

**В. Ф. БОЛЮХ, Ю. В. КАШАНСКИЙ, И. С. ЩУКИН, Л. П. ЩУКИНА**

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕССА ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Розроблено математичну модель магнітно-імпульсного преса циклічної дії, яка на кожному робочому циклі розраховує комплекс взаємопов'язаних електромагнітних, механічних і теплових процесів. Встановлено, що при циклічному режимі роботи перевищення температури якоря вище, ніж у обмотки індуктора. При слідуванні імпульсів зі шпаруватістю 200 під час паузи перевищення температури індуктора незначно збільшується, а якоря помітно знижується. Перевищення температури індуктора в пресі з аперіодичним імпульсом збудження і повним розрядом ємнісного накопичувача вище, ніж при використанні однонапівперіодного імпульсу збудження індуктора і збереженні частини енергії в накопичувачі протягом всього циклічного процесу. Перевищення температур якоря в обох випадках практично однакові. При експериментальних дослідженнях на модельному магнітно-імпульсному пресі на кожному робочому циклі забезпечувався силовий імпульс тиску на керамічний порошок з амплітудою 85 МПа і тривалістю 1 мс. Показано, що збільшення кількості силових імпульсів ущільнює керамічний порошок, збільшуючи механічну міцність зразка, знижуючи його пористість і водопоглинання. Встановлено, що імпульсне пресування дозволяє отримати зразки, щільність яких на 12% більша за щільність зразків, отриманих статичним пресуванням.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсний прес, циклічна дія, математична модель, теплові процеси, експериментальні дослідження, керамічний порошок, імпульсне пресування.

Разработана математическая модель магнитно-импульсного преса циклического действия, которая на каждом рабочем цикле рассчитывает комплекс взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов. Установлено, что при циклическом режиме работы превышение температуры якоря выше, чем у обмотки индуктора. При следовании импульсов со скважностью 200 во время паузы превышение температуры индуктора незначительно увеличивается, а якоря заметно снижается. Превышение температуры индуктора в прессе с аперiodическим импульсом возбуждения и полным разрядом емкостного накопителя выше, чем при использовании однополупериодного импульса возбуждения индуктора и сохранении части энергии в накопителе в течение всего циклического процесса. Превышения температур якоря в обоих случаях практически одинаковы. При экспериментальных исследованиях на модельном магнитно-импульсном прессе на каждом рабочем цикле обеспечивался силовой импульс давления на керамический порошок с амплитудой 85 МПа и длительностью 1 мс. Показано, что увеличение количества силовых импульсов уплотняет керамический порошок, увеличивая механическую прочность образца, снижая его пористость и водопоглощение. Установлено, что импульсное прессование позволяет получить образцы, плотность которых на 12 % выше плотности образцов, полученных статическим прессованием.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсний прес, циклическое действие, математическая модель, тепловые процессы, экспериментальные исследования, керамический порошок, импульсное прессование.

**Purpose.** Investigate the influence of the half-wave and aperiodic inductor excitation pulse on the efficiency and thermal processes of a magnetic-pulse press operating in a cyclic mode. Experimentally establish the influence of the number of operating cycles on the indicators of pulsed pressing of ceramic powders. **Methodology.** With the help of a mathematical model, the thermal processes of a magnetic-pulse press of cyclic action with aperiodic and half-wave excitation pulses of an inductor winding depending on the number of excitation pulses are investigated. Experimental studies of samples formed of ceramic powders with a different number of power pulses were carried out on a model magnetic pulse press. **Results.** A mathematical model of a magnetic-pulse press of cyclic action has been developed, which at each working cycle calculates a complex of interconnected electromagnetic, mechanical and thermal processes. It has been established that during cyclic operation the temperature of the armature is higher than that of the inductor winding. With a significant period of pulse repetition during a pause, the temperature rise of the inductor increases slightly, and the anchors decrease markedly. Experimental studies on a model magnetic pulse press at each working cycle provided a force pressure pulse on a ceramic powder with amplitude of 85 MPa and a duration of 1 ms. **Originality.** It is established that the temperature rise of the inductor in a press with an aperiodic excitation pulse and full discharge of the capacitive drive is higher than when using a half-wave inductor excitation pulse and saving part of the energy in the drive during the entire cyclic process. Temperatures of the armature are almost the same. It is established that pulse pressing allows to obtain samples, the density of which is 12% higher than the density of samples obtained by static pressing. **Practical value.** It is shown that an increase in the number of power pulses compacts the ceramic powder, increasing the mechanical strength of the sample, reducing its porosity and water absorption.

**Keywords:** magnetic pulse press, cyclic action, mathematical model, thermal processes, experimental studies, ceramic powder, pulse pressing.

**Введение.** Линейные импульсные электромагнитные преобразователи, которые обеспечивают мощные силовые импульсы, широко используются во многих отраслях науки и техники в качестве устройств ударно-силового действия [1–3]. Одним из перспективных направлений применения указанных преобразователей является ударное прессование керамических порошков [4]. Для этого используют различные методы, которые сочетают статическое и динамическое уплотнение, вибрационные и ударно-волновые технологии. Большой интерес вызывает возможность использования импульсных источников энергии (взрыва, электромагнитного поля, электрического разряда, энергии удара ускоряемого твердого тела). Наибольших успехов достигла технология

ударного прессования предварительно спеченных порошковых заготовок [5]. Однако недостаток этой технологии состоит в многоступенчатости процесса и его трудоемкости. Методы взрывного прессования позволяют получать заготовки высокой плотности, однако они достаточно сложны в обслуживании и эксплуатации.

Большую перспективность продемонстрировали магнитно-импульсные методы для формирования наноразмерных порошков [6, 7]. Установлено, что многократное последовательное импульсное воздействие позволяет уменьшить конечную пористость керамического порошка [4]. Разрабатываются магнитно-импульсные прессы, совмещающие электромагнитные импульсные преобразователи электродинамического и индукционного типов [8]. Однако наиболее эффективным для магнитно-

© В. Ф. Болух, Ю. В. Кашанский, И. С. Щукин, Л. П. Щукина, 2019

импульсного пресса (МИП) одностороннего действия является линейный импульсный электромеханический преобразователь индукционного типа коаксиальной конфигурации. В этом преобразователе на подвижный электропроводящий якорь действуют импульсные электродинамические усилия (ЭДУ) со стороны неподвижной обмотки индуктора при возбуждении ее от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) [9, 10].

Следует отметить, что при циклическом режиме работы МИП могут проявиться проблемы, связанные с перегревом его активных элементов – неподвижного индуктора и подвижного электропроводящего якоря. Это требует оценки влияния количества рабочих циклов на превышения температур в активных элементах МИП. Кроме того не исследовано влияние формы токового импульса на эффективность работы и тепловые процессы в МИП.

**Постановка задачи.** Необходимо исследовать влияние однополупериодного и аperiodического импульса возбуждения индуктора на эффективность и тепловые процессы МИП, работающего в циклическом режиме, и экспериментально установить влияние количества рабочих циклов на показатели импульсного прессования керамических порошков.

**Математическая модель МИП.** Математическая модель МИП циклического действия должна в каждом рабочем цикле оперативно рассчитывать комплекс взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов, учитывать изменяемую магнитную связь между подвижным электропроводящим якорем и неподвижной обмоткой индуктора при прямом ходе, перемещение якоря под действием возвратной пружины при обратном ходе, изменение сопротивления обмотки индуктора и якоря из-за нагрева импульсными токами, комплекс сил, действующих на якорь, условия охлаждения и теплового взаимодействия активных элементов. При этом необходимо учитывать, что по сечению активных элементов наблюдаются незначительные температурные градиенты [11].

В циклическом режиме работы целесообразно использовать цепную модель МИП с сосредоточенными параметрами активных элементов, а решения уравнений представить в рекуррентном виде, считая все параметры на численно малом интервале  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  неизменными [12].

Рассмотрим электрические процессы МИП, обеспечивающего однополупериодный импульс возбуждения обмотки индуктора с сохранением части энергии ЕНЭ и аperiodический импульс возбуждения с полным разрядом ЕНЭ (рис. 1). Будем полагать, что пусковой тиристор  $VS$  и обратный диод  $VD$  являются идеальными, а коаксиально установленный якорь перемещается относительно обмотки индуктора вдоль оси  $z$  со скоростью  $v_z$ .

Электромагнитные процессы, возникающие в МИП при подключении к ЕНЭ, можно описать уравнениями:

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

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

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.

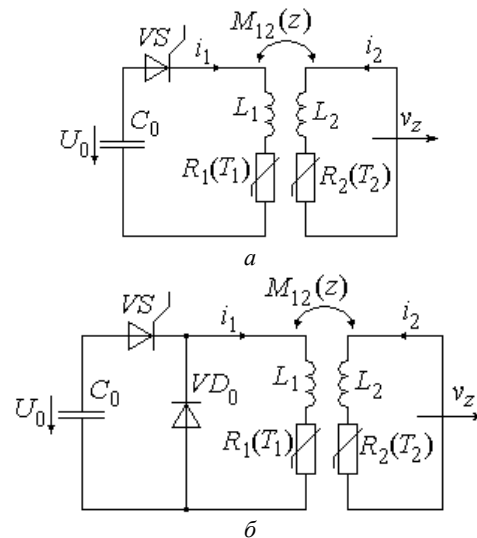


Рис. 1 – Схемы возбуждения индуктора МИП однополупериодным импульсом с сохранением части энергии ЕНЭ (а) и аperiodическим импульсом с полным разрядом ЕНЭ (б)

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

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 коэффициенты

$$a_3 = \nu; \quad a_2 = \chi - 2Mv_z \frac{dM_{12}}{dz}; \quad a_1 = R_1 R_2 + \frac{L_2}{C_0} - v_z^2 \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2; \\ a_0 = R_2 C_0^{-1}; \quad \nu = L_1 L_2 - M_{12}^2; \quad \chi = R_1 L_2 + L_1 R_2.$$

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

$$u_* = \sqrt[3]{D^{0,5} - 0,5q_*}; v_* = \sqrt[3]{-D^{0,5} - 0,5q_*}; \varepsilon_{1,2} = 0,5(-1 \pm j\sqrt{3});$$

$$D = (p_*/3)^3 + (q_*/2)^2 - \text{дискриминант уравнения (5)}.$$

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

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

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 представляют в рекуррентном виде [12]:

$$i_n(t_{k+1}) = \delta^{-1} \left\{ \left[ i_n(t_k) - \frac{i_m(t_k) v_z^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] \times \right.$$

$$\times (\alpha_1 \beta_2 \beta_3 + \alpha_2 \beta_1 \beta_3 + \alpha_3 \beta_1 \beta_2) + \left( \Omega_n - \frac{v_z \Omega_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) [\alpha_1 (\beta_2 + \beta_3) +$$

$$+ \alpha_2 (\beta_1 + \beta_3) + \alpha_3 (\beta_1 + \beta_2)] + \left( \Lambda_n - \frac{v_z \Lambda_m}{R_n} \frac{dM_{12}}{dz} \right) (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \left. \right\} \times$$

$$\times \left[ 1 - \frac{v_z^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (10)$$

где  $n=1, 2$  при  $m=2, 1$ ;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\left. + v_z^2 (L_1 L_2 + M_{12}^2) \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[ v_z (L_2 \chi + 2R_2 M_{12}^2) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12} R_2 \chi - \right.$$

$$\left. - v^2 M_{12} L_2 \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left( R_2 M_{12}^2 + L_2^2 R_1 - 2L_2 v M_{12} \frac{dM_{12}}{dz} \right) \left. \right\};$$

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

$$\left. \times \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[ R_2 (R_1 M_{12}^2 + R_2 L_1^2) - M_{12} v_z (2L_1 R_2 + \chi) \frac{dM_{12}}{dz} + (L_1 L_2 + \right.$$

$$\left. + M_{12}^2) v_z^2 \left( \frac{dM_{12}}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left[ v_z (L_1 L_2 + M_{12}^2) \frac{dM_{12}}{dz} - M_{12} \chi \right] \left. \right\},$$

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 [12]:

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

где

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

$$\left. + \exp(f\Delta t) [\sin(g\Delta t) d(f^2 - g^2 - fd) \Theta_n + (g^2 + d^2 - f^2) \Omega_n + \right.$$

$$\left. + (f-d) \Lambda_n \right] + g \cdot \cos(g\Delta t) [d(d-2f) \Theta_n + 2fg \Omega_n - \Lambda_n] \left. \right\};$$

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

В схеме на рис. 1 б после того, как напряжение на ЕНЭ становится равным нулю, токи в обмотках индуктора и якоря описываются уравнениями:

$$R_n(T_n) \cdot i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{nm}(z) \frac{di_m}{dt} + i_m(t) \cdot V(t) \frac{dM_{nm}}{dz} = 0, \quad (14)$$

где  $m = 3 - n$ .

После ряда преобразований эта система приводится к уравнению:

$$(1 - K_{12}^2) \frac{d^2 i_1}{dt^2} + (\gamma_1 + \gamma_2 - 2\xi_1 \chi_2) \frac{di_1}{dt} + (\gamma_1 \gamma_2 - \chi_1 \chi_2) i_1 = 0, \quad (15)$$

$$\text{где } \gamma_n = \frac{R_n}{L_n}; \quad \xi_n = \frac{M_{nm}(z)}{L_n}; \quad \chi_n = \frac{V(t) dM_{nm}}{L_n dz}.$$

Характеристическое уравнение дифференциального уравнения (15) имеет два действительных корня:

$$x_{1,2} = \frac{1}{1-K_{12}^2} \left\{ \xi_1 \chi_2 - 0,5 \cdot (\gamma_1 + \gamma_2) \pm \left[ 0,5(\gamma_1 + \gamma_2) - \xi_1 \chi_2 \right]^2 + \right. \\ \left. + (K_{12}^2 - 1) (\gamma_1 \gamma_2 - \chi_1 \chi_2) \right\}^{0,5} \cdot \quad (16)$$

Решения для токов в окончательном виде описываются рекуррентными соотношениями

$$i_n(t_{k+1}) = \frac{1}{x_1 - x_2} \left\{ i_n(t_k) [x_1 \exp(x_2 \Delta t) - x_2 \exp(x_1 \Delta t)] + \right. \\ \left. + \frac{\exp(x_1 \Delta t) - \exp(x_2 \Delta t)}{1 - K_{12}^2} [i_n(t_k) (\xi_n \chi_m - \gamma_n) + i_m(t_k) (\gamma_m \xi_n - \chi_n)] \right\}. \quad (17)$$

Механические процессы МИП при перемещении якоря с пуансоном можно описать уравнением:

$$i_1(t) i_2(t) \frac{dM}{dz}(z) = (m_a + m_2) \frac{dv}{dt} + K_p \Delta z(t) + K_T v(t) + \\ + 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v^2(t), \quad (18)$$

где  $m_2, m_a$  – масса якоря и масса пуансона соответственно;  $K_p$  – коэффициент упругости сжимаемой среды;  $\Delta z(t)$  – величина перемещения якоря с пуансоном;  $K_T$  – коэффициент динамического трения;  $\gamma_a$  – плотность среды перемещения;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  – наружный диаметр пуансона.

На основании уравнения (18) величину перемещения якоря с пуансоном можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$\Delta z(t_{k+1}) = \Delta z(t_k) + v(t_k) \Delta t + \vartheta \cdot \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (19)$$

где  $v(t_{k+1}) = v(t_k) + \vartheta \cdot \Delta t / (m_a + m_2)$  – скорость якоря

$$\text{с УП; } \vartheta = i_1(t_k) i_2(t_k) \frac{dM}{dz}(z) - K_p \Delta z(t_k) - K_T v(t_k) - \\ - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v^2(t_k).$$

Тепловые процессы во многом определяются количеством рабочих циклов МИП. 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  $n$ -тых активных элементов МИП при этом можно описать рекуррентным соотношением [13]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \xi + (1 - \xi) \left[ \pi^{-1} i_n(t_k) R_n(T_n) (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} + \right. \\ \left. + 0,25 \pi T_0 D_{en} H_n \alpha_{Tn} + T_m(t_k) \lambda_a(T) d_a^{-1} \right] \left\{ 0,25 \pi \alpha_{Tn} D_{en} H_n + \right. \\ \left. + \lambda_a(T) d_a^{-1} \right\}^{-1}, \quad (20)$$

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

$\lambda_a(T)$  – 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:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \chi + (1 - \chi) \left[ T_0 + 4 \pi^{-2} i_n(t_k) R_n(T_n) \alpha_{Tn}^{-1} \times \right.$$

$$\left. \times D_{en}^{-1} H_n^{-1} (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} \right], \quad (21)$$

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)–(21):

$T_n(0) = T_0$  – 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;

$v(0) = 0$  – скорость якоря.

Эффективность работы МИП оценим соотношением в конце рабочего цикла [5]

$$\eta = 100 \frac{(m_2 + m_a) v^2 + K_p \Delta z^2}{C(U_0^2 - U_1^2)}, \% \quad (22)$$

где  $U_1$  – остаточное напряжение в ЕНЭ в конце прямого хода рабочего цикла,

и величиной импульса ЭДУ, определяющего интегральное силовое воздействие якоря на пуансон:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (23)$$

Превышения температур индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  должны быть минимальными.

В рабочем цикле МИП при прямом ходе якоря имеют место следующие энергетические составляющие [14]:

$W_{p1} = \int i_1^2(t) R_1(T_1) dt$  – потери в индукторе;

$W_{p2} = \int i_2^2(t) R_2(T_2) dt$  – потери в якоре;

$W_{mag} = 0,5 \sum_{n=1}^2 L_n i_n^2(t) + M(z) \cdot i_1(t) \cdot i_2(t)$  – магнитная энергия;

$W_{kin} = 0,5(m_2 + m_a) v^2(t)$  – кинетическая энергия;

$W_c = 0,5 \cdot C \cdot u_c^2(t)$  – энергия ЕНЭ;

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

**Исходные параметры МИП.** Рассмотрим МИП коаксиальной конфигурации со следующими параметрами. Неподвижный индуктор содержит  $N_1 = 46$  витков медной шины сечением  $a \times b = 1,8 \times 4,8 \text{ мм}^2$  и выполнен с наружным диаметром  $D_{ex1} = 100 \text{ мм}$ , внутренним диаметром  $D_{in1} = 10 \text{ мм}$  и высотой  $H_1 = 10 \text{ мм}$ . Якорь выполнен в виде медного диска с наружным диаметром  $D_{ex2} = 100 \text{ мм}$ , внутренним диаметром  $D_{in2} = 10 \text{ мм}$  и высотой  $H_2 = 2 \text{ мм}$ . Индуктор возбуждается от ЕНЭ емкостью  $C = 3000 \text{ мкФ}$  и напряжением  $U_0 = 400 \text{ В}$ . Масса пуансона  $m_a = 0,250 \text{ кг}$ . Коэффициент упругости возвратной пружины  $K_p = 25 \text{ кН/м}$ .

**Исследование процессов в МИП.** Рассмотрим возбуждение обмотки индуктора МИП однополупериодным импульсом с сохранением части энергии ЕНЭ (рис. 1а) и аperiodическим импульсом с полным разрядом ЕНЭ (рис. 1б).

На рис. 2 а представлены электромеханические характеристики МИП при возбуждении индуктора однополупериодным импульсом. В этом преобразователе импульс плотности тока в обмотке индуктора  $j_1$  пре-

крашается через 1,3 мс, после чего плотность тока в якоре  $j_2$  меняет характер изменения и начинает плавно затухать. Максимальная плотность тока в индукторе составляет  $j_{1m} = 285,8 \text{ А/мм}^2$ , а в якоре –  $j_{2m} = 823,9 \text{ А/мм}^2$ . Возникающие при этом ЭДУ отталкивания  $f_z$  достигают максимальной величины 12,45 кН. После 0,85 мс ЭДУ меняют направление воздействия с отталкивания на притяжение. Вследствие этого максимальная скорость якоря с пуансоном в момент времени 0,8 мс достигает 12,26 м/с, а в момент времени 2,5 мс снижается до 10 м/с. С учетом того, что к концу рассматриваемого рабочего цикла в ЕНЭ сохраняется энергия, эффективность работы МИП составляет  $\eta = 29,1 \%$ . Такое значение эффективности обусловлено значительными потерями энергии в обмотке индуктора  $W_{p1}$  и якоря  $W_{p2}$ . При этом величина импульса ЭДУ составляет  $F_z = 3,9 \text{ Н}\cdot\text{с}$ . Поскольку остаточное напряжение  $U_1$  в ЕНЭ имеет противоположную полярность по отношению к исходному напряжению  $U_0$ , то это обуславливает использование неполярных конденсаторов в ЕНЭ.

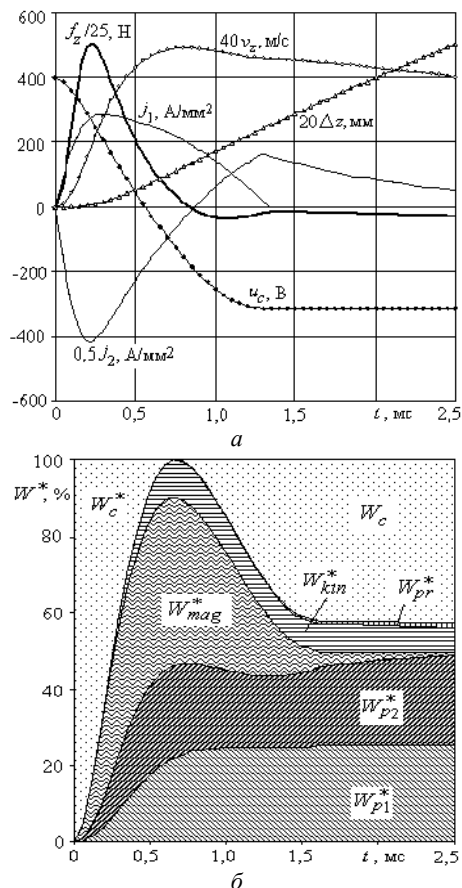


Рис. 2 – Электромеханические (а) и энергетические (б) характеристики МИП с однополупериодным импульсом возбуждения индуктора и сохранением части энергии ЕНЭ

МИП со схемой возбуждения обмотки индуктора, представленной на рис. 1б, позволяет использовать в ЕНЭ электролитические конденсаторы повышенной энергоемкости. В этом преобразователе до момента времени 0,55 мс электромеханические процессы протекают так же, как в преобразователе

со схемой возбуждения индуктора, представленной на рис. 1а (рис. 3). После указанного момента времени ток в обмотке индуктора проходит через обратный диод  $VD$ , формируя аperiodический импульс возбуждения и обеспечивая полный разряд ЕНЭ. При этом максимальная скорость якоря с пуансоном практически такая же, но к концу рассматриваемого интервала скорость снижается до 9,7 м/с. Величина импульса ЭДУ составляет  $F_z = 3,8 \text{ Н}\cdot\text{с}$ , а эффективность МИП составляет лишь 11 %. Это обусловлено тем, что в данном преобразователе значительно возрастают потери в индукторе  $W_{p1}$  и не сохраняется энергия в ЕНЭ.

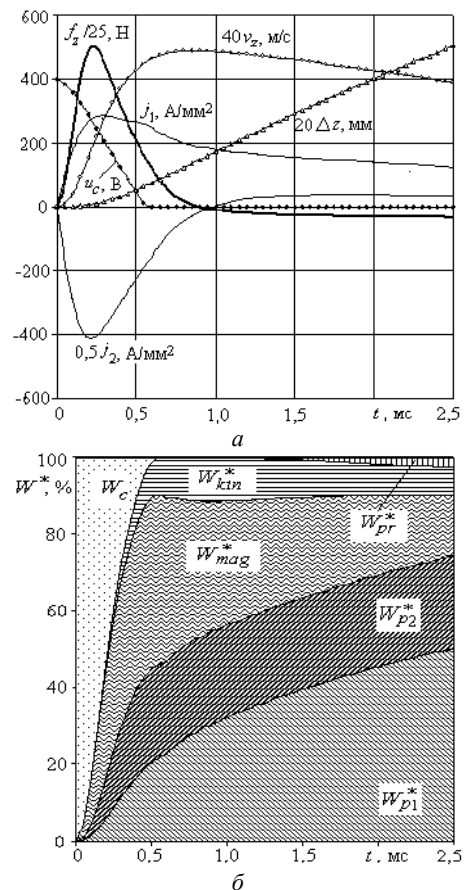


Рис. 3 – Электромеханические (а) и энергетические (б) характеристики МИП с аperiodическим импульсом возбуждения индуктора и полным разрядом ЕНЭ

При циклическом режиме работы на первый план выступают тепловые процессы в МИП. Превышение температуры якоря  $\theta_2$  выше, чем у обмотки индуктора  $\theta_1$  (рис. 4). При прямом ходе якоря с пуансоном происходит резкое увеличение температур активных элементов МИП. После обратного хода якоря под действием возвратной пружины между якорем и индуктором происходит теплообмен. При скважности импульсов  $q_{imp} = 200$  (период следования импульсов  $T_{imp} = 1 \text{ с}$ ) во время паузы превышение температуры индуктора  $\theta_1$  незначительно увеличивается, а якоря  $\theta_2$  заметно снижается.

Превышение температуры индуктора  $\theta_1$  в МИП с аperiodическим импульсом возбуждения и полным разрядом ЕНЭ выше, чем при использовании однополупериодного импульса возбуждения индуктора и сохра-

нении части энергии ЕНЭ в течение всего циклического процесса. Однако превышения температур якоря  $\theta_2$  в МИП с аperiodическим и однополярным импульсами возбуждения практически одинаковы.

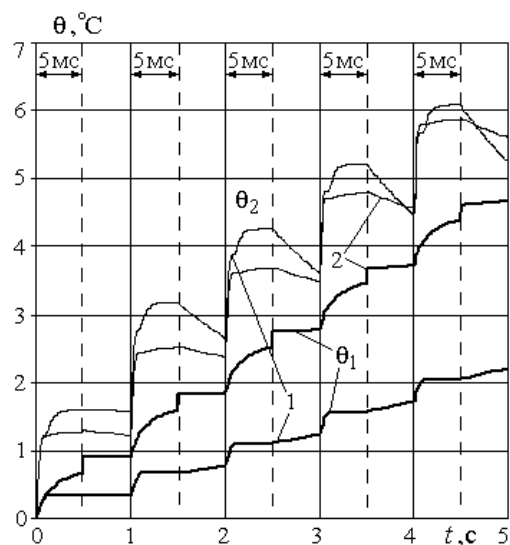
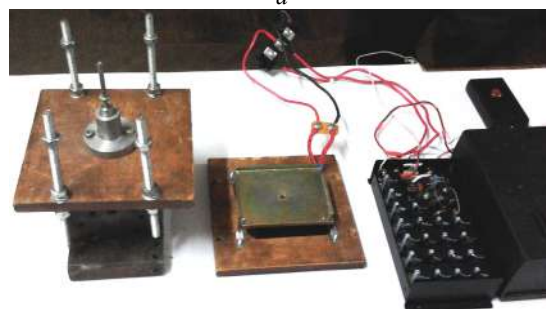
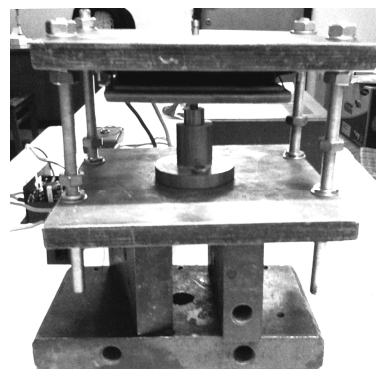


Рис. 4 – Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе в циклическом режиме при возбуждении индуктора однополупериодным (1) и аperiodическим (2) импульсом

**Экспериментальные исследования МИП.** На основании проведенных расчетов был изготовлен лабораторный образец МИП (рис. 5), и проведены экспериментальные исследования по прессованию разных керамических порошков, используемых в технологии шамотных огнеупоров и технической керамики [15].

В данном прессе индуктор крепится к верхней неметаллической плите и возбуждается от электронного блока, формирующего аperiodический импульс возбуждения. Медный якорь соединяется с прямоугольной ударной пластиной, выполненной из немагнитной нержавеющей стали, которая воздействует на цилиндрический пуансон. Верхняя направляющая часть пуансона проходит через центральное направляющее отверстие индуктора. Нижняя массивная часть пуансона частично размещается в отверстии матрицы, которая крепится к нижней неметаллической плите. Верхняя плита при помощи четырех регулируемых стоек фиксируется относительно нижней плиты. Геометрические и электрические параметры лабораторного образца аналогичны исходным параметрам теоретически исследованного МИП.

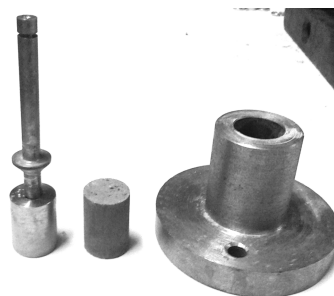
При экспериментах керамический порошок насыпался в матрицу и прессовался пуансоном, на упорный конусообразный выступ которого воздействовали ударная пластина и якорь. При каждом рабочем цикле МИП обеспечивал силовой импульс давления на керамический порошок с амплитудой 85 МПа и длительностью 1 мс.



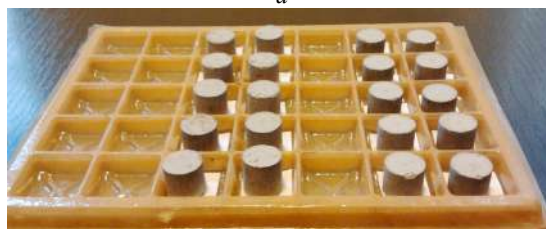
а

Рис. 5 – Общий вид лабораторного образца МИП для керамических порошков в собранном (а) и разобранном (б) виде

На рис. 6 представлены результаты работы лабораторного образца МИП по прессованию керамических порошков.



а



б

Рис. 6 – Пуансон, образец спрессованного порошка, матрица (а) и совокупность сформованных образцов при различных условиях (б)

На первом этапе эксперимента использовались шамотно-глинистые порошки с одинаковым соотношением компонентов, но разным гранулометрическим составом: грубый порошок (ГП) и тонкий порошок (ТП) с шамотным зерном фракций 2–3 мм и менее 2 мм соответственно. Импульсное прессование таких порошков показало, что при ударном воздействии пуансона способность керамических порошков уплотняться зависела



от гранулометрического состава, усилия прессования и количества ударных импульсов. Увеличение количества силовых импульсов  $N$  уплотняет керамический порошок, снижая пористость и водопоглощение полученных после обжига керамических материалов (рис. 7).

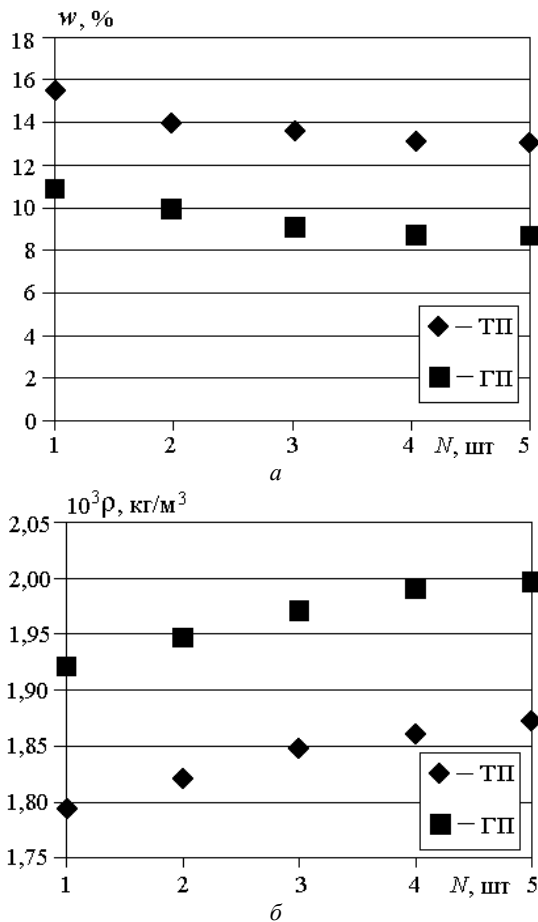


Рис. 7 – Влияние количества силовых импульсов  $N$  на водопоглощение  $w$  (а) и кажущуюся плотность  $\rho$  (б) керамических образцов, полученных при температуре обжига  $1200^{\circ}\text{C}$

При увеличении числа силовых импульсов лабораторного образца МИП водопоглощение  $w$  керамических образцов уменьшается, а их кажущаяся плотность  $\rho$  повышается. Материалы из ГП уплотняются лучше, чем из ТП, что указывает на влияние фактора гранулометрии, который является более существенным, чем фактор давления прессования.

При импульсном прессовании технических порошков с размерами частиц менее  $63\ \mu\text{m}$  были получены цилиндрические образцы правильной геометрической формы, которые подвергались последующему обжигу при температурах  $1250^{\circ}\text{C}$ ,  $1350^{\circ}\text{C}$  и  $1450^{\circ}\text{C}$ . Был проведен сравнительный анализ плотности свежесформованных образцов, полученных при импульсном (быстром) прессовании с помощью МИП, и при традиционном статическом (медленном) прессовании. Установлено, что импульсное прессование позволяет получить компакты, плотность которых оказалась на 12 % выше плотности образцов, полученных статическим прессованием.

Это соответствующим образом отразилось и на плотности обожженных образцов. Данные рис. 8 иллюстрируют выраженную зависимость плотности образцов как от температуры обжига, так от примененного способа формования. При любой температуре обжига наблюдается прирост плотности образцов, полученных импульсным прессованием, по отношению к плотности образцов, полученных статическим прессованием.

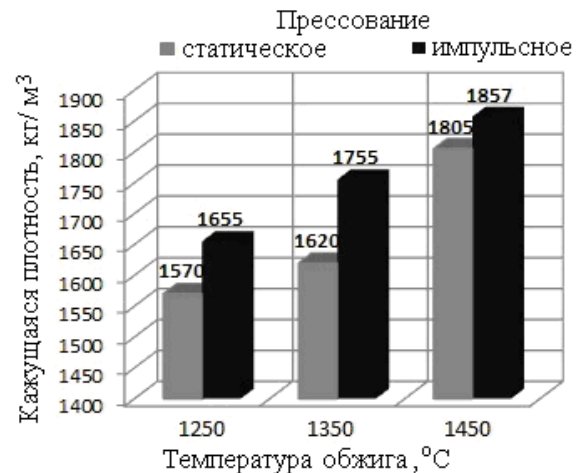


Рис. 8 – Кажущаяся плотность керамических образцов, полученных различными способами прессования при различных температурах обжига

Таким образом, импульсное прессование с использованием МИП циклического действия представляет эффективный способ прессования керамических порошков и может служить резервом энергосбережения в керамических технологиях.

#### Выводы.

1. Разработана математическая модель магнитно-импульсного пресса циклического действия, которая на каждом рабочем цикле рассчитывает комплекс взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых процессов.
2. Установлено, что при циклическом режиме работы превышение температуры якоря выше, чем у обмотки индуктора. При значительной скважности следования импульсов ( $q_{imp} = 200$ ) во время паузы превышение температуры индуктора незначительно увеличивается, а якоря заметно снижается.
3. Установлено, что превышение температуры индуктора в МИП с аperiodическим импульсом возбуждения и полным разрядом ЕНЭ выше, чем при использовании однополупериодного импульса возбуждения индуктора и сохранении части энергии ЕНЭ в течение всего циклического процесса. Превышения температур якоря практически одинаковы.
4. При экспериментальных исследованиях на лабораторном образце МИП на каждом рабочем цикле обеспечивался силовой импульс давления на керамический порошок с амплитудой  $85\ \text{МПа}$  и длительностью  $1\ \text{мс}$ .
5. Показано, что при формовании шамотно-глинистых порошков увеличение количества силовых импульсов уплотняет порошок, снижая водопоглощение и пористость керамических материалов. Достигнутый

уровень свойств образцов, полученных при температуре обжига 1200°C, соответствует уровню, характерному для шамотных огнеупоров, получаемых при значительно больших температурах (1350–1400°C).

6. Установлено, что импульсное прессование технических порошков позволяет получить компакты, плотность которых на 12 % выше плотности образцов, полученных статическим прессованием. Импульсное прессование способствует повышению плотности керамических образцов на 3–8,5 % в зависимости от температуры обжига.

#### Список литературы

- Balikci A. Improved performance of linear induction launchers / A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2005. – Vol. 41. – № 1. – P. 171–175.
- Chemerys V.T. Prospectives of new coilgun design development / V.T. Chemerys, V.F. Bolyukh // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – 2008. – № 3. – С. 44–52.
- Bissal A. Comparison of two ultra-fast actuator concept / A. Bissal, J. Magnusson, G. Engdahl // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48. – № 11. – P. 3315–3318.
- Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков / В.А. Миронов. – Рига: Зинатне, 1980. – 192 с.
- Sjoberg G.. Die filling and densification in hot extrusion forging of porous preforms. *Powder Metallurgy international* / G. Sjoberg, H. Fischmeister, V. Mironov. – 1977. – Vol. 9. – № 4. – P. 160–164.
- Боков А.А. Одноосное компактирование нанопорошков на магнитно-импульсном прессе / А.А. Боков, Г.Ш. Болтачев, Н.Б. Волков // *Журнал технической физики*. – 2013. – Т. 83. – Вып. 10. – С. 68–77.
- Kim J.H. Fabrication and densification behavior analysis of metalizing targets using ZrO<sub>2</sub> nanopowders by magnetic pulsed compaction. / J.H. Kim, M.R. Rumman, C.K. Rhee, J.G. Lee, M.K. Lee, S.J. Hong // *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52. – № 6. – P. 1156–1162.
- Акарачкин С.А. Радиальный магнитноимпульсный пресс совмещенной электродинамической и индукционной системы // С.А. Акарачкин, Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко, А.А. Сивков // *Электричество*. – 2012. – № 6. – С. 65–69.
- Bolyukh V.F. High-efficiency impact electromechanical converter / V.F. Bolyukh, V.F. Luchuk, M.A. Rassokha, I.S. Shchukin // *Russian Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 82. – № 2. – P. 104–110.
- Боллох В.Ф. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов / В.Ф. Боллох, С.В. Олексенко, И.С. Щукин // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 5. – С. 46–48.
- Li W. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method / W. Li, C.S. Koh // *14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*. – 2010. – P. 1–9.
- Боллох В.Ф. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора / В.Ф. Боллох, А.И. Кочерга, И.С. Щукин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2018. – № 1. – С. 21–28.
- Bolyukh V.F. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode / V.F. Bolyukh, I.S. Shchukin // *Russian electrical engineering*. – 2012. – Vol. 83, № 10. – P. 571–576.
- Боллох В.Ф. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия / В.Ф. Боллох, А.М. Марков, В.Ф. Лучук, И.С. Щукин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 2. – С. 9–14.
- Щукина Л. П. Влияние метода консолидации порошков на фазообразование технической керамики / Л.П. Щукина, В.Ф. Боллох, С.Л. Лигезин, А.В. Захаров, О.С. Противень // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2018. – № 3. – С. 3–7.

#### References (transliterated)

- Balikci A. Zabar Z., Birenbaum L. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no 1, pp. 171–175.
- Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Artilleryskoye i strelkovoye vooruzheniye – Artillery and small arms*, 2008, no 3, pp. 44–52.
- 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.
- Mironov V.A. Magnitno-impul'snoye pressovaniye poroshkov [Magnetic pulse pressing of powders]. - Riga: Zinatne, 1980. – 192 p.
- Sjoberg G., Fischmeister H., Mironov V.. Die filling and densification in hot extrusion forging of porous preforms. *Powder Metallurgy international*, 1977, Vol. 9, no. 4, pp. 160–164.
- Bokov A.A., Boltachev G.Sh, Volkov N.B. Odnoosnoye kompaktirovaniye nanoporoshkov na magnitno-impul'snom presse [Uniaxial compaction of nanopowders on a magnetic pulse press]. *Journal of Technical Physics*, 2013, Vol. 83, no. 10, pp. 68–77.
- Kim J.H., Rumman M.R., Rhee C.K., Lee J.G., Lee M.K., Hong S.J. Fabrication and densification behavior analysis of metalizing targets using ZrO<sub>2</sub> nanopowders by magnetic pulsed compaction. *Materials Transactions*, 2011, Vol. 52, no. 6, pp. 1156–1162.
- Akarachkin S.A., Annenkov Yu.M., Ivashutenko A.S., Sivkov A.A. Radial'nyy magnitnoimpul'snyy press sovmeshchennoy elektrodinamicheskoy i induktsionnoy sistemy [Radial magnetic pulse press combined electrodynamic and induction systems]. *Electricity*, 2012, no. 6, pp. 65–69.
- 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.
- Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Sravnitel'nyy analiz lineynykh impul'snykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley elektromagnitnogo i induktsionnogo tipov [Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types]. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 5, pp. 46–48.
- Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method, *14<sup>th</sup> biennial IEEE conference on electromagnetic field computation, digital object identifier*, 2010, pp. 1–9.
- Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Issledovaniye lineynogo impul'sno-induktsionnogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya pri razlichnykh skhemakh pitaniya induktora [Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with various inductor power supply circuits]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 1, pp. 21–28.
- 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.
- Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S. Energeticheskiye protsessy i effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelya udarnogo deystviya [Energy processes and efficiency of an induction-dynamic shock transducer]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no 2, pp. 9–14.
- Shchukina L.P., Bolyukh V.F., Ligezin S.L., Zakharov A.V., Protiven O.S. Vplyv metodu konsolidatsiyi poroshki na fazovotvorenniya tekhnichnoy keramiki [Influence of the method of consolidation of powders on the phase-formation of technical ceramics]. *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya – Integrated Technologies and Energy Saving*, 2018, no. 3, pp. 3–7.

Поступила (received) 30.01.2019

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Теоретичні та експериментальні дослідження магнітно-імпульсного преса для керамічних порошків / В. Ф. Боллох, Ю. В. Кашанський, І. С. Щукін, Л. П. Щукіна // Вісник Національного технічного університету

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».



«ХП». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХП», 2019. – № 4 (1329). – С. 23–31. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

**Теоретические и экспериментальные исследования магнитно-пульсного пресса для керамических порошков / В. Ф. Болюх, Ю. В. Кашанский, И. С. Щукин, Л. П. Щукина** // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХП», 2019. – № 4 (1329). – С. 23–31. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

**Theoretical and experimental studies of the magnetic-pulse press for ceramic powders / V. F. Bolyukh, Yu. V. Kashansky, I. S. Shchukin, L. P. Shchukina** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 23–31. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2409-9295.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Болюх Володимир Федорович**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-64-27; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

**Болюх Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры общей электротехники, тел. (057)707-64-27; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

**Bolyukh Vladimir Fedorovich**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of chair of General Electrical Engineering, tel. +38 (057)707-64-27; e-mail: vfbolyukh@gmail.com.

**Кашанський Юрій Володимирович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри загальної електротехніки, тел. (057)707-64-27; e-mail: upanblazeit@gmail.com.

**Кашанский Юрий Владимирович**, Национальный технический университет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри общей электротехники, тел. (057)707-64-27; e-mail: upanblazeit@gmail.com.

**Kashanskiy Yurii Vladimirovich**, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department "General Electrical Engineering", tel. +38 (057)707-64-27, e-mail: upanblazeit@gmail.com.

**Щукин Ігор Сергійович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, (057)707-65-14, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.

**Щукин Игорь Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com

**Shchukin Igor Sergeevich**, PhD in Technical Sciences, Assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Assistant professor of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057)707-65-14; e-mail: tech@tetra.kharkiv.com

**Щукіна Людмила Павлівна**, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, (057) 707-64-82, e-mail: milinvest@meta.ua.

**Щукина Людмила Павловна**, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей, тел. (057) 707-64-82; e-mail: milinvest@meta.ua

**Schukina Lyudmila Pavlovna**, PhD in Technical Sciences, Assistant professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of the Department of Technology of ceramics, refractories, glass and enamels, tel. +38 (057) 707-64-82; e-mail: milinvest@meta.ua