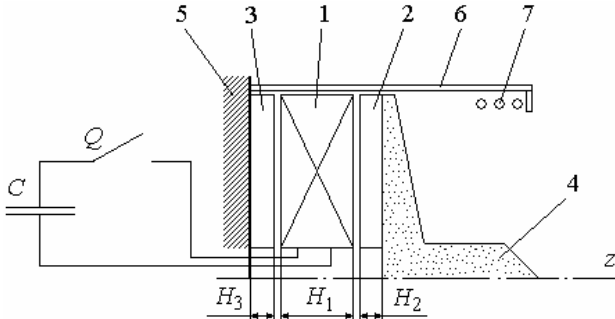


Рис. 1. Конструктивная схема ЛИИЭП: 1 – индуктор; 2 – стационарный якорь; 3 – подвижный якорь; 4 – исполнительный элемент; 5 – упор; 6 – корпус; 7 – демпферная пружина

Целью статьи является определение влияния высоты подвижного и стационарного дисковых якорей, охватывающих подвижный индуктор на электромеханические процессы в ЛИИЭП.

Математическая модель. Рассмотрим математическую модель, которая описывает электромеханические процессы ЛИИЭП с использованием сосредоточенных параметров активных элементов - индуктора, стационарного и подвижного якорей:

$$i_1 R_1(T_1) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + M_{13}(z) \frac{di_3}{dt} + v_{12}(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + v_{13}(t) i_3 \frac{dM_{13}}{dz} = 0; \quad \frac{1}{C} \int i_1 dt = U_0; \quad (1)$$

$$i_2 R_2(T_2) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_3}{dt} + i_1 \xi_1 + i_3 \xi_3 = 0; \quad (2)$$

$$i_3 R_3(T_3) + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_2}{dt} + i_1 \xi_2 + i_2 \xi_3 = 0; \quad (3)$$

$$i_1 i_3 \frac{dM_{13}}{dz} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + (m_1 + m_2 + m_e) \frac{dv_{13}}{dt} + K_T v_{13}(t); \quad (4)$$

$$i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dz} = i_2 i_3 \frac{dM_{23}}{dz} + (m_2 + m_e) \frac{dv_{12}}{dt} + K_T \cdot (v_{13}(t) + v_{12}(t)) + 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 [v_{12}(t) + v_{13}(t)]^2 + K_P [\Delta z_{12}(t) + \Delta z_{13}(t)]; \quad (5)$$

где $\xi_1 = v_{12}(t) \frac{dM_{12}}{dz}$; $\xi_2 = v_{13}(t) \frac{dM_{13}}{dz}$; $p=1, 2, 3$ – индексы индуктора, ПЯ и СЯ; $\xi_3 = (v_{12}(t) + v_{13}(t)) \frac{dM_{23}}{dz}$;

$R_p(T_p)$, L_p , i_p – сопротивление, индуктивность и ток p -ого активного элемента соответственно; $M_{12}(z)$, $M_{13}(z)$, $M_{23}(z)$ – взаимоиנדуктивности между соответствующими p -ми активными элементами; $v_{13}(t)$, $v_{12}(t)$ – скорости индуктора относительно СЯ и ПЯ относительно индуктора вдоль оси z соответственно; $\Delta z_{13}(t)$, $\Delta z_{12}(t)$ – перемещение индуктора относительно СЯ и ПЯ относительно индуктора соответственно; m_1 , m_2 , m_e – масса индуктора, ПЯ и исполнительного элемента соответственно.

Совместное решение уравнений (1) – (3) позволяет свести их к одному дифференциальному уравнению:

$$a_4 \frac{d^4 i_1}{dt^4} + a_3 \frac{d^3 i_1}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + a_1 \frac{di_1}{dt} + a_0 = 0, \quad (6)$$

где $a_4 = L_1 b_1 + M_{13} d_2 + M_{12} d_3$;

$$a_3 = R_1 b_1 + R_2 b_2 + R_3 b_3 + 2(e_1 d_1 + e_2 d_2 + e_3 d_3);$$

$$a_2 = b_1 / C + L_1 (R_2 R_3 - e_1^2) + L_2 (R_1 R_3 - e_2^2) + L_3 (R_1 R_2 - e_3^2) + 2[M_{12}(e_1 e_2 - R_3 e_3) + M_{13}(e_1 e_3 - R_2 e_2) + M_{23}(e_2 e_3 - R_1 e_1)];$$

$$a_1 = R_1 (R_2 R_3 - e_1^2) + e_2 (e_1 e_3 - R_2 e_2) + e_3 (e_1 e_2 - R_3 e_3) + (R_2 L_3 + R_3 L_2 - 2M_{23} e_1) / C;$$

$$a_0 = (R_2 R_3 - e_1^2) / C; \quad b_1 = L_2 L_3 - M_{23}^2; \quad b_2 = L_1 L_3 - M_{13}^2;$$

$$b_3 = L_1 L_2 - M_{12}^2; \quad d_1 = M_{12} M_{13} - L_1 M_{23};$$

$$d_2 = M_{12} M_{23} - L_2 M_{13}; \quad d_3 = M_{13} M_{23} - L_3 M_{12};$$

$$e_1 = (v_{13} + v_{12}) \frac{dM_{23}}{dz}; \quad e_2 = v_{13} \frac{dM_{13}}{dz}; \quad e_3 = v_{12} \frac{dM_{12}}{dz}.$$

Характеристическое уравнение дифференциального уравнения (6)

$$a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 = 0 \quad (7)$$

посредством замены $\varpi = x + 0,25 a_3 / a_4$ переводится в приведенную форму с кубической резольвентой:

$$\varpi^3 + q_1 \cdot \varpi^2 + q_2 \cdot \varpi - q_3^2 = 0, \quad (8)$$

$$\text{где } q_1 = 2 \frac{a_2}{a_4} - 0,75 \left(\frac{a_3}{a_4} \right)^2;$$

$$q_2 = 3 \left(\frac{a_3}{2 \cdot a_4} \right)^4 - \frac{a_3^2 \cdot a_2}{a_4^3} + \frac{a_1 \cdot a_3 + a_2^2}{a_4^2} - 4 \frac{a_0}{a_4};$$

$$q_3 = \left(\frac{a_3}{2 \cdot a_4} \right)^3 - 0,5 \frac{a_2 \cdot a_3}{a_4^2} + \frac{a_1}{a_4}.$$

Если дискриминант резольвенты

$$D = (u/3)^3 - (v/2)^2, \quad (9)$$

где $u = q_2 - q_1^2 / 3$; $v = 2 \cdot q_1^3 / 27 - q_1 \cdot q_2 / 3 - q_3^2$,

меньше нуля, то, используя тригонометрическое решение уравнения (8), получаем:

$$\varpi_p = 2 \cdot 3 \sqrt[3]{\left(\frac{u^3}{27} \right)^{0,5}} \cos \left(\frac{2\pi(p-1)}{3} + \frac{\arccos \left(\frac{-0,5v\sqrt{-27/a_3^3}}{3} \right)}{3} \right). \quad (10)$$

В этом случае корни уравнения (7):

$$x_l = 0,5 \cdot (\pm \sqrt{\varpi_1} \pm \sqrt{\varpi_2} \pm \sqrt{\varpi_3}) - 0,25 \cdot a_3 / a_4, \quad (11)$$

где $l = 1, 2, 3, 4$.

Если все корни (11) действительны, то для токов в p -ых активных элементах ЛИИЭП можно записать:

$$i_p = \frac{U_0 t}{a_4 \vartheta}, \quad (12)$$

где

$$i = A_{p1} \exp(x_1 t) + A_{p2} \exp(x_2 t) + A_{p3} \exp(x_3 t) + A_{p4} \exp(x_4 t)$$

$$\vartheta = \gamma_{21} \gamma_{43} (\delta_{21} + \delta_{43}) + \gamma_{24} \gamma_{31} (\delta_{24} + \delta_{31}) + \gamma_{32} \gamma_{41} (\delta_{32} + \delta_{41}),$$

$$A_{p1} = \gamma_{32} (\alpha_4 - \Theta_p \delta_{32}) + \gamma_{24} (\alpha_3 - \Theta_p \delta_{24}) + \gamma_{43} (\alpha_2 - \Theta_p \delta_{43});$$

$$A_{p2} = \gamma_{13} (\alpha_2 - \Theta_p \delta_{13}) + \gamma_{41} (\alpha_3 - \Theta_p \delta_{41}) + \gamma_{34} (\alpha_1 - \Theta_p \delta_{34});$$

$$A_{p3} = \gamma_{21} (\alpha_4 - \Theta_p \delta_{21}) + \gamma_{42} (\alpha_1 - \Theta_p \delta_{42}) + \gamma_{14} (\alpha_2 - \Theta_p \delta_{14});$$

$$A_{p4} = \gamma_{12}(\alpha_3 - \Theta_p \delta_{12}) + \gamma_{31}(\alpha_2 - \Theta_p \delta_{31}) + \gamma_{23}(\alpha_1 - \Theta_p \delta_{23});$$

$$n = 2, 3; m = 5 - n;$$

$$\gamma_{kl} = x_k - x_l; \alpha_k = (\Lambda_p x_k - \Xi_p) x_k^2; \delta_{kl} = x_k^2 x_l^2;$$

$$\Theta_1 = -b_1; \Theta_n = -d_m; \Lambda_1 = \zeta_1/a_4; \Lambda_n = \zeta_n/a_4;$$

$$\Xi_1 = [a_4 b_1^2/C - \zeta_1(R_1 b_1 + e_2 d_2 + e_3 d_3) - \zeta_2(R_2 d_3 + e_3 b_1 + e_1 d_2) - \zeta_3(R_3 d_2 + e_2 b_1 + e_1 d_3)]/a_4^2;$$

$$\Xi_n = [a_4 b_1 d_m/C - \zeta_1(R_1 d_m + e_m b_n + e_n d_1) - \zeta_n(R_n b_n + e_m d_m + e_1 d_1) - \zeta_m(R_m d_1 + e_n d_m + e_1 b_n)]/a_4^2;$$

$$\zeta_1 = R_1 b_1^2 + R_2 d_3^2 + R_3 d_2^2 + 2[b_1(e_2 d_2 + e_3 d_3) + e_1 d_2 d_3];$$

$$\zeta_n = d_m(R_1 b_1 + R_n b_n) + R_m d_1 d_n + e_m(b_1 b_n + d_m^2) - (e_n b_1 + e_1 d_m) \times \\ \times L_1 M_{nm} - L_n M_{1m}(e_n d_m + e_1 b_n) - L_m M_{1n}(e_1 d_1 + e_n d_n)$$

Если дискриминант резольвенты (9) больше нуля, то, используя решение Кардано для уравнения (8), получаем один действительный и два комплексно сопряженных корня:

$$\varpi_1 = \phi + \zeta - q_1/3; \varpi_{2,3} = \varepsilon \pm j\chi, \quad (13)$$

$$\text{где } \phi = \sqrt[3]{-0,5 \cdot v + \sqrt{D}}; \zeta = \sqrt[3]{-0,5 \cdot v - \sqrt{D}};$$

$$\varepsilon = -0,5 \cdot (\phi + \zeta) - q_1/3; \chi = 0,5 \cdot \sqrt{3}(\phi - \zeta).$$

В этом случае корни уравнения (7) имеют вид:

$$x_{1,2} = 0,5 \cdot \sqrt{\varpi_1} - 0,25 \cdot a_3/a_4 \pm \sqrt{0,5 \cdot (\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \chi^2})};$$

$$x_{3,4} = \sigma \pm j\xi, \quad (14)$$

$$\text{где } \sigma = 0,5 \cdot \sqrt{\varpi_1} - 0,25 \cdot a_3/a_4; \xi = \sqrt{0,5 \cdot (-\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + \chi^2})}.$$

Если x_1 и x_2 действительны и различны, то токи в p -ых активных элементах можно представить в виде:

$$i_p = \frac{U_0 \lambda}{a_4 \aleph}, \quad (15)$$

$$\text{где } \aleph = x_1 x_2 (3\sigma^2 - 2\sigma\chi_1 - \xi^2 + x_1 x_2) + \chi_2 (\chi_2 + \chi_3 - 2\sigma\chi_1);$$

$$\lambda = B_{p1} \exp(x_1 t) + B_{p2} \exp(x_2 t) + \exp(\sigma \cdot t) [B_{p3} \cos(\xi t) + B_{p4} \sin(\xi t)];$$

$$B_{p1} = \left\{ \Theta_p [x_2^2 (3\sigma^2 - \xi^2 - 2x_2 \sigma) - \chi_2^2] + \Lambda_p [2\sigma\chi_2 - x_2 (3\sigma^2 - \xi^2 - x_2^2)] - \Xi_p [(\sigma - x_2)^2 + \xi^2] \right\} / (x_2 - \xi);$$

$$B_{p2} = \left\{ \Theta_p [\chi_2^2 + \sigma^2 (\xi^2 - 3\sigma^2 + 2x_1 \sigma)] + \Lambda_p [x_1 (3\sigma^2 - \xi^2) - 2\sigma\chi_2] + \Xi_p (\chi_2 - 2x_1 \sigma) \right\} / (x_2 - \xi);$$

$$B_{p3} = \Theta_p \left[(\xi^2 - 3\sigma^2) \chi_1 + 2\sigma\chi_3 \right] + \Lambda_p \left[(3\sigma^2 - \xi^2) - \chi_3 \right] + \Xi_p (\chi_1 - 2\sigma);$$

$$B_{p4} = \left\{ \Theta_p [\chi_3 (\xi^2 - \sigma^2) + \chi_1 \sigma (\sigma^2 - 3\xi^2) + x_1^2 x_2^2] + \Lambda_p (\chi_3 \sigma - x_1 x_2 \chi_1 + 3\sigma\xi^2 - \sigma^3) + \Xi_p (\sigma^2 - \xi^2 + x_1 x_2 - \sigma\xi_1) \right\} / \xi;$$

$$\chi_1 = x_1 + x_2; \chi_2 = \sigma^2 + \xi^2; \chi_3 = x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2.$$

Перемещения индуктора относительно СЯ, а также ПЯ относительно индуктора на основе уравнений (4) и (5) можно представить в виде рекуррентных соотношений:

$$\Delta z_{13}(t_{k+1}) = \left[i_1(t_k) \left(i_3(t_k) \frac{dM_{13}}{dz} - i_2(t_k) \frac{dM_{12}}{dz} \right) - K_T v_{13}(t_k) \right] \times \\ \times 0,5 \frac{\Delta t^2}{m_1 + m_2 + m_e} + \Delta z_{13}(t_k) + v_{13}(t_k) \Delta t, \quad (16)$$

$$\Delta z_{12}(t_{k+1}) = \Delta z_{12}(t_k) + v_{12}(t_k) \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2(m_2 + P)} \times \\ \times \left[\left(i_1(t_k) \frac{dM_{12}}{dz} - i_3(t_k) \frac{dM_{23}}{dz} \right) i_2(t_k) - K_T (v_{12}(t_k) + v_{13}(t_k)) - \right. \\ \left. - 0,125 \cdot \pi \cdot \beta_a \gamma_a D_{2m}^2 [v_{12}(t_k) + v_{13}(t_k)]^2 - \right. \\ \left. - K_P (\Delta z_{12}(t_k) + \Delta z_{13}(t_k)) \right]. \quad (17)$$

Температура p -ого активного элемента при перемещении якоря и индуктора, когда отсутствует тепловой контакт между ними, можно описать рекуррентным соотношением [10]:

$$T_p(t_{k+1}) = T_p(t_k) \chi + (1 - \chi) \left[T_0 + 4\pi^{-2} i_p(t_k) R_p(T_n) \alpha_{Tp}^{-1} \times \right. \\ \left. \times D_{ep}^{-1} H_p^{-1} (D_{ep}^2 - D_{ip}^2)^{-1} \right], \quad (18)$$

где $\chi = \exp\{-0,25\Delta t D_{ep} \alpha_{Tp} c_p^{-1}(T_p) \gamma_p^{-1}\}$; D_{ep} , D_{ip} – внешний и внутренний диаметры p -ого активного элемента соответственно; α_{Tp} – коэффициент теплоотдачи p -ого активного элемента; c_p – теплоемкость p -ого активного элемента.

Начальные условия системы уравнений (1) – (18):

$T_p(0) = T_0$ – температура p -ого активного элемента; $i_p(0) = 0$ – ток p -ого активного элемента; $\Delta z(0) = 1$ мм – исходное осевое расстояние между якорями и индуктором; $u_c(0) = U_0$ – напряжение ЕНЭ; $v_z(0) = 0$ – скорость якоря вдоль оси z .

Для того чтобы учесть комплекс взаимосвязанных электрических, магнитных, тепловых и механических процессов и различные нелинейные зависимости переходный процесс разбивается на большое число интервалов времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, в пределах которых все величины считаются неизменными. При таком численно-аналитическом подходе внутри малого интервала Δt используются определенные ранее аналитические выражения для расчета основных величин, а переходный процесс рассчитывается с использованием итерационных соотношений на ЭВМ.

Основные параметры ЛИИЭП. Рассмотрим ЛИИЭП коаксиальной конфигурации, у которого оба якоря выполнены в форме плоского диска из технической меди, одна из сторон которого обращена к индуктору.

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 $N_1 = 46$ шт. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами.

Якоря: внешний диаметр $D_{ex2,3} = 100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2,3} = 10$ мм, высота $H_2 = H_3 = 3 - 7$ мм.

ЕНЭ: емкость $C = 500$ мкФ, напряжение $U_0 = 1,5$ кВ.

Исполнительный элемент имеет массу $m_e = 1,0$ кг.

Электромеханические характеристики ЛИИЭП. Рассмотрим влияние высоты якорей на электромеханические процессы ЛИИЭП. Высоту ПЯ будем оценивать безразмерным геометрическим параметром $h_2^* = H_2 H_1^{-1}$, а высоту СЯ – параметром $h_3^* = H_3 H_1^{-1}$.

Рассмотрим электромеханические характеристики ЛИИЭП, имеющих различные сочетания высот СЯ и ПЯ.

На рис. 2 представлены электромеханические характеристики ЛИИЭП, у которого высота СЯ в два раза больше высоты ПЯ (параметры якорей $h_2^*=0,3, h_3^*=0,6$).

Ток в индукторе с плотностью j_1 имеет колебательно-затухающий характер. Максимальная плотность тока индуктора составляет 448 А/мм^2 . В начальный момент рабочего процесса плотности тока в ПЯ j_2 и в СЯ j_3 имеют противоположную к индуктору полярность. Максимум плотности тока в ПЯ составляет $554,6 \text{ А/мм}^2$, а в СЯ – 303 А/мм^2 . Вследствие взаимодействия токов на ПЯ действуют ЭДУ отталкивания f_{z2} , максимальная величина которых составляет $13,6 \text{ кН}$.

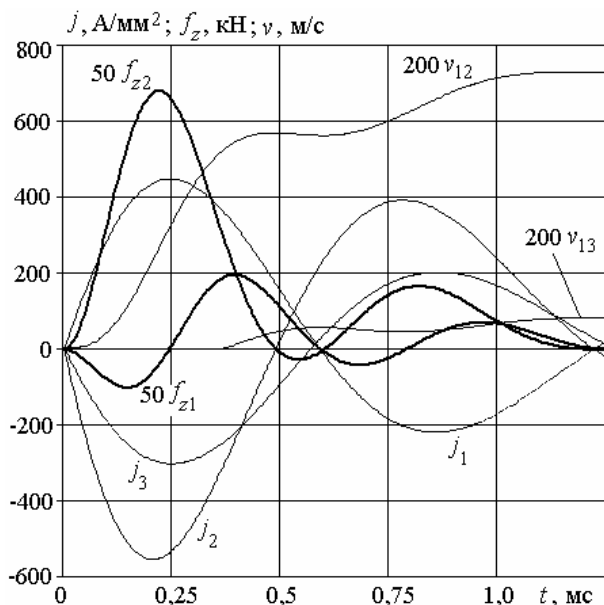


Рис. 2. Электромеханические характеристики ЛИИЭП с геометрическими параметрами якорей $h_2^*=0,3, h_3^*=0,6$

В интервале $0,5-0,65 \text{ мс}$ ЭДУ меняют направление, после чего происходит повторный всплеск усилий отталкивания, но значительно меньшей величины, по сравнению с первоначальным. В результате ПЯ перемещается относительно индуктора со скоростью v_{12} , максимальная величина которой составляет $3,65 \text{ м/с}$.

На индуктор в начальный момент времени действуют отрицательные ЭДУ f_{z1} , прижимающие его к СЯ. Однако через $0,25 \text{ мс}$ эти ЭДУ, изменяя направление, отталкивают индуктор от СЯ с максимальной величиной $3,9 \text{ кН}$. В результате индуктор перемещается относительно СЯ со скоростью v_{13} , максимальная величина которой составляет $0,4 \text{ м/с}$. Причем перемещение индуктора начинается с задержкой $0,35 \text{ мс}$. Значение максимальной скорости ПЯ относительно СЯ $v_{23} = v_{12} + v_{13}$ составляет $4,05 \text{ м/с}$.

На рис. 3 представлены электромеханические характеристики ЛИИЭП, у которого высота ПЯ в два раза больше высоты СЯ (параметры якорей $h_2^*=0,6, h_3^*=0,3$).

В данном ЛИИЭП, как и в рассмотренном выше, сохраняется характер протекания токов. Максимальная плотность тока в индукторе j_1 незначительно увеличивается до $450,1 \text{ А/мм}^2$. Максимум плотности тока j_2 в ПЯ уменьшается до $294,3 \text{ А/мм}^2$, а в СЯ j_3 плотность тока повышается до -573 А/мм^2 . Вследствие этого максимальная величина ЭДУ отталкивания, дей-

ствующих на f_{z2} , уменьшается до $12,7 \text{ кН}$. В результате максимальная скорость перемещения ПЯ относительно индуктора v_{12} уменьшается до величины $2,95 \text{ м/с}$.

Однако в данном ЛИИЭП на индуктор в начальный момент времени действуют положительные ЭДУ f_{z1} , отталкивающие его от СЯ и его перемещение начинается примерно через $0,1 \text{ мс}$. При этом максимальная величина этих сил наблюдается во втором пике отталкивания, достигая $2,18 \text{ кН}$. В результате индуктор перемещается относительно СЯ со скоростью v_{13} , максимальная величина которой достигает $0,63 \text{ м/с}$. Максимальная скорость ПЯ относительно СЯ v_{23} составляет $3,58 \text{ м/с}$. Уменьшение скорости ПЯ можно объяснить его повышенной массой.

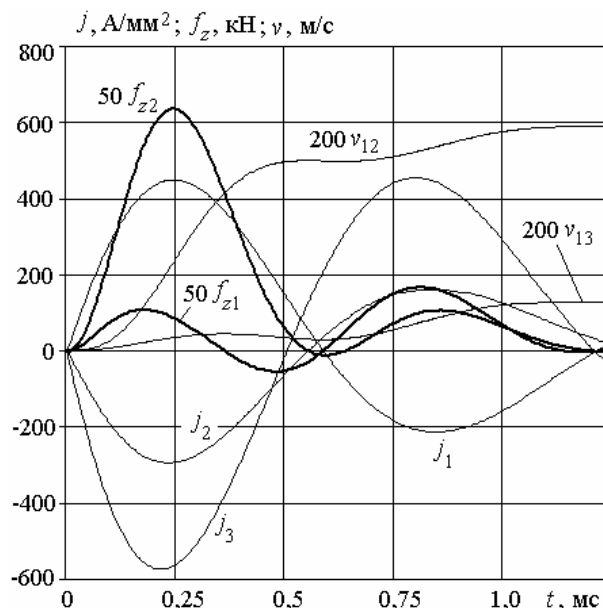


Рис. 3. Электромеханические характеристики ЛИИЭП с геометрическими параметрами якорей $h_2^*=0,6, h_3^*=0,3$

Рассмотрим вариант ЛИИЭП, у которого высоты СЯ и ПЯ равны. На рис. 4 представлены электромеханические характеристики ЛИИЭП с параметрами $h_2^*=0,4, h_3^*=0,4$.

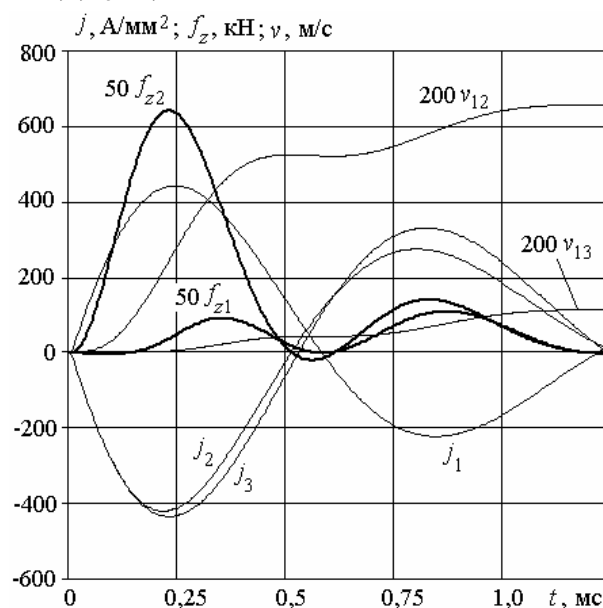


Рис. 4. Электромеханические характеристики ЛИИЭП с геометрическими параметрами якорей $h_2^*=0,4, h_3^*=0,4$

В данном ЛИИЭП максимальная плотность тока в индукторе j_1 составляет $442,8 \text{ А/мм}^2$. Токи в якорях особенно на начальном участке процесса, где отсутствует перемещение активных элементов, практически одинаковы. Максимум плотности тока j_2 в ПЯ составляет $420,3 \text{ А/мм}^2$, а в СЯ $j_3 = 434,8 \text{ А/мм}^2$. Максимальная величина ЭДУ отталкивания, действующих на f_{z2} , составляет $12,8 \text{ кН}$, что приводит к перемещению ПЯ относительно индуктора со скоростью v_{12} , максимальная величина которой составляет $3,28 \text{ м/с}$.

В данном ЛИИЭП на индуктор до момента времени $0,15 \text{ мс}$ практически не действуют ЭДУ f_{z1} . Вследствие этого перемещение индуктора относительно СЯ начинается практически через $0,25 \text{ мс}$. При этом максимальная величина этих сил наблюдается во втором пике отталкивания и составляет лишь $1,85 \text{ кН}$. В результате индуктор перемещается относительно СЯ со скоростью v_{13} , максимальная величина которой составляет $0,56 \text{ м/с}$. При этом максимальная скорость ПЯ относительно СЯ v_{23} составляет $3,84 \text{ м/с}$.

Силовые и скоростные показатели ЛИИЭП. Рассмотрим влияния геометрических параметров СЯ $h_2^* \in [0,3; 0,7]$ и ПЯ $h_3^* \in [0,3; 0,7]$ на величину импульса ЭДУ $F_{zp} = \int f_{zp} dt$, где $p = 1, 2, 3$ – индексы индуктора, ПЯ и СЯ.

Величины импульсов ЭДУ, действующих на индуктор F_{z1} , существенно меньше, чем величины импульсов, действующих на ПЯ F_{z2} и СЯ F_{z3} . Максимальные значения импульса ЭДУ F_{z1} , действующих на индуктор, возникают при геометрических параметрах якорей $h_3^*=0,4$ и $h_2^*=0,7$ (рис. 5). Минимальные значения F_{z1} возникают при $h_3^*=0,7$ и $h_2^*=0,4$. Наибольшая величина импульса ЭДУ F_{z1} при любой высоте ПЯ реализуется при СЯ с параметром $h_3^*=0,4$.

Наименьшие значения импульса ЭДУ F_{z2} , действующих на ПЯ, наоборот, возникают при $h_3^*=0,4$ (минимальное значение имеет место при высоком ПЯ $h_2^*=0,7$). Наибольшие значения импульса ЭДУ F_{z2} имеют место при $h_2^*=0,42-0,45$ (максимальное значение имеет место при высоком СЯ $h_3^*=0,7$).

Наибольшие значения импульса ЭДУ F_{z3} , действующих на СЯ, возникают при $h_3^*=0,4$ (максимальное значение имеет место при $h_2^*=0,7$). А наибольшие значения импульса ЭДУ F_{z3} имеют место при $h_2^*=0,4$ (минимальное значение имеет место при $h_3^*=0,7$).

Рассмотрим влияния геометрических параметров СЯ $h_2^* \in [0,3; 0,7]$ и ПЯ $h_3^* \in [0,3; 0,7]$ на скорости перемещения индуктора и ПЯ, реализуемые в конце рабочего процесса (рис. 6).

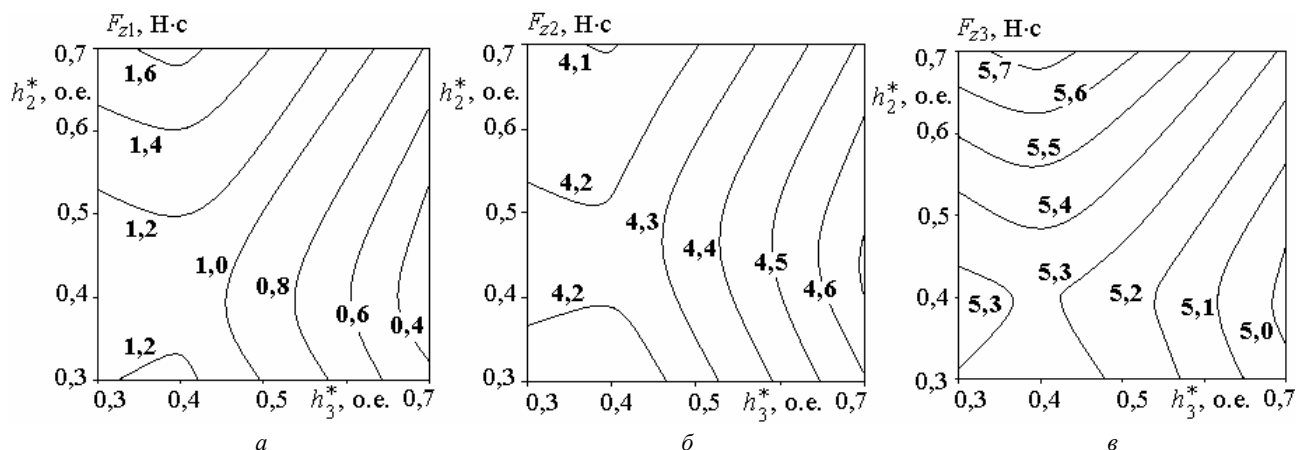


Рис. 5. Зависимость импульсов ЭДУ, действующих на индуктор (а), ПЯ (б) и СЯ (в) в зависимости от соотношений геометрических параметров h_2^* и h_3^*

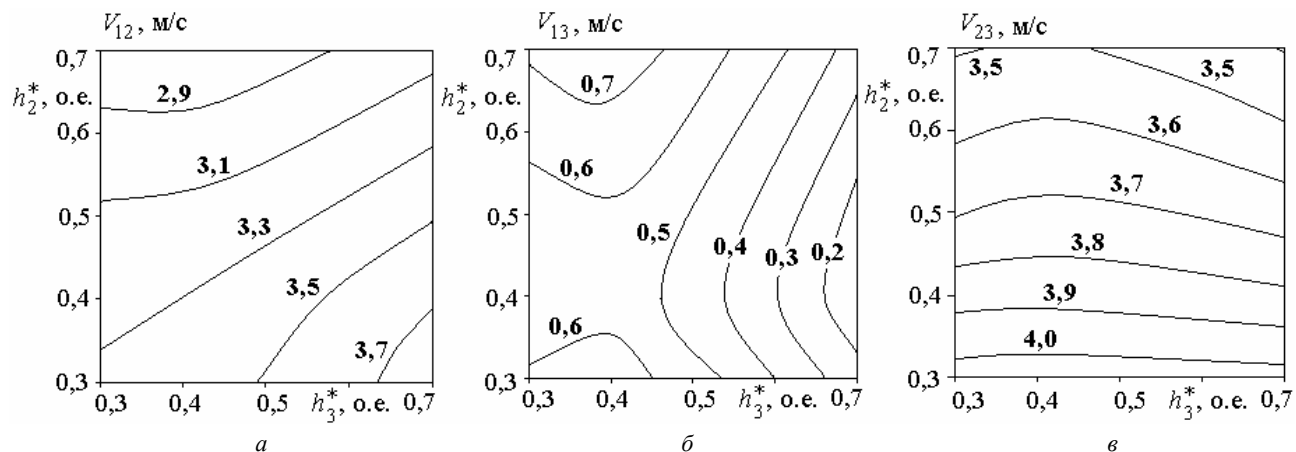


Рис. 6. Зависимость скоростей ПЯ относительно индуктора (а), индуктора относительно СЯ (б) и ПЯ относительно СЯ (в) в зависимости от соотношений геометрических параметров h_2^* и h_3^*

Максимальное значение скорости ПЯ относительно индуктора V_{12} реализуется при минимальной его высоте $h_2^*=0,3$ и максимальной высоте СЯ $h_3^*=0,7$. А минимальное значение скорости ПЯ относительно индуктора V_{12} реализуется при максимальной его высоте $h_2^*=0,7$ и минимальной высоте СЯ $h_3^*=0,3$.

В свою очередь наибольшие значения скорости перемещения индуктора относительно СЯ V_{13} имеют место при относительно невысоком СЯ $h_3^*=0,4$ (максимальная скорость имеет место при высоком ПЯ $h_2^*=0,7$). Наименьшие значения скоростей V_{13} реализуются при $h_2^*=0,45$ (минимальная скорость V_{13} имеет место при высоком СЯ $h_3^*=0,7$).

Наибольший интерес представляет скорость перемещения ПЯ относительно СЯ V_{23} . Как показывают расчеты наибольшие скорости V_{23} развивает наиболее низкий ПЯ $h_2^*=0,3$, причем высота СЯ на нее практически не влияет. Однако с увеличением высоты ПЯ начинает сказываться влияние СЯ. В этом случае высоту СЯ целесообразно выбирать с геометрическим параметрами $h_3^*=0,4-0,42$.

Влияние массы исполнительного элемента на показатели ЛИИЭП. Для того чтобы более полно понять электромеханические процессы в ЛИИЭП, рассмотрим влияние массы исполнительного элемента m_e на его электромеханические показатели. На рис. 7 представлены зависимости показателей ЛИИЭП, имеющего геометрические параметры якорей $h_2^*=0,5$, $h_3^*=0,5$, от массы исполнительного элемента. С увеличением массы m_e происходит существенное уменьшение скорости перемещения индуктора относительно СЯ V_{13} , которая уже при массе $m_e=3$ кг практически снижается до нуля. Скорость ПЯ относительно индуктора V_{12} с увеличением массы исполнительного элемента от 0 до 5 кг уменьшается с 9,83 м/с до 0,9 м/с.

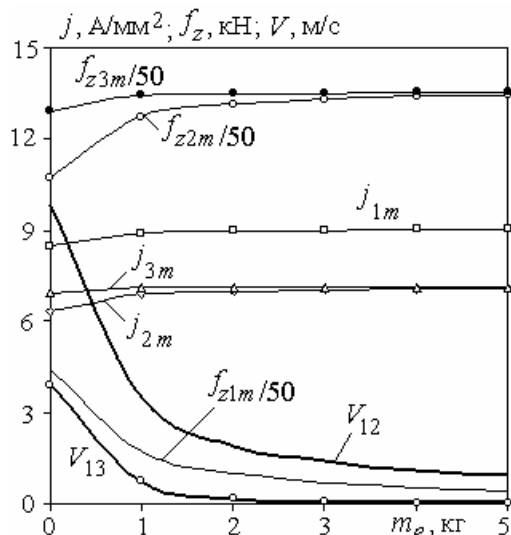


Рис. 7. Зависимость показателей ЛИИЭП с параметрами $h_2^*=0,5$, $h_3^*=0,5$ от массы исполнительного элемента

Зависимости максимальных значений ЭДУ, действующих на активные элементы ЛИИЭП, от массы исполнительного элемента имеют следующие особенности. С увеличением массы m_e максимальные значения ЭДУ, действующих на индуктор f_{z1m} , уменьшаются, а на якоря — увеличиваются. Причем максимальные ЭДУ, действующих на ПЯ f_{z2m} , меньше, чем аналогичные усилия, действующие на СЯ f_{z3m} . Однако с увеличением

массы исполнительного элемента эти усилия стремятся к выравниванию. Очевидно, что при полностью заторможенном ПЯ эти ЭДУ будут равными.

С увеличением массы m_e происходит увеличение токов как в индукторе, так и в якорях, особенно сильно — в интервале 0...1 кг. Это можно объяснить более сильным индукционным взаимодействием индуктора с якорями, которые находятся в сильной магнитной связи.

Выводы.

1. Разработана математическая модель, которая описывает электромеханические процессы ЛИИЭП с подвижным индуктором, взаимодействующим со стационарным и подвижным электропроводящими якорями.

2. Установлено влияние высот якорей на электромеханические процессы ЛИИЭП. Показано, что в начальный момент рабочего процесса токи в якорях имеют противоположную к току индуктора полярность.

3. Показано, что если высота СЯ в два раза больше высоты ПЯ, то на индуктор в начальный момент времени действуют ЭДУ, прижимающие его к СЯ, и перемещение индуктора начинается с задержкой 0,35 мс. Если высота ПЯ в два раза больше высоты СЯ, то на индуктор в начальный момент времени действуют ЭДУ, отталкивающие его от СЯ, и его перемещение начинается с задержкой 0,1 мс. Если высоты СЯ и ПЯ равны, то до момента времени 0,15 мс на индуктор практически не действуют ЭДУ и перемещение индуктора относительно СЯ начинается с задержкой 0,25 мс.

4. Установлено влияние высот дисковых якорей на величины импульсов ЭДУ, действующих на индуктор и якоря. Величины импульсов ЭДУ, действующих на индуктор существенно меньше, чем импульсы ЭДУ, действующих на якоря. Установлены комбинации высот якорей, при которых на них и на индуктор действуют как наибольшие, так и наименьшие импульсы ЭДУ.

5. Установлено влияние геометрических параметров СЯ и ПЯ на скорости перемещения индуктора и ПЯ. Наибольшие скорости развивает наиболее низкий ПЯ, причем высота СЯ на них практически не влияет. Однако с увеличением высоты ПЯ начинает сказываться влияние СЯ. В этом случае высоту СЯ целесообразно выбирать с геометрическим параметром $h_3^*=0,4-0,42$.

6. Показано, что с увеличением массы исполнительного элемента происходит увеличение токов в активных элементах ЛИИЭП и уменьшение скоростей индуктора и ПЯ. При этом максимальные значения ЭДУ, действующих на индуктор, уменьшаются, а на якоря — увеличиваются. Максимальные ЭДУ, действующие на ПЯ меньше, чем аналогичные усилия, действующие на СЯ.

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.
- 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.
- Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. — 2006. — №1. — С. 24-27.
- Болюх 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.

5. 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.

6. Иванов В.В., Паранин С.Н., Ноздрин А.А. Полуавтоматическая установка магнитно-импульсного прессования порошков // Материаловедение. – 2011. – № 7. – С. 42-45.

7. Ивашин В.В., Пенчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – №6. – С. 42-46.

8. 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.

9. Болух В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.

10. 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.

11. US Patent 8686814: H01H77/00. Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device / Schneider Electric Industries SAS. 01.04.2014.

12. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – vol.83. – no.10. – pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.

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. 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.

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

4. 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).

5. 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.

6. Ivanov V.V., Parani S.N., Nozdrin A.A. Semiautomatic installation of magnetic pulse compaction of powders. *Materialovedenie*, 2011, no.7, pp. 42-45. (Rus).

7. Ivashin V.V., Penchev V.P. Features of the dynamics of work and energy diagrams of pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of excitation windings. *Electrical engineering*, 2013, no.6, pp. 42-46. (Rus).

8. 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.

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

10. 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.

11. Schneider Electric Industries SAS. *Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device*. Patent USA, no.8686814, 2014.

12. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*, 2012, vol.83, no.10, pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.

Поступила (received) 05.01.2018

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

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

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

² Firm Tetra, LTD,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Electromechanical processes in a linear pulse-induction electromechanical converter with a movable inductor and two armatures.

Purpose. The purpose of the paper is to determine the influence of the height of the mobile and stationary disk electrically conductive armatures covering the movable inductor on the electromechanical processes of linear pulsed-induction electromechanical converter (LPIEC). **Methodology.** With the help of the developed mathematical model that describes electromechanical and thermal processes of LPIEC, the influence of the heights of the armatures on electromechanical processes, the values of the electrodynamic forces acting on the inductor and armature, and the moving speed of the movable armature (MA) is established. **Results.** It is shown that if the height of the stationary armature (SA) is twice the height of the MA, then the inductor at the initial instant of time is acted upon by electrodynamic forces pressing it to the SA, and the displacement of the inductor begins with a delay of 0.35 ms. If the height of the MA is twice the height of the SA, then the electrodynamic forces act on the inductor at the initial instant of time, repelling it from the SA, and its movement begins with a delay of 0.1 ms. If the heights of the SA and the MA are equal, then until the time 0.15 ms on the inductor, the electrodynamic forces practically do not act and the inductor moving relative to the SA begins with a delay of 0.25 ms. **Originality.** The effect of the geometric parameters of the SA and MA on the velocity of the inductor moving relative to the SA, MA relative to the inductor and the MA relative to the SA is established. It has been established that the highest velocity of the MA relative to the SA develops the lowest MA, and the height of the SA does not affect it practically. However, with the increase in the height of the MA, the effect of SA begins to affect. In this case, it is expedient to select the height of the SA to be 0.4-0.42 of the height of the inductor. **Practical value.** It is shown that as the weight of the actuating element increases, the currents in the active elements of the LPIEC increase, the induction velocities of the inductor relative to the SA and the MA decrease relative to the inductor. At the same time, the maximum the electrodynamic forces values acting on the inductor decrease, and the armatures increase. Moreover, the maximum the electrodynamic forces acting on the MA are less than similar forces acting on the SA. References 12, figures 7.

Key words: linear pulse-induction electromechanical converter, mathematical model, mobile inductor, stationary armature, movable armature, electromechanical processes.