

*В.Ф. БОЛЮХ*, д.т.н., проф., НТУ "ХПИ"  
*С.В. ОЛЕКСЕНКО*, аспирант, НТУ "ХПИ"

## **ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЯКОРЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Рассмотрено влияние и зависимость эффективности линейного электромеханического преобразователя дисковой конфигурации от геометрической формы и размера якоря в зависимости от характера индуцированного в нем тока.

**Ключевые слова:** электромеханический преобразователь, якорь, математическое моделирование.

**Введение.** Линейные электромеханические преобразователи (ЛЭМП) широко используются в научно-технических системах, где необходимы импульсные механические нагрузки или высокие кинетические энергии, развиваемые на коротком участке за малое время. В ЛЭМП индукционного типа при возбуждении неподвижного индуктора от емкостного накопителя в электропроводящем якоре индуцируется ток, что приводит к возникновению электродинамических усилий (ЭДУ) и быстрому линейному перемещению якоря в сторону объекта воздействия. Рассмотрены различные массогабаритные и энергетические параметры ЛЭМП, влияющие на его эффективность. Однако вопрос об оптимальной конфигурации якоря в зависимости от характера индуцированного тока остался не исследованным [1].

**Анализ литературы.** ЛЭМП используются во многих отраслях науки и техники для механической обработки поверхностей, деформации и ускорения объектов, в качестве быстродействующих линейных приводов в различных системах, и т.д. Относительно низкая эффективность ЛЭМП вызвана несогласованностью электромагнитных, механических и тепловых процессов вследствие их кратковременного импульсного характера. Известны технические решения, направленные на повышение эффективности ЛЭМП (использование криогенного охлаждения, ферромагнитного сердечника, якоря специальной конфигурации, многосекционного индуктора с последовательной коммутацией и др.), которые требуют существенного усложнения конструкции с ухудшением массогабаритных показателей [2-5]. При этом не полностью использован оптимизационный подход, позволяющий избежать указанных усложнений.

© Болух В.Ф., Олексенко С.В., 2012

**Целью работы** является определение эффективности ЛЭМП в зависимости от геометрических параметров и размеров якоря на основе характера индуцированного в нем тока.

**Математическая модель ЛЭМП.** Для ЛЭМП дисковой конфигурации характерна существенная неравномерность распределения токов, индуцированных в массивном якоре. В математической модели это можно учесть путем представления якоря в виде совокупности коаксиальных, упорядочено расположенных короткозамкнутых контуров малого поперечного сечения. В этом случае электрические процессы в ЛЭМП можно описать системой уравнений [6]:

$$R_1(T_1)i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^{t_s} i_1(t) dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0; \dots \dots \dots (1)$$

$$R_n(T_n)i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{1n}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{n-1,n} \frac{di_{n-1}}{dt} + i_1(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} + \dots + i_{n-1}(t)V(t) \frac{dM_{n,n-1}}{dz} = 0,$$

где 1 – индекс индуктора; 2,...,n – индексы элементарных контуров якоря, перемещающегося вдоль оси z со скоростью V(t); R<sub>p</sub>(T<sub>p</sub>), L<sub>p</sub>, i<sub>p</sub>, T<sub>p</sub> – соответственно, сопротивление, индуктивность, ток и температура p-го элементарного контура; M<sub>nk</sub> – взаимоиндуктивность между n-ым и k-ым элементарными контурами; t<sub>s</sub> – длительность разрядного импульса.

Результирующая сила, действующая на ускоряемый якорь, равна:

$$f_2(t, z) = f_z(t, z) - f_{pr}(z) - f_a(V), \quad (2)$$

где f<sub>z</sub>(t, z) – ЭДУ со стороны индуктора

$$f_z(t, z) = i_1(t) \sum_{p=2}^n i_p(t) \frac{dM_{1p}}{dz}(z); \quad (3)$$

f<sub>pr</sub>(z) – сила возвратной пружины, противодействующая движению

$$f_{pr}(z) = K_p \Delta Z(t); \quad (4)$$

f<sub>a</sub>(V) – сила аэродинамического сопротивления

$$f_a(V) = 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t), \quad (5)$$

K<sub>p</sub> – коэффициент упругости пружины; ΔZ(t) – величина перемещения якоря; γ<sub>a</sub> – плотность воздуха; β<sub>a</sub> – коэффициент аэродинамического сопротивления, D<sub>ex2</sub> – внешний диаметр якоря.

Под действием результирующей силы  $f_2$  якорь перемещается вдоль оси  $z$  со скоростью  $V(t)$ , которую можно представить рекуррентным соотношением:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + (t_{n+1} - t_n) f_2 m_{ank}^{-1}, \quad (6)$$

где  $m_{ank}$  – общая масса ускоряемой части, включающей якорь и ускоряемый элемент.

**Геометрические параметры ЛЭМП.** ЛЭМП состоит из коаксиально установленных многovitковой обмотки индуктора 2, возбуждаемой аперiodическим импульсом от емкостного накопителя, массивного якоря 1 и ускоряемого элемента 3 (рис. 1).

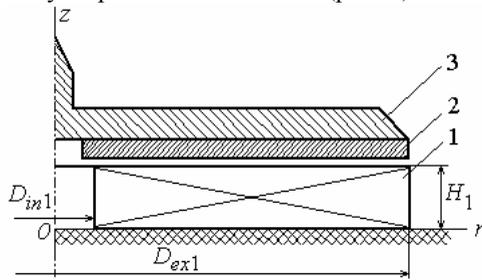


Рис. 1. Схема ЛЭМП дисковой конфигурации: 1 – якорь, 2 – индуктор, 3 – ускоряемый элемент.

Основные параметры базового варианта ЛЭМП представлены в таблице. В общем случае показателями геометрии ЛЭМП являются (рис. 2):  $D_{ex1}$ ,  $D_{in1}$  – внешний и внутренний диаметр индуктора;  $H_1$  – высота индуктора; цилиндрический якорь характеризуется:  $D_{ex2}$ ,  $D_{in2}$  – соответственно, внешний и внутренний диаметр якоря;  $H_2$  – высота якоря;  $d_{z0}$  – аксиальное расстояние между индуктором и якорем;  $\Delta z$ ,  $\Delta r$  – радиальная длина и высота элементарного токового элемента;  $z^*(k)$  – аксиальное расстояние между нижней границей якоря и центром элементарного токового элемента;  $r(k)$  – радиальное расстояние между центром индуктора (якоря) и центром элементарного токового элемента.

Введем безразмерные параметры, описывающие геометрические размеры ЛЭМП:

$$\chi = \frac{D_{in2}}{D_{ex1}}; \quad \gamma = \frac{D_{ex2}}{D_{ex1}}; \quad \varpi = \frac{D_i}{D_{ex1}}; \quad \vartheta = \frac{\int f_z(t, z) dt}{\int f_z^*(t, z) dt} \cdot 100\%.$$

Таблица – Основные параметры базового варианта ЛЭМП

Показатель	Значение
Внешний диаметр индуктора $D_{ex1}$ , мм	100
Внутренний диаметр индуктора $D_{in1}$ , мм	10
Высота индуктора $H_1$ , мм	10
Внешний диаметр якоря $D_{ex2}$ , мм	100
Внутренний диаметр якоря $D_{in2}$ , мм	6
Высота якоря $H_2$ , мм	2,5
Начальное расстояние между якорем и индуктором $dz_0$ , мм	1
Количество витков индуктора $N_1$ , шт.	46
Размер сечения витка индуктора $a \times b$ , мм <sup>2</sup>	1,8×4,8
Коэффициент упругости пружины $K_p$ , кН/м	7,5
Масса якоря и полезного груза $m_{ank}$ , кг	0,354
Зарядное напряжение накопителя $U_0$ , В	400

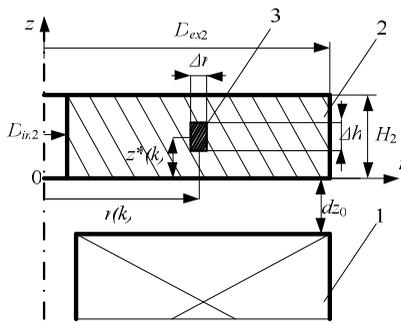


Рис. 2. Расчетная конфигурация ЛЭМП дисковой конфигурации: 1 – якорь, 2 – индуктор, 3 – элементарный токовый элемент

### Влияние формы и размеров якоря на эффективность ЛЭМП

При выборе параметров якоря рассмотрим влияние его высоты, внутреннего и внешнего диаметра на КПД ЛЭМП, определяемый отношением:

$$\eta_m = \frac{m_{ank} \cdot V_m^2}{U_0 \cdot C^2} \cdot 100\%. \quad (7)$$

*Зависимость  $\eta_m$  от внешнего диаметра якоря ( $D_{ex2}$ ).* При изменении внешнего диаметра цилиндрического массивного якоря в диапазоне значений  $\gamma = [0,3 \dots 1,8]$  наибольшие значения КПД  $\eta_m$  достигаются для  $\gamma = 1,2$  (рис. 3). При этом изменение параметра  $\gamma$  от 1,2 до 1,0 не приводит к уменьшению КПД более чем на 0,5 %, что достаточно

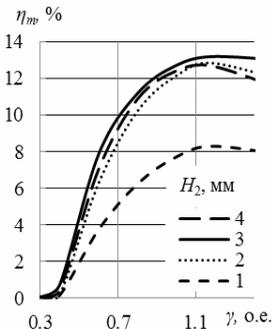


Рис. 3. Зависимость  $\eta_m$  ЛЭМП от внешнего диаметра якоря

При этом диапазоне высот цилиндрического якоря  $H_2 = [0 \dots 2,5]$  мм в наибольшей степени влияет на значение КПД ЛЭМП вследствие того, что магнитная связь между индуктором и элементарными токовыми элементами, принадлежащими этому диапазону высот, максимальна.

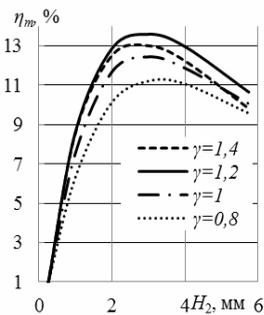


Рис. 4. Зависимость  $\eta_m$  ЛЭМП от высоты якоря

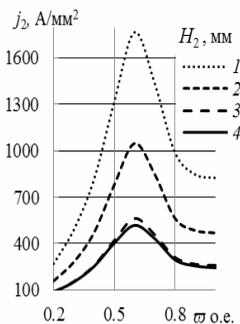


Рис. 5. Изменение средней плотности тока якоря в зависимости от его высоты

С ростом высоты массивного цилиндрического якоря средняя плотность тока в нем уменьшается (рис. 5) за счет роста числа элементарных токовых элементов, характеризующихся более низкой взаимоиндуктивностью с индуктором. Указанное свойство иллюстрирует рис. 6, на котором представлено изменение импульса силы

важно, когда ограничением размеров якоря выступает внешний диаметр индуктора.

Элементарные токовые элементы, принадлежащие диапазону радиальных расстояний  $\gamma = [0,4 \dots 0,8]$  в наибольшей мере влияют на значение  $\eta_m$  ЛЭМП. Это объясняется тем, что плотности токов в них максимальны. При дальнейшем увеличении параметра  $\gamma$  более 1,2 КПД ЛЭМП падает, вследствие низкой плотности токов в дополнительных элементарных токовых элементах и высокой относительной массы.

*Зависимость  $\eta_m$  от высоты якоря ( $H_2$ ).*

Наиболее эффективной высотой массивного цилиндрического якоря является диапазон высот  $[2,5 \dots 3,5]$  мм, максимум которого достигается при значении  $H_2 = 3$  мм не зависимо от внешнего диаметра (рис. 4).

$$F_z = \int_0^t f_z(z, t) dt \quad (8)$$

в зависимости от высоты якоря.

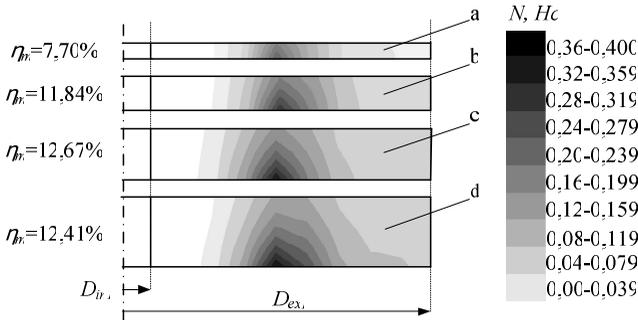


Рис. 6. КПД ЛЭМП и характер импульса силы в зависимости от высоты якоря: а –  $H_2=1$  мм, б –  $H_2=2$  мм, в –  $H_2=3$  мм, д –  $H_2=4$  мм

*Зависимость  $\eta_m$  от внутреннего диаметра якоря ( $D_{in}$ ).* При выборе внутреннего диаметра якоря необходимо выбирать наименьший из возможных, однако, элементарные токовые элементы, принадлежащие диапазону радиальных расстояний  $\chi=[0..0,2]$  имеют малое влияние на значение КПД ЛЭМП. Исключение последних не приводит к уменьшению эффективности ЛЭМП более чем на 0,5 % (рис. 7).

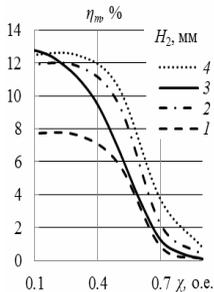


Рис. 7. Зависимость  $\eta_m$  ЛЭМП от внутреннего радиуса якоря

как следствие – к росту импульса силы в оставшихся токовых элементах, которые суммарно компенсируют импульс силы, создаваемый исключенными токовыми элементами.

*Геометрия якоря.* Выбор конфигурации якоря ЛЭМП определяется распределением плотности тока по его сечению (рис. 8) для момента времени  $t$  при котором сила  $f(t)$ , действующая на якорь, максимальна.

Синтез оптимальной формы якоря предполагает, что элементарные токовые элементы, имеющие низкую плотность тока, исключаются. Это приводит к росту плотностей тока в оставшихся элементарных токовых элементах якоря (обусловленное отсутствием отрицательного влияния взаимоиндуктивности между ними), и

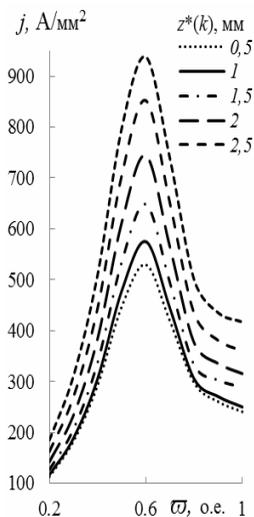


Рис. 8. Распределение плотности тока по сечению базового якоря

В случае добавления дополнительного элементарного токового происходит обратное – уменьшение средней плотности тока в других токовых элементах. Повышение эффективности ЛЭМП за счет добавления новых токовых элементов к базовому варианту не целесообразно, так как добавление на краях диска якоря не эффективно, вследствие низкой плотности тока в элементарных токовых элементах этих участков. Добавление элементарных токовых элементов в центральной части диска якоря приводит к существенному уменьшению плотности тока в соседних элементарных токовых элементах. Отрицательное изменение импульса силы при этом не компенсируется вследствие низкого значения магнитной связи между ними и индуктором.

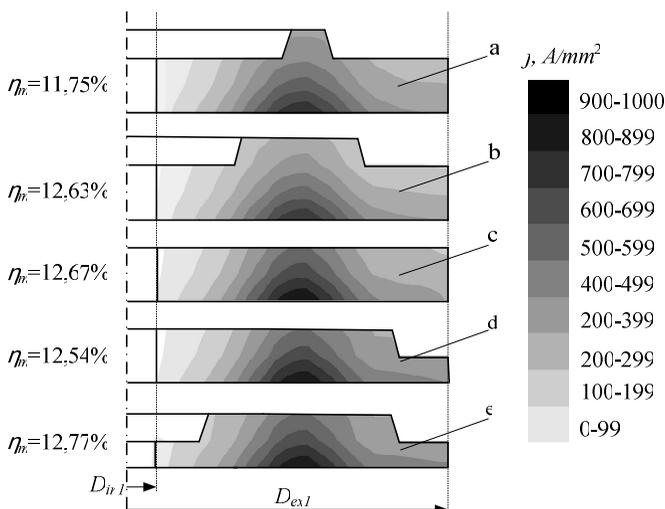


Рис. 9. КПД ЛЭМП и характер распределения индуцированного тока якоря в зависимости от его конфигурации

На рис. 9 представлено изменение распределения плотности тока по сечению якоря в зависимости от его формы, в случае добавления элементарных токовых элементов (вариант а, б) к базовому якорю (вариант с) и их исключению (вариант d, e).

В результате проведения ряда расчетов было выявлено, что наиболее эффективными формами якоря являются представленные на рис. 10.

**Выводы.** Предложенную задачу выбора формы и размеров якоря необходимо рассматривать как многокритериальную, учитывающую различные факторы: КПД, расход активных материалов, габаритные ограничения. На основании математического моделирования установлено влияние формы якоря на эффективность ЛЭМП и выявлены оптимальные геометрические параметры.

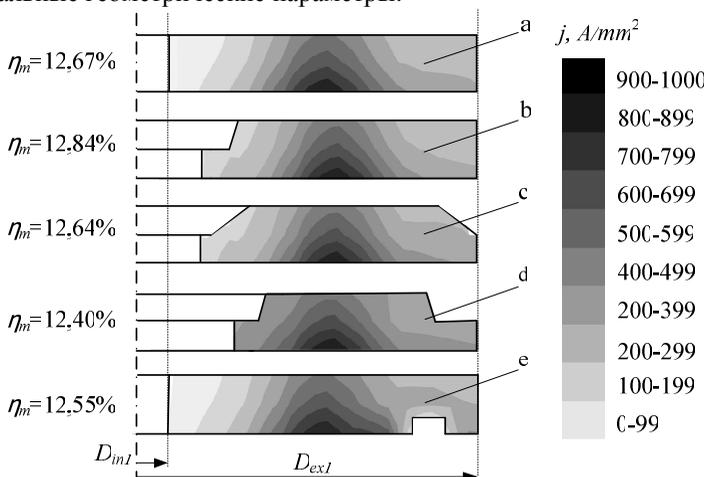


Рис. 10. КПД ЛЭМП и характер распределения индуцированного тока якоря в зависимости от его конфигурации; а – базовый якорь

**Список литературы:** 1. Болюх В.Ф., Назаренко С.А. Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия // Интегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С. 28-36. 2. Карпунин В.Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке // Труды междуна. науч.техн. конф. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития. – Самара: Изд. учеб. лит. – 2007. – С. 99-103. 3. Чемерис В.Т., Болюх В.Ф., Маисталир В.В. О возможности применения в минометах калибра 82 мм индукционного способа метания мин // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2010. – № 2. – С. 50-58. 4. Пат. України № 56568. Криогенний імпульсний електромеханічний перетворювач індукційного типу / Болюх В.Ф.,

Любимова Л.О. № 2002076134; Заявлено 23.07.02; Надрук. 15.05.03, Бюл. № 5.  
**5. Болюх В.Ф., Щукин И.С.** Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 5-11. **6. Болюх В.Ф., Данышко В.Г.** Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Монографія. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – 260 с.



**Болюх Владимир Федорович**, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



**Олексенко Сергей Владимирович**. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2011 г. Аспирант кафедры общей электротехники НТУ "ХПІ". Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.

*Поступила в редколлегию 06.09.2012*

УДК 621.313:536.2.24:539.2

**Влияние конфигурации якоря на эффективность линейного электромеханического преобразователя / Болюх В.Ф., Олексенко С.В.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 18-26. Бібліогр.: 6 назв.

Розглянуто вплив і залежність ефективності лінійного електромеханічного перетворювача дискової конфігурації від геометричної форми і розміру якоря в залежності від характеру індукованого в ньому струму.

**Ключові слова:** електромеханічний перетворювач, якор, математичне моделювання.

The influence and dependence of the efficiency of the linear electromechanical transducer of the disk configuration on the geometrical shape and size of armature depending on the nature of the induced current in it are considered.

**Keywords:** electromechanical transducer, armature, mathematical modelling.