

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ И СКОРОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО И ИНДУКЦИОННОГО ТИПОВ**

В.Ф. Болюх*, докт.техн.наук, **Ю.В. Кашанский****, **И.С. Щукин*****, канд.техн.наук
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина, e-mail: yfbolyukh@gmail.com

Целью статьи является определение влияния геометрических параметров обмоток индуктора и якоря на силовые и скоростные показатели линейных импульсных электромеханических преобразователей (ЛИЭП) индукционного и электродинамического типов. Разработана цепная математическая модель ЛИЭП, описывающая взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы. Установлены геометрические соотношения обмоток индуктора и якоря (аксиальная высота, количество слоев и витков медной шины), при которых обеспечиваются максимальные силовые и скоростные показатели указанных преобразователей. Силовые и скоростные показатели преобразователя электродинамического типа выше, чем у преобразователя индукционного типа, однако конструктивно он является более сложным. В наиболее эффективном преобразователе индукционного типа возникают значительные потери в обмотке индуктора, а потери в обмотке якоря незначительны, что обуславливает относительно низкий КПД – 10,9 %. В наиболее эффективном преобразователе электродинамического типа потери в обмотке индуктора уменьшаются, а в обмотке якоря возрастают, что приводит к повышенному КПД – 20,0 %. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, преобразователь индукционного типа, преобразователь электродинамического типа, сравнительный анализ.

Введение. Для создания мощных силовых импульсов и обеспечения высоких скоростей используются линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП). Наиболее эффективными являются ЛИЭП электродинамического (ЛИЭП-Э) и индукционного (ЛИЭП-И) типов [8]. В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы, в горной промышленности – бутобои и вибраторы, в геологоразведке – вибросейсмоисточники, в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара и устройства для электродинамической обработки сварных соединений, в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители и др. ЛИЭП применяются в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на ударные нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов, для уничтожения информации на цифровых носителях и др. [5, 6, 9].

В ЛИЭП неподвижный индуктор содержит многовитковую обмотку, возбуждаемую, как правило, емкостным накопителем энергии (ЕНЭ). Индуктор посредством магнитного поля взаимодействует с подвижным якорем, который в результате электродинамических сил отталкивания воздействует на ударный исполнительный элемент. В ЛИЭП-И якорь представляет собой одно- или многовитковую короткозамкнутую обмотку, в которой индуцируется ток. В ЛИЭП-Э якорь представляет собой многовитковую обмотку, которая электрически последовательно и встречно по магнитному полю соединена с индуктором. В ЛИЭП-Э якорь соединен с индуктором и ЕНЭ при помощи гибких или скользящих тоководов. Проблемой сравнительного анализа показателей ЛИЭП индукционного и электродинамического типов занимались различные исследователи [1, 3, 10]. Однако при этом не рассматривалась идентичность геометрических параметров обмоток индуктора (ОИ) и якоря (ОЯ), не исследовалось влияние количества слоев, числа витков и аксиальной высоты обмоток на эффективность и электромеханические показатели этих ЛИЭП.

Целью статьи является определение влияния геометрических параметров обмоток индуктора и якоря на силовые и скоростные показатели линейных импульсных электромеханических преобразователей индукционного и электродинамического типов.

© Болюх В.Ф., Кашанский Ю.В., Щукин И.С., 2019
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-9115-7828> ; ** <https://orcid.org/0000-0002-1532-9613> ;
*** <https://orcid.org/0000-0001-7982-8633>

Математическая модель ЛИЭП. Рассмотрим математическую модель ЛИЭП-И и ЛИЭП-Э, в которой используются сосредоточенные параметры активных элементов – ОИ и ОЯ. Такая цепная модель позволяет оперативно осуществлять расчет параметров ЛИЭП при варьировании различных параметров [7]. Будем считать, что коаксиально установленные неподвижный индуктор и ускоряемый якорь содержат круглые дисковые многовитковые обмотки, 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. Поскольку индуктор и якорь выполнены в виде многовитковых плотно намотанных обмоток, то для них целесообразно использовать понятия индуктивности и взаимной индуктивности. Изменение пространственного положения учитывается изменением потоко-сцепления Ψ между обмотками индуктора и якоря

$$\frac{d\Psi}{dt} = M_{12}(z) \frac{di_n}{dt} + v_z(t) \cdot i_n \frac{dM_{12}}{dz},$$

где $n=1, 2$ – индексы ОИ и ОЯ соответственно; $M_{12}(z)$ – взаимная индуктивность между ОИ и ОЯ, перемещаемая вдоль оси z со скоростью v_z ; i_n – ток n -го активного элемента.

Будем рассматривать схему возбуждения ЛИЭП, в которой ЕНЭ шунтирован обратным диодом, полагая, что его сопротивление в прямом направлении пренебрежимо мало, а в обратном направлении его проводимость столь же мала.

Электрические процессы в активных элементах ЛИЭП-И на временном интервале $\{0, t_1\}$ можно описать системой уравнений [2]

$$R_1(T_1)i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + v_z(t)i_2 \frac{dM_{12}}{dz} = 0, \quad \frac{1}{C_0} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0, \quad (1)$$

$$R_2(T_2) \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + i_1 v(t) \frac{dM_{12}}{dz} = 0, \quad (2)$$

где t_1 – время, при котором напряжение ЕНЭ $u_C=0$; R_n, L_n, T_n – активное сопротивление, индуктивность, температура и ток n -го активного элемента соответственно; C_0 – емкость ЕНЭ, заряженного до напряжения U_0 .

Введем обозначения: $R_1 = R_1(T_1)$; $R_2 = R_2(T_2)$; $M_{12} = M_{12}(z)$; $v_z = v_z(t)$.

Система уравнений (1) – (2) после ряда преобразований приводится к уравнению

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

где $a_3 = v$; $a_2 = \chi - 2Mv_z \frac{dM_{12}}{dz}$; $a_1 = R_1 R_2 + \frac{L_2}{C_0} - v_z^2 \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2$; $a_0 = \frac{R_2}{C_0}$; $v = L_1 L_2 - M_{12}^2$; $\chi = R_1 L_2 + L_1 R_2$.

Характеристическое уравнение дифференциального уравнения (3) представляется в виде

$$x^3 + r_* x^2 + s_* x + t_* = 0, \quad (4)$$

где $r_* = a_2/a_3$; $s_* = a_1/a_3$; $t_* = a_0/a_3$.

Используя замену $y = x + r_*/3$, уравнение (4) приводится к виду

$$y^3 + p_* y + q_* = 0, \quad \text{где } p_* = s_* - r_*^2/3; \quad q_* = 2(r_*/3)^3 - r_* s_*/3 + t_*. \quad (5)$$

Корни уравнения (5) находятся с использованием формулы Кардано

$$y_1 = u_* + v_*; \quad y_2 = \varepsilon_1 u_* + \varepsilon_2 v_*; \quad y_3 = \varepsilon_2 u_* + \varepsilon_1 v_*, \quad (6)$$

где $u_* = \sqrt[3]{D^{0.5} - 0.5q_*}$; $v_* = \sqrt[3]{-D^{0.5} - 0.5q_*}$; $\varepsilon_{1,2} = 0.5(-1 \pm j\sqrt{3})$; $D = (p_*/3)^3 + (q_*/2)^2$ – дискриминант уравнения (5).

Если $D < 0$, то кубическое уравнение (5) имеет три действительных корня

$$y_p = 2\sqrt[3]{-p_*/27} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(-\frac{q_*}{2\sqrt[3]{-p_*/27}} \right) + \frac{2}{3} \pi(p-1) \right], \quad p=1, 2, 3. \quad (7)$$

После ряда преобразований получаем выражение для токов в активных элементах

$$i_n(t_{k+1}) = \delta^{-1} \left\{ \left[i_n(t_k) - \frac{i_m(t_k)v_z^2}{R_1R_2} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] (\alpha_1\beta_2\beta_3 + \alpha_2\beta_1\beta_3 + \alpha_3\beta_1\beta_2) + \left(\Omega_n - \frac{v_z\Omega_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) [\alpha_1(\beta_2 + \beta_3) + \alpha_2(\beta_1 + \beta_3) + \alpha_3(\beta_1 + \beta_2)] + \left(\Lambda_n - \frac{v_z\Lambda_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \right\} \left[1 - \frac{v_z^2}{R_1R_2} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $m=1, 2$ при $n=2, 1$; $\delta = \beta_1\beta_2(\beta_2 - \beta_1) + \beta_1\beta_3(\beta_1 - \beta_3) + \beta_2\beta_3(\beta_3 - \beta_2)$; $\Omega_n = B_n + \frac{B_m v_z}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$;

$$\Lambda_n = E_n + \frac{E_m v_z}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad \alpha_1 = (\beta_3 - \beta_2) \exp(\beta_1 \Delta t); \quad \alpha_2 = (\beta_1 - \beta_3) \exp(\beta_2 \Delta t); \quad \alpha_3 = (\beta_2 - \beta_1) \exp(\beta_3 \Delta t);$$

$$\beta_p = \left\{ 2(a_2^2 - 3a_1 a_3)^{0.5} \cos[2\pi(p-1)/3 + \zeta] - a_2 \right\} / 3a_3; \quad \zeta = \arccos \left[(a_2^2 - 3a_1 a_3)^{-1.5} (4.5a_1 a_2 a_3 - a_2^3 - 13.5a_0 a_3^2) \right];$$

$$\gamma_1 = L_2; \quad \gamma_2 = -M_{12}; \quad B_n = v^{-1} \left[i_n(t_k) \left(M_{12} v_z \frac{dM_{12}}{dz} - R_n L_m \right) + i_m(t_k) \left(R_m M_{12} - L_m v_z \frac{dM_{12}}{dz} \right) - \gamma_k u_c(t_k) \right];$$

$$E_1 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[R_1 (R_2 M_{12}^2 + R_1 L_2^2 - C^{-1} L_2 v) - v_z M_{12} \frac{dM_{12}}{dz} (\chi + 2R_1 L_2) + v_z^2 (L_1 L_2 + M_{12}^2) \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \times \right. \\ \left. \times \left[v_z (L_2 \chi + 2R_2 M_{12}^2) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12} R_2 \chi - v^2 M_{12} L_2 \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left(R_2 M_{12}^2 + L_2^2 R_1 - 2L_2 v M_{12} \frac{dM_{12}}{dz} \right) \right\};$$

$$E_2 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[M_{12} (C^{-1} v - R_1 \chi) + v_z (2R_1 M_{12}^2 + L_1 \chi) \frac{dM_{12}}{dz} - 2v_z^2 L_1 M_{12} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[R_2 (R_1 M_{12}^2 + R_2 L_1^2) - \right. \right. \\ \left. \left. - M_{12} v_z (2L_1 R_2 + \chi) \frac{dM_{12}}{dz} + (L_1 L_2 + M_{12}^2) v_z^2 \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left[v_z (L_1 L_2 + M_{12}^2) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12} \chi \right] \right\},$$

где $u_c(t_k)$ – напряжение ЕНЭ в момент времени t_k .

Если дискриминант характеристического уравнения (5) $D > 0$, то один его корень действительный $x_1 = d$, а два других – комплексно сопряженные $x_{2,3} = f \pm jg$. После ряда преобразований получаем выражение для токов в активных элементах

$$i_n(t_{k+1}) = \left(\xi_n - \frac{\xi_m v_z}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) / \left[1 - \frac{v_z^2}{R_1 R_2} \left(\frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$\text{где } \xi_n = g^{-1} [g^2 + (f-d)^2]^{-1} \{ g \cdot \exp(d\Delta t) [(g^2 + f^2)\Theta_n - 2f\Omega_n + \Lambda_n] + \exp(f\Delta t) \{ \sin(g\Delta t) d(f^2 - g^2 - fd)\Theta_n + \\ + (g^2 + d^2 - f^2)\Omega_n + (f-d)\Lambda_n \} + g \cdot \cos(g\Delta t) [d(d-2f)\Theta_n + 2f\Omega_n - \Lambda_n] \}; \quad \Theta_n = i_n(t_k) + \frac{v_z i_m(t_k)}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}.$$

Электрические процессы в ЛИЭП-И на временном интервале $\{t_1, \infty\}$ описываются системой уравнений [2]

$$R_n(T_n) i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{nm}(z) \frac{di_m}{dt} + i_m(t) v_z(t) \frac{dM_{nm}}{dz} = 0. \quad (10)$$

После ряда преобразований эта система приводится к уравнению

$$(1 - K_{12}^2) \frac{d^2 i_1}{dt^2} + (\gamma_1 + \gamma_2 - 2\xi_1 \chi_2) \frac{di_1}{dt} + (\gamma_1 \gamma_2 - \chi_1 \chi_2) i_1 = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } \gamma_n = \frac{R_n}{L_n}; \quad \xi_n = \frac{M_{nm}(z)}{L_n}; \quad \chi_n = \frac{v_z(t)}{L_n} \frac{dM_{nm}}{dz}; \quad K_{12} = \frac{M_{nm}(z)}{(L_n L_m)^{0.5}}.$$

Выражения для токов в окончательном виде описываются рекуррентными соотношениями

$$i_n(t_{k+1}) = \frac{1}{x_1 - x_2} \left\{ i_n(t_k) \left[x_1 \exp(x_2 \Delta t) - x_2 \exp(x_1 \Delta t) \right] + \frac{\exp(x_1 \Delta t) - \exp(x_2 \Delta t)}{1 - K_{12}^2} \left[i_n(t_k) (\xi_n \chi_m - \gamma_n) + i_m(t_k) (\gamma_m \xi_n - \chi_n) \right] \right\}, \quad (12)$$

где $x_{1,2} = \frac{1}{1-K_{12}^2} \left\langle \xi_1 \chi_2 - 0,5 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \pm \left\{ 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) - \xi_1 \chi_2 \right\}^2 + (K_{12}^2 - 1)(\gamma_1 \gamma_2 - \chi_1 \chi_2) \right\}^{0,5}$.

Электрические процессы в ЛИЭП-Э на интервале $\{0, t_1\}$ можно описать уравнением

$$\left(R_1(T_1) + R_2(T_2) - 2v_z(t) \frac{dM_{12}}{dz} \right) \cdot i + [L_1 - 2M_{12}(z) + L_2] \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t idt = 0, \quad (13)$$

где i – ток ОИ и ОЯ.

Если $\Theta > 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, где $\Xi = L_1 - 2M_{12}(z) + L_2$; $\Theta = R_1(T_1) + R_2(T_2) - 2v_z(t) \frac{dM_{12}}{dz}$, то получаем следующее выражение для тока в рекуррентном виде:

$$i(t_{k+1}) = \frac{u_c(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)}{\Xi(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(\alpha_1 \Delta t) - \exp(\alpha_2 \Delta t)] + \frac{i(t_k)}{\alpha_2 - \alpha_1} [\alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t)], \quad (14)$$

где $\alpha_{1,2} = -0,5 \frac{\Theta}{\Xi} \pm \left[0,25 \left(\frac{\Theta}{\Xi} \right)^2 - \frac{1}{C_0 \Xi} \right]^{0,5}$.

Если $\Theta < 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то $\alpha_{1,2} = -\delta \pm j\omega_1 = \omega_0 \exp(j(\pi \pm \theta))$, где $\delta = 0,5\Theta \Xi^{-1}$; $\theta = \arctg(4\Xi\Theta^{-2}C_0^{-1} - 1)^{0,5}$; $\omega_0 = (\Xi C_0)^{-0,5}$; $\omega_1 = (\Xi^{-1}C_0^{-1} - 0,25\Theta^2\Xi^{-2})^{0,5}$.

Учитывая, что $2j \sin(\omega_1 \Delta t) = \exp(j\omega_1 \Delta t) - \exp(-j\omega_1 \Delta t)$, получаем выражение для тока в виде

$$i(t_{k+1}) = -\omega_1^{-1} \exp(-\delta \Delta t) \left\{ \Xi^{-1} [u_c(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \sin(\omega_1 \Delta t) + \omega_0 i(t_k) \sin(\omega_1 \Delta t - \theta) \right\}. \quad (15)$$

Если $\Theta = 2\sqrt{\Xi C_0^{-1}}$, то $\delta = \omega_0$, и ток описывается выражением

$$i(t_{k+1}) = \exp(-\delta \Delta t) \Delta t \left\{ i(t_k) \delta - \Xi^{-1} [u_c(t_k) + \Theta \cdot i(t_k)] \right\}. \quad (16)$$

Ток в ЛИЭП-Э на временном интервале $\{t_1, \infty\}$ описывается уравнением

$$i(t_{k+1}) = i(t_k) \exp(-\Theta \Xi^{-1} \Delta t). \quad (17)$$

Величина перемещения якоря массой m_2 с исполнительным элементом массой m_a относительно неподвижного индуктора описывается рекуррентными соотношениями, представленными в работе [3]. Температуры активных элементов ЛИЭП описываются рекуррентными соотношениями, представленными в работе [4].

Начальные условия математической модели: $T_n(0) = T_0$ – температура n -го активного элемента, $i_n(0) = 0$ – ток n -го активного элемента, $\Delta z(0) = \Delta z_0$ – исходное осевое расстояние между ОИ и ОЯ, $u_c(0) = U_0$ – напряжение ЕНЭ, $v_z(0) = 0$ – скорость якоря вдоль оси z .

В рекуррентных соотношениях расчетный шаг по времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ в значительной степени обуславливает погрешность расчета: чем меньше величина Δt , тем меньше погрешность, но больше время расчета взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов при учете ряда нелинейных зависимостей.

Эффективность ЛИЭП оценим силовыми показателями: наибольшими значениями амплитуды f_{zm} и импульса электродинамических усилий (ЭДУ) F_z и скоростными показателями: максимальными значениями КПД η и скорости якоря V_m при минимальных превышениях температур активных элементов θ_n , где $f_z(z, t) = i_1(t) i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z)$, $f_z(z, t) = i^2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z)$ – мгновенное значение ЭДУ, действующих на якорь ЛИЭП-И и ЛИЭП-Э соответственно;

$F_z = \int f_z(z, t) dt$; $\eta = \left[(m_2 + m_a) v_z^2 + K_p \Delta z^2 \right] C_0^{-1} U_0^{-2}$; $\theta_n = T_n - T_0$.

КПД η представляет собой отношение механической энергии ЛИЭП к исходной энергии емкостного накопителя энергии $W_{c0} = 0,5 C_0 U_0^2$. Механическая энергия, развиваемая преобразователем, состоит из кинетической энергии подвижных элементов (якоря и исполнительного элемента) $W_{kin} = 0,5(m_2 + m_a) v^2(t)$ и энергии сжатия возвратной пружины $W_{pr} = 0,5 K_p \Delta z^2(t)$.

Рассмотрим ЛИЭП, у которого коаксиально установленные ОИ ($n=1$) и ОЯ ($n=2$) плотно намотаны K_{pn} слоями медной шины квадратного сечения со стороной $a=1,5$ мм. Внешний диаметр n -го

элемента $D_{en}=100$ мм, внутрєнный диаметр $D_{in}=10$ мм. ЕНЭ имеет следующие параметры: емкость $C_0=3,0$ мФ, напряжение $U_0=0,4$ кВ. Начальное расстояние между индуктором и якорем $\Delta z_0=1$ мм. Коэффициент упругости возвратной пружины $K_p=25$ кН/м. Масса ИЭ $m_a=0,25$ кг. Исследуем влияние количества K_{pn} слоев медной шины в ОИ и ОЯ на показатели ЛИЭП, поскольку эти параметры определяют число витков $N_n = Ent[0,5K_{pn}(D_{en} - D_{in})(a + 2\delta_i)^{-1}]$ и аксиальную высоту $H_n = (a + 2\delta_i)K_{pn}$ n -ых активных элементов при фиксированных радиальных размерах. Здесь $Ent(\zeta)$ – наибольшее целое число, не превосходящее ζ ; δ_i – толщина изоляции медной шины.

Электромеханические показатели ЛИЭП. Рассмотрим электромеханические показатели ЛИЭП при различном количестве слоев шины ОИ K_{p1} и фиксированном количестве слоев шины ОЯ $K_{p2}=4$ ($N_2=112$, $H_2=6,4$ мм). В ЛИЭП-И (рис. 1, а) при увеличении количества слоев шины ОИ напряжение ЕНЭ u_c достигает нулевого значения за больший интервал времени. Амплитуды плотностей токов ОИ j_1 и ОЯ j_2 уменьшаются и достигаются за больший интервал времени. Аналогичную закономерность проявляют ЭДУ f_z . Если ОИ содержит два слоя шины ($K_{p1}=2$, $N_1=56$, $H_1=3,2$ мм), то амплитуда плотности тока в ОИ $j_{1m}=804,9$ А/мм², а в ОЯ $j_{2m}=308,6$ А/мм². Амплитуда ЭДУ $f_m=12,5$ кН, максимальная величина скорости якоря $V_m=9,47$ м/с, величина импульса ЭДУ $F_z=6,56$ Н·с, КПД $\eta=10,6$ %, превышение температуры ОИ $\theta_1=3,06$ °С и превышение температуры ОЯ $\theta_2=0,21$ °С.

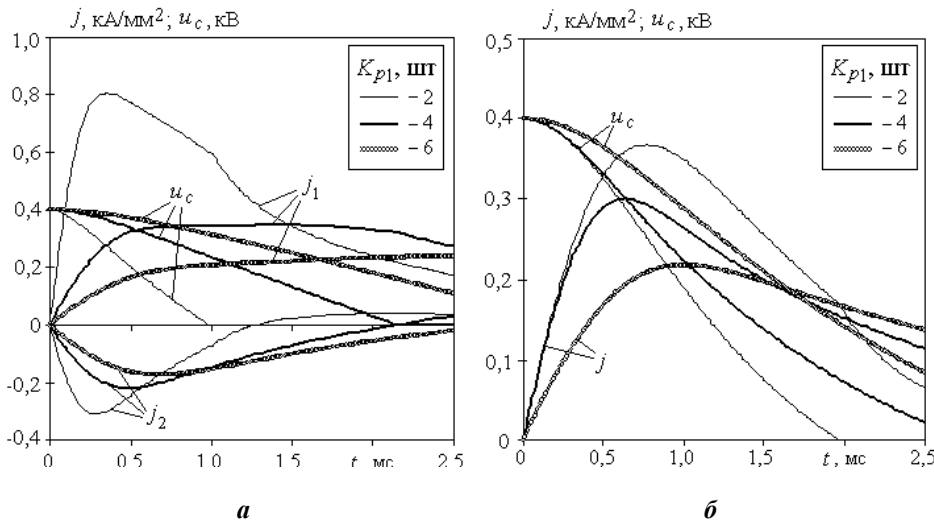


Рис. 1

При увеличении числа слоев шины ОИ в три ра-за ($K_{p1}=6$, $N_1=168$, $H_1=9,6$ мм) все показатели ЛИЭП-И уменьшаются: j_{1m} – в 3,38, j_{2m} – в 1,78, f_m – в 3,03, V_m – в 1,3, F_z – в 1,3, η – в 1,6, θ_1 – в 6,55, а θ_2 – в 1,46 раз.

В ЛИЭП-Э (рис. 1, б) при увеличении количества слоев шины ОИ K_{p1} закономерности изменения напряжения ЕНЭ u_c амплитуды плотности тока в ОИ и ОЯ j и ЭДУ f_z аналогичен. Однако при этом наблюдаются и различия. Если ОИ содержит два слоя шины ($K_{p1}=2$), то в ЛИЭП-Э амплитуда плотности тока в ОИ и ОЯ $j_m=367,7$ А/мм², амплитуда ЭДУ $f_m=6,43$ кН, максимальная величина скорости якоря $V_m=9,51$ м/с, величина импульса ЭДУ $F_z=6,59$ Н·с, КПД $\eta=14,1$ %, превышения температуры ОИ и ОЯ $\theta_1=\theta_2=0,73$ °С. При увеличении числа слоев шины ОИ в три раза ($K_{p1}=6$), j_m уменьшается в 1,6, f_m – в 1,39, V_m возрастает в 1,15 раз, F_z уменьшается в 1,03, η возрастает в 1,11, θ уменьшается в 1,9 раза. По сравнению с ЛИЭП-И в ЛИЭП-Э реализуются более высокие КПД, скоростные и силовые показатели. В ЛИЭП-И с увеличением количества слоев шины ОИ K_{p1} все показатели ухудшаются, а в ЛИЭП-Э такой зависимости нет, причем наиболее эффективным является преобразователь, у которого $K_{p1}=4$.

Рассмотрим влияние слоев шины ОИ и ОЯ на силовые показатели ЛИЭП. На рис. 2 показаны распределения амплитуды ЭДУ f_{zm} и импульса ЭДУ F_z в зависимости от количества слоев ОИ (K_{p1}) и ОЯ (K_{p2}).

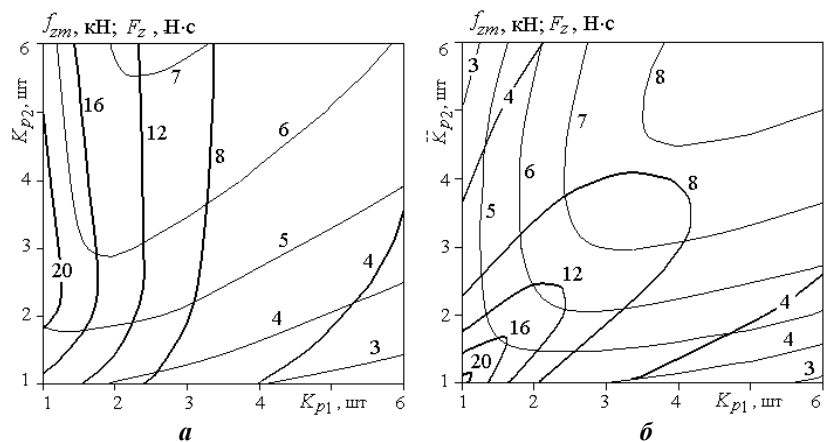


Рис. 2

туды f_{zm} (жирные линии) и импульса F_z (тонкие линии) ЭДУ в пространстве $K_{p1} \in (1, 6)$; $K_{p2} \in (1, 6)$. В ЛИЭП-И (рис. 2, а) наибольшее значение амплитуды ЭДУ $f_{zm}=21,5$ кН возникает при условии «тонкой» ОИ ($K_{p1}=1$) и «средней» ОЯ ($K_{p2}=3$), а наименьшее $f_{zm}=2,3$ кН – при условии «толстой» ОИ ($K_{p1}=6$) и «тонкой» ОЯ ($K_{p2}=1$). Максимальная величина импульса $F_z=7,1$ Н·с имеет место в «средней» ОИ ($K_{p1}=3$) и «толстой» ОЯ ($K_{p2}=6$), а наименьшая величина $F_z=2,3$ Н·с – в «толстой» ОИ ($K_{p1}=6$) и «тонкой» ОЯ ($K_{p2}=1$).

В ЛИЭП-Э (рис. 2, б) наибольшие значения амплитуды и импульса ЭДУ образуются при равенстве количества слоев шин ОИ и ОЯ. Величина наибольшей амплитуды ЭДУ практически такая же, как и у ЛИЭП-И $f_{zm}=20,5$ кН, однако она возникает при условии «тонких» ОИ и ОЯ. Наименьшее значение амплитуды ЭДУ $f_{zm}=1,73$ кН проявляется у «толстой» ОИ ($K_{p1}=6$) и «тонкой» ОЯ ($K_{p2}=1$). Максимальная величина импульса ЭДУ $F_z=8,15$ Н·с возникает в «толстых» ОИ и ОЯ, а наименьшая $F_z=2,78$ Н·с – в «толстой» ОИ и «тонкой» ОЯ.

Рассмотрим влияние слоев шины ОИ K_{p1} и ОЯ K_{p2} на величину КПД η ЛИЭП в пространстве $K_{p1} \in (1, 6)$; $K_{p2} \in (1, 6)$. В ЛИЭП-И (рис. 3, а) максимальный КПД $\eta=10,9$ % имеет место при $K_{p1}=2$ и $K_{p2}=3$. Наименьшая величина КПД $\eta=2,99$ % возникает при «толстой» ОИ и «тонкой» ОЯ. В ЛИЭП-Э максимальное значение КПД практически в два раза больше $\eta=20,0$ % и достигается при более «толстых» и одинаковых ОИ и ОЯ ($K_{p1}=K_{p2}=4$) (рис. 3, б). Наименьшая величина КПД $\eta=2,61$ % возникает при «тонкой» ОИ и «толстой» ОЯ.

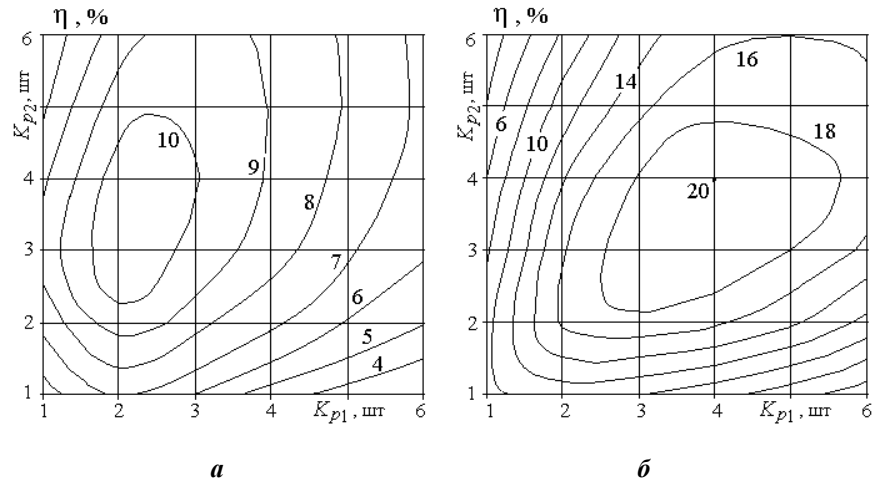


Рис. 3

Рассмотрим энергетические процессы в течение рабочего цикла в ЛИЭП-И и ЛИЭП-Э с наибольшими КПД, учитывая следующие составляющие: $W_c = 0,5 \cdot C_0 \cdot u_c^2(t)$ – энергия ЕНЭ;

$$W_{mag} = 0,5 \sum_{n=1}^2 L_n i_n^2(t) + M_{12}(z) \cdot i_1(t) \cdot i_2(t) \quad \text{– магнитная энергия; } W_{p1} = \int i_1^2(t) R_1(T_1) dt \quad \text{– потери в ОИ;}$$

$$W_{p2} = \int i_2^2(t) R_2(T_2) dt \quad \text{– потери в ОЯ; } W_{kin} = 0,5(m_2 + m_a)v^2(t) \quad \text{– кинетическая энергия;}$$

$$W_{pr} = 0,5 \cdot K_p \Delta z^2(t) \quad \text{– энергия сжатия возвратной пружины.}$$

В наиболее эффективном ЛИЭП-И энергия ЕНЭ W_c , которая в начале рабочего цикла была

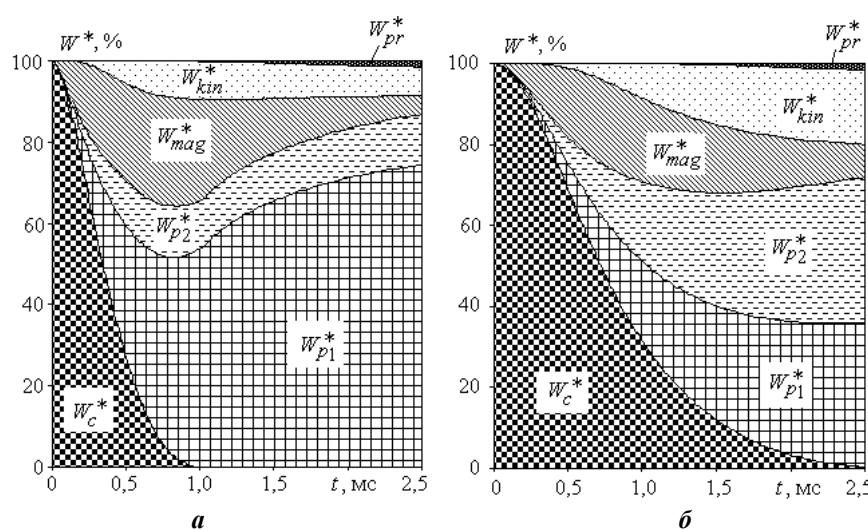


Рис. 4

$W_{c0} = 0,5C_0U_0^2$, уменьшается довольно быстро – через 1 мс (рис. 4, а). В начале рабочего цикла существенно возрастает энергия магнитного поля W_{mag} , которая к концу рассматриваемого интервала рабочего цикла заметно уменьшается. Наиболее возрастают потери в ОИ W_{p1} , составляя к концу рассматриваемого интервала 73 % от W_0 , в то время как потери в ОЯ W_{p2} составляют 11 % от W_0 . К концу рабочего цикла энергия магнитного поля в основном переходит в потери ОИ,

поскольку суммарная механическая энергия не увеличивается. Таким образом, в основном из-за потерь в ОИ только 10,9 % исходной энергии W_0 превращается в механическую энергию ($W_{kin}+W_{pr}$), что и обуславливает низкий КПД преобразователя индукционного типа.

В наиболее эффективном ЛИЭП-Э исходная энергия в ЕНЭ W_c уменьшается медленнее (рис. 4, б). Энергия магнитного поля W_{mag} в течение рабочего процесса возрастает до меньшей величины, однако из-за медленного уменьшения к концу рассматриваемого интервала рабочего цикла сохраняет большую величину. Потери в ОИ и ОЯ $W_{p1}=W_{p2}$ одинаковы, а по сравнению с ЛИЭП-И потери в ОИ уменьшаются, а в ОЯ возрастают. Однако общая величина этих потерь меньше и составляет около 70 % от W_0 . К концу рабочего цикла энергия магнитного поля переходит в потери ОИ и ОЯ и в механическую энергию, составляющую 20 % от исходной энергии W_0 . Из-за снижения потерь в активных элементах эффективность ЛИЭП-Э выше, чем в ЛИЭП-И.

Таким образом, силовые и скоростные показатели ЛИЭП-Э выше, чем у ЛИЭП-И при выполнении якорей в виде многовитковых обмоток. Однако необходимо учитывать, что конструктивно ЛИЭП-Э является более сложным из-за наличия гибких или скользящих контактов для питания обмотки якоря. В ЛИЭП-Э между обмотками существует электрическая и магнитная связь, а в ЛИЭП-И – только магнитная.

Выводы. 1. Разработана цепная математическая модель, учитывающая взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы в линейных импульсных электромеханических преобразователях индукционного и электродинамического типов.

2. Установлены геометрические соотношения обмоток индуктора и якоря (аксиальная высота, количество слоев и витков медной шины), при которых обеспечиваются максимальные силовые и скоростные показатели указанных преобразователей.

3. Силовые и скоростные показатели ЛИЭП-Э выше, чем у ЛИЭП-И при выполнении якорей в виде многовитковых обмоток, однако конструктивно ЛИЭП-Э является более сложным из-за наличия гибких или скользящих контактов для питания обмотки якоря.

4. В наиболее эффективном преобразователе индукционного типа возникают значительные потери в обмотке индуктора (73 % от исходной энергии W_0), а потери в обмотке якоря незначительны (11 % от W_0), что обуславливает относительно низкий КПД – 10,9 %. В наиболее эффективном преобразователе электродинамического типа потери в обмотке индуктора уменьшаются, а в обмотке якоря возрастают так, что суммарная величина этих потерь составляет около 70 % от W_0 , что обуславливает повышенный КПД – 20,0 %.

Работа выполнена по госбюджетной теме «Удосконалення технічних систем та пристроїв за рахунок імпульсних електромеханічних перетворювачів та електрофізичних технологій». Номер государственной регистрации: 0117U004881. (01.01.2017 - 31.12.2018).

1. 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.
2. 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.
3. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 5. С. 46-48.
4. 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.
5. 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.
6. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Техн. електродинаміка*. 2017. № 5. С. 83-88.
7. Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W., Shin D.K., Ro J.S., Chung T.K., Jung H.K. 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.
8. Puumala V., Kettunen L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 3. Pp. 1104-1109.
9. Suchkov G.M., Taranenko Y.K., Khomyak Y.V. A non-contact multifunctional ultrasonic transducer for measurements and non-destructive testing. *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59. No 9. Pp. 990-993.

10. Zhang M., Wang Y., Li P., Wen H. Comparative studies on two electromagnetic repulsion mechanisms for high-speed vacuum switch. *IET Electric Power Applications*. 2018. Vol. 12. No 2. Pp. 247-253.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИЛОВИХ ТА ШВИДКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТОВРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ТА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПІВ

В.Ф. Болюх, докт.техн.наук, **Ю.В. Кашанський**, **І.С. Щукін**, канд.техн.наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

Метою статті є визначення впливу геометричних параметрів обмоток індуктора і якоря на силові та швидкісні показники лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів (ЛЕП) індукційного і електродинамічного типів. Розроблено ланцюгову математичну модель ЛЕП, що описує взаємопов'язані електричні, магнітні, механічні та теплові процеси. Встановлено геометричні співвідношення обмоток індуктора і якоря (аксіальна висота, кількість шарів і витків мідної шини), за яких забезпечуються максимальні силові та швидкісні показники зазначених перетворювачів. Силові й швидкісні показники перетворювача електродинамічного типу вище, ніж у перетворювача індукційного типу, проте конструктивно він є більш складним. У найбільш ефективному перетворювачі індукційного типу виникають значні втрати в обмотці індуктора, а втрати в обмотці якоря незначні, що зумовлює відносно низький ККД – 10,9%. У найбільш ефективному перетворювачі електродинамічного типу втрати в обмотці індуктора зменшуються, а в обмотці якоря зростають, що обумовлює підвищений ККД – 20,0%. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, перетворювач індукційного типу, перетворювач електродинамічного типу, порівняльний аналіз.

COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER AND SPEED INDICATORS LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL CONVERTERS ELECTRODYNAMIC AND INDUCTION TYPES

V.F. Bolyukh, Yu.V. Kashanskyi, I.S. Shchukin

National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,

str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

The purpose of the article is to determine the influence of the geometrical parameters of the windings of the inductor and armature on the power and speed characteristics of linear pulsed electromechanical converters (LPEC) of induction and electrodynamic types. A chain mathematical model of LPEC, describing interconnected electrical, magnetic, mechanical and thermal processes, has been developed. The geometrical ratios of the windings of the inductor and the armature (axial height, the number of layers and turns of the copper bus) are established, at which the maximum power and speed characteristics of the specified converters are provided. The power and speed characteristics of an electrodynamic type converter are higher than those of an induction type converter, but structurally it is more complex. In the most efficient induction type converter, significant losses occur in the inductor winding, and the losses in the armature winding are insignificant, which causes a relatively low efficiency of 10.9%. In the most efficient electrodynamic type converter, the losses in the inductor winding are reduced, and in the armature winding they increase, which causes an increased efficiency of 20.0%. References 10, figures 4.

Key words: linear pulse electromechanical converter, converter of induction type, converter of electrodynamic type, comparative analysis.

1. 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.
2. 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.
3. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulse electromechanical converters of electromagnetic and induction types. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 46-48. (Rus)
4. 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.
5. Ivashin V.V., Penchev V.P. Features of the dynamics of work and energy diagrams of a pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of the excitation windings. *Electrical Engineering*. 2013. No 6. Pp. 42-46. (Rus)
6. Kondratenko I.P., Zhiltsov A.V., Pashchin M.O., Vasyuk V.V. The choice of parameters of an electromechanical converter of an induction type for electrodynamic treatment of welded joints. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 83-88. (Ukr)
7. Lim D.K., Woo D.K., Kim I.W., Shin D.K., Ro J.S., Chung T.K., Jung H.K. 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.
8. Puumala V., Kettunen L. Electromagnetic design of ultrafast electromechanical switches. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30. No 3. Pp. 1104-1109.
9. Suchkov G.M., Taranenko Y.K., Khomyak Y.V. A non-contact multifunctional ultrasonic transducer for measurements and non-destructive testing. *Measurement Techniques*. 2016. Vol. 59. No 9. Pp. 990-993.
10. Zhang M., Wang Y., Li P., Wen H. Comparative studies on two electromagnetic repulsion mechanisms for high-speed vacuum switch. *IET Electric Power Applications*. 2018. Vol. 12. No 2. Pp. 247-253.

Надійшла 04.06.2019
Остаточний варіант 02.07.2019