

В.Ф. Болюх, И.С. Щукин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОМ ИМПУЛЬСНО-ИНДУКЦИОННОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

*Розроблена математична модель лінійного імпульсно-індукційного електромеханічного перетворювача (ЛІЕП) циклічної дії, система рівнянь якої враховує комплекс взаємопов'язаних електромагнітних, електромеханічних та теплових процесів. Рішення цих рівнянь представлені в рекурентному вигляді. Досліджені процеси ЛІЕП, що протікають при прямому ході робочого циклу. Показано, що в кінці робочого циклу значна частина енергії зберігається в ємнісному накопичувачі енергії, а також перетворюється в теплову енергію якоря та індуктора. При значному числі робочих циклів виникає недопустимий нагрів активних елементів ЛІЕП. Для рішення цієї проблеми використовується інтенсивне охолодження обмотки індуктора, рухомого якоря або їх обох, а також збільшення періоду слідування імпульсів. Встановлено, що при роботі ЛІЕП в циклічному режимі експериментальні залежності температури нагріву обмотки індуктора з точністю до 6 % співпадають з розрахунковими результатами. Розроблена конструктивна схема ЛІЕП циклічної дії з інтенсивним водяним охолодженням обмотки індуктора. Бібл. 13, табл. 1, рис. 12.*

*Ключові слова:* лінійний імпульсно-індукційний електромеханічний перетворювач, циклічна дія, тепловий стан, математична модель, електромеханічні і енергетичні процеси, інтенсивне охолодження, експериментальні дослідження, конструктивна схема.

*Разработана математическая модель линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя (ЛИИЭП) циклического действия, система уравнений которой учитывает комплекс взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов. Решения этих уравнений представлены в рекуррентном виде. Исследованы процессы ЛИИЭП, протекающие при прямом ходе рабочего цикла. Показано, что к концу рабочего цикла значительная часть энергии сохраняется в емкостном накопителе энергии, а также преобразуется в тепловую энергию якоря и индуктора. При значительном числе рабочих циклов происходит недопустимый нагрев активных элементов ЛИИЭП. Для решения этой проблемы используется интенсивное охлаждение обмотки индуктора, подвижного якоря или их обоих, а также увеличение периода следования импульсов. Установлено, что при работе ЛИИЭП в циклическом режиме экспериментальные зависимости температуры нагрева обмотки индуктора с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами. Разработана конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора. Библ. 13, табл. 1, рис. 12.*

*Ключевые слова:* линейный импульсно-индукционный электромеханический преобразователь, циклическое действие, тепловое состояние, математическая модель, электромеханические и энергетические процессы, интенсивное охлаждение, экспериментальные исследования, конструктивная схема.

**Введение.** Линейные импульсно-индукционные электромеханические преобразователи (ЛИИЭП) находят применение во многих отраслях науки, техники и технологии. Они используются для очистки технологического оборудования и бункеров от остатков сыпучих грузов, испытаний ответственных изделий и устройств на ударные воздействия, обработки и формовки металлических конструкций. Такие преобразователи применяются в горнодобывающей промышленности и геологоразведке, в машиностроении при магнитно-импульсной сварке, штамповке, перфорации, в различных измерительных приборах, электромеханических ускорителях и др. [1-4].

Во многих технических системах ЛИИЭП должен обеспечивать непрерывную последовательность силовых импульсов с заданным периодом следования. В таком преобразователе в каждом рабочем цикле реализуется кратковременный период нагрузки (активный режим работы), при которой в активных элементах (индуктор и якорь) возбуждаются интенсивные токовые импульсы, и совершается прямой ход якоря с исполнительным элементом (ИЭ), и продолжительная пауза (пассивный режим работы). Во время пассивного режима осуществляется обратный ход якоря с ИЭ под действием, например возвратной пружины, и следующий за этим режим покоя якоря, при котором происходит заряд емкостного накопителя

энергии (ЕНЭ). Хотя такой режим напоминает повторно-кратковременный с малой продолжительностью включения для традиционных электрических машин, он обладает существенными особенностями [5, 6]. Это связано с тем, что импульсная нагрузка столь непродолжительна, что нарастание температуры в активных элементах ЛИИЭП происходит практически в адиабатических условиях.

При циклическом режиме работы подлежат исследованию:

- допустимые превышения температур активных элементов при заданном количестве рабочих циклов;
- период следования силовых импульсов, в пассивном режиме которого активные элементы ЛИИЭП охлаждаются до заданного теплового состояния;
- допустимое число циклов при заданном периоде следования импульсов и интенсивности охлаждения.

В ЛИИЭП при прямом ходе неподвижный индуктор, возбуждаемый от ЕНЭ, посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в электропроводящем якоря, который под действием электродинамических сил обеспечивает стремительное перемещение ИЭ при прямом ходе, оказывающего, например, ударно-силовое воздействие на объект. При обратном ходе якорь с ИЭ возвращается в первоначальное положение в зону максимальной магнит-

ной связи с индуктором, после чего следует пауза, во время которой осуществляется заряд ЕНЭ для последующего рабочего цикла. Таким образом, в рассматриваемых преобразователях с возвратно-поступательным движением якоря с ИЭ протекают сложные пространственно-временные, зависящие друг от друга импульсные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы [7].

Поскольку импульсные токовые нагрузки в ЛИИЭП многократно превышают аналогичные показатели электромеханических устройств продолжительного действия, то в циклическом режиме работы особую роль приобретают тепловые процессы, которые в значительной степени определяют условия и время работы преобразователя. В свою очередь, тепловое состояние ЛИИЭП существенно зависит от [6]:

- параметров и конструктивного выполнения индуктора, якоря и ЕНЭ;
- формы тока обмотки индуктора, определяемой электронной схемой возбуждения;
- частоты (периода) следования импульсов;
- характера движения якоря;
- интенсивности охлаждения активных элементов.

Однако до настоящего времени указанные тепловые процессы практически не исследованы, что можно объяснить сложным и взаимосвязанным характером процессов различной физической природы, которые, к тому же, зависят от конструктивного выполнения, назначения и условий работы ЛИИЭП. Особую актуальность приобретает вопрос о влиянии интенсивности охлаждения активных элементов преобразователя и длительности периода следования силовых импульсов на их тепловое состояние.

**Целью статьи** является исследования влияния интенсивности охлаждения активных элементов и периода следования силовых импульсов на тепловое состояние ЛИИЭП в циклическом режиме работы.

**Конструкция ЛИИЭП.** В качестве объекта исследования выбран ЛИИЭП циклического действия, ИЭ которого содержит подпружиненный боек, совершающий силовые импульсы по исследуемой плите, установленной снизу (рис. 1) [7].

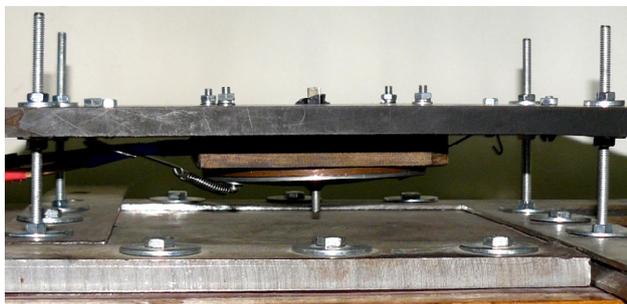


Рис. 1. Общий вид ЛИИЭП циклического действия

ЛИИЭП работает в условиях окружающей среды с естественным охлаждением. Электронная схема возбуждения индуктора обеспечивает серию однополярных токовых импульсов, что позволяет сохранять часть энергии в ЕНЭ к концу рабочего цикла [5].

ЛИИЭП коаксиальной конфигурации содержит неподвижный индуктор с двухслойной обмоткой

дисковой формы, которая намотана прямоугольной медной шиной, замонтирована эпоксидной смолой и уложена либо в толстостенный изоляционный (стеклотекстолитовый), либо в тонкостенный (1 мм) стальной каркас [8] (рис. 2). Особенность стального каркаса состоит в том, что через него можно обеспечить интенсивное воздушное или водяное охлаждением обмотки индуктора.

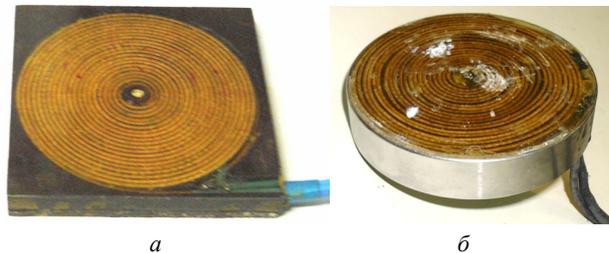


Рис. 2. Индукторы ЛИИЭП со стеклотекстолитовым (а) и стальным (б) каркасами

Коаксиально с индуктором установлен медный дисковый якорь, который соединен с силовым диском, обеспечивающим перемещение бойка в сторону объекта воздействия. Таким образом, ИЭ состоит из силового диска и бойка, которые выполнены из нержавеющей немагнитной стали.

К силовому диску присоединены возвратные пружины, обеспечивающие плотное прижатие якоря к индуктору до и после силового импульса. Основные параметры ЛИИЭП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ЛИИЭП

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр обмотки индуктора, мм	$D_{ex1}$	100
Внутренний диаметр обмотки индуктора, мм	$D_{in1}$	10
Высота обмотки индуктора, мм	$h_1$	10
Внешний диаметр якоря, мм	$D_{ex2}$	100
Внутренний диаметр якоря, мм	$D_{in2}$	10
Высота якоря, мм	$h_2$	2,5
Толщина изоляции между обмоткой индуктора и якорем, мм	$\Delta Z_0$	0,5
Число витков обмотки индуктора, шт	$w_1$	42
Сечение витка обмотки индуктора, мм <sup>2</sup>	$a \times b$	1,8×4,8
Коэффициент упругости возвратной пружины, кН/м	$K_p$	25,0
Масса ИЭ, кг	$m_a$	0,35
Емкость ЕНЭ, мкФ	$C$	3000
Зарядное напряжение ЕНЭ, В	$U_0$	310

**Математическая модель ЛИИЭП.** Математическая модель ЛИИЭП циклического действия должна в каждом рабочем цикле оперативно рассчитывать комплекс взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов, учитывать изменяемую магнитную связь между якорем и обмоткой индуктора при прямом ходе, изменение сопротивления обмотки индуктора и якоря из-за нагрева импульсными токами, комплекс сил, действующих на якорь, условия охлаждения и теплового взаимодейст-

вия активных элементов. При этом необходимо учитывать, что по сечению активных элементов наблюдаются незначительные температурные градиенты [6]. Полевые методы расчета целесообразно применять для исследования процессов ЛИИЭП при однократном режиме работы [9, 10].

В циклическом режиме работы целесообразно использовать цепную модель ЛИИЭП с сосредоточенными параметрами [11], а решения уравнений представить в рекуррентном виде, считая все параметры на интервале  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  неизменными [12].

**Электромагнитные процессы**, возникающие в ЛИИЭП при подключении к ЕНЭ, можно описать системой уравнений:

$$[R_1(T_1) + R_0] \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} +$$

$$+ v(t) i_2 \frac{dM_{12}}{dz} = 0, \quad \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt = U_0, \quad (1)$$

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

где  $n = 1, 2$  – индексы обмотки индуктора и якоря соответственно;  $R_n, L_n, T_n, i_n$  – активное сопротивление, индуктивность, температура и ток  $n$ -го элемента соответственно;  $C$  – емкость ЕНЭ, заряженного до напряжения  $U_0$ ;  $M_{12}(z) = M_{21}(z)$  – взаимная индуктивность между индуктором и якорем, перемещаемым вдоль оси  $z$  со скоростью  $v$ .

Обозначим

$$R_1 = R_1(T_1) + R_0; R_2 = R_2(T_2); M = M_{12}(z) = M_{21}(z).$$

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

$$a_3 = v; a_2 = \chi - 2Mv \frac{dM}{dz}; a_1 = R_1 R_2 + \frac{L_2}{C} - v^2 \left( \frac{dM}{dz} \right)^2;$$

$$a_0 = \frac{R_2}{C}; v = L_1 L_2 - M^2; \chi = R_1 L_2 + L_1 R_2.$$

Если дискриминант его характеристического уравнения меньше нуля, то все корни действительны и решение для токов после ряда преобразований представляется в рекуррентном виде [5]

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

где  $m = 2, 1$  при  $n = 1, 2$ ;

$$\delta = x_1 x_2 (x_2 - x_1) + x_1 x_3 (x_1 - x_3) + x_2 x_3 (x_3 - x_2);$$

$$\alpha_1 = (x_3 - x_2) \exp(x_1 \Delta t); \alpha_2 = (x_1 - x_3) \exp(x_2 \Delta t);$$

$$\alpha_3 = (x_2 - x_1) \exp(x_3 \Delta t);$$

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

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

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

$$\Omega_n = B_n + \frac{B_m v}{R_n} \frac{dM}{dz}; A_n = E_n + \frac{E_m v}{R_n} \frac{dM}{dz};$$

$$\gamma_1 = L_2; \gamma_2 = -M;$$

$$B_n = v^{-1} \left[ i_n(t_k) \left( Mv \frac{dM}{dz} - R_n L_m \right) + i_m(t_k) \times \right.;$$

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

$$E_1 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[ R_1 (R_2 M^2 + R_1 L_2^2 - C^{-1} L_2 v) - v M \times \right. \right.$$

$$\left. \times \frac{dM}{dz} (\chi + 2R_1 L_2) + v^2 (L_1 L_2 + M^2) \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right\} +$$

$$+ i_2(t_k) \left[ v (L_2 \chi + 2R_2 M^2) \frac{dM}{dz} - M R_2 \chi - v^2 M L_2 \times \right.$$

$$\left. \times \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] + u_c(t_k) \left( R_2 M^2 + L_2^2 R_1 - 2L_2 v M \frac{dM}{dz} \right);$$

$$E_2 = v^{-2} \left\{ i_1(t_k) \left[ M (C^{-1} v - R_1 \chi) + v (2R_1 M^2 + L_1 \chi) \times \right. \right.$$

$$\left. \times \frac{dM}{dz} - 2v^2 L_1 M \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] + i_2(t_k) \left[ R_2 (R_1 M^2 + R_2 L_1^2) - \right.$$

$$\left. \left[ -Mv (2L_1 R_2 + \chi) \frac{dM}{dz} + (L_1 L_2 + M^2) v^2 \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right] + \right.$$

$$\left. + u_c(t_k) \left[ v (L_1 L_2 + M^2) \frac{dM}{dz} - M \chi \right] \right\};$$

$u_c$  – напряжение ЕНЭ.

Если дискриминант характеристического уравнения для уравнения (3) больше нуля, то один из его корней действителен  $x_1 = d$ , а два других – комплексно сопряженные  $x_{2,3} = f \pm jg$ , и решение для токов приобретает вид:

$$i_n(t_{k+1}) = \left( \xi_n - \frac{\xi_m v}{R_n} \frac{dM}{dz} \right) \Big/ \left[ 1 - \frac{v^2}{R_1 R_2} \left( \frac{dM}{dz} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где

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

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

**Механические процессы** ЛИИЭП в общем случае можно описать уравнением:

$$i_1(t) i_2(t) \frac{dM}{dz}(z) = (m_a + m_2) \frac{dv}{dt} + K_P \Delta z(t) + K_T v(t) +$$

$$+ 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 v^2(t), \quad (6)$$

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.

На основании уравнения (6) величину перемещения якоря с ИЭ можно представить в виде рекуррентного соотношения [5]:

$$\Delta z(t_{k+1}) = \Delta z(t_k) + v(t_k)\Delta t + \mathcal{G} \cdot \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (7)$$

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

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

**Тепловые процессы** во многом определяются периодом работы ЛИИЭП в течение рабочего цикла. Так 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 [6]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k)\xi + (1 - \xi) \left[ \pi^{-1} i_n(t_k) R_n(T_n) (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} + 0,25\pi T_0 D_{en} H_n \alpha_{Tn} + T_m(t_k) \lambda_a(T) d_a^{-1} \right] \left\{ 0,25\pi \alpha_{Tn} D_{en} H_n + \lambda_a(T) d_a^{-1} \right\}^{-1}, \quad (8)$$

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:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k)\chi + (1 - \chi) \left[ T_0 + 4\pi^{-2} i_n(t_k) R_n(T_n) \alpha_{Tn}^{-1} \times D_{en}^{-1} H_n^{-1} (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} \right], \quad (9)$$

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) – (9):

$T_n(0) = T_0$  – 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.

**Функционирование ЛИИЭП при естественном охлаждении.** Электромеханические процессы ЛИИЭП при прямом ходе рабочего цикла с естественным охлаждением ( $\alpha_{Tn} = 20$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>) представлены на рис. 3. Плотность тока в обмотке индуктора  $j_1$  имеет форму полярного импульса с более длинным фронтом затухания по сравнению с фронтом нарастания. Максимальная величина индуцированной плот-

ности тока якоря  $j_2$  противоположной полярности более чем в 2 раза превышает величину плотности тока обмотки индуктора. Поскольку индуцированный ток якоря затухает быстрее, то через 0,8 мс он меняет полярность, возрастая до момента прекращения тока в обмотке индуктора. После этого ток якоря плавно затухает. Вследствие такой закономерности токовых импульсов электродинамическая сила вначале имеет характер отталкивания, а после 0,8 мс – характер незначительного притяжения между якорем и индуктором. После указанного времени результирующая сила  $f_z$ , действующая на якорь, становится тормозной. Последующее изменение тормозной силы обусловлено упругой деформацией возвратной пружины. Под действием указанных сил якорь с ИЭ совершает перемещение  $\Delta z$  со скоростью  $v$ , которая после 0,8 мс уменьшается под воздействием результирующей тормозной силы  $f_z$ .

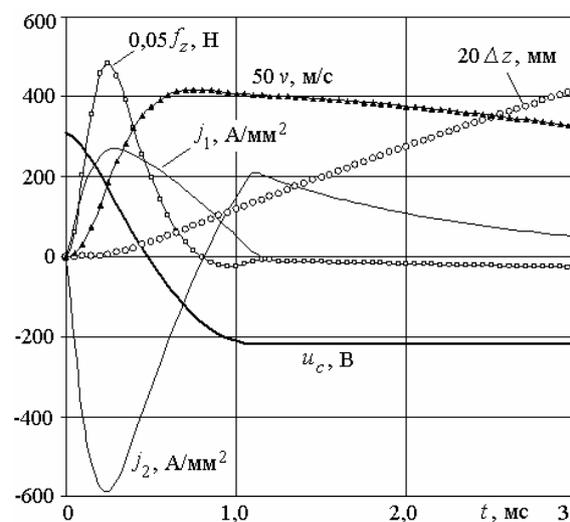


Рис. 3. Электромеханические характеристики ЛИИЭП

Рассмотрим энергетические процессы при прямом ходе рабочего цикла ЛИИЭП. При этом имеют место следующие энергетические составляющие:

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

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

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

Эффективность ЛИИЭП оценивается соотношением [5]

$$\eta = 100 \frac{(m_a + m_e)v^2 + K_P \Delta z^2}{C(U_0^2 - u_c^2)} \% \quad (10)$$

в конце прямого хода рабочего цикла.

На рис. 4 представлены относительные значения (помечены \*) энергетических составляющих при прямом ходе рабочего цикла ЛИИЭП.

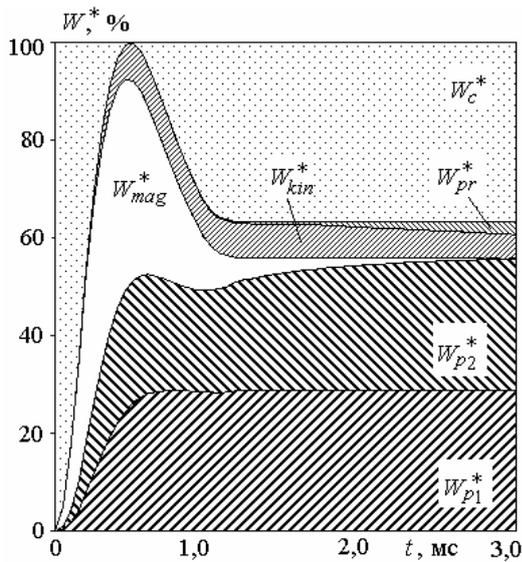


Рис. 4. Относительные значения энергетических составляющих при прямом ходе рабочего цикла ЛИИЭП

Как следует из представленных результатов, к концу рабочего цикла значительная часть энергии преобразуется в тепловую энергию якоря ( $W_{p2}^* = 26,8\%$ ) и индуктора ( $W_{p1}^* = 28,7\%$ ). Именно этим и объясняется низкая эффективность ЛИИЭП, составляющая в конце прямого хода  $\eta = 19,5\%$ . Отметим, что значительная часть энергии сохраняется в ЕНЭ ( $W_c^* = 36,7\%$ ).

Тепловая энергия приводит к росту превышений температур индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$ . При этом необходимо учитывать, что в активном режиме при прямом ходе якоря с ИЭ отсутствует тепловая связь между якорем и индуктором. А в пассивном режиме после того, как якорь под действием возвратной пружины занимает исходное положение, происходит тепловое взаимодействие между активными элементами ЛИИЭП. Такое тепловое взаимодействие особенно проявляет свое влияние при работе ЛИИЭП в циклическом режиме.

На рис. 5 представлены превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе ЛИИЭП с естественным охлаждением в циклическом режиме работы. Рассмотрены первые четыре рабочих цикла с периодом следования импульсов  $T_{imp} = 1$  с. На данном рисунке показан короткий (5 мс) активный режим работы ЛИИЭП, при котором осуществляется прямой ход якоря, и длительный (995 мс) пассивный режим работы, при котором якорь в основном находится в тепловом контакте с обмоткой индуктора.

В активном режиме работы ЛИИЭП происходит рост превышений температур индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$ . При этом превышение температуры индуктора  $\theta_1$  меньше, чем у якоря  $\theta_2$  на первоначальных рабочих циклах. В пассивном режиме из-за теплового контакта происходит рост превышения температуры обмотки индуктора и снижение превышения температуры якоря. Причем с увеличением числа рабочих циклов указанная закономерность проявляется сильнее из-за возрастающей разности между температурами якоря и обмотки индуктора.

При значительном числе рабочих циклов наблюдаются недопустимо высокие превышения темпера-

тур, при которых происходит размягчение эпоксидной смолы обмотки индуктора: после 400 циклов превышение температуры обмотки индуктора составляет  $\theta_1 = 110^\circ\text{C}$ , а после 800 циклов  $\theta_1 = 170^\circ\text{C}$ . При этом превышения температур обмотки индуктора и якоря практически выравниваются.

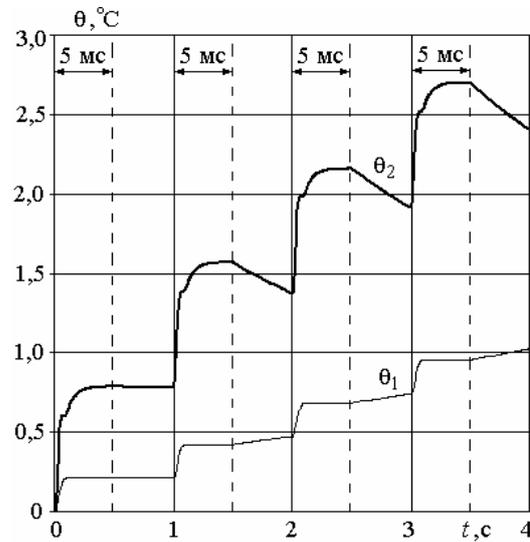


Рис. 5. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе в циклическом режиме ( $T_{imp} = 1$  с)

**Пути уменьшения нагрева ЛИИЭП.** Одним из путей решения проблемы недопустимо высокого нагрева, что особенно важно для компаундированной эпоксидной смолой обмотки индуктора, является интенсивное охлаждение ее или якоря.

Рассмотрим влияние на тепловое состояние ЛИИЭП интенсивного водяного ( $\alpha_{Tn} = 2 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) охлаждения одного или обоих активных элементов. На рис. 6 показана динамика превышений температуры обмотки индуктора и якоря при интенсивном охлаждении индуктора (режим охлаждения I), якоря (режим охлаждения II) и их совместном охлаждении (режим охлаждения III) за первые 4 цикла с периодом следования импульсов  $T_{imp} = 1$  с.

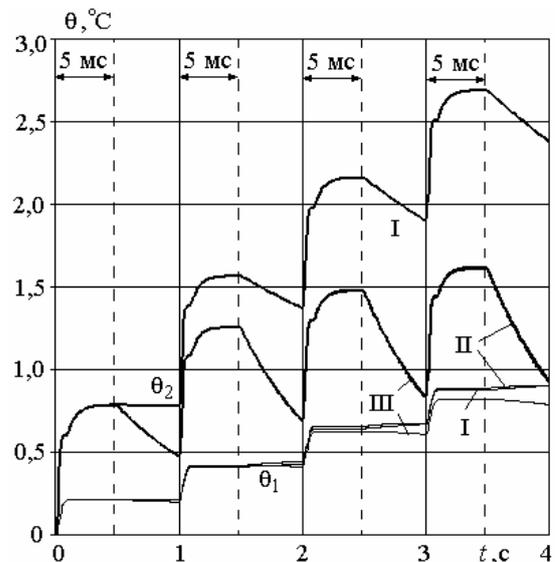


Рис. 6. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$  при работе в циклическом режиме ( $T_{imp} = 1$  с) в режимах охлаждения I, II и III

При использовании режима охлаждения I превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  уменьшается за первые 4 цикла на 12 %, в то время как превышение температуры якоря  $\theta_2$  практически не изменяется. В режиме охлаждения II превышение температуры якоря снижается на 61%, в то время как обмотки индуктора – только на 12 %. В режиме охлаждения III наименьшее превышение возникает как в обмотке индуктора (23 %), так и в якоря (62 %). При этом в пассивном режиме превышение температуры якоря  $\theta_2$  существенно уменьшается, а  $\theta_1$  обмотки индуктора практически не изменяется. Нагрев активных элементов заметно меняется при длительной работе ЛИИЭП. На рис. 7 показана динамика превышений температуры активных элементов ЛИИЭП при работе в течение 100 с ( $T_{imp}=1$  с).

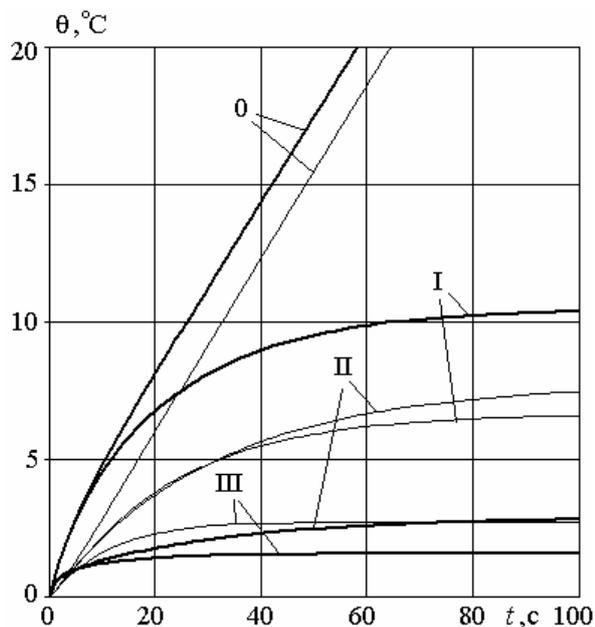


Рис. 7. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  (тонкие линии) и якоря  $\theta_2$  (жирные линии) при работе в циклическом режиме ( $T_{imp}=1$  с) в режимах охлаждения I, II и III

Как следует из представленных зависимостей, интенсивное охлаждение хотя бы одного из активных элементов практически предотвращает недопустимый нагрев обоих элементов. Превышения температур активных элементов достигают некоторых значений, после которых практически не меняются. Таким образом, интенсивное охлаждение одного из активных элементов ЛИИЭП уменьшает температуру нагрева и другого элемента. Так за 100 рабочих циклов при использовании режима охлаждения I превышение температуры якоря составляет  $\theta_2 = 10,4$   $^\circ\text{C}$ , а в режиме охлаждения II – превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1 = 7,5$   $^\circ\text{C}$ .

Другим путем уменьшения нагрева активных элементов ЛИИЭП является увеличение периода следования импульсов, при котором увеличивается пассивный период, а значит и время взаимодействия индуктора и якоря.

На рис. 8 показана динамика превышений температур активных элементов ЛИИЭП для четырех начальных рабочих циклов при периоде следования

$T_{imp}=5$  с. С увеличением периода следования импульсов происходит заметное снижение превышений температур активных элементов.

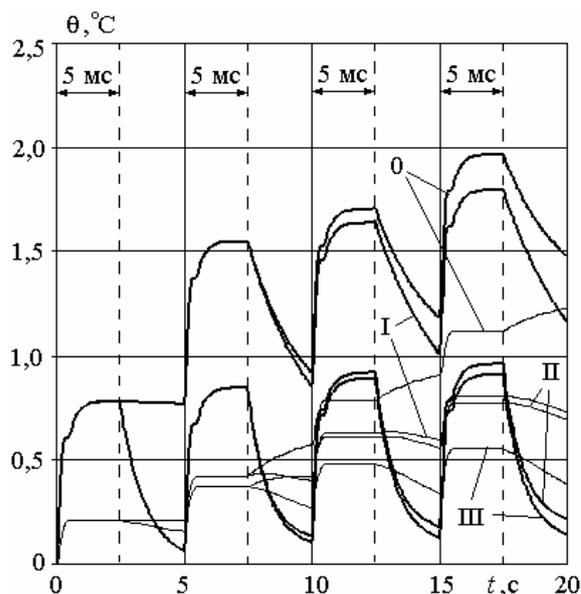


Рис. 8. Превышения температур обмотки индуктора  $\theta_1$  (тонкие линии) и якоря  $\theta_2$  (жирные линии) при работе в циклическом режиме ( $T_{imp}=5$  с) с естественным охлаждением (0) и в режимах охлаждения I, II и III

При периоде следования импульсов  $T_{imp}=5$  с наблюдается существенное снижение превышений температур якоря  $\theta_2$  в пассивном режиме работы ЛИИЭП, в том числе при естественном охлаждении (0). Превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  в пассивном режиме работы ЛИИЭП происходит только при естественном охлаждении (0). В режимах охлаждения I, II и III превышение температуры обмотки индуктора  $\theta_1$  также уменьшается.

На рис. 9 показана динамика относительного превышения температур индуктора  $\theta_1^*$  и якоря  $\theta_2^*$  при естественном и интенсивном охлаждении индуктора, якоря и их обоих в зависимости от величины  $T_{imp}$  за 100 импульсов. Значения превышений температур нормированы соответствующими значениями при  $T_{imp}=1$  с. Как следует из представленных значений, увеличение периода следования импульсов  $T_{imp}$  приводит к уменьшению превышений температур как индуктора  $\theta_1$ , так и якоря  $\theta_2$  при любом способе охлаждения. Однако при работе с естественным охлаждением превышения температур обмотки индуктора и якоря при увеличении периода следования импульсов уменьшаются практически линейно и незначительно. Так при  $T_{imp}=5$  с по сравнению с  $T_{imp}=1$  с превышение температуры индуктора  $\theta_1$  уменьшается на 23 %, а  $\theta_2$  якоря – на 28 %.

При интенсивном охлаждении, по крайней мере, одного из активных элементов ЛИИЭП, при аналогичном увеличении периода следования импульсов превышения температур активных элементов уменьшается на 80-90 %. Отметим, что наиболее сильное снижение (на 67-77 %) превышений температур происходит при увеличении  $T_{imp}$  от 1 с до 2 с. При дальнейшем увеличении периода следования импульсов

уменьшение превышений температур происходит намного медленнее.

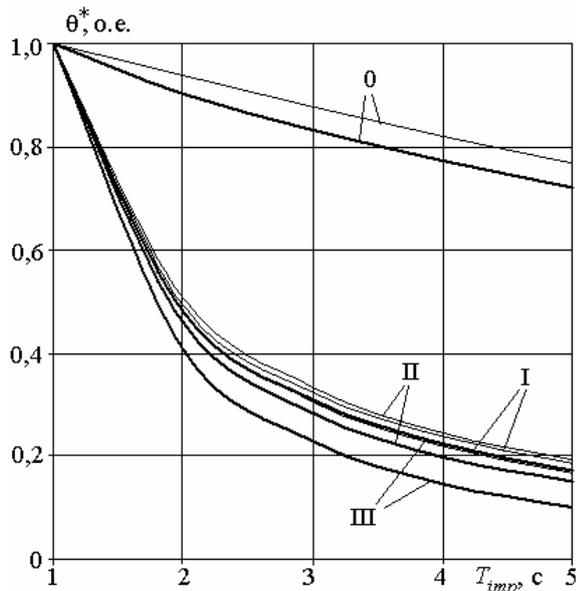


Рис. 9. Динамика относительных превышений температур обмотки индуктора  $\theta_1^*$  (тонкие линии) и якоря  $\theta_2^*$  (жирные линии) при естественном охлаждении (0) и режимах охлаждения I, II и III за 100 импульсов в зависимости от  $T_{imp}$

Таким образом, интенсивное охлаждение одного из активных элементов ЛИИЭП позволяет существенно уменьшить превышения температур обоих активных элементов.

**Экспериментальные исследования.** Для проверки основных теоретических результатов была изготовлена экспериментальная установка, представленная на рис. 10,а.

Экспериментальный образец ЛИИЭП содержит неподвижный индуктор с двухслойной обмоткой дисковой формы, которая намотана прямоугольной медной шиной, замоноличена эпоксидной смолой и уложена либо в толстостенный стеклотекстолитовый каркас, либо в тонкостенный стальной каркас с возможностью интенсивного охлаждения (рис. 2).



Рис. 10. Экспериментальная установка для исследования ЛИИЭП с тонкостенным стальным каркасом (а) и процесс измерения температуры (б)

Интенсивное охлаждение создавалось направленным потоком холодного воздуха на стальной каркас. Были проведены измерения температуры на поверхности обмотки индуктора ЛИИЭП при работе в циклическом режиме с периодом следования импульсов  $T_{imp}=1$  с. Измерение температуры обмотки проводилось при помощи термопары прибора М 890G. При

измерениях датчик с термопарой устанавливался в наиболее напряженном в тепловом отношении участке – на середине открытой стороны обмотки.

Было установлено, что обмотка индуктора со стальным каркасом, обдуваемым воздухом, нагревается слабее, чем обмотка с изоляционным каркасом (рис. 11). Заметим, что за время 270 с температура обмотки с изоляционным каркасом увеличивалась так, что ее эпоксидная смола размягчалась. Было установлено, что экспериментальные зависимости с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами.

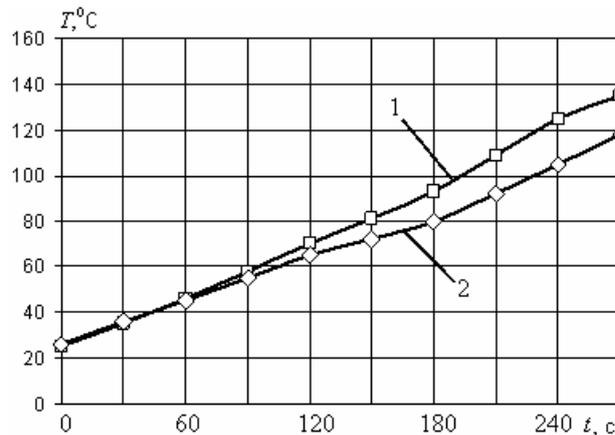


Рис. 11. Экспериментальные зависимости температуры на поверхности обмотки индуктора с изоляционным (1) и стальным (2) каркасами ЛИИЭП при работе с  $T_{imp}=1$  с

### Конструктивная схема ЛИИЭП с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора.

Поскольку применение интенсивного водяного охлаждения для подвижного якоря сопряжено с целым рядом конструктивных трудностей, то указанное охлаждение целесообразно применить только для неподвижной обмотки индуктора. Исходя из этого, разработана конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия, которая представлена на рис. 12 [13].

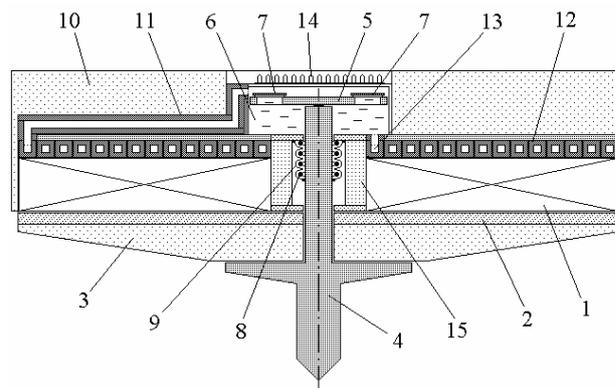


Рис. 12. Конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора

В ЛИИЭП циклического действия при возбуждении обмотки 1 индуктора от ЕНЭ магнитное поле индуцирует токи в электропроводящем якоре 2 вихревые токи. Возникающая между ними электродинамическая сила перемещает якорь 2 вместе с ударным диском 3 и бойком 4. Направляющая часть бойка соединена с плоским поршнем 5, расположенным

внутри охлаждающей камеры 6 с водой. Упорядочено расположенные на плоском поршне 5 односторонние клапаны 7 при прямом ходе якоря свободно пропускают воду. При этом возвратная пружина 8 и охватывающий ее упругий гидроизоляционный сильфон 9 растягиваются. Охлаждающая камера 6 расположена в изоляционном корпусе 10.

После совершения прямого хода под действием пружины 8 якорь 2 с бойком 4 совершают обратный ход, и односторонние клапаны 7 закрываются. Поршень 5 толкает воду, которая выдавливается из камеры 6. Она поступает во входной конец 11 намотанной в форме диска трубки 12, проходит по ее внутреннему каналу и через выходной конец 13 поступает в камеру 6. Циркулирующая таким образом в трубке 12 вода отводит тепловую энергию, выделяемую в обмотке 1, предотвращая нагрев обоих активных элементов, поскольку между ними происходит тепловое взаимодействие в пассивном режиме работы ЛИИЭП. Тепло нагретой воды отводится из охлаждающей камеры 6 в окружающее пространство через установленные на ее внешней стороне радиаторы 14. Направляющая втулка 15 служит технологическим каркасом для обмотки 1 индуктора и защищает гидроизоляционный сильфон 9 от механических воздействий. Поскольку поршень 5 при обратном ходе подвергается действию силы сопротивления, вызванной, в основном, гидравлическим сопротивлением воды во внутреннем канале 13 многовитковой трубки 12, то происходит плавное движение бойка 4 в сторону обмотки 1 индуктора. Таким образом, осуществляется безударное контактирование якоря 2 с обмоткой 1 индуктора.

#### Выводы.

1. Разработана математическая модель ЛИИЭП циклического действия, учитывающая комплекс взаимосвязанных электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов.

2. Исследованы электромагнитные, электромеханические и энергетические процессы ЛИИЭП, возникающие при прямом ходе рабочего цикла. Показано, что к концу рабочего цикла значительная часть энергии преобразуется в тепловую энергию якоря (26,8 %) и индуктора (28,7 %).

3. При значительном числе рабочих циклов с периодом следования импульсов  $T_{imp}=1$  с наблюдаются недопустимо высокие превышения температур активных элементов ЛИИЭП.

4. Одним из путей решения проблемы нагрева обмотки индуктора является интенсивное охлаждение ее, подвижного якоря или их обоих. При этом превышения температур активных элементов достигают определенных значений, после которых практически не изменяются.

5. Увеличение периода следования импульсов приводит к снижению превышений температур активных элементов ЛИИЭП. С увеличением указанного периода при естественном охлаждении превышения температур активных элементов уменьшаются практически линейно и незначительно. При интенсивном охлаждении, по крайней мере, одного из активных элементов превышения температур активных элементов уменьшаются на 80-90 %.

6. Проведены измерения температуры на поверхности обмотки индуктора ЛИИЭП при работе в циклическом режиме с периодом следования импульсов  $T_{imp}=1$  с. Установлено, что обмотка индуктора со стальным каркасом, обдуваемым воздухом, нагревается медленнее, чем обмотка с изоляционным каркасом. Экспериментальные зависимости с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами.

7. Разработана конструктивная схема ЛИИЭП циклического действия с интенсивным водяным охлаждением обмотки индуктора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical. – Stockholm, Sweden. – 2013. – 120 p.
2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – №3. – С. 44-52.
3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // Measurement Techniques. – 2014. – vol.56. – iss.10. – pp. 1098-1104. doi: 10.1007/s11018-014-0337-z.
4. Наумов И.В., Болюх В.Ф., Бреславский Д.В. Деформирование и разрушение пластин при нагружении цилиндрическим ударником // Механіка та машинобудування. – 2010. – №1. – С. 207-216.
5. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
6. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – vol.83. – no.10. – pp. 571-576. doi: 10.3103/s1068371212100045.
7. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter // Russian electrical engineering. – 2011. – vol.82. – no.2. – pp. 104-110. doi: 10.3103/s1068371211020027.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter // Russian Electrical Engineering. – 2015. – vol.86. – no.7. – pp. 425-431. doi: 10.3103/s1068371215070044.
9. 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.
10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
11. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – vol.39. – no.1. – pp. 382-389. doi: 10.1109/tps.2010.2047276.
12. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering. – 2004. – vol.75. – no.12. – pp. 1-11.
13. Пат РФ № 2467455. Индукционно-динамический электродвигатель циклического действия / Болюх В.Ф., Лучук В.Ф., Щукин И.С. – Заявка №. 2011107038/07– Заявл. 24.02.2011. – Опубл. 20.11.2012.

#### REFERENCES

1. Bissal A. Licentiate thesis on the design of ultra-fast electromechanical. Stockholm, Sweden. 2013. 120 p.
2. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Artillery and small arms*, 2008, no.3, pp. 44-52.

3. Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I. Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*, 2014, vol.56, iss.10, pp. 1098-1104. doi: **10.1007/s11018-014-0337-z**.
4. Naumov I.V., Bolyukh V.F., Breslavskiy D.V. Deformation and fracture of the plates during loading cylindrical drummer. *Mechanics and engineer*, 2010, no.1, pp. 207-216. (Rus).
5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
6. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*, 2012, vol.83, no.10, pp. 571-576. doi: **10.3103/s1068371212100045**.
7. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S. High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*, 2011, vol.82, no.2, pp. 104-110. doi: **10.3103/s1068371211020027**.
8. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction-dynamic converter. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol.86, no.7, pp. 425-431. doi: **10.3103/s1068371215070044**.
9. 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**.
10. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. *Mul'tifizicheskoe modelirovanie v elektrotekhnike* [Multiphysical modeling in electrical engineering]. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus).
11. L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, Z. Yadong. Improvement of Current Filament Method and Its Application in Performance Analysis of Induction Coil Gun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol.39, no.1, pp. 382-389. doi: **10.1109/tps.2010.2047276**.
12. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2004, vol.75, no.12, pp. 1-11.
13. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Induktsionno-dinamicheskii elektrodvigatel' tsiklicheskogo deistviia* [Induction-dynamic electric motor of cyclic action]. Patent Russian Federation, no. 2467455, 2012. (Rus).

Поступила (received) 28.06.2017

Болюх Владимир Федорович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
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>, 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,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action.

**Purpose.** Investigation of the influence of the intensity of cooling of active elements and the period of succession of power pulses

on the thermal processes of linear pulse-induction electromechanical converter (LPIEC) operating in a cyclic mode. **Methodology.** The electromechanical and energy processes of LPIEC, which arise during the direct course of the working cycle, are investigated. It is shown that by the end of the operating cycle, a significant part of the energy is stored in the capacitive energy storage device, and is also converted into thermal energy of the armature and inductor. With a significant number of operating cycles, an unacceptably high temperature rise of LPIEC active elements occurs. To solve this problem, intensive cooling of the winding of the inductor, the movable armature or both of them, as well as an increase in the pulse repetition period are used. It has been experimentally established that when the LPIEC is operating in a cyclic mode, the inductor winding with a steel frame blown with air is heated more slowly than the winding with an insulating frame. The experimental dependences with an accuracy of 6 % coincide with the calculated results. A constructive scheme of the LPIEC of cyclic action with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. **Results.** A mathematical model of the LPIEC of cyclic action is developed, taking into account a complex of interrelated electromechanical and thermal processes. The solutions of its equations are represented in a recurrent form. The electromechanical and energy processes of LPIEC, which arise during the direct course of the working cycle, are investigated. It is shown that for a considerable number of operating cycles, unacceptably high temperature excesses of active elements of the LPIEC are observed. It is shown that intensive cooling of the winding of the inductor, the movable armature or both of them, and also the increase in the pulse repetition period ensure the temperature stabilization of the LPIEC. Measurements of the temperature on the surface of the winding of the inductor LPIEC during cyclic operation are carried out. A constructive scheme of the LPIEC of cyclic action with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. **Originality.** A mathematical model of the LPIEC of cyclic action is developed, taking into account a complex of interrelated electromechanical and thermal processes. The solutions of its equations are represented in a recurrent form. It is shown that by the end of the working cycle a significant part of the energy is converted into thermal energy of the armature and inductor. It is determined that for a significant number of operating cycles, unacceptably high temperature excesses of active elements of the LPIEC are observed. It is shown that intense cooling of active elements, as well as an increase in the pulse repetition period, ensure the temperature stabilization of the LPIEC. A design scheme of the LPIEC with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. **Practical value.** It is shown that by thermal cooling of at least one of the active elements and by increasing the pulse repetition period, the temperature stabilization of the LPIEC is ensured. A constructive scheme of the LPIEC of cyclic action with intensive cooling of the stationary winding of the inductor has been developed. References 13, tables 1, figures 12.

**Key words:** linear pulse-induction electromechanical converter, cyclic action, thermal state, mathematical model, electromechanical and energy processes, intensive cooling, experimental studies, constructive scheme.