

В.Ф. Болух, Ю.В. Кашанский, А.И. Кочерга, И.С. Щукин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА С ДВОЙНЫМ ЯКОРЕМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ УНИЧТОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА SSD НАКОПИТЕЛЕ

За допомогою математичної моделі, яка враховує взаємопов'язані електричні, магнітні, теплові та механічні процеси досліджено вплив геометричних параметрів на електродинамічні характеристики та показники лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача (ЛЕП) індукційного типу з подвійним якорем, який охоплює індуктор з протилежних сторін. При аксіальному віддаленні задньої частини якоря від індуктора максимальні щільності струмів в індукторі зменшуються, в передній частині якоря збільшуються, а в задній частині якоря зменшуються. Максимальна величина та імпульс електродинамічних зусиль (ЕДЗ) між частинами якоря зменшуються. При збільшенні числа витків індуктора та зменшенні товщини мідної шини відбувається підвищення усіх основних показників ЛЕП. При збільшенні числа витків індуктора від 26 до 56 максимальна величина ЕДЗ, що діє між частинами якоря, підвищується практично у 3 рази, а величина імпульсу ЕДЗ – в 3,3 рази. При збільшенні ширини мідної шини індуктора відбувається зниження основних показників ЛЕП. При збільшенні ширини індуктора від 10 мм до 20 мм максимальна величина ЕДЗ між частинами якоря знижується у 1,3 рази, а величина імпульсу ЕДЗ знижується в 1,2 рази. На основі виконаних досліджень був розроблений та експериментально випробуваний зразок ЛЕП індукційного типу з подвійним якорем, що призначений для знешкодження інформації, яка розміщена на SSD накопичувачі. Бібл. 14, рис. 9.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач індукційного типу, подвійний якорь, електродинамічні процеси, цифровий SSD накопичувач, експериментальний зразок.

При помощи математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы исследовано влияние геометрических параметров на электродинамические характеристики и показатели линейного импульсного электромеханического преобразователя (ЛИЭП) индукционного типа с двойным якорем, охватывающим индуктор с противоположных сторон. При аксиальном удалении задней части якоря от индуктора максимальные плотности токов в индукторе уменьшаются, в передней части якоря увеличивается, а в задней части якоря уменьшается. Максимальная величина и импульс электродинамических усилий (ЭДУ) между частями якоря уменьшаются. При увеличении числа витков индуктора и уменьшении толщины медной шины происходит увеличение всех основных показателей ЛИЭП. При увеличении числа витков индуктора от 26 до 56 максимальная величина ЭДУ, действующая между частями якоря, возрастает практически в 3 раза, а величина импульса ЭДУ в 3,3 раза. При увеличении ширины медной шины и ширины индуктора происходит уменьшение основных показателей ЛИЭП. При увеличении ширины индуктора от 10 мм до 20 мм максимальная величина ЭДУ между частями якоря уменьшается в 1,3 раза, а величина импульса ЭДУ уменьшается в 1,2 раза. На основании проведенных исследований был разработан и экспериментально испытан образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, предназначенный для уничтожения информации, размещенной на цифровом SSD накопителе. Библ. 14, рис. 9.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь индукционного типа, двойной якорь, электродинамические процессы, цифровой SSD накопитель, экспериментальный образец.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи (ЛИЭП) индукционного типа широко применяются для создания ударно-механических импульсов [1-4]. Такие преобразователи используются во многих отраслях науки и техники в качестве ударно-силовых устройств. В строительстве применяются электромагнитные молоты и перфораторы; в горной промышленности – бутобой и вибраторы; в геологоразведке вибросейсмоисточники; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара и устройства для электродинамической обработки сварных соединений; в химической и медико-биологической промышленности – вибросмесители, дозаторы и др. ЛИЭП применяются в испытательных комплексах для проверки ответственной аппаратуры на ударные нагрузки, в магнитно-импульсных устройствах для прессования порошков керамики, очистки емкостей от налипания сыпучих материалов [4-6]. Одним из перспективных направлений является применение ЛИЭП для уничтожения информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе [7]. Такие ЛИЭП должны обла-

дать высоким быстродействием и коротким рабочим циклом, ограниченными массогабаритными показателями, автономностью и развивать высокие ударно-механические нагрузки. Задача приобретает повышенную сложность при уничтожении информации, распределенной по поверхности плоского твердотельного SSD накопителя [8].

Наиболее перспективным для решения данной задачи является ЛИЭП индукционного типа, в котором электропроводящий якорь электродинамически взаимодействует с неподвижным индуктором [4, 9, 10]. При возбуждении многовиткового индуктора от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в электропроводящем якорю индуцируются вихревые токи. Вследствие этого на якорь действуют электродинамические усилия (ЭДУ) отталкивания, вызывающие его аксиальное перемещение вместе с ударным исполнительным элементом (бойком) относительно индуктора.

Однако при быстром изменении электромагнитных, механических и тепловых параметров силовые показатели ЛИЭП индукционного типа традиционной

конструкции недостаточно высоки [4]. Одним из путей повышения указанных показателей является разработка новых конструкций ЛИЭП. Поскольку в традиционной конструкции ЛИЭП с якорем индукционно взаимодействует только одна сторона индуктора, то значительная часть магнитного поля с противоположной стороны индуктора рассеивается в окружающее пространство, негативно влияя на близко расположенные электронные и биологические объекты, и не используется для создания дополнительных ЭДУ.

Рассмотрим конструкцию ЛИЭП коаксиальной конфигурации, содержащую неподвижный индуктор 1 и двойной якорь, охватывающий индуктор с противоположных сторон [8] (рис. 1).

Передняя часть якоря (ПЧЯ) 2 и задняя часть якоря (ЗЧЯ) 3 выполнены в виде коаксиально установленных дисков, охватывающих индуктор с противоположных сторон. К ПЧЯ 2 присоединен боек 4, направленный в сторону объекта воздействия 5. ЗЧЯ 3 и объект воздействия 5 по наружной поверхности охвачены фиксирующими скобами 6. Заметим, что роль одной из частей указанного якоря может играть наружный электропроводящий экран [11].

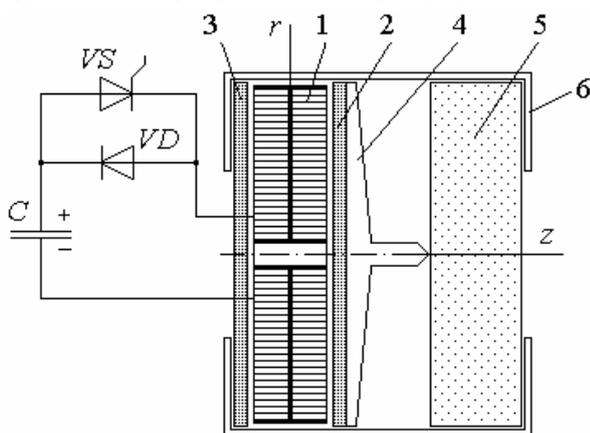


Рис. 1. ЛИЭП с двойным якорем:
1 – индуктор; 2 – ПЧЯ; 3 – ЗЧЯ; 4 – боек;
5 – объект воздействия; 6 – фиксирующие скобы

При поступлении сигнала на тиристор VS происходит возбуждение током неподвижного индуктора от ЕНЭ C и за счет возникающего магнитного поля в каждой из частей двойного якоря индуцируются вихревые токи. Вследствие этого на обе части двойного якоря со стороны индуктора действуют противоположно направленные ЭДУ отталкивания, что приводит к суммарному силовому воздействию бойка на объект воздействия. За счет использования диода VD возбуждение индуктора осуществляется разнополярным импульсом, при котором реализуется колебательно-затухающий характер изменения тока.

Однако при этом возникает вопрос о влиянии параметров индуктора и расположения частей двойного якоря на силовые показатели ЛИЭП.

Целью статьи является определение путей повышения силовых показателей линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа с двойным якорем, предназначенного для уничтожения информации в плоском твердотельном SSD накопителе.

Математическая модель. Рассмотрим математическую модель, которая описывает электро-механические процессы ЛИЭП с использованием сосредоточенных параметров активных элементов – индуктора, и подвижных частей двойного якоря. Электрические процессы можно описать системой уравнений:

$$i_1 R_1(T_1) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \sum_{n=2,3} \left(M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_n e_n \right); \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt = U_0; \quad (2)$$

$$i_n R_n(T_n) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{1n}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{nm}(z) \frac{di_m}{dt} + i_n e_3 + i_m e_1 = 0; \quad (3)$$

где $p = 1, 2, 3$ – индексы индуктора, ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно; $m = 5-n$; $n = 2, 3$; $e_1 = (v_{12}(t) + v_{13}(t)) \frac{dM_{23}}{dz}$;

$$e_2 = v_{13}(t) \frac{dM_{13}}{dz}; \quad e_3 = v_{12}(t) \frac{dM_{12}}{dz}; \quad R_p(T_p), L_p, i_p, T_p$$
 – со-

противление, индуктивность, ток и температура p -ого активного элемента соответственно; $M_{12}(z)$, $M_{13}(z)$, $M_{23}(z)$ – взаимоиנדуктивности между соответствующими p -ми активными элементами; $v_{13}(t)$, $v_{12}(t)$ – противоположно направленные скорости ЗЧЯ и ПЧЯ относительно индуктора вдоль оси z соответственно.

Решение уравнений (1) – (3) для токов в активных элементах представлено в работе [12].

Электродинамические процессы можно описать системой уравнений:

$$i_1 i_n \frac{dM_{1n}}{dz} = i_n i_m \frac{dM_{nm}}{dz} + (m_n + m_e) \frac{dv_{1n}}{dt} + K_T v_{1n}(t) + 0,125 \pi \gamma_a \beta_a D_{2\max}^2 v_{1n}^2(t) + K_p \Delta z_{1n}(t), \quad (4)$$

где $\Delta z_{13}(t)$, $\Delta z_{12}(t)$ – противоположно направленные перемещения ЗЧЯ и ПЧЯ относительно индуктора вдоль оси z ; m_2 , m_3 , m_e – масса ПЧЯ, ЗЧЯ и бойка соответственно; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность среды перемещения; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления среды; $D_{ex\ m}$ – максимальный диаметр якоря; K_p – коэффициент жесткости объекта воздействия.

Перемещения ЗЧЯ и ПЧЯ относительно индуктора можно представить в виде рекуррентных соотношений:

$$\Delta z_{1n}(t_{k+1}) = \Delta z_{1n}(t_k) + v_{1n}(t_k) \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2(m_n + m_e)} \times \left[\left(i_1(t_k) \frac{dM_{1n}}{dz} - i_2(t_k) \frac{dM_{nm}}{dz} \right) i_n(t_k) - K_T v_{1n}(t_k) - 0,125 \cdot \pi \cdot \beta_a \gamma_a D_{ex\ n}^2 v_{1n}^2(t_k) - K_p \Delta z_{1n}(t_k) \right]. \quad (5)$$

Методика расчета взаимосвязанных электрических, магнитных, тепловых и электродинамических процессов при учете различных нелинейных зависимостей описана в работе [12].

В качестве показателей ЛИЭП с двойным якорем будем использовать:

- амплитуду аксиального ЭДУ f_{z23m} , действующего на фиксирующие скобы от противоположно направленных сил на переднюю и заднюю части двойного

якоря $f_{z23m} = f_{z2m} - f_{z3m}$, где f_{z2m}, f_{z3m} – амплитуды ЭДУ, действующие на ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно;

- величину импульса ЭДУ $F_{z23m} = F_{z2m} - F_{z3m}$, действующую на фиксирующие скобы от противоположно направленных сил на переднюю и заднюю части двойного якоря, где F_{z2m}, F_{z3m} – амплитуды ЭДУ, действующие на ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно; импульс $F_z = \int f_z(t) dt$;

- максимальные значения плотностей токов в индукторе j_{1m} , ПЧЯ j_{2m} , и ЗЧЯ j_{3m} ;

- превышения температур индуктора $\theta_1 = T_1 - T_0$, ПЧЯ $\theta_2 = T_2 - T_0$, и ЗЧЯ $\theta_3 = T_3 - T_0$, где T_1, T_2, T_3 – температура индуктора, ПЧЯ и ЗЧЯ соответственно; T_0 – температура окружающей среды.

Основные параметры ЛИЭП. Рассмотрим ЛИЭП коаксиальной конфигурации, у которого обе части двойного якоря одинаковы и выполнены в форме плоского диска из технической меди, одна из сторон которого обращена к индуктору.

ЛИЭП имеет следующие исходные параметры:

Индуктор: внешний диаметр $D_{ex1}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1}=10$ мм, высота $H_1 = 10$ мм, сечение медной шины $a \times b = 1,8 \times 4,8$ мм², количество витков шины $N_1 = 46$ шт. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами.

Части якоря: внешний диаметр $D_{ex2,3}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2,3}=10$ мм, высота $H_{2,3}=3$ мм.

ЕНЭ: емкость $C=500$ мкФ, напряжение $U_0=1$ кВ.

Боек имеет массу $m_e=0,45$ кг; коэффициент жесткости объекта воздействия $K_p = 3 \cdot 10^7$ Н/м. Такая жесткость характерна для объекта воздействия типа, цифрового SSD накопителя при воздействии на него заостренного бойка.

Рассмотрим схему возбуждения, которая обеспечивает колебательно-затухающий характер изменения тока возбуждения индуктора, при котором реализуются наиболее высокие электродинамические показатели ЛИЭП (рис. 1) [13].

Электродинамические характеристики и показатели ЛИЭП с двойным якорем. Рассмотрим влияние геометрических параметров на электромеханические процессы ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем. На рис. 2 представлены плотности токов в индукторе j_1 и в обеих частях якоря $j_2=j_3$, величина f_{z23} и импульс F_{z23} ЭДУ, действующие между передней и задней частями двойного якоря для ЛИЭП с исходными параметрами.

В данном ЛИЭП токи в индукторе и якоре изменяются по колебательно-затухающему закону практически в противофазе. Максимальная величина плотности тока в индукторе составляет $j_{1m}=215,8$ А/мм², а в каждой из одинаковых частей двойного якоря – $j_{2m}=j_{3m}=299,7$ А/мм². ЭДУ имеют форму затухающих полярных импульсов, частота следования которых практически в 2 раза выше частоты колебания тока индуктора. Максимальная величина ЭДУ, действующая в противоположные стороны на переднюю и заднюю части двойного якоря, составляет $f_{z23m}=11,99$ кН. А величина импульса ЭДУ между частями двойного якоря составляет $F_{z23}=4,59$ Н·с. К концу действия

токовых импульсов превышение температуры индуктора составляет $\theta_1=0,4$ °С, а превышения температур частей якоря – $\theta_2 = \theta_3 = 0,17$ °С.

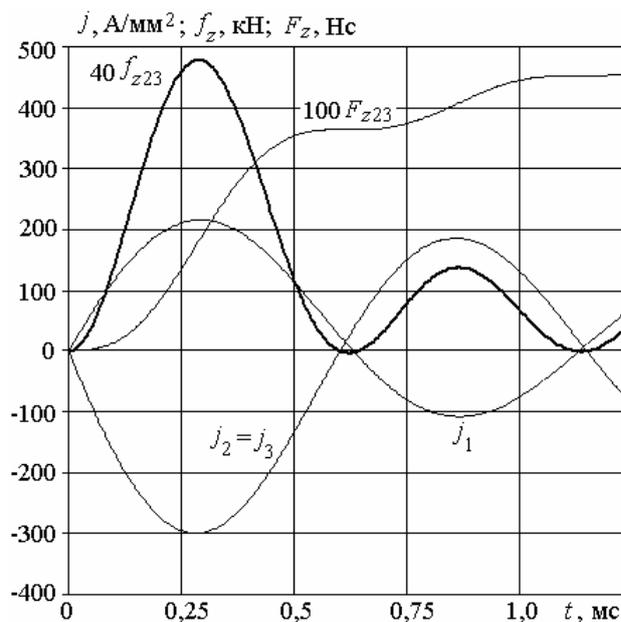


Рис. 2. Электродинамические характеристики ЛИЭП с исходными параметрами

При аксиальном удалении ЗЧЯ от индуктора на расстояние $\Delta z_{13}=6$ мм наблюдаются следующие изменения (рис. 3). Ток в ПЧЯ к концу первого полупериода несколько опережает ток индуктора, в то время как ток в ЗЧЯ находится с ним практически в противофазе. По сравнению с ЛИЭП с исходными параметрами в данном случае максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} уменьшается в 1,06 раз, в ПЧЯ j_{2m} – увеличивается в 1,05 раз, а в ЗЧЯ j_{3m} – уменьшается в 1,92 раза. В результате этого максимальная величина ЭДУ, действующая на ПЧЯ f_{2m} увеличивается в 1,07 раз, на ЗЧЯ f_{3m} – уменьшается в 4,55 раз, что приводит к уменьшению суммарных усилий f_{z23m} в 1,55 раз.

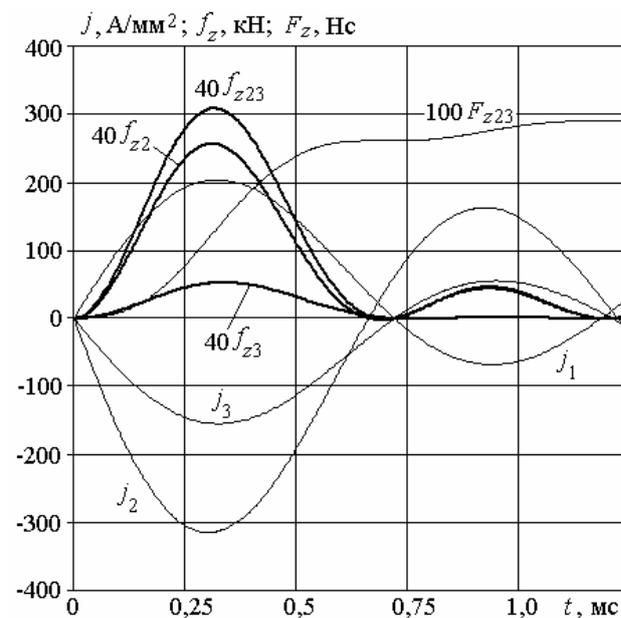


Рис. 3. Электродинамические характеристики ЛИЭП, у которого ЗЧЯ удалена на расстояние $\Delta z_{13}=6$ мм от индуктора

Импульс ЭДУ, действующий на ПЧЯ, F_{z2} увеличивается в 1,05 раз, на ЗЧЯ F_{z3} – уменьшается в 4,73 раз, что приводит к уменьшению суммарного импульса ЭДУ между частями якоря F_{z23} в 1,58 раз.

Для данного ЛИЭП превышение температуры индуктора θ_1 уменьшается в 1,33 раза, ПЧЯ θ_2 – увеличивается в 1,075 раз, а ЗЧЯ θ_3 – уменьшается в 4 раза.

На рис. 4 представлены зависимости электродинамических показателей ЛИЭП с двойным якорем при удалении ЗЧЯ от индуктора. При удалении ЗЧЯ от индуктора на расстояние 8 мм максимальные плотности в индукторе снижаются в 1,07 раз, в ПЧЯ – увеличивается в 1,1 раз, в ЗЧЯ – уменьшается в 2,91 раз.

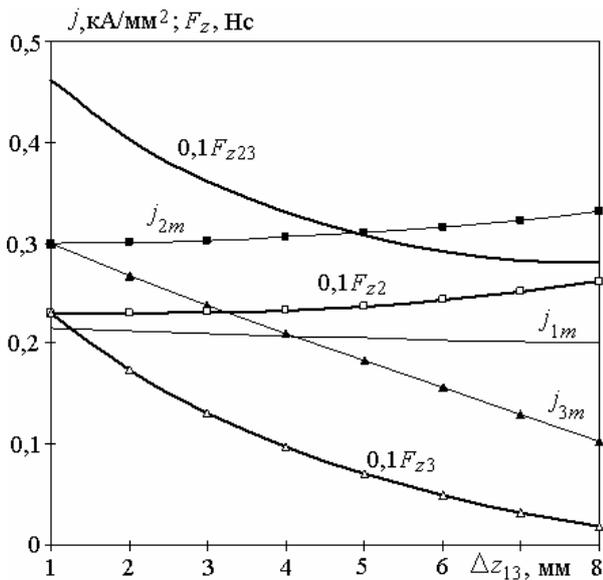


Рис. 4. Зависимость электродинамических показателей ЛИЭП от расстояния Δz_{13} между индуктором и ЗЧЯ

Максимальная величина ЭДУ, действующих на ПЧЯ f_{2m} , увеличивается в 1,17 раз, на ЗЧЯ f_{3m} – уменьшается в 13,12 раз, что приводит к уменьшению суммарных усилий f_{23m} в 1,62 раза. Импульс ЭДУ, действующих на ПЧЯ, F_{z2} увеличивается в 1,14 раз, на ЗЧЯ F_{z3} – уменьшается в 12,1 раз, что приводит к уменьшению суммарного импульса ЭДУ F_{z23} в 1,64 раз.

При этом превышение температуры индуктора θ_1 уменьшается в 1,16 раза, ПЧЯ θ_2 – увеличивается в 1,18 раз, а ЗЧЯ θ_3 – уменьшается в 6,63 раза.

Рассмотрим влияние геометрических параметров индуктора на показатели ЛИЭП с двойным якорем. Одним из таких показателей является толщина медной шины b , влияющая на число витков индуктора N_1 . Если шина имеет сечение $a \times b = 6,8 \times 2,6$ мм², то индуктор имеет $N_1 = 26$ витков. Если шина имеет сечение $a \times b = 6,8 \times 1,4$ мм², то индуктор имеет $N_1 = 56$ витков. При увеличении числа витков индуктора N_1 , а значит при уменьшении толщины медной шины b , происходит увеличение всех основных показателей ЛИЭП (рис. 5) При увеличении числа витков индуктора от 26 до 56 максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} возрастает в 1,5 раз, а в обеих частях якоря $j_{2m} = j_{3m}$ – в 1,73 раза.

Это приводит к тому, что максимальная величина ЭДУ, действующая между частями якоря f_{23m} , возрастает практически в 3 раза, а величина импульса

ЭДУ F_{z23} – в 3,3 раза. Однако при этом происходит увеличение превышений температуры индуктора θ_1 в 2,82 раза, а обеих частей якоря $\theta_2 = \theta_3$ – в 3,37 раза к концу рабочего цикла.

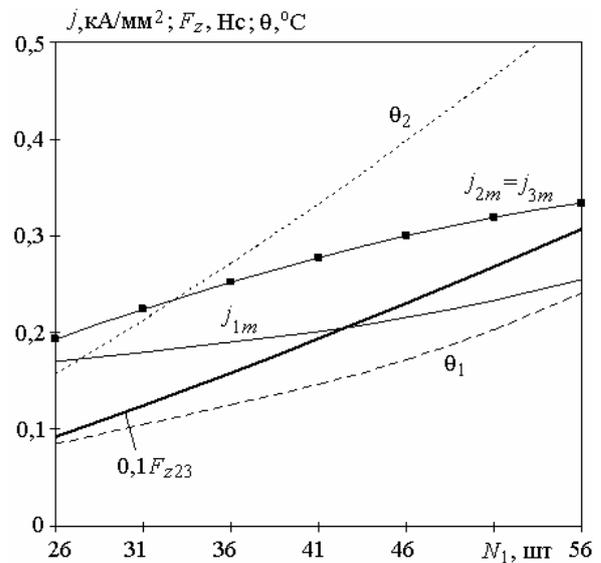


Рис. 5. Зависимость электродинамических и тепловых показателей ЛИЭП от числа витков индуктора N_1

При увеличении ширины медной шины, а значит и ширины индуктора, происходит уменьшение основных показателей ЛИЭП (рис. 6). При увеличении ширины медной шины a от 4,8 мм до 9,8 мм, а значит и ширины индуктора H_1 от 10 мм до 20 мм, можно отметить следующие закономерности. Максимальная плотность тока в индукторе j_{1m} уменьшается значительно (более чем 2 раза), а максимальные плотности токов в обеих частях якоря $j_{2m} = j_{3m}$ снижаются незначительно (в 1,1 раз). Максимальная величина ЭДУ f_{23m} между частями якоря уменьшается в 1,3 раза, а величина импульса ЭДУ F_{z23} уменьшается в 1,2 раза. При этом превышения температур индуктора θ_1 уменьшаются значительно (практически в 4 раза), а превышения температур якоря $\theta_2 = \theta_3$ уменьшаются незначительно (в 1,1 раз).

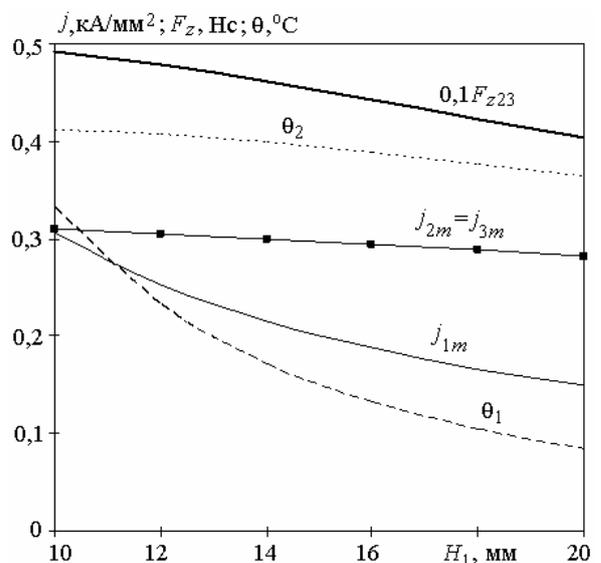


Рис. 6. Зависимость электродинамических и тепловых показателей ЛИЭП от ширины индуктора H_1

Конструкция и образец ЛИЭП для уничтожения информации на SSD накопителе. На основании проведенных исследований разработана конструкция ЛИЭП, предназначенного для уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе с распределенной по поверхности памятью [8].

Устройство содержит индуктор 1 в виде двух обмоток 1а и 1б с внешними электрическими выводами 2, между которыми расположена индукторная немагнитическая пластина 3 (рис. 7). Выполненные в форме овала обмотки индуктора 1 намотаны согласно по магнитному полю из единого ленточного провода и при помощи эпоксидной смолы соединены с индукторной пластиной 3.

Устройство содержит ПЧЯ 4 и ЗЧЯ 5. Индуктор 1 зафиксирован относительно объекта воздействия – цифрового SSD накопителя информации 6 при помощи фиксирующей скобы 7, охватывающих их прямолинейные участки. Передняя часть скобы 7а охватывает цифровой накопитель 6, а задняя часть скобы 7б охватывает ЗЧЯ 5. Части скобы фиксируются между собой при помощи разъемных фиксаторов 8.

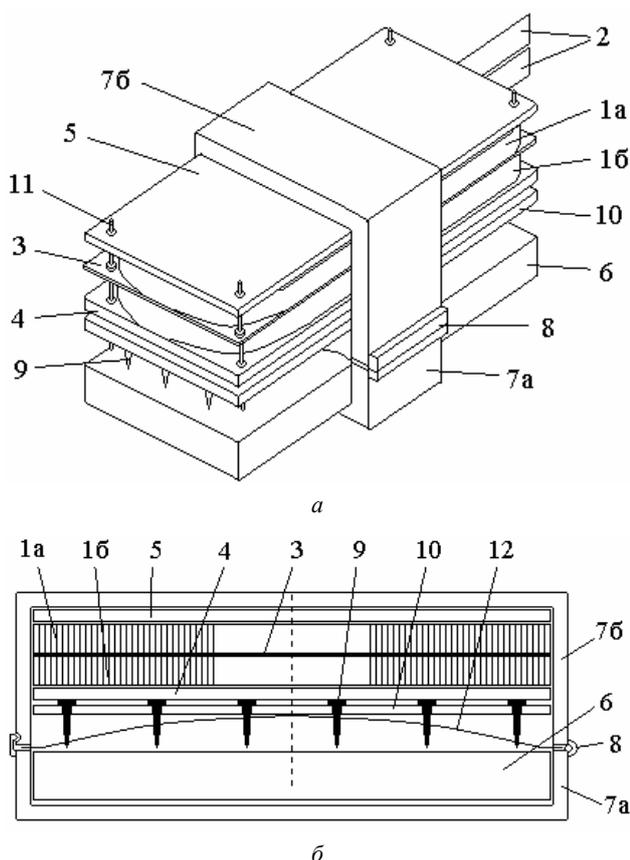


Рис. 7. Общий вид (а) и поперечное сечение (б) ЛИЭП для уничтожения информации на SSD накопителе

Ударный исполнительный элемент содержит упорядочено расположенные заостренные бойки 9 в форме закаленных гвоздей. Шляпка каждого бойка расположена между ПЧЯ 4 и ударной пластиной 10, а стержни бойков выполнены в форме заостренного

конуса и зафиксированы в отверстиях ударной пластины 10. ПЧЯ 4 и ударная пластина 10 соединены между собой. ПЧЯ 4, ЗЧЯ 5, индукторная 3 и ударная 10 пластины выполнены в форме прямоугольников, что соответствует форме цифрового SSD накопителя информации 6.

В угловых участках индукторной пластины 3 перпендикулярно закреплены направляющие стойки 11, которые проходят через направляющие отверстия ПЧЯ ЗЧЯ и ударной пластины 10.

Направляющие стойки присоединены к индукторной пластине 3. Устройство содержит плоскую пружину 12, средняя часть которой взаимодействует с ударной пластиной 10, а ее концы закреплены относительно задней и передней частей скобы в разъемных фиксаторах 8. В исходном состоянии пружины 12 своей средней частью прижимает ударную пластину 10 вместе с ПЧЯ 4 к обмотке индуктора 1а, а обмотку 1а – к ЗЧЯ 5.

При необходимости уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе, например, при поступлении сигнала о несанкционированном доступе к его информации происходит разряд емкостного накопителя энергии на индуктор. При этом происходит перемещение ударной пластины 10 с бойками 9, которые проникают в массив цифрового накопителя 6, безвозвратно уничтожая находящуюся на нем информацию.

Кроме того, ПЧЯ и ЗЧЯ экранируют магнитное поле, возбуждаемое индуктором, что благоприятно для близко расположенных электронных и биологических объектов [14].

На основании проведенных исследований был разработан экспериментальный образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем.

Для проведения экспериментальных исследований ЛИЭП использовался диодно-тиристорный блок, электронный блок формирования импульса с конденсаторами, аккумулятор и пусковое устройство (рис. 8,а). При экспериментальных исследованиях в качестве объекта воздействия использовалась многослойная конструкция, набранная из тонких стальных листов, подпертых листами ДСП и стеклотекстолита. Такая конструкция позволяла визуально оценить глубину проникновения бойков в объект воздействия. Как показали эксперименты, после срабатывания ЛИЭП боек эффективно пробивал практически весь объект воздействия.

На рис. 9 показаны опытный образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, предназначенный для уничтожения информации на SSD накопителе и результаты его воздействия на многослойный образец.

В опытном образце индуктор был покрыт декоративной черной пленкой и были усовершенствованы фиксирующие скобы, которые выполняли функцию наружного корпуса и полностью охватывали объект воздействия и ЗЧЯ.

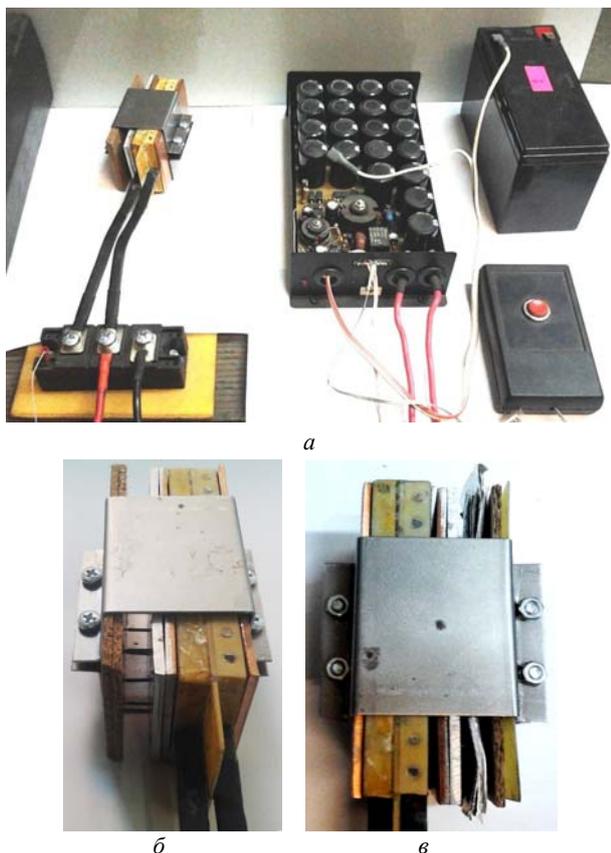


Рис. 8. Оборудование для испытания ЛИЭП (а), экспериментальный образец ЛИЭП в исходном положении (б) и после срабатывания (в)

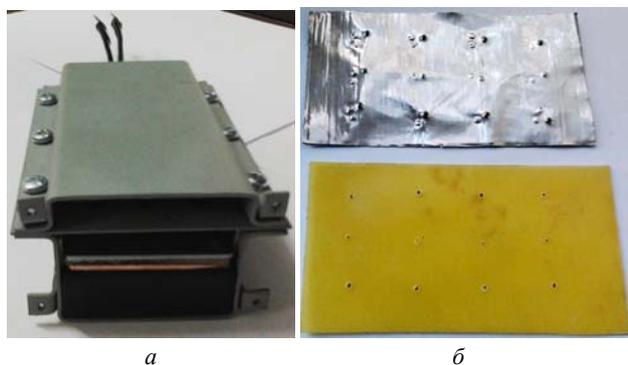


Рис. 9. Опытный образец ЛИЭП для уничтожения информации на SSD накопителе (а) и результаты его воздействия на многослойный образец (б)

Выводы.

1. При помощи математической модели, учитывающей взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы установлено влияние геометрических параметров на электродинамические характеристики и показатели ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, охватывающим индуктор с противоположных сторон.

2. Определены пути повышения силовых показателей ЛИЭП – максимальной величины и импульса электродинамических усилий между частями двойного якоря. Впервые установлено, что силовые показатели ЛИЭП увеличиваются при максимальном приближении обеих частей двойного якоря к индуктору, при увеличении числа витков и неизменных габари-

тах индуктора, при уменьшении ширины медной шины и ширины индуктора.

3. Разработан и экспериментально испытан образец ЛИЭП индукционного типа с двойным якорем, предназначенный для уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. – №1. – С. 24-27.
2. Ивашин В.В., Пенчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. – 2013. – №6. – С. 42-46.
3. 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.
4. Болух В.Ф., Шукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
5. Иванов В.В., Паранин С.Н., Ноздрин А.А. Полуавтоматическая установка магнитно-импульсного прессования порошков // Материаловедение. – 2011. – № 7. – С. 42-45.
6. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). – 2013, 10-13 June, Stockholm. – Paper 608. doi: 10.1049/cp.2013.0834.
7. Болух В.Ф., Шукин И.С. Высокоэффективные импульсные электромеханические и электромагнитные устройства уничтожения информации на цифровых накопителях // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №5. – С. 36-46. doi: 10.20998/2074-272x.2015.5.05.
8. Пат. РФ № 2654163, МПК G11C 13/00, G06F 21/60. Устройство уничтожения информации, размещенной на твердотельном цифровом SSD накопителе / Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Шукин И.С. – Заявка № 2017109042. Заявл. 17.03.2017. Оpubл. 16.05.2018, Бюл. № 14.
9. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – vol.48. – no.11. – pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.
10. US Patent 8686814: H01H77/00. Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device / Schneider Electric Industries SAS. 01.04.2014.
11. Болух В.Ф., Данько В.Г., Олексенко С.В. Влияние наружного экрана на эффективность линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа // Электротехника. – 2018. – №4. – С. 63-69. doi: 10.3103/s106837121804003x.
12. Болух В.Ф., Кочерга А.И., Шукин И.С. Электромеханические процессы в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе с подвижным индуктором и двумя якорями // Электротехніка і електромеханіка. – 2018. – №2. – С. 11-17. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.02.
13. Болух В.Ф., Кочерга А.И., Шукин И.С. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора // Электротехніка і електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 21-28. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.
14. Болух В.Ф., Кочерга О.І., Шукин І.С. Порівняльний аналіз конструктивних типів комбінованих лінійних імпульсних електромеханічних перетворювачів // Технічна електродинаміка. – 2018. – №4. – С. 84-88.

REFERENCES

1. Tomashevsky D.N., Koshkin A.N. Modeling of linear impulse electric motors. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no.1, pp. 24-27. (Rus).
2. Ivashin V.V., Penchev V.P. Features of the dynamics of work and energy diagrams of pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of excitation windings. *Electrical engineering*, 2013, no.6, pp. 42-46. (Rus).
3. 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**.
4. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induksionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
5. Ivanov V.V., Paragin S.N., Nozdrin A.A. Semiautomatic installation of magnetic pulse compaction of powders. *Materialovedenie*, 2011, no.7, pp. 42-45. (Rus).
6. Young-woo Jeong, Seok-won Lee, Young-geun Kim, Hyun-wook Lee. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, 10-13 June, Stockholm, Paper 608. doi: **10.1049/cp.2013.0834**.
7. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. High-performance electromechanical and electromagnetic pulse devices for destruction of information on digital drives. *Electrical engineering and electromechanics*, 2015, no.5, pp. 36-46. (Rus). doi: **10.20998/2074-272x.2015.5.05**.
8. Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Shchukin I.S. *Ustroistvo unichtozheniia informatsii, razmeshchennoi na tverdotel'nom tsifrovom SSD nakopitele* [A device for destroying information located on a solid state digital SSD drive]. Patent Russian Federation, no. 2654163, 2018. (Rus).
9. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol.48, no.11, pp. 3315-3318. doi: **10.1109/tmag.2012.2198447**.
10. Schneider Electric Industries SAS. *Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device*. Patent USA, no.8686814, 2014.
11. Bolyukh V.F., Dan'ko V.G., Oleksenko S.V. The Effect of an External Shield on the Efficiency of an Induction-Type Linear-Pulse Electromechanical Converter. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol.89, no.4, pp. 275-281. doi: **10.3103/s106837121804003x**.
12. 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.2, pp. 11-17. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2018.2.02**.
13. 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. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2018.1.03**.
14. Bolyukh V.F., Kocherga A.A., Shchukin I.S. Comparative analysis of constructive types of combined linear pulse electromechanical converters. *Technical electrodynamics*, 2018, no.4, pp. 84-88. (Ukr). doi: **10.15407/techned2018.04.084**.

Поступила (received) 22.06.2018

Болух Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
 Каианский Юрий Владимирович¹, магистрант,
 Кочерга Александр Иванович¹, аспирант,
 Шукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com
²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, Yu.A. Kashanskij¹, A.I. Kocherga¹, I.S. Schukin^{1,2}
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kurychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
²Firm Tetra, LTD,
 2, Kurychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Investigation of linear pulse electromechanical converter of induction type with double armature intended for destroying information on SSD storage device.

Purpose. The goal of the paper is to determine the influence of the linear pulse electromechanical converter (LPEC) parameters with a double armature on its electrical, power and temperature indices and experimental verification of the proposed design for an information destruction device in a flat SSD storage device.

Methodology. Using the mathematical model that takes into account interrelated electrical, magnetic, thermal and mechanical processes, the influence of geometric parameters on the electrodynamic characteristics and the indices of the induction type LPEC with a double armature spanning the inductor from opposite sides is investigated. **Results.** It is shown that the currents in the inductor and armature change in accordance with the oscillation-damping law practically in antiphase. The maximum value of the current density in the inductor is 215.8 A/mm², and in each of the identical parts of the double armature it is 299.7 A/mm². The maximum value of electrodynamic forces (EDF) acting in opposite directions on the front and rear of the double armature is 11.99 kN, and the value of the EDF pulse is 4.59 N·s. **Originality.** It is established that with axial removal of the rear part of the armature from the inductor, the maximum current densities in the inductor decrease, in the front part of the armature increase, and in the rear part of the armature decrease. The maximum value and the pulse of the EDF between the armature parts decrease. With an increase in the number of turns in the inductor and a decrease in the thickness of the copper bus, all the basic indicators of the LPEC increase. With an increase in the number of turns of the inductor from 26 to 56, the maximum EDF value acting between the parts of the armature increases almost 3 times, and the magnitude of the EDF pulse is 3.3 times. With an increase in the width of the copper bus and the width of the inductor, the main indicators of the LPEC decrease. With an increase in the width of the inductor from 10 mm to 20 mm, the maximum EDF between the armature parts decreases by 1.3 times, and the value of the EDF pulse decreases by 1.2 times. **Practical value.** Based on the conducted studies, an induction-type LPEC model with a double armature was designed and tested experimentally, designed to destroy information located on a solid-state digital SSD storage device. References 14, figures 9.

Key words: linear pulse electromechanical converter of induction type, double armature, electrodynamic processes, digital SSD storage device, experimental sample.