

В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, И.С. Щукин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНО-ИНДУКЦИОННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ПИТАНИЯ ИНДУКТОРА

*На основі розробленої ланцюгової математичної моделі отримані рекурентні співвідношення для розрахунку взаємопов'язаних електромагнітних, механічних та теплових параметрів лінійного імпульсно-індукційного електромеханічного перетворювача (ЛПЕП). Показано, що електромеханічні показники ЛПЕП зі схемою живлення індуктора, яка формує аперіодичний струмовий імпульс збудження, краще, ніж у ЛПЕП зі збудженням індуктора однополярним струмовим імпульсом, але гірше, ніж у ЛПЕП зі збудженням індуктора коливально-загасаючим струмовим імпульсом. В цьому перетворювачі у процесі роботи найбільш сильно нагрівається індуктор та найменше нагрівається якорь. Показано, що у ЛПЕП зі схемою живлення індуктора, яка формує аперіодичний струмовий імпульс збудження із підключенням додаткового ємнісного накопичувача, всі електромеханічні показники вище у порівнянні з ЛПЕП зі схемою живлення індуктора, яка формує коливально-загасаючий струмовий імпульс збудження. Однак в цьому ЛПЕП збільшуються перевищення температур активних елементів, особливо сильно індуктора та відбувається зниження ККД. Бібл. 12, рис. 7.*

*Ключові слова:* лінійний імпульсно-індукційний електромеханічний перетворювач, ланцюгова математична модель, рекурентні співвідношення, схеми живлення індуктора, ємнісний накопичувач енергії, струмовий імпульс збудження індуктора.

*На основе разработанной цепной математической модели получены рекуррентные соотношения для расчета взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых параметров линейного импульсно-индукционного электро-механического преобразователя (ЛИИЭП). Показано, что электро-механические показатели ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей аперіодический токовый импульс возбуждения, лучше, чем у ЛИИЭП с возбуждением индуктора однополярным токовым импульсом, но хуже, чем у ЛИИЭП с возбуждением индуктора колебательно-затухающим токовым импульсом. В данном преобразователе в процессе работы наиболее сильно нагревается индуктор и наименее нагревается якорь. Показано, что в ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей аперіодический токовый импульс возбуждения с подключением добавочного емкостного накопителя энергии, все электро-механические показатели выше по сравнению с ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей колебательно-затухающий токовый импульс возбуждения. Однако в этом ЛИИЭП возрастают превышения температур активных элементов, особенно сильно – индуктора и снижается ККД. Библ. 12, рис. 7.*

*Ключевые слова:* линейный импульсно-индукционный электро-механический преобразователь, цепная математическая модель, рекуррентные соотношения, схемы питания индуктора, емкостной накопитель энергии, токовый импульс возбуждения индуктора.

**Введение.** Линейные электродвигатели традиционного типа (синхронные, асинхронные и постоянного тока) не позволяют обеспечить значительные ускорения и ударные нагрузки при ограниченных удельных показателях. Это привело к появлению специальных линейных импульсных электро-механических преобразователей, которые обеспечивают высокую скорость исполнительного элемента (ИЭ) на коротком активном участке, и/или создают мощные силовые импульсы при незначительном его перемещении [1-4]. Такие преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве электро-механических ускорителей и ударно-силовых устройств [5-7]. Они характеризуются [8]:

- пульсирующим, возвратно-поступательным, циклическим или одноразовым режимом работы;
- прерывистым характером преобразования энергии за счет наличия обратного хода, а часто и длительной паузы в течение рабочего цикла;
- большой длительностью накопления энергии от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) по отношению к длительности рабочего периода;
- интенсивными электро-магнитными нагрузками, значительно превышающими аналогичные показатели традиционных линейных электродвигателей.

Наиболее широко применяются линейные импульсно-индукционные электро-механические преоб-

разователи (ЛИИЭП) коаксиальной конфигурации, в которых ускоряемый якорь бесконтактно взаимодействует с неподвижным индуктором [1, 2, 9]. При возбуждении индуктора от ЕНЭ в электропроводящем якоре индуцируются вихревые токи. Вследствие этого на якорь действуют электро-динамические усилия (ЭДУ), вызывающие его аксиальное перемещение (рис. 1,а).

Однако при работе в динамическом режиме с быстрым изменением электро-магнитных, механических и тепловых параметров эффективность ЛИИЭП недостаточно высока, что требует новых подходов по улучшению его электро-механических показателей. Одним из путей повышения указанных показателей является формирование необходимых токовых импульсов индуктора за счет схем питания, которые располагаются между ЕНЭ и индуктором. Однако до настоящего времени не проведено целенаправленных исследований по определению влияния различных схем питания индуктора на электро-механические показатели ЛИИЭП.

**Целью** статьи является исследование влияния различных схем питания индуктора, формирующих его токовые импульсы, на электро-механические показатели ЛИИЭП.

**Математическая модель.** Рассмотрим математическую цепную модель ЛИИЭП, в которой используются сосредоточенные параметры индуктора и якоря (рис. 1, б).

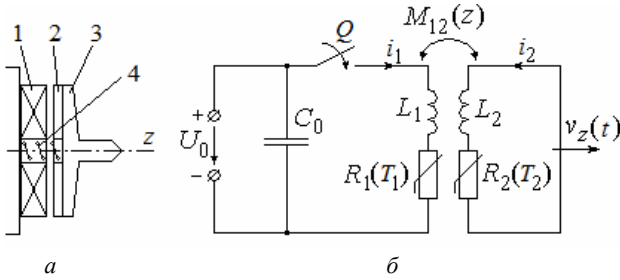


Рис. 1. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы ЛИИЭП со свободным разрядом ЕНЭ на индуктор: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ИЭ; 4 – возвратная пружина

В представленной на рис. 1, б электрической схеме после замыкания ключа  $Q$  происходит свободный разряд ЕНЭ на индуктор. Электрические процессы в ЛИИЭП можно описать системой уравнений [9]:

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

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

где  $n = 1, 2$  – индексы индуктора и якоря соответственно;  $R_n, L_n, T_n, i_n$  – активное сопротивление, индуктивность, температура и ток  $n$ -го элемента соответственно;  $C_0$  – емкость ЕНЭ, заряженного до напряжения  $U_0$ ;  $M_{12}(z)$  – взаимная индуктивность между индуктором и якорем, перемещаемым вдоль оси  $z$  со скоростью  $v_z$ .

Обозначим

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

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 каноническом 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

$$y^3 + p_* y + q_* = 0, \quad (5)$$

где  $p_* = s_* - r_*^2/3$ ;  $q_* = 2(r_*/3)^3 - r_* s_*/3 + t_*$ .

Корни уравнения (5) находятся с использованием формулы Кардано:

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

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:

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

где  $p = 1, 2, 3$ .

Решение системы уравнений (1) – (2) находится в виде:

$$i_1(t) = A_{11} \exp(x_1 t) + A_{12} \exp(x_2 t) + A_{13} \exp(x_3 t) - v_z \frac{i_2}{R_1} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad (8)$$

$$i_2(t) = A_{21} \exp(x_1 t) + A_{22} \exp(x_2 t) + A_{23} \exp(x_3 t) - v_z \frac{i_1}{R_2} \frac{dM_{12}}{dz}, \quad (9)$$

где  $A_{11}, \dots, A_{23}$  – постоянные, определяемые в момент времени  $t_k$ .

После нахождения постоянных  $A_{11}, \dots, A_{23}$ , выражения для токов индуктора и якоря представляются в рекуррентном виде:

$$i_n(t_{k+1}) = \delta^{-1} \left\{ \left[ i_n(t_k) - \frac{i_m(t_k) v_z^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times (\alpha_1 \beta_2 \beta_3 + \alpha_2 \beta_1 \beta_3 + \alpha_3 \beta_1 \beta_2) + \left( \Omega_n - \frac{v_z \Omega_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) [\alpha_1 (\beta_2 + \beta_3) + \\ \left. + \alpha_2 (\beta_1 + \beta_3) + \alpha_3 (\beta_1 + \beta_2)] + \left( \Lambda_n - \frac{v_z \Lambda_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \right\} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{v_z^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (10)$$

где  $n = 1, 2$  при  $m = 2, 1$ ;

$$\delta = \beta_1 \beta_2 (\beta_2 - \beta_1) + \beta_1 \beta_3 (\beta_1 - \beta_3) + \beta_2 \beta_3 (\beta_3 - \beta_2);$$

$$\alpha_1 = (\beta_3 - \beta_2) \exp(\beta_1 \Delta t); \alpha_2 = (\beta_1 - \beta_3) \exp(\beta_2 \Delta t);$$

$$\alpha_3 = (\beta_2 - \beta_1) \exp(\beta_3 \Delta t);$$

$$\beta_p = \left\{ 2(a_2^2 - 3a_1 a_3)^{0,5} \cos[2\pi(p-1)/3 + \zeta] - a_2 \right\} / 3a_3;$$

$$p = 1, 2, 3;$$

$$\zeta = \arccos \left[ (a_2^2 - 3a_1 a_3)^{-1,5} (4,5a_1 a_2 a_3 - a_2^3 - 13,5a_0 a_3^2) \right];$$

$$\Omega_n = B_n + \frac{B_m v_z}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}; \Lambda_n = E_n + \frac{E_m v_z}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz};$$

$$\gamma_1 = L_2; \gamma_2 = -M_{12};$$

$$B_n = v^{-1} \left[ i_n(t_k) \left( M_{12} v_z \frac{dM_{12}}{dz} - R_n L_m \right) + i_m(t_k) \times \right.$$

$$\left. \times \left( R_m M - L_m v_z \frac{dM_{12}}{dz} \right) - \gamma_k u_c(t_k) \right];$$

$$E_1 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[ R_1 \left( R_2 M_{12}^2 + R_1 L_2^2 - C^{-1} L_2 v \right) - v_z M_{12} \frac{dM_{12}}{dz} (\chi + 2R_1 L_2) + \right. \right. \\ \left. \left. + v_z^2 (L_1 L_2 + M_{12}^2) \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[ v_z (L_2 \chi + 2R_2 M_{12}^2) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12} R_2 \chi - \right. \right. \\ \left. \left. - v^2 M_{12} L_2 \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left( R_2 M_{12}^2 + L_2^2 R_1 - 2L_2 v M_{12} \frac{dM_{12}}{dz} \right) \right\}; \\ E_2 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[ M_{12} (C^{-1} v - R_1 \chi) + v_z (2R_1 M_{12}^2 + L_1 \chi) \frac{dM_{12}}{dz} - 2v_z^2 L_1 M_{12} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[ R_2 (R_1 M_{12}^2 + R_2 L_1^2) - M_{12} v_z (2L_1 R_2 + \chi) \frac{dM_{12}}{dz} + (L_1 L_2 + \right. \right. \\ \left. \left. + M_{12}^2) v_z^2 \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left[ v_z (L_1 L_2 + M_{12}^2) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12} \chi \right] \right\},$$

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

Если дискриминант  $D < 0$  характеристического уравнения (5), то один его корень действительный  $x_1 = d$ , а два других – комплексно сопряженные  $x_{2,3} = f \pm jg$ . Решение системы уравнений (1) – (2) находится в виде:

$$i_1(t) = B_{11} \exp(dt) + \exp(ft) [B_{12} \cos(gt) + B_{13} \sin(gt)] - \\ - v_z \frac{i_2}{R_1} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad (11)$$

$$i_2(t) = B_{21} \exp(dt) + \exp(ft) [B_{22} \cos(gt) + B_{23} \sin(gt)] - \\ - v_z \frac{i_1}{R_2} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad (12)$$

где  $B_{11}, \dots, B_{23}$  – постоянные, определяемые в момент времени  $t_k$ .

В окончательном виде токи индуктора и якоря можно представить в виде рекуррентных соотношений:

$$i_n(t_{k+1}) = \left( \xi_n - \frac{\xi_m v_z}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) / \left[ 1 - \frac{v_z^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где

$$\xi_n = g^{-1} \left[ g^2 + (f - d)^2 \right]^{-1} \left\{ g \cdot \exp(d\Delta t) \left[ (g^2 + f^2) \Theta_n - 2fg\Omega_n + \Lambda_n \right] + \right. \\ \left. + \exp(f\Delta t) \left[ \sin(g\Delta t) d (f^2 - g^2 - fd) \Theta_n + (g^2 + d^2 - f^2) \Omega_n + \right. \right. \\ \left. \left. + (f - d) \Lambda_n \right] + g \cdot \cos(g\Delta t) \left[ d(d - 2f) \Theta_n + 2fg\Omega_n - \Lambda_n \right] \right\};$$

$$\Theta_n = i_n(t_k) + \frac{v_z i_m(t_k)}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz}.$$

**Механические процессы** ЛИИЭП можно описать уравнением:

$$i_1(t) i_2(t) \frac{dM}{dz} = (m_a + m_2) \frac{dv_z}{dt} + K_P \Delta z(t) + K_T v_z(t) + \\ + 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v_z^2(t), \quad (14)$$

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;  $\gamma_a$  – плотность среды перемещения;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  – наружный диаметр ИЭ.

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

$$F_z = \int f_z(z, t) dt, \quad (15)$$

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

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

$$\Delta z(t_{k+1}) = \Delta z(t_k) + v_z(t_k) \Delta t + \mathcal{G} \cdot \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (16)$$

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

$$\mathcal{G} = i_1(t_k) i_2(t_k) \frac{dM}{dz}(z) - K_P \Delta z(t_k) - K_T v_z(t_k) - \\ - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v_z^2(t_k).$$

**Тепловые процессы.** При отсутствии перемещения якоря, что происходит либо до начала прямого хода, либо после обратного хода, между активными элементами существует тепловой контакт через изоляционную прокладку. Температуры  $n$ -ых активных элементов ЛИИЭП при этом можно описать рекуррентным соотношением [10]:

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

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

$\lambda_a(T)$  – коэффициент теплопроводности изоляционной прокладки;  $d_a$  – толщина прокладки;  $D_{en}, D_{in}$  – внешний и внутренний диаметры активных элементов соответственно;  $\alpha_{Tn}$  – 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:

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

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

Начальные условия системы уравнений (1) – (18):  $T_n(0) = T_0$  – температура  $n$ -ого активного элемента;  $i_n(0) = 0$  – ток  $n$ -ого активного элемента;  $\Delta z(0) = \Delta z_0$  – исходное осевое расстояние между якорем и обмоткой индуктора;  $u_c(0) = U_0$  – напряжение ЕНЭ;  $v_z(0) = 0$  – скорость якоря вдоль оси  $z$ .

КПД ЛИИЭП будем оценивать соотношением:

$$\eta = 100 \frac{(m_2 + m_e) v_z^2 + K_P \Delta z^2}{C_0 U_0^2} \%. \quad (19)$$

**Основные параметры ЛИИЭП.** Рассмотрим ЛИИЭП коаксиальной конфигурации, у которого якорь выполнен в форме плоского диска, одна из сторон которого обращена к индуктору, а вторая взаимодействует с ИЭ. Основные параметры ЛИИЭП:

**Индуктор:** внешний диаметр  $D_{ex1} = 100$  мм, внутренний диаметр  $D_{in1} = 10$  мм, высота  $H_1 = 10$  мм, сечение медной шины  $a \times b = 1,8 \times 4,8$  мм<sup>2</sup>, количество витков шины  $N = 46$  шт. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами.

**Якорь:** внешний диаметр  $D_{\text{ex2}}=100$  мм, внутренний диаметр  $D_{\text{in2}} = 6$  мм, высота  $H_2 = 2,5$  мм. Якорь выполнен из технической меди.

**ЕНЭ:** емкость  $C_0 = 1$  мФ, напряжение  $U_0 = 1$  кВ.

Начальное расстояние между индуктором и якорем  $\Delta z_0 = 1$  мм. Коэффициент упругости возвратной пружины  $K_p = 25$  кН/м. Масса ИЭ  $m_e = 0,25$  кг;

Полагаем, что в схемах питания индуктора ЛИИЭП сопротивления диодов и тиристора в прямом направлении пренебрежимо мало, а в обратном направлении их проводимость столь же мала.

**Схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая однополярный токовый импульс возбуждения.** Наиболее простой является схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая однополярный токовый импульс возбуждения, в которой используется лишь пусковой тиристор  $VS$  (рис. 2).

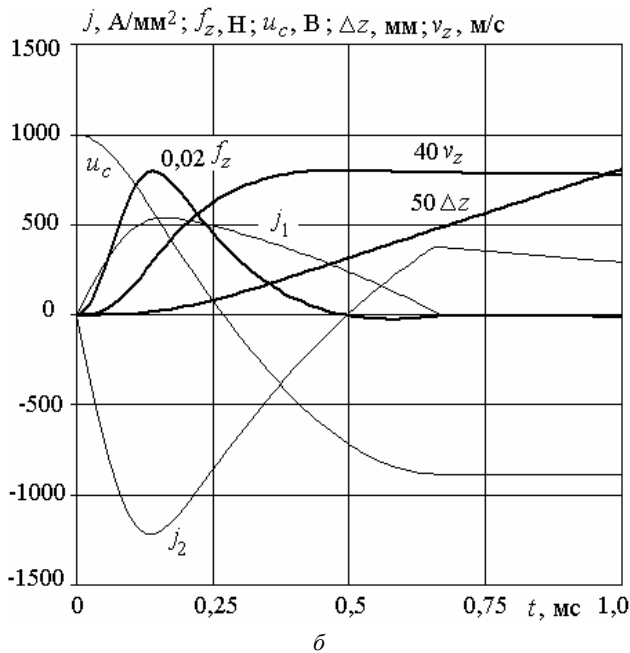
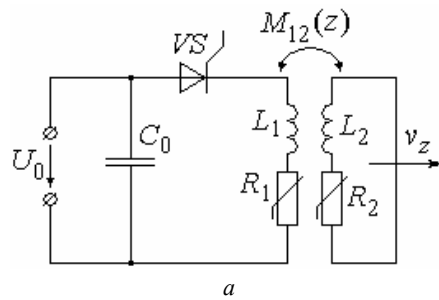


Рис. 2. Электрическая схема ЛИИЭП, формирующая однополярный токовый импульс индуктора, (а) и электромеханические характеристики этого ЛИИЭП (б)

Импульс тока в индукторе имеет относительно небольшую длительность переднего фронта и более продолжительную длительность заднего фронта. Такая форма токового импульса индуктора обусловлена индукционным воздействием тока якоря, смещающим максимум к началу процесса возбуждения. Заметим, что при отсутствии якоря импульс тока индуктора близок в полусинусоиде. Максимальные значения тока якоря и индуктора из-за магнитной связи возникают практически в один и тот же момент времени.

Индукционный ток в якорь через 0,5 мс меняет полярность, что обуславливает возникновение незначительных тормозных ЭДУ, которые действуют до окончания протекания токового импульса в индукторе. Максимальные значения плотности тока составляют: в индукторе  $j_{1m} = 538,7$  А/мм<sup>2</sup>, в якорь –  $j_{2m} = 1218,5$  А/мм<sup>2</sup>. В момент максимума плотностей токов возникает и максимум ЭДУ, достигающий величины  $f_{zm} = 39,8$  кН. Рассматриваемый ЛИИЭП создает импульс силы  $F_z = 7,6$  Нс, под действием которого якорь вместе с ИЭ достигает скорости  $v_z = 17,9$  м/с. К концу рабочего цикла превышение температуры индуктора составляет  $\theta_1 = 0,5$  °С, а превышение температуры якоря –  $\theta_2 = 2$  °С. КПД данного ЛИИЭП составляет  $\eta = 16,66\%$ .

**Схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая колебательно-затухающий токовый импульс возбуждения.** Схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая колебательно-затухающий токовый импульс возбуждения, реализуется при шунтировании пускового тиристора  $VS$  обратным диодом  $VD_1$  (рис. 3).

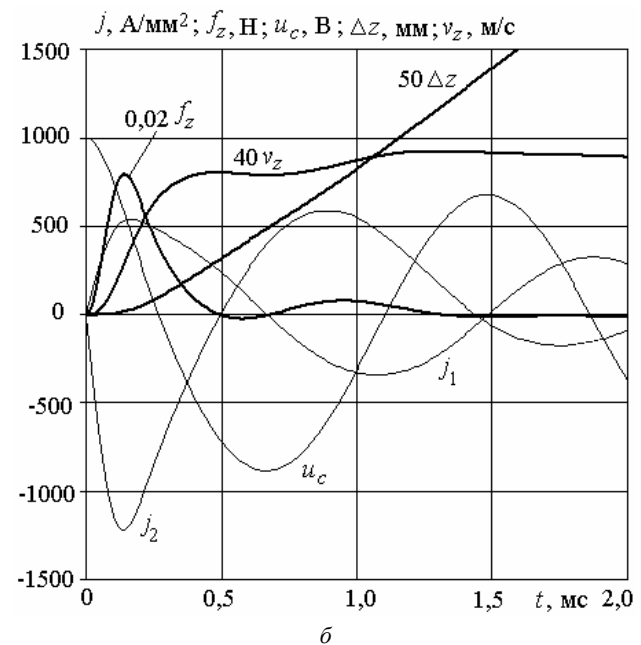
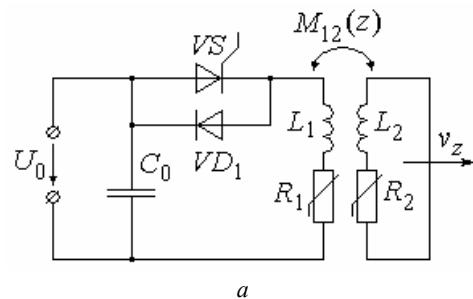


Рис. 3. Электрическая схема ЛИИЭП, формирующая колебательно-затухающий токовый импульс индуктора, (а) и электромеханические характеристики этого ЛИИЭП (б)

Возбуждение индуктора ЛИИЭП колебательно-затухающим токовым импульсом приводит к существенному изменению его электромеханических характеристик. Из-за несинхронного изменения полярностей токов индуктора и якоря между ними возникают

как ЭДУ отталкивания, перемещающие якорь с ИЭ вдоль оси  $z$ , так и ЭДУ притяжения, тормозящие якорь. Можно отметить наличие основных (до 0,5 мс) и дополнительных (в интервале 0,7-1,3 мс) ЭДУ отталкивания. Дополнительные ЭДУ отталкивания значительно меньше основных усилий, прежде всего из-за ослабленной магнитной связи между индуктором и удаленным от него якорем.

В схеме питания индуктора ЛИИЭП, формирующей колебательно-затухающий токовый импульс возбуждения, на якорь действует увеличенный импульс ЭДУ  $F_z = 9,46$  Нс, вследствие чего он вместе с ИЭ достигает скорости  $v_z = 22,3$  м/с. К концу рабочего цикла превышение температуры индуктора составляет  $\theta_1 = 1$  °С, а превышение температуры якоря –  $\theta_2 = 2,4$  °С. КПД этого ЛИИЭП повышается до величины  $\eta = 24,88$  %.

Однако в схемах питания индуктора, формирующих однополярный и колебательно-затухающий токовые импульсы возбуждения, напряжение ЕНЭ  $u_c$  меняет полярность, что требует использования специальных неполярных конденсаторов.

**Схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая апериодический токовый импульс возбуждения.** Схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая апериодический токовый импульс возбуждения, реализуется при шунтировании индуктора обратным диодом  $VD_0$ . Данная схема позволяет использовать электролитические конденсаторы с повышенными удельными энергетическими показателями (рис. 4).

До момента, когда напряжение на ЕНЭ становится равным нулю, токи в индукторе и якоре описываются соотношениями (10) и (13). В последующем токи описываются системой уравнений [11]:

$$R_n(T_n)i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{nm}(z) \frac{di_m}{dt} + i_m(t)v_z(t) \frac{dM_{nm}}{dz} = 0, \quad (20)$$

где  $m = 1, 2$  при  $n = 2, 1$ .

После ряда преобразований эта система приводится к уравнению:

$$\left(1 - K_{12}^2\right) \frac{d^2 i_1}{dt^2} + (\gamma_1 + \gamma_2 - 2\xi_1 \chi_2) \frac{di_1}{dt} + (\gamma_1 \gamma_2 - \chi_1 \chi_2) i_1 = 0, \quad (21)$$

где

$$\gamma_n = \frac{R_n}{L_n}; \quad \xi_n = \frac{M_{nm}(z)}{L_n}; \quad \chi_n = \frac{v_z(t)}{L_n} \frac{dM_{nm}}{dz}; \quad K_{12} = \frac{M_{nm}(z)}{(L_n L_m)^{0,5}}.$$

Характеристическое уравнение дифференциального уравнения (21) имеет два действительных корня

$$x_{1,2} = \frac{1}{1 - K_{12}^2} \left\{ \xi_1 \chi_2 - 0,5 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \pm \left[ 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) - \xi_1 \chi_2 \right]^2 + (K_{12}^2 - 1)(\gamma_1 \gamma_2 - \chi_1 \chi_2) \right\}^{0,5}. \quad (22)$$

Выражения для токов в окончательном виде описываются рекуррентными соотношениями:

$$i_n(t_{k+1}) = \frac{1}{x_1 - x_2} \left\{ i_n(t_k) \left[ x_1 \exp(x_2 \Delta t) - x_2 \exp(x_1 \Delta t) \right] + \frac{\exp(x_1 \Delta t) - \exp(x_2 \Delta t)}{1 - K_{12}^2} \left[ i_n(t_k) (\xi_n \chi_m - \gamma_n) + i_m(t_k) (\gamma_m \xi_n - \chi_n) \right] \right\}. \quad (23)$$

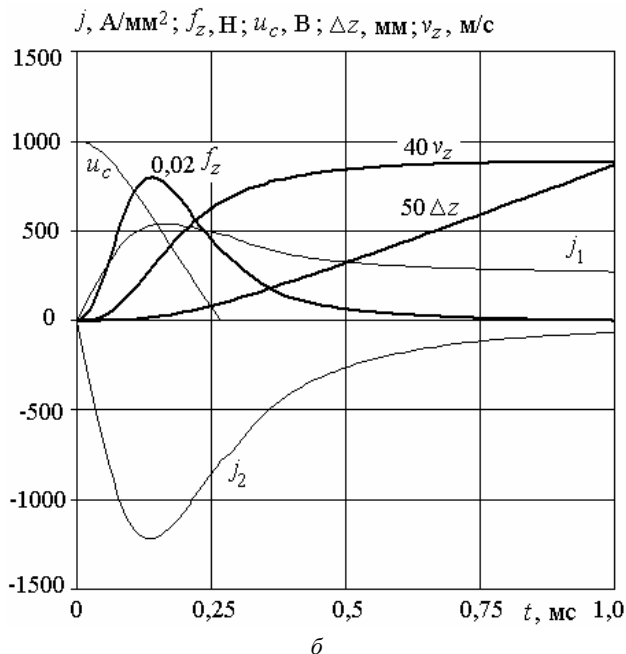
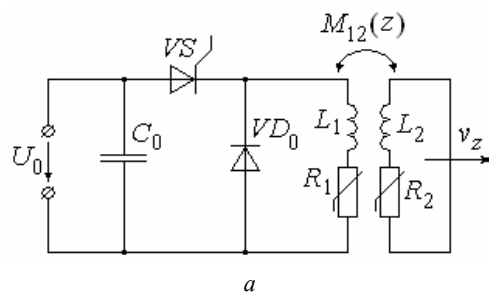


Рис. 4. Электрическая схема ЛИИЭП, формирующая апериодический токовый импульс индуктора, (а) и электро-механические характеристики этого ЛИИЭП (б)

При апериодическом токовом импульсе индуктора ЛИИЭП сохраняются как полярность напряжения ЕНЭ  $u_c$ , так и полярности токов индуктора и якоря (рис. 4). После достижения напряжения ЕНЭ  $u_c = 0$  ток в индукторе начинает протекать через обратный диод  $VD_0$ . Из-за сохранения полярности токов на якорь действуют только ЭДУ отталкивания, величина импульса которых составляет  $F_z = 8,85$  Нс. Якорь вместе с ИЭ достигает скорости  $v_z = 20,8$  м/с. К концу рабочего цикла превышение температуры индуктора  $\theta_1$  составляет 1,1 °С, а превышение температуры якоря  $\theta_2 = 1,7$  °С. КПД ЛИИЭП  $\eta$  составляет 22,23 %.

Электро-механические показатели ЛИИЭП с апериодическим токовым импульсом индуктора лучше, чем у ЛИИЭП с возбуждением индуктора однополярным токовым импульсом, но хуже, чем у ЛИИЭП с возбуждением индуктора колебательно-затухающим токовым импульсом. В преобразователе с апериодическим токовым импульсом индуктора наблюдается повышенный нагрев индуктора и пониженный нагрев якоря.

**Схема питания индуктора ЛИИЭП, формирующая апериодический токовый импульс возбуждения с подключением добавочного ЕНЭ.** Сохранение полярности напряжения  $u_c$  в схеме питания индуктора ЛИИЭП, формирующей апериодический токовый импульс возбуждения, открывает перспективы по усовершенствованию данной схемы, например,

за счет подключения добавочного ЕНЭ-1 в процессе разряда исходного ЕНЭ-0 с параметрами  $C_0$  и  $U_0$  [12]. Добавочный ЕНЭ-1 емкостью  $C_1$  предварительно заряжается до напряжения  $U_1$ , которое меньше напряжения  $U_0$  исходного ЕНЭ-0 (рис. 5). В процессе разряда ЕНЭ-0, когда напряжение  $u_c < U_1$ , через диод  $VD_1$  подключается ЕНЭ-1, увеличивая разрядную емкость до величины  $C_0 + C_1$ .

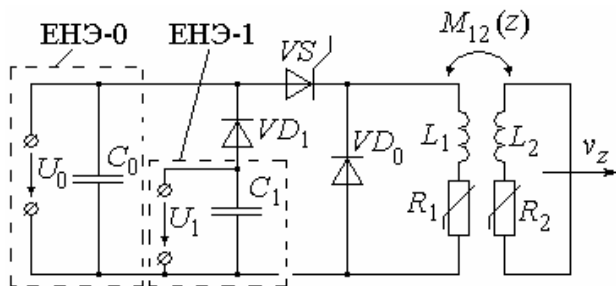


Рис. 5. Электрическая схема ЛИИЭП, формирующая апериодический токовый импульс индуктора с подключением добавочного ЕНЭ-1

Поскольку данная схема практически не исследована, рассмотрим влияние параметров добавочного ЕНЭ-1 на электромеханические показатели ЛИИЭП. Вначале рассмотрим влияние величины напряжения  $U_1$  добавочного ЕНЭ-1 на показатели ЛИИЭП, поскольку его величина определяет момент подключения к исходному ЕНЭ-0. Рассмотрим три варианта подключения добавочного ЕНЭ-1: до ( $U_1 = 0,7U_0$ ), в момент ( $U_1 = 0,6U_0$ ) и после ( $U_1 = 0,5U_0$ ) достижения максимума ЭДУ, действующих на якорь. Будем использовать добавочный ЕНЭ-1, у которого  $C_1 = C_0$ .

КПД ЛИИЭП с данной схемой питания индуктора будем оценивать соотношением

$$\eta = 100 \frac{(m_2 + m_e)v^2 + K_P \Delta z^2}{C_0 U_0^2 + C_1 U_1^2} \% \quad (24)$$

В момент подключения добавочного ЕНЭ-1 до достижения максимума ЭДУ ( $U_1 = 0,7U_0$ ) на переднем фронте токовых импульсов индуктора и якоря наблюдаются возмущения (рис. 6,а). При этом возникает соответствующее возмущение и на переднем фронте кривой ЭДУ. После подключения добавочного ЕНЭ-1 напряжение  $u_c$  начинает снижаться более медленно. По сравнению с вариантом использования только исходного ЕНЭ-0 максимальные значения плотностей тока повысились: в индукторе – до  $603,6 \text{ А/мм}^2$ , в якорь – до  $1324,6 \text{ А/мм}^2$ . Это привело к увеличению максимума ЭДУ до  $47,2 \text{ кН}$ , импульса ЭДУ – до  $11,5 \text{ Нс}$ , а скорости якоря с ИЭ – до  $27,1 \text{ м/с}$ . Однако за счет энергии добавочного ЕНЭ-1 КПД ЛИИЭП снижается до  $18,8 \%$ . Кроме того, при работе ЛИИЭП с данной схемой питания индуктора наблюдаются более высокие превышения температур ( $\theta_n = T_n - T_0$ ) индуктора  $\theta_1 = 2,1^\circ\text{C}$  и якоря  $\theta_2 = 2,2^\circ\text{C}$ , по сравнению с рассмотренными ранее схемами.

При подключении добавочного ЕНЭ-1 в момент возникновения максимума ЭДУ ( $U_1 = 0,6U_0$ ) наблюдается локальный рост величин токовых импульсов индуктора и якоря (рис. 6,б).

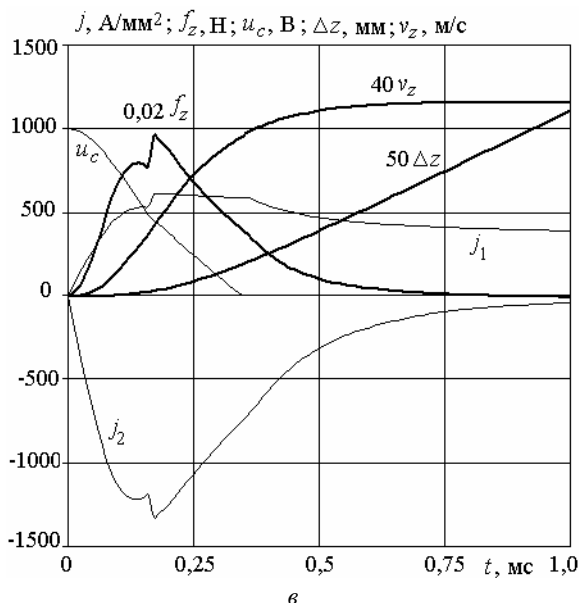
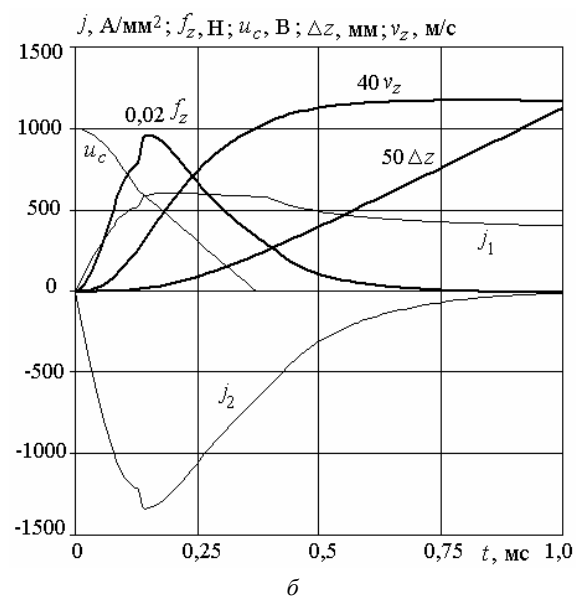
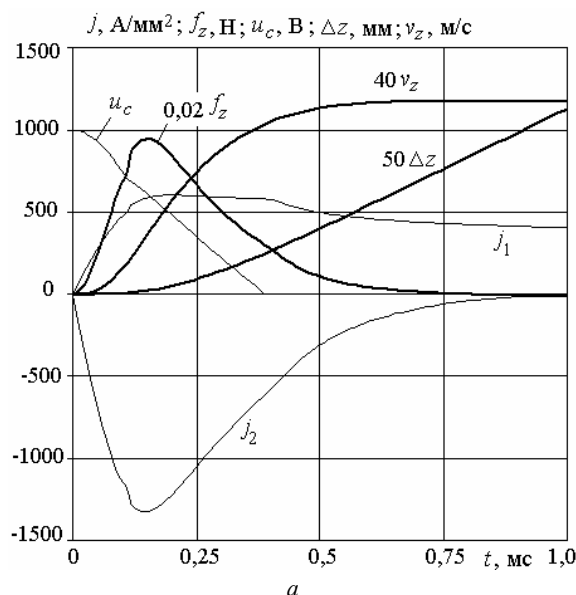


Рис. 6. Электромеханические характеристики ЛИИЭП при подключении добавочного ЕНЭ-1, заряженного до напряжения  $U_1$ :  $0,7U_0$  (а);  $0,6U_0$  (б);  $0,5U_0$  (в)

В этот момент происходит и соответствующее увеличение ЭДУ. Несмотря на определенное изменение электромеханических характеристик, в целом показатели ЛИИЭП практически остались неизменными по сравнению с предыдущим вариантом ( $U_1 = 0,7U_0$ ). При подключении ЕНЭ-1 после момента возникновения максимума ЭДУ ( $U_1 = 0,5U_0$ ) наблюдается локальный рост величин токовых импульсов индуктора и якоря на их заднем фронте (рис. 6,б).

После подключения ЕНЭ-1 ток в индукторе начинает медленнее спадать до момента  $u_c = 0$ .

Таким образом, добавочные ЕНЭ-1 и с малым и с высоким значениями напряжений  $U_1$ , которые подключаются, соответственно на заднем и переднем фронтах ЭДУ, позволяют повысить электромеханические показатели ЛИИЭП. Так, при подключении ЕНЭ-1 с малым напряжением ( $U_1 = 0,15U_0$ ) скорость якоря возрастает на 27 %, величина импульса ЭДУ возрастает на 27 %, а КПД снижается на 25 %. При подключении ЕНЭ-1 с высоким напряжением ( $U_1 = 0,75U_0$ ) скорость якоря возрастает на 29,7 %, величина импульса ЭДУ возрастает на 29,6 %, а КПД снижается на 18,7 %.

При данной схеме питания все электромеханические показатели ЛИИЭП выше по сравнению с ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей колебательно-затухающий токовый импульс возбуждения. Так, при использовании ЕНЭ-1 с напряжением  $U_1 = 0,6U_0$  максимальная величина ЭДУ  $f_{zm}$  повышается на 20 %, а величина импульса ЭДУ  $F_z$  и скорость якоря  $v_z$  – на 21,6 %. При этом возрастает превышение температуры индуктора  $\theta_1$  в 2,12 раз, а превышение температуры якоря  $\theta_2$  уменьшается на 11,3 %. КПД ЛИИЭП  $\eta$  снижается на 32,2 %.

Заметим, что электромеханические показатели ЛИИЭП, использующего добавочный ЕНЭ-1 с напряжением  $U_1 = 0,6U_0$ , выше, чем в ЛИИЭП со схемой питания, формирующей аperiodический токовый импульс возбуждения индуктора с исходной емкостью  $C_0 = 2$  мФ.

Показатели ЛИИЭП зависят также от емкости  $C_1$  добавочного ЕНЭ-1 (рис. 7).

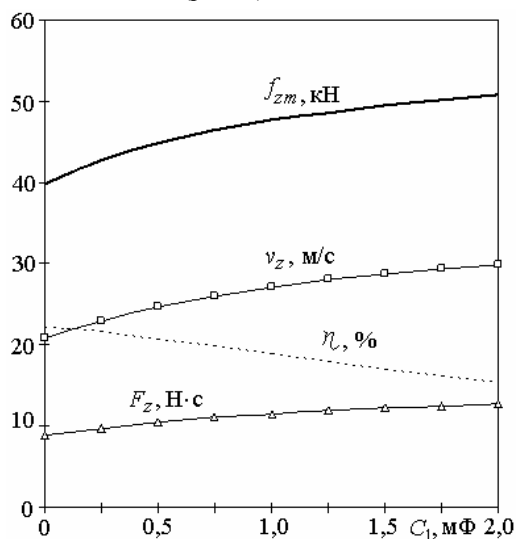


Рис. 7. Зависимость электромеханических показателей ЛИИЭП от емкости  $C_1$  при  $U_1 = 0,6U_0$

С увеличением указанной емкости возрастают все основные электромеханические показатели ЛИИЭП. Так при увеличении емкости  $C_1$  от нуля до 2 мФ максимальная величина плотности тока индуктора  $j_{1m}$  увеличивается на 24,3 %, тока якоря  $j_{2m}$  – на 12,8 %, максимальная величина ЭДУ  $f_{zm}$  – на 27,6 %, величина импульса ЭДУ  $F_z$  и скорость якоря  $v_z$  – на 43,6 %. Однако при этом возрастают превышения температур индуктора  $\theta_1$  в 2,7 раз, якоря  $\theta_2$  – на 40,7 %. КПД ЛИИЭП  $\eta$  снижается на 45,2 %.

Таким образом, ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей аperiodический токовый импульс возбуждения с подключением добавочного ЕНЭ-1, обеспечивает повышенные электромеханические показатели. Однако при этом необходимо иметь в виду, что добавочный ЕНЭ-1 приводит к повышенному нагреву индуктора и якоря, а также к уменьшению КПД ЛИИЭП.

#### Выводы.

1. С использованием разработанной цепной математической модели получены рекуррентные соотношения для расчета взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых параметров ЛИИЭП при различных схемах питания индуктора.

2. Установлено, что электромеханические показатели ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей аperiodический токовый импульс возбуждения, лучше, чем у ЛИИЭП с возбуждением индуктора однополярным токовым импульсом, но хуже, чем у ЛИИЭП с возбуждением индуктора колебательно-затухающим токовым импульсом. В преобразователе с аperiodическим токовым импульсом возбуждения наиболее сильно нагревается индуктор, а наименее сильно – якорь.

3. Установлено, что в ЛИИЭП со схемой питания индуктора, формирующей аperiodический токовый импульс возбуждения с подключением добавочного ЕНЭ, все электромеханические показатели выше по сравнению с ЛИИЭП со схемой питания, формирующей колебательно-затухающий токовый импульс возбуждения индуктора. Однако в этом ЛИИЭП наблюдается повышенный нагрев активных элементов, особенно – индуктора, и происходит снижение КПД.

#### 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., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов // Технічна електродинаміка. – 2016. – №5. – С. 46-48.
- 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.
- 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.

7. 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.

8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // Proceedings of the 13<sup>th</sup> cryogenics 2014 IIR international conference. – Praha, Czech Republic. – 7-11 April, 2014. – Paper ID: 012. – pp. 268-275.

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

10. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 9-14. doi: 10.20998/2074-272X.2009.2.02.

11. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Шукин И.С. Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.2. – С. 65-70.

12. Патент РФ № 2485614. МПК H01F7/06, G01V1/04. Индукционно-динамический привод / Ивашин В.В., Иванников Н.А. – Заявл. 03.08.2011. – Опубл. 20.06.2013, Бюл. №17.

#### 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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> cryogenics 2014 IIR int. conf.* Praha, Czech Republic, 7-11 April, 2014, Paper ID: 012, pp. 268-275.
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. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S.. Energy processes and efficiency of a dynamic induction percus-

sion converter. *Electrical engineering and electromechanics*, 2009, no.2, pp. 9-14. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2009.2.02.

11. Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S. Theoretical and experimental studies of an induction-dynamic motor excited from a polar capacitive reservoir. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*. 2006, part 2, pp. 65-70. (Rus).

12. Ivashin V.V., Ivannikov N.A. *Induktsionno-dinamicheskiy privod* [Induction-dynamic drive]. Patent Russian Federation, no. 2485614, 2013. (Rus).

Поступила (received) 10.11.2017

Болюх Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Кочерга Александр Иванович<sup>1</sup>, аспирант,  
Шукин Игорь Сергеевич<sup>1,2</sup>, к.т.н., доц.,

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

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

V.F. Bolyukh<sup>1</sup>, A.I. Kocherga<sup>1</sup>, I.S. Schukin<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Firm Tetra, LTD,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits.

**Purpose.** The goal of the paper is to investigate the influence of the power circuits of the linear pulse-induction electromechanical converters (LPIEC), which form the current pulse of excitation of the inductor from the capacitive energy storage (CES), to its electromechanical parameters. **Methodology.** A circuit mathematical model of LPIEC was developed, on the basis of which recurrence relations were obtained for calculating the interrelated electromagnetic, mechanical, and thermal parameters of the LPIEC. This model makes it possible to calculate the LPIEC parameters for various power circuits, the inductor of which is excited by the CES. **Results.** It is established that electromechanical LPEC parameters with power circuit forming an aperiodic current excitation pulse of an inductor are better than in LPIEC with excitation of an inductor by an unipolar current pulse, but worse than in LPIEC with excitation of an inductor by a vibrationally damped current pulse. In this converter, during operation, the inductor is heated most, and the armature is heated least. It is established that in LPIEC with power circuit that forms an aperiodic current pulse of excitation of an inductor with the connection of an additional CES, all electromechanical parameters are higher in comparison with the LPIEC with a power circuit that forms a vibrationally damped current excitation pulse of the inductor. However, in this LPIEC the excess of the temperatures of the active elements increases, especially strongly in the inductor, and the efficiency of the converter decreases. **Originality.** For the first time, the LPIEC has been investigated using the power circuit that forms an aperiodic current pulse of excitation of an inductor with the connection of an additional CES. It is established that in this LPIEC all electromechanical parameters are higher than for LPIEC with power circuits forming an unipolar or oscillating-damped current excitation pulse of the inductor. **Practical value.** In the LPIEC with power circuit that forms an aperiodic current pulse of excitation of the inductor with the connection of an additional CES, the electromechanical LPIEC parameters increase. This increases the temperature rise of the inductor, and the temperature rise of the armature decreases. The effectiveness of this LPIEC is also reduced. References 12, figures 7.

**Key words:** linear pulse-induction electromechanical converters, circuit mathematical model, recurrence relations, inductor feed circuits, capacitive energy storage, chain mathematical model, current excitation pulse of inductor.