

В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, И.С. Шукин

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА ОТ ИСТОЧНИКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Розроблена ланцюгова математична модель лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу при збудженні від джерела змінного струму, в якій рішення рівнянь, що описують взаємопов'язані електричні, магнітні, механічні та теплові процеси, які представлені в рекурентному вигляді. Встановлено, що при роботі перетворювача в ударно-силовому режимі електродинамічна сила змінюється з подвійною частотою, приймаючи як позитивні, так і негативні значення. Позитивні значення сили перевищують негативні і величина імпульсу електродинамічної сили з кожним періодом підвищується. В залежності від початкової фази напруги відносна зміна величини імпульсу сили складає 1,5 %. При роботі перетворювача в швидкісному режимі максимальний струм в обмотці індуктора в перший півперіод має найбільше значення, але через декілька періодів приймає постійне значення. В залежності від початкової фази напруги відносна зміна максимальної швидкості обмотки якоря складає 2,5 %. Бібл. 16, рис. 5.

Ключові слова: лінійний електромеханічний перетворювач індукційного типу, математична модель, швидкісний і ударно-силовий режим роботи, джерело змінного струму, максимальна швидкість, імпульс електродинамічної сили.

Разработана цепная математическая модель линейного электромеханического преобразователя индукционного типа при возбуждении от источника переменного тока, в которой решения уравнений, описывающие взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, представлены в рекуррентном виде. Установлено, что при работе преобразователя в ударно-силовом режиме электродинамическая сила изменяется с удвоенной частотой, принимая как положительные, так и отрицательные значения. Положительные значения силы превышают отрицательные и величина импульса электродинамической силы с каждым периодом увеличивается. В зависимости от начальной фазы напряжения относительное изменение величины импульса силы составляет 1,5 %. При работе преобразователя в скоростном режиме максимальный ток в обмотке индуктора в первый полупериод имеет наибольшее значение, но через несколько периодов принимает постоянное значение. В зависимости от начальной фазы напряжения относительное изменение максимальной скорости обмотки якоря составляет 2,5 %. Библ. 16, рис. 5.

Ключевые слова: линейный электромеханический преобразователь индукционного типа, математическая модель, скоростной и ударно-силовой режим работы, источник переменного тока, максимальная скорость, импульс электродинамической силы.

Введение. Линейные электромеханические преобразователи (ЛЭМП) индукционного типа используются для разгона исполнительного элемента до высокой скорости на коротком активном участке и для создания мощных силовых импульсов на объект воздействия при незначительном перемещении указанного элемента [1-4]. Такие преобразователи функционируют в скоростном (ускорительном) и ударно-силовом режимах. Они используются в качестве исполнительных элементов электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [5-7].

В ЛЭМП индукционного типа подвижный якорь, выполненный в виде одно- или многовитковой короткозамкнутой обмотки, индукционно взаимодействует с неподвижной обмоткой индуктора. В преобразователе коаксиальной конфигурации обмотки выполнены в форме дисков. Обмотка якоря установлена и перемещается аксиально относительно обмотки индуктора. При возбуждении обмотки индуктора от источника питания протекающий в ней ток посредством магнитного поля индуцирует ток в обмотке якоря. Возникающие при этом электродинамические силы между обмотками посредством подвижной обмотки якоря передаются на исполнительный элемент.

Наиболее распространено возбуждение ЛЭМП от высоковольтного емкостного накопителя энергии [2, 8]. Однако при этом необходимо специальное высоковольтное оборудование и соответствующее ис-

полнение обмоток. Кроме того, такое возбуждение происходит в течение относительно короткого промежутка времени, что может ограничивать ряд показателей и технических применений преобразователя.

В свое время рассматривались иные источники возбуждения ЛЭМП индукционного типа, например, индуктивный и переменного тока повышенной частоты [9]. В работе [10] исследовался источник переменного тока для электромеханического ускорителя цилиндрической конфигурации, в котором обмотка якоря коаксиально перемещается внутри обмотки индуктора. При этом рассматривались следующие варианты:

- 1) возбуждение от источника повышенной частоты;
- 2) возбуждение от источника, частота которого повышается по мере ускорения обмотки якоря;
- 3) намотка обмотки индуктора с увеличивающимся шагом, которая возбуждается от источника неизменной частоты.

Вариант №2 требует специального генератора. Вариант №3 целесообразен только для ускорителя, в котором обмотка якоря перемещается внутри обмотки индуктора. Вариант №1 получил развитие в работе [11], где описан электромеханический ускоритель, в котором внутри ряда аксиально установленных секций обмотки индуктора разгонялась обмотка якоря. Секции обмотки индуктора по мере перемещения обмотки якоря последовательно подключались к сек-

© В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, И.С. Шукин

циям источника переменного тока, в каждой из которых частота переменного тока была постоянной, но повышенной по отношению к частоте предыдущей секции. Заметим, что такая система возбуждения сложна и требует сложной системы коммутации.

Все исследования источников возбуждения касались ЛЭМП, работающего в скоростном режиме, при котором время эффективного взаимодействия ускоряемой обмотки якоря с обмоткой индуктора незначительно. Но при работе в ударно-силовом режиме указанное время взаимодействия может быть значительным, ограничиваясь иными факторами, например тепловыми.

Целью статьи является установление основных закономерностей работы ЛЭМП индукционного типа при работе в скоростном и ударно-силовом режимах и возбуждении от источника переменного тока повышенной частоты.

Математическая модель ЛЭМП. Рассмотрим математическую модель ЛЭМП индукционного типа в скоростном режиме, при котором магнитная связь между обмотками изменяется в процессе возбуждения обмотки индуктора. В данной модели используем сосредоточенные параметры неподвижной обмотки индуктора и ускоряемой обмотки якоря [12]. Для учета взаимосвязанных электрических, магнитных, механических и тепловых процессов, а также ряда нелинейных зависимостей, например сопротивления от температуры, решения уравнений, описывающих указанные процессы, представим в рекуррентном виде [9, 13].

Для расчета показателей и временных характеристик ЛЭМП используем алгоритм циклического действия. Для этого рабочий процесс разбивается на ряд численно малых интервалов времени $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, в пределах которых все величины считаются неизменными. На k -ом цикле, используя в качестве начальных значений параметры, рассчитанные в момент времени t_k , осуществляется расчет параметров в момент времени t_{k+1} .

Для определения токов на интервале времени Δt используем линейные уравнения с неизменными значениями параметров. Малую величину расчетного шага Δt выбираем таким образом, чтобы она не оказывала существенного влияния на результаты расчета на ЭВМ, обеспечивая при этом необходимую точность.

Начальные условия математической модели:

$T_n(0) = T_0$ – температура n -ой обмотки; $i_n(0) = 0$ – ток n -ой обмотки; $h_z(0) = h_{z0}$ – расстояние между обмотками; $u(0) = U_m \sin \psi_u$ – напряжение источника переменного тока; $v_z(0) = 0$ – скорость обмотки якоря вдоль оси z .

Поскольку индуктор и якорь выполнены в виде многовитковых плотно намотанных обмоток, то для них целесообразно использовать понятия индуктивности и взаимной индуктивности. Изменение пространственного положения обмотки якоря учитывается изменением потокосцепления Ψ между обмотками [14]:

$$\frac{d\Psi_n}{dt} = M(z) \frac{di_n}{dt} + v_z(t) \cdot i_n \frac{dM}{dz}, \quad (1)$$

где $n = 1, 2$ – индексы обмоток индуктора и якоря соответственно; $M(z)$ – взаимная индуктивность между обмотками; v_z – скорость перемещения обмотки якоря вдоль оси z ; i_n – ток n -й обмотки.

В таком случае электрические процессы в обмотках ЛЭМП можно описать системой уравнений:

$$R_1(T_1)i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + i_2 v_z(t) \frac{dM_{12}}{dz} = u(t), \quad (2)$$

$$R_2(T_2)i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + i_1 v_z(t) \frac{dM_{21}}{dz} = 0, \quad (3)$$

где $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ – напряжение источника питания; R_n, L_n, T_n – активное сопротивление, индуктивность, температура и ток n -ой обмотки соответственно.

Введем обозначения: $R_1 = R_1(T_1); R_2 = R_2(T_2); M = M_{12}(z) = M_{21}(z); v_z = v_z(t); u = u(t)$.

Решения для токов будем находить в виде:

$$i_1 = \frac{u}{R_1} - \beta \frac{i_2}{R_1} + A_{11} \exp(\alpha_1 t) + A_{12} \exp(\alpha_2 t), \quad (4)$$

$$i_2 = -\beta \frac{i_1}{R_1} + A_{21} \exp(\alpha_1 t) + A_{22} \exp(\alpha_2 t), \quad (5)$$

где $\alpha_{1,2} = -0.5\zeta\chi^{-1} \pm \left\{ 0.25\zeta^2\chi^{-2} - [R_1R_2 - \beta^2]\chi^{-1} \right\}^{-1/2}$ – корни характеристического уравнения для свободной составляющей, описываемой дифференциальным уравнением

$$\chi \frac{d^2 i_l}{dt^2} + \zeta \frac{di_l}{dt} + (R_l R_2 - \beta^2) i_l = 0, \quad (6)$$

$\beta = v_z \frac{dM}{dz}$; $\zeta = L_1 R_2 + L_2 R_1 - 2\beta M$; $\chi = L_1 L_2 (1 - K_M^2)$;

$K_M = M(L_1 L_2)^{-0.5}$ – коэффициент магнитной связи между обмотками; $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ – произвольные постоянные, определяемые в момент времени t_k для свободной составляющей токов, равные

$$A_{1l} = \frac{\alpha_m \left[i_2(t_k) \beta R_1^{-1} - u(t_k) R_1^{-1} + i_1(t_k) \right] - \Xi}{(\alpha_m - \alpha_l) \exp(\alpha_l t_k)}; \quad (7)$$

$$A_{2l} = \frac{\alpha_m \left[i_2(t_k) + i_1(t_k) \beta R_2^{-1} \right] - \Omega}{(\alpha_m - \alpha_l) \exp(\alpha_l t_k)}, \quad (8)$$

где $l = 1, 2; m = 3 - l$;

$$\Xi = \frac{1}{L_1 (1 - K_M^2)} \left\{ u(t_k) + i_1(t_k) \left(\beta \frac{M}{L_2} - R_1 \right) + i_2(t_k) \left(\frac{MR_2}{L_2} - \beta \right) \right\};$$

$$\Omega = \frac{1}{L_2 (1 - K_M^2)} \left\{ i_2(t_k) \left(\beta \frac{M}{L_1} - R_2 \right) - u(t_k) \frac{M}{L_1} + i_1(t_k) \left(\frac{MR_1}{L_1} - \beta \right) \right\}.$$

В окончательном виде токи в обмотках ЛЭМП описываются выражениями:

$$i_1(t_{k+1}) = -\frac{i_2(t_k)v_z(t_k)}{R_1} \frac{dM}{dz} + (u(t_k) - R_1 i_1(t_k) - i_2(t_k)v_z(t_k)) \times$$

$$\times \frac{dM}{dz} \left(\frac{\alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t) - \alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t)}{R_1(\alpha_2 - \alpha_1)} + \frac{u(t_k)}{R_1} + \right.$$

$$\left. + \frac{\exp(\alpha_2 \Delta t) - \exp(\alpha_1 \Delta t)}{L_1 L_2 (\alpha_2 - \alpha_1) (1 - K_M^2)} \left[u(t_k) L_2 + \left[v_z(t_k) M \frac{dM}{dz} - R_1 L_2 \right] \times \right. \right.$$

$$\left. \times i_1(t_k) + \left[R_2 M - v_z(t_k) L_2 \frac{dM}{dz} \right] i_2(t_k) \right\};$$

$$i_2(t_{k+1}) = -\frac{i_1(t_k)v_z(t_k)}{R_2} \frac{dM}{dz} + \left[i_2(t_k) + \frac{i_1(t_k)v_z(t_k)}{R_2} \frac{dM}{dz} \right] \times$$

$$\times \frac{\alpha_2 \exp(\alpha_1 \Delta t) - \alpha_1 \exp(\alpha_2 \Delta t)}{\alpha_2 - \alpha_1} + \frac{\exp(\alpha_2 \Delta t) - \exp(\alpha_1 \Delta t)}{L_1 L_2 (\alpha_2 - \alpha_1) (1 - K_M^2)} \times$$

$$\times \left\{ i_1(t_k) \left[R_1 M - v_z(t_k) L_1 \frac{dM}{dz} \right] - u(t_k) M + i_2(t_k) \times \right.$$

$$\left. \times \left[v_z(t_k) M \frac{dM}{dz} - R_2 L_1 \right] \right\},$$

где $u(t_k) = U_m \sin(\omega t_k + \psi_u)$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Величину перемещения обмотки якоря вместе с исполнительным элементом относительно неподвижной обмотки индуктора можно представить в виде рекуррентного соотношения [15]:

$$h_z(t_{k+1}) = h_z(t_k) + v_z(t_k) \Delta t + \mathcal{G} \cdot \Delta t^2 / (m_a + m_2), \quad (11)$$

где $v_z(t_{k+1}) = v_z(t_k) + \mathcal{G} \cdot \Delta t / (m_a + m_2)$ – скорость обмотки якоря вместе с исполнительным элементом;

$$\mathcal{G} = f_z(z, t) - K_T v_z(t_k) - 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{e2}^2 v_z^2(t_k);$$

$$f_z(z, t) = i_1(t_k) i_2(t_k) \frac{dM}{dz}(z) - \text{мгновенное значение}$$

аксиальной электродинамической силы между обмотками; m_2, m_a – масса обмотки якоря и исполнительного элемента соответственно; h_z – величина перемещения обмотки якоря; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность среды перемещения; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{e2} – наружный диаметр исполнительного элемента.

При работе ЛЭМП в ударно-силовом режиме между обмотками существует тепловой контакт через изоляционную прокладку. Температуру n -ой обмотки при этом можно описать рекуррентным соотношением [16]:

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \xi + (1 - \xi) \left[\pi^{-1} i^2(t_k) R_n(T_n) (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} + \right.$$

$$\left. + 0,25 \pi T_0 D_{en} H_n \alpha_{Tn} + T_m(t_k) \lambda_a(T) d_a^{-1} \right] \times$$

$$\times \left\{ 0,25 \pi \alpha_{Tn} D_{en} H_n + \lambda_a(T) d_a^{-1} \right\}^{-1}, \quad (12)$$

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

$\lambda_a(T), d_a$ – коэффициент теплопроводности и толщина прокладки соответственно; D_{en}, D_{in} – внешний и внутренний диаметры n -ой обмотки соответственно; α_{Tn}, c_n – коэффициент теплоотдачи и теплоемкость n -ой обмотки соответственно.

При работе ЛЭМП в скоростном режиме температуру n -ой обмотки можно описать рекуррентным соотношением:

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

$$\left. \times R_n(T_n) \alpha_{Tn}^{-1} D_{en}^{-1} H_n^{-1} (D_{en}^2 - D_{in}^2)^{-1} \right], \quad (13)$$

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

При реализации уравнений (9-13) на ЭВМ используется алгоритм циклического действия, в котором на каждом численно малом расчетном шаге последовательно рассчитываются значения токов i_n , температур T_n , сопротивлений $R_n(T_n)$ обмоток, коэффициент теплопроводности прокладки $\lambda_a(T)$; значения аксиальной электродинамической силы $f_z(z, t)$, скорости v_z и перемещения h_z обмотки якоря, взаимоиנדуктивности $M(z)$ между обмотками.

Основные параметры ЛЭМП. Рассмотрим ЛЭМП индукционного типа, у которого обмотка индуктора ($n=1$) и обмотка якоря ($n=2$) выполнены в форме дисковых катушек. Обмотки плотно намотаны медным проводом диаметром 0,9 мм. Числа витков обмотки индуктора $N_1=450$ и обмотки якоря $N_2=180$. Внешний диаметр обмоток $D_{en}=100$ мм, их внутренний диаметр $D_{in}=10$ мм. Аксиальная высота обмотки индуктора $H_1=10$ мм, обмотки якоря – $H_2=4$ мм. Обмотки выполнены в виде массивных дисков путем пропитки и последующего затверждения эпоксидной смолы. Обмотки установлены коаксиально так, что начальное расстояние между ними $h_{z0}=0,5$ мм. Источник питания характеризуется частотой 100 Гц и амплитудой $U_m=300$ В.

Рассмотрим продолжительность времени подключения обмотки индуктора к источнику $t=50$ мс. Оценим эффективность ЛЭМП при работе в скоростном режиме (масса исполнительного элемента $m_a=0,25$ кг) величиной максимальной скорости V_m , а при работе в ударно-силовом режиме – величиной импульса электродинамической силы $P_z = \int f_z(z, t) dt$ (полагаем отсутствие перемещения обмотки якоря) при минимальных превышениях температур обмоток $\theta_n = T_n - T_0$.

Рассмотрим электрические и тепловые характеристики ЛЭМП при подключении обмотки индуктора к источнику переменного тока и отсутствии обмотки якоря, полагая $\psi_u=0$ (рис. 1).

Максимальная плотность тока в обмотке индуктора j_1 в первом полупериоде на 24 % выше, чем при последующих установившихся колебаниях. После каждого полупериода колебаний наблюдается увеличение превышения температуры θ_1 . К концу рассматриваемого интервала времени $t=50$ мс превышение температуры обмотки индуктора составляет $\theta_1=0,86$ °С.

Возбуждение ЛЭМП в ударно-силовом режиме. Рассмотрим возбуждение ЛЭМП в ударно-силовом режиме при заторможенной обмотке якоря. За счет индукционного воздействия обмотки индуктора на обмотку якоря в последней протекает ток плотностью j_2 (рис. 2,а).

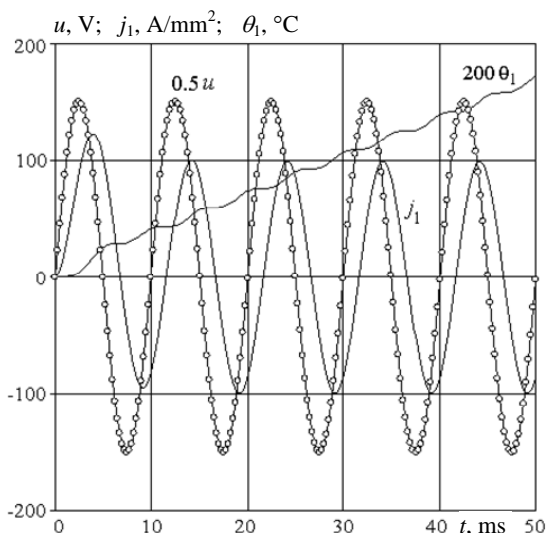


Рис. 1. Электрические и тепловые характеристики ЛЭМП при отсутствии обмотки якоря

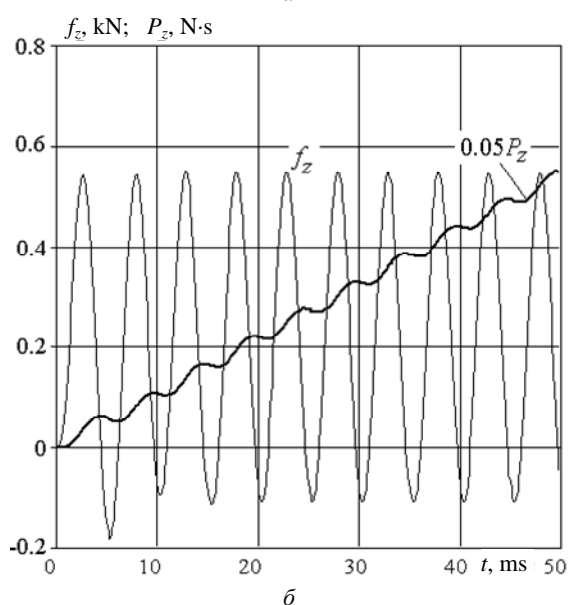
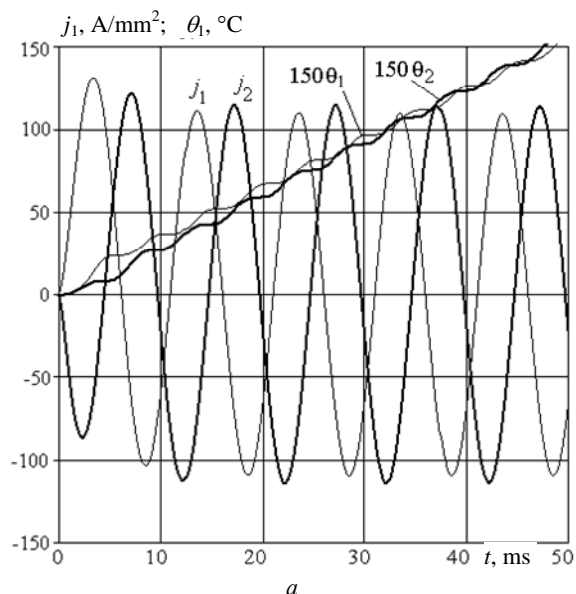


Рис. 2. Электрические, тепловые (а) и силовые (б) характеристики ЛЭМП при возбуждении в ударно-силовом режиме

Индукцированный ток в обмотке якоря имеет фазовый сдвиг по отношению к току обмотки индуктора. По сравнению с работой при отсутствии обмотки якоря максимальная плотность тока в обмотке индуктора j_1 возрастает на 6,7 %. В первый полупериод плотность тока в обмотке якоря принимает наименьшее отрицательное значение, но уже во второй полупериод возникает наибольшее положительное значение $j_2=121,3$ А/мм². Превышение температуры обмотки индуктора θ_1 к концу рассматриваемого интервала времени увеличивается на 18,5 % по сравнению с работой ЛЭМП при отсутствии обмотки якоря. Превышение температуры обмотки якоря практически такое же, как обмотки индуктора и составляет $\theta_2 = 1,03$ °С.

Вследствие фазового сдвига между токами обмоток электродинамическая сила изменяется с удвоенной частотой практически по синусоидальному закону, принимая как положительное (отталкивающее), так и отрицательное (притягивающее) значения (рис. 2,б). Положительные значения силы (токи в обмотках имеют противоположные направления) в несколько раз превышают отрицательные значения (токи имеют одинаковые направления). Максимальная величина силы первого положительного колебания составляет $f_z = 0,542$ кН, незначительно увеличиваясь в последующих полупериодах. Величина первого отрицательного колебания максимальна и составляет 0,182 кН, уменьшаясь в последующем на 67 %. Поскольку положительные колебания силы по величине преобладают над отрицательными, то величина импульса электродинамической силы P_z с каждым периодом силы f_z увеличивается, достигая значения $P_z = 10,98$ Н·с к концу рассматриваемого интервала времени. При положительных значениях силы f_z величина импульса силы P_z увеличивается, а при отрицательных значениях силы величина P_z имеет характерные понижения.

Начальная фаза напряжения в момент подключения ЛЭМП к источнику переменного тока может находиться в диапазоне $\psi_u \in (0; 180^\circ)$. Влияние начальной фазы напряжения на величины превышений температур обмоток и импульса электродинамической силы за рассматриваемый интервал времени $t=50$ мс показано на рис. 3.

Для оценки влияния начальной фазы напряжения источника используем относительное изменение величины показателя κ :

$$\Delta\kappa = 2 \frac{\kappa_{\max} - \kappa_{\min}}{\kappa_{\max} + \kappa_{\min}},$$

где κ_{\max} , κ_{\min} – максимальное и минимальное значение показателя κ соответственно.

Минимальное значение величины импульса силы P_z для рассматриваемого преобразователя имеет место примерно при $\psi_u=50^\circ$, а максимальное – через 90° . Относительное изменение величины импульса силы незначительно и составляет $\Delta P_z = 1,5$ %.

Превышения температур обмоток имеют экстремум в центре рассматриваемого интервала ψ_u . Превышение температуры обмотки индуктора при $\psi_u=90^\circ$ минимально, а обмотки якоря максимально. Относительные изменения тепловых показателей составляют: $\Delta\theta_1=6,6$ %, а $\Delta\theta_2=2,8$ %.

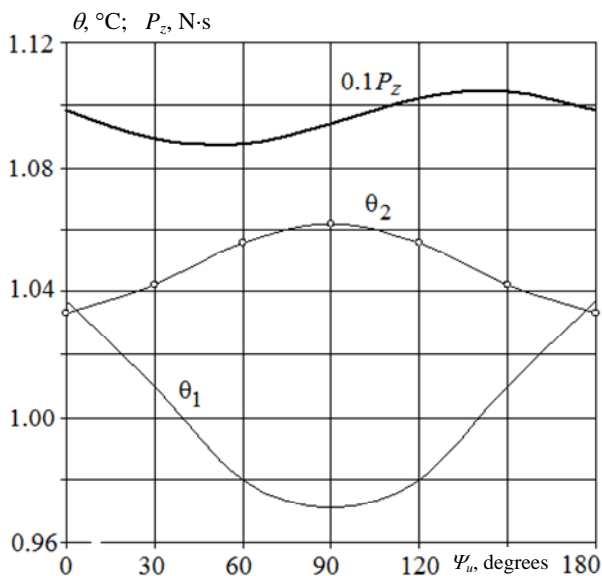


Рис. 3. Зависимость тепловых и силовых показателей ЛЭМП в ударно-силовом режиме от начальной фазы напряжения источника переменного тока

Возбуждение ЛЭМП в скоростном режиме. Скоростной режим ЛЭМП характеризуется тем, что под действием электродинамической силы обмотка якоря вместе с исполнительным элементом перемещается относительно обмотки индуктора, обуславливая ослабление магнитной связи между обмотками (рис. 4). В данном режиме работы ЛЭМП ток в обмотке индуктора имеет следующие особенности (рис. 4,а). В первый полупериод максимальная плотность тока в обмотке индуктора имеет наибольшее значение $j_1=125,2 \text{ A/mm}^2$, но через несколько периодов выходит на установившееся значение $j_1=99 \text{ A/mm}^2$ (как и при работе с отсутствующей обмоткой якоря). Индуцированный ток в обмотке якоря имеет колебательно-затухающий характер с наибольшим максимальным значением во втором положительном полупериоде.

Указанный характер протекания токов приводит к существенному изменению превышений температур по отношению к ударно-силовому режиму работы ЛЭМП. Превышение температуры обмотки индуктора к концу рассматриваемого интервала времени составляет $\theta_1=0,88 \text{ }^\circ\text{C}$ и возрастает с момента подключения к источнику переменного тока. Превышение температуры обмотки якоря имеет характер насыщения, достигая существенно меньшего значения $\theta_2=0,16 \text{ }^\circ\text{C}$ за рассматриваемое время.

Механические характеристики ЛЭМП индукционного типа в скоростном режиме работы имеют следующие особенности (рис. 4,б). Электродинамическая сила f_z принимает колебательный характер с быстрым затуханием и существенным преобладанием положительной составляющей. Наибольшая величина силы $f_z=0,4 \text{ kN}$ меньше, чем при работе ЛЭМП в ударно-силовом режиме. Но еще более существенно меньше величина импульса силы, составляя $P_z = 1,25 \text{ Н}\cdot\text{с}$ к концу рассматриваемого интервала времени.

На характер изменения скорости обмотки якоря влияют как положительные (ускоряющие), так и отрицательные (тормозные) составляющие электроди-

намической силы. Скорость к концу рассматриваемого интервала возбуждения достигает максимального значения $V_m = 2,36 \text{ м/с}$.

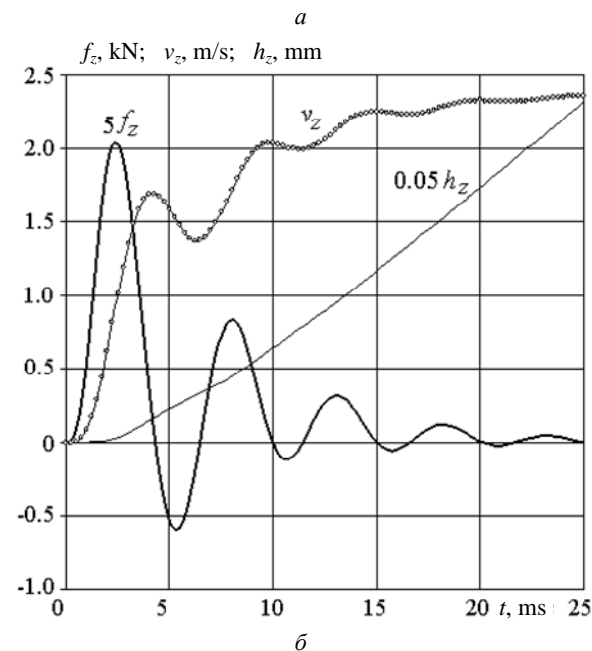
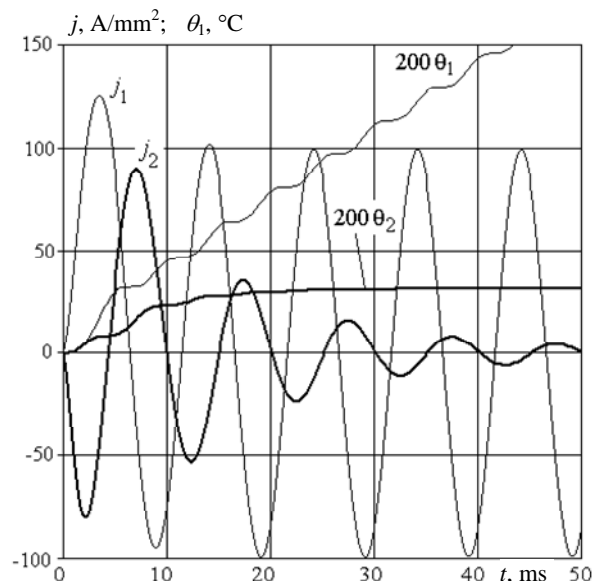


Рис. 4. Электрические, тепловые (а) и механические (б) характеристики ЛЭМП при возбуждении в скоростном режиме

Влияние начальной фазы напряжения на показатели ЛЭМП показано на рис. 5. По сравнению с ударно-силовым режимом работы ЛЭМП в диапазоне $\psi_u \in (0; 180^\circ)$ не наблюдается симметрия превышений температур обмоток. Относительные изменения тепловых показателей составляют: $\Delta\theta_1 = 8 \%$, $\Delta\theta_2 = 1,9 \%$. Максимальная скорость обмотки якоря имеет место примерно при $\psi_u = 90^\circ$. Она незначительно зависит от начальной фазы напряжения (относительное изменение составляет $\Delta V_m = 2,5 \%$).

На основании проведенных исследований можно сделать следующее заключение. Возбуждение ЛЭМП индукционного типа от источника переменного тока позволяет реализовать новые технические приложе-

ния. Так при работе ЛЭМП в ударно-силовом режиме можно многократно увеличивать время силового воздействия на исполнительный элемент по сравнению с возбуждением от емкостного накопителя энергии. Такое продолжительное силовое воздействие необходимо в прессах с большим диапазоном энергии воздействия, в приводах станов холодной прокатки, в вибросмесителях, дозаторах, насосах, в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на силовые нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, в устройствах для электродинамической обработки сварных соединений и др. [9].

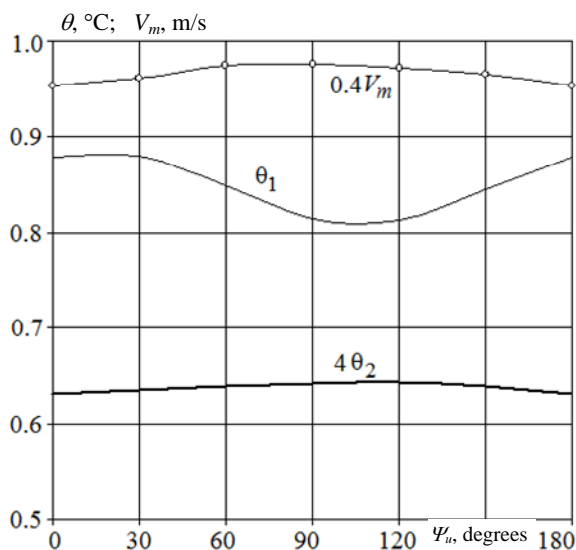


Рис. 5. Зависимость тепловых и механических показателей ЛЭМП в скоростном режиме от начальной фазы напряжения источника переменного тока

Выводы.

1. Разработана цепная математическая модель ЛЭМП при возбуждении от источника переменного тока, в которой решения уравнений, описывающие взаимосвязанные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы, представлены в рекуррентном виде.

2. Установлено, что при работе ЛЭМП в ударно-силовом режиме максимальное значение тока в обмотке индуктора возникает в первом полупериоде, а в заторможенной обмотке якоря во втором полупериоде. Электродинамическая сила изменяется с удвоенной частотой, принимая как положительные, так и отрицательные значения. Поскольку положительные значения превышают отрицательные, то величина импульса электродинамической силы с каждым периодом силы увеличивается. В зависимости от начальной фазы напряжения относительное изменение величины импульса силы составляет 1,5 %.

3. Установлено, что при работе ЛЭМП в скоростном режиме ток в обмотке индуктора в первый полупериод имеет наибольшее значение, но через несколько периодов принимает установившееся состояние. Превышение температуры обмотки индуктора возрастает со временем подключения к источнику переменного тока, а превышение температуры обмотки якоря имеет характер насыщения. Электродинами-

ческая сила имеет колебательный характер с сильным затуханием и существенным преобладанием положительной составляющей. В зависимости от начальной фазы напряжения относительное изменение максимальной скорости обмотки якоря составляет 2,5 %.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Guangcheng F., Wang Y., Xu Q., Xinyi N., Yan Z. Design and analysis of a novel three-coil reconnection electromagnetic launcher. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 814-820. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2018.2874287>.
- Go B.-S., Le D.-V., Song M.-G., Park M., Yu I.-K. Design and electromagnetic analysis of an induction-type coilgun system with a pulse power module. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, pp. 971-976. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2018.2874955>.
- Angquist L., Baudoin A., Norrga S., Nee S., Modeer T. Low-cost ultra-fast DC circuit-breaker: Power electronics integrated with mechanical switchgear. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, Lyon, pp. 1708-1713. doi: <https://doi.org/10.1109/icit.2018.8352439>.
- Vilchis-Rodriguez D.S., Shuttleworth R., Barnes M. Modelling thomson coils with axis-symmetric problems: practical accuracy considerations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 629-639. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2017.2651979>.
- Kondratiuk M., Ambroziak L. Concept of the magnetic launcher for medium class unmanned aerial vehicles designed on the basis of numerical calculations. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, vol. 54, iss. 1, pp. 163-177. doi: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.1.163>.
- Liu X., Yu X., Ban R., Li Z. Analysis of the capacitor-aided meat grinder circuits for an inductive pulsed power supply. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 1339-1346. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2017.2705179>.
- Gorodzha K.A., Podoltsev O.D., Troshchinsky B.A. Electromagnetic processes in pulse electrodynamic emitter for exciting elastic oscillations in concrete structures. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 3, pp. 23-28. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>.
- Yadong Z., Ying W., Jiangjun R. Capacitor-driven coil-gun scaling relationships. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, vol. 39, no. 1, pp. 220-224. doi: <https://doi.org/10.1109/tps.2010.2052266>.
- Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
- Driga M.D., Weldon W.F., Woodson H.H. Electromagnetic induction launchers. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1986, vol. 22, no. 6, pp. 1453-1458. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.1986.1064639>.
- 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: <https://doi.org/10.1109/tmag.2004.839283>.
- Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no.1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2018.1.03>.
- Bolyukh V.F., Katkov I.I. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type. *Volume 2B: Advanced Manufacturing*, Nov. 2019, 8 p. doi: <https://doi.org/10.1115/imece2019-10388>.

14. Bolyukh V.F. Effect of electric conducting element on indicators of linear pulse electromechanical converter induction type. *Technical Electrodynamics*, 2020, no. 3, pp. 22-29. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.022>.

15. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Schukin I.S. Efficiency of linear pulse electromechanical converters designed to create impact loads and high speeds. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 3, pp. 31-40. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.05>.

16. 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: <https://doi.org/10.3103/S1068371212100045>.

Поступила (Received) 25.10.2020

Принята (Accepted) 05.12.2020

Опубликована (Published) 25.02.2021

Болюх Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Кашанский Юрий Владимирович¹, аспирант,
Щукин Игорь Сергеевич², к.т.н., доц.,

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: vfbolyukh@gmail.com

² ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
61024, Харьков, ул. Гуданова, 18,
e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, Yu.V. Kashansky¹, I.S. Schukin²

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

² Firm Tetra, LTD,
18, Gudanova Str., Kharkiv, 61024, Ukraine.

Features of excitation of a linear electromechanical converter of induction type from an AC source.

Purpose. The purpose of the article is to establish the basic laws of operation of induction-type linear electromechanical converter (LEMC) during operation in high-speed and shock-power modes and excitation from an AC source of increased frequency.

Methodology. With the help of a mathematical model, the regularities of the course of processes in a LEMC, excited from an AC source, were established when working with shock-power and high-speed modes. The solutions of the equations of the mathematical model, which describe interrelated electrical, magnetic, mechanical and thermal processes, are presented in a recurrent form. **Results.** It was found that when the LEMC operates in the shock-power mode, the maximum value of the current in the inductor winding occurs in the first half-period, and in the inhibited armature winding in the second half-period. The electrodynamic force changes at twice the frequency, taking on both positive and negative values. Since the positive values exceed the negative ones, the magnitude of the impulse of the electrodynamic force increases with each period of the force. Depending on the initial voltage phase, the relative change in the magnitude of the force impulse is 1.5 %. It was found that when the LEMC operates in high-speed mode, the current in the inductor winding in the first half-period has the greatest value, but after several periods it takes on a steady state. The temperature rise of the inductor winding increases with the time of connection to the AC source, and the temperature rise of the armature winding has the nature of saturation. The electrodynamic force has an oscillatory character with strong damping and a significant predominance of the positive component. Depending on the initial phase of the voltage, the relative change in the maximum speed of the armature winding is 2.5 %. **Originality.** For the first time, a mathematical model of the LEMC, excited from an AC source, was developed, the solutions of the equations of which describe the interrelated electrical, magnetic, mechanical and thermal processes. For the first time, the regularities of the course of processes in LEMC were established when working with shock-power and high-speed modes. **Practical value.** The characteristics of LEMC are obtained, which determine the efficiency of work in shock-power and high-speed modes. It is shown that the initial voltage phase has no significant effect on the power, high-speed thermal performance of the converter excited from an alternating current source. References 16, figures 5.

Key words: linear electromechanical induction-type converter, mathematical model, high-speed and shock-power operation mode, alternating current source, maximum speed, electrodynamic force impulse.