

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТИПІВ КОМБІНОВАНИХ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

В.Ф. Болюх*, докт.техн.наук, **О.І. Кочерга****, **І.С. Щукін*****, канд.техн.наук
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
 вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна. Е-mail: yfbolyukh@gmail.com

Розроблено комп'ютерну модель лінійного імпульсного електромеханічного перетворювача (ЛІЕП) циліндричної конфігурації, яка описує електромагнітні та електромеханічні процеси з просторово-розподіленими параметрами. Виконано аналіз конструктивних типів, призначених для утворення механічних імпульсів комбінованих ЛІЕП, якорі яких виконано у вигляді мідного диску та/або багатовиткової котушки, що послідовно або паралельно з'єднана з індуктором. Встановлено закономірності протікання електромеханічних процесів та розподіл магнітного поля в активній зоні конструктивних типів комбінованих ЛІЕП. З використанням критерію ефективності, який у відносному вигляді враховує електричні, силові та польові (індукція магнітного поля розсіювання) показники та надійність, показано, що за всіма варіантами стратегії оцінки найбільш ефективним є конструктивний тип ЛІЕП з переднім і заднім електропровідними якорями та котушковим якорем, який послідовно з'єднаний з індуктором. Бібл. 10, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач, конструктивний тип, електропровідний якор, котушковий якор, критерій ефективності.

Вступ. Для утворення потужних силових імпульсів найбільш широко використовуються лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі (ЛІЕП) електродинамічного та індукційного типів [1, 4, 8]. У будівництві застосовуються електромагнітні молоти і перфоратори; в гірничій промисловості – бутобій та вібратори; в геологорозвідці – вібросейсморджерела; в машинобудуванні – молоти з великим діапазоном енергії удару та пристрої для електродинамічної обробки зварних з'єднань; у хімічній та медико-біологічній промисловості – віброзмішувачі, дозатори тощо. ЛІЕП застосовуються у випробувальних комплексах для перевірки відповідальності апаратури на ударні навантаження, в магнітно-імпульсних пристроях для пресування порошків кераміки, очищення смностей від налипання сипучих матеріалів, знешкодження інформації на цифрових носіях тощо [2, 5, 6].

Основним елементом ЛІЕП є нерухомий індуктор, що збуджується імпульсним джерелом, наприклад, емнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ). Індуктор за допомогою магнітного поля взаємодіє з якорем, який діє на ударний виконавчий елемент. У ЛІЕП індукційного типу електропровідний якор (ЕЯ) представляє собою відносно тонкий мідний диск, в якому індуються вихрові струми від індуктора, внаслідок чого між ними виникають електродинамічні зусилля (ЕДЗ) відштовхування. У ЛІЕП електродинамічного типу котушковий якор (КЯ) – це рухома багатовиткова котушка, яка електрично з'єднана з індуктором. Оскільки індуктор та КЯ намотані зустрічно за магнітним полем, то між ними також виникають ЕДЗ відштовхування.

Оскільки ефективність зазначених перетворювачів недостатньо висока, то пропонуються конструктивні типи комбінованих ЛІЕП, які поєднують кращі властивості зазначених перетворювачів [10]. Однак ефективність конструктивних типів комбінованих ЛІЕП не досліджена.

Мета роботи полягає у порівняльному аналізі ефективності конструктивних типів комбінованих ЛІЕП циліндричної конфігурації, призначених для створення силових імпульсів. Оцінка ефективності має враховувати різні аспекти роботи ЛІЕП: максимальні та інтегральні силові показники, максимальну величину струму в індукторі, що впливає на електронну систему формування струмового імпульсу, та магнітні поля розсіювання, які впливають на близько розташовані електронні та біологічні об'єкти.

Математична модель. У ЛІЕП при збудженні від ЄНЕ виникають швидкісні та взаємопов'язані електромагнітні та електромеханічні процеси. Реалізація математичної моделі ЛІЕП з використанням теорії електричних кіл не дозволяє повною мірою описати сукупність просторово-часових процесів. Виходячи з цього, використовується математична модель ЛІЕП, заснована на методі кінцевих елементів.

Оскільки ЛІЕП, що розглядаються, мають осьову симетрію, то доцільно використовувати двомірну математичну модель з просторово-розподіленими параметрами [9]. Для визначення електромагнітних параметрів ЛІЕП у циліндричній системі координат $\{r, z, \varphi\}$ розраховується φ -складова векторного магнітного потенціалу A_φ з рівняння

$$-\frac{A_\varphi}{\mu_0 r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r \mu_0} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \sigma \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = j_m, \quad (1)$$

© Болюх В.Ф., Кочерга О.І., Щукін І.С., 2018

ORCID ID: *<http://www.orcid.org/0000-0001-9115-7828> ; **<http://www.orcid.org/0000-0002-0028-9532> ;

***<http://www.orcid.org/0000-0001-7982-8633>

де μ_0 – магнітна постійна; σ – електропровідність якоря та індуктора; j_m – густина струму в активному елементі; $m=1$ – індекс індуктора; $m=2$ – індекс КЯ.

Складові вектора магнітної індукції знаходяться за відомими співвідношеннями

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r}; \quad B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}. \quad (2)$$

Граничними умовами системи є рівняння $n \times A = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні. Струм в індукторі i_1 описується рівняннями

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt - \frac{N_1}{s} \int_V \frac{dA_\varphi}{dt} dv = 0, \quad q(0) = U_0, \quad (3)$$

де R_e – активний опір зовнішнього кола; R_1 – активний опір індуктора; L_e – індуктивність зовнішнього кола; U_0 – напруга заряду ЄНЕ; C – ємність ЄНЕ; N_1 – число витків індуктора; s – площа поперечного перетину індуктора, яка пронизується магнітним потоком; A_φ – азимутальна складова векторного магнітного потенціалу; V – об'єм індуктора; $q(0)$ – заряд конденсатора при $t=0$.

ЕДЗ, що діють на якір, визначаються за допомогою тензора натягу Максвелла

$$f_z = 0,5 \oint_S [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)] ds, \quad (4)$$

де S – площа, яка обмежує поперечний перетин якоря; n – одиничний вектор нормалі до поверхні якоря.

Імпульс ЕДЗ, що визначає інтегральну силову дію на якір, записується

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

Рівняння (1) – (5) описують електромагнітні та електромеханічні процеси в ЛЕП при початкових умовах: $u_c(0)=U_0$; $i_1(0)=0$, де u_c – напруга ЄНЕ.

При розрахунках припускаємо відсутність механічних переміщень та деформації елементів і аксіальне розташування якорів відносно індуктора.

Рішення системи рівнянь (1) – (5) отримуємо з використанням методу кінцевих елементів при інтегруванні за просторовими змінними та удосконаленням методом Гіра при інтегруванні за часом. Для цього було розроблено комп'ютерну модель ЛЕП у програмному пакеті *Comsol Multiphysics* [7]. Розрахунковий крок за часом автоматично варіювався залежно від умов збіжності та показників похибок отриманих рішень. Рішення системи рівнянь здійснювалося методом BDF (*backward differentiation formula*) з фіксованим кроком за часом, нерівномірною сіткою та використанням вирішувача PARDISO.

Конструктивні типи комбінованих ЛЕП. Розглянемо комбіновані ЛЕП з наступними параметрами. Індуктор має $N_1=46$ витків мідної шини перерізом $a \times b=1,8 \times 4,8$ мм² і виконаний з зовнішнім діаметром $D_{ex1}=100$ мм, внутрішнім діаметром $D_{in1}=10$ мм та висотою $H_1=10$ мм. ЕЯ виконаний у вигляді мідного диска з зовнішнім діаметром $D_{ex2}=100$ мм, внутрішнім діаметром $D_{in2}=10$ мм та висотою $H_2=2,5$ мм. КЯ виконаний аналогічно індуктору. Індуктор збуджується від ЄНЕ ємністю $C=2850$ мкФ і зарядною напругою $U_0=400$ В полярним аперіодичним імпульсом (індуктор шунтований зворотним діодом) [9].

Розглянемо конструктивні типи комбінованих ЛЕП циліндричної конфігурації, що включають індуктор 1, передній ЕЯ 2, задній ЕЯ 3 та КЯ 4 (рис. 1–3). ЛЕП має ударний виконавчий елемент 5 і фіксатори 6, які утримують об'єкт впливу 7. Індуктор 1 та КЯ 4 електрично з'єднані між собою за допомогою рухомих (гнучких або контактних) струмоводів.

У конструктивному типі комбінованого ЛЕП, що включає індуктор, охоплений переднім та заднім ЕЯ (рис. 1), густина струму в індукторі j_1 має форму полярного аперіодичного імпульсу, а густина струмів в передньому j_2 та в задньому j_3 ЕЯ протягом 1,3 мс має протилежну полярність. Максимальна густина струму в індукторі $j_{1m}=266,7$ А/мм², а в якорях $-j_{2,3m}=390,2$ А/мм². Це обумовлює виникнення протилежних ЕДЗ відштовхування переднього f_{z2} та заднього f_{z3} якорів від індуктора. Протилежну полярність мають й імпульси ЕДЗ, що діють на передній F_{z2} та задній F_{z3} ЕЯ.

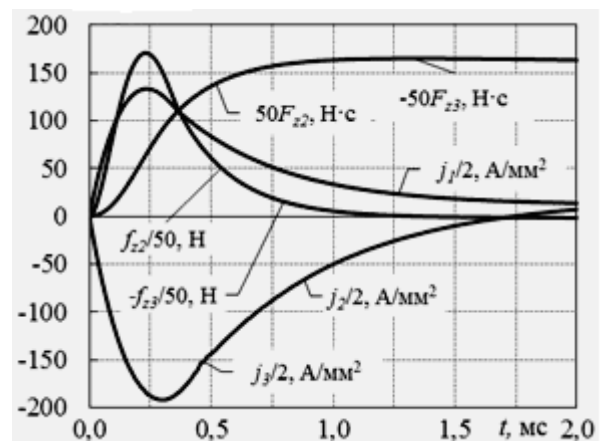
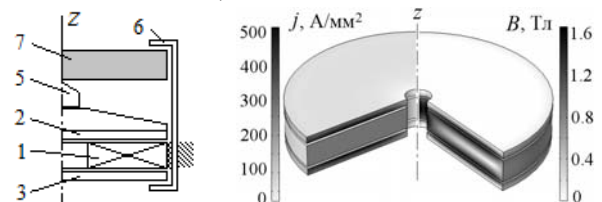


Рис. 1

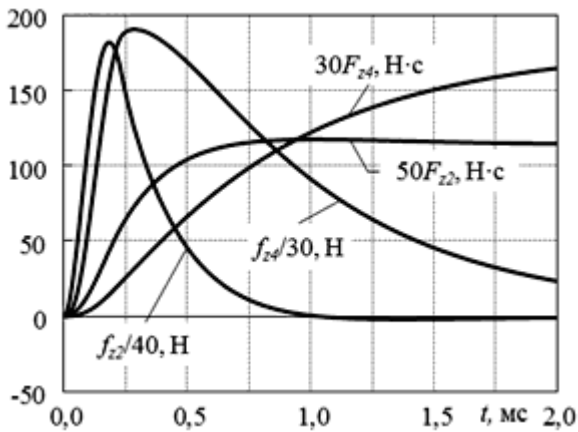
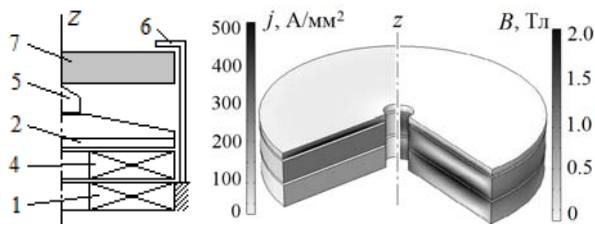


Рис. 2

ЕДЗ у кінці робочого процесу у порівнянні з величиною імпульсу ЕДЗ, що діє на КЯ. В даному конструктивному типі ЛПЕП максимальне значення індукції магнітного поля B на момент максимуму струму в індукторі має місце в області між індуктором та КЯ.

Розглянемо конструктивний тип комбінованого ЛПЕП з переднім та заднім ЕЯ та КЯ, який паралельно з'єднаний з індуктором (рис. 3). У цьому перетворювачі струми в обох ЕЯ та струми в індукторі та КЯ рівні. При цьому на передній і задній ЕЯ діють протилежно направлені ЕДЗ, максимальна величина яких $f_{z2,3m}=6,42$ кН. На КЯ діють ЕДЗ, максимальна величина яких дорівнює $f_{z4m}=4,09$ кН. Відповідні імпульси ЕДЗ, що діють на ЕЯ та КЯ, $-F_{z2,3}=1,98$ і $F_{z4}=4,07$ Нс. Максимальне значення індукції магнітного поля B на момент максимуму струму в індукторі в даному ЛПЕП має місце в області між індуктором та КЯ.

Аналіз ефективності ЛПЕП. Для того щоб провести порівняльний аналіз конструктивних типів комбінованих ЛПЕП, застосуємо критерій ефективності K^* , який у відносному вигляді враховує електричні, силові та польові (індукція магнітного поля розсіювання) показники

$$K^* = \beta \left(\frac{\alpha_1}{j_{1m}^*} + \alpha_2 f_{zm}^* + \alpha_3 F_z^* + \frac{\alpha_4}{B_{ex}^*} \right); \quad \sum_{n=1}^4 \alpha_n = 1, \quad (6)$$

де j_{1m} – максимальна густина струму в індукторі, f_{zm} , F_z – відповідно максимальне значення та імпульс ЕДЗ, що діють на ударний виконавчий елемент, B_{ex} – усереднене значення індукції магнітного поля розсіювання, β – коефіцієнт надійності якоря, α_j – вагові коефіцієнти відповідних показників ЛПЕП.

Усереднене значення індукції магнітного поля розсіювання B_{ex} розраховується на контурі, що розташований на відстані $2D_{ex1}$ від центра індуктора. Всі показники ЛПЕП нормовані відносно ЛПЕП з одним переднім ЕЯ та позначено зірочками.

Вважаючи, що коефіцієнт надійності для ЛПЕП без КЯ складає $\beta=1$, на підставі експертних оцінок вважаємо коефіцієнт надійності $\beta=0,75$ для ЛПЕП з КЯ. Більш низька надійність ЛПЕП з КЯ обумовлена наявністю рухомого контакту між індуктором та КЯ, а також його виконанням у вигляді багатовиткової котушки.

Розглянемо декілька варіантів визначення ефективності конструктивних типів ЛПЕП (табл. 1). Пріоритетність показника ЛПЕП оцінюється величиною відповідного безрозмірного вагового коефіцієнта α_n .

Максимальні значення ЕДЗ, що діють на кожний ЕЯ, дорівнюють $f_{z2,3m}=8,55$ кН, а імпульс ЕДЗ $F_{z2,3}=3,3$ Нс. За рахунок рухомих фіксаторів 6 ЕДЗ від обох якорів здійснюють сумарну силову дію на об'єкт впливу 7. На рис. 1 показано розподіли густини струмів та індукції магнітного поля B в індукторі та якорях на момент максимального значення струму в індукторі. Максимальні значення густини струму виникають на середніх ділянках ЕЯ, що обернені до індуктора. А найбільші значення індукції магнітного поля B виникають у центральній зоні індуктора та у суміжних областях між індуктором та ЕЯ.

У ЛПЕП електродинамічного типу індуктор та КЯ можуть бути з'єднані послідовно або паралельно [3]. Розглянемо конструктивний тип комбінованого ЛПЕП з переднім ЕЯ та КЯ, що паралельно з'єднаний з індуктором (рис. 2). При такому з'єднанні струми в індукторі та КЯ можуть розрізнитися через індукційну взаємодію з ЕЯ. На рис. 2 показані миттєві значення ЕДЗ, які діють на ЕЯ f_{z2} та КЯ f_{z4} , і відповідні імпульси ЕДЗ F_{z2} й F_{z4} , направлені вздовж осі z . Максимальні значення ЕДЗ, які діють на ЕЯ, дорівнюють $f_{z2m}=7,28$ кН, а на КЯ $-f_{z4m}=5,72$ кН, відповідні імпульси ЕДЗ $-F_{z2}=2,35$ і $F_{z4}=6,04$ Нс. Зазначимо, що ЕДЗ, які діють на передній ЕЯ, за рахунок більш короткого часу впливу обумовлюють меншу величину імпульсу

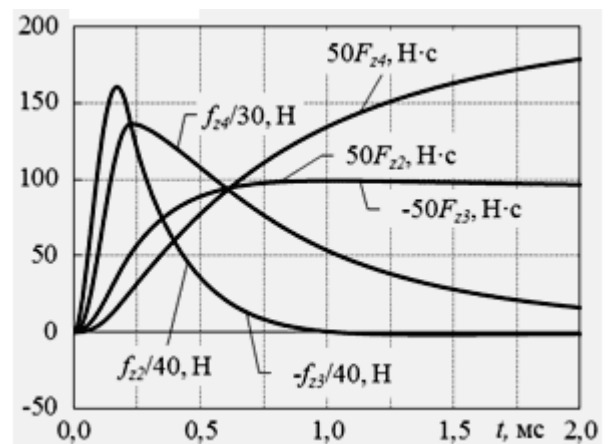
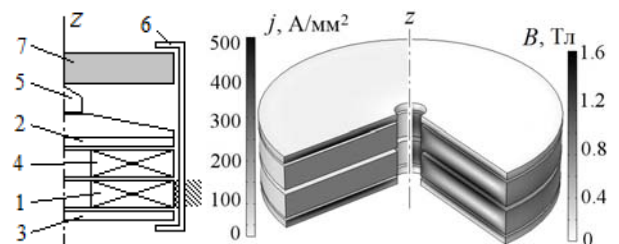


Рис. 3

Таблиця 1

Варіанти стратегій	α_1	α_2	α_3	α_4
I	0,25	0,25	0,25	0,25
II	0,4	0,2	0,2	0,2
III	0,2	0,4	0,2	0,2
IV	0,2	0,2	0,4	0,2
V	0,2	0,2	0,2	0,4

У табл. 2 у відносному вигляді представлені значення критеріїв ефективності K^* конструктивних типів ЛІЕП при різних варіантах стратегії оцінки їхньої ефективності. Необхідно зазначити, що за всіма варіантами оцінки найбільш ефективним є конструктивний тип ЛІЕП № 7 з переднім та заднім ЕЯ, а також з КЯ, який послідовно з'єднаний з індуктором. Ефективність цього ЛІЕП у значній мірі обумовлена найменшими значеннями індукції магнітного поля розсіювання B_{ex} . Найменш ефективними є конструктивні типи ЛІЕП № 3 та 5, у яких найменша величина максимального значення ЕДЗ f_{zm} . Зазначимо, що найбільша величина ЕДЗ f_{zm} реалізується в конструктивних типах ЛІЕП № 1 та 6, а найбільша величина імпульсу ЕДЗ F_z – у ЛІЕП № 2.

Висновки.

1. У програмному пакеті *Comsol Multiphysics* розроблено комп'ютерну модель ЛІЕП циліндричної конфігурації, яка описує електромагнітні та електромеханічні процеси з просторово-розподіленими параметрами.
2. Виконано аналіз конструктивних типів комбінованих ЛІЕП, якорі яких виконано у вигляді відносно тонкого мідного диску та/або багатовиткової котушки, яка послідовно або паралельно з'єднана з індуктором. Визначено закономірності протікання електромеханічних процесів та розподілення магнітного поля в активній зоні конструктивних типів комбінованих ЛІЕП.
3. З використанням критерію ефективності, який у відносному вигляді враховує електричні, силові та польові (індукція магнітного поля розсіювання) показники і надійність, показано, що за всіма варіантами стратегії оцінки найбільш ефективним є конструктивний тип ЛІЕП з переднім та заднім електропровідними якорями, і з котушковим якорем, який послідовно з'єднаний з індуктором.

1. Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электро-механических преобразователей электромагнитного и индукционного типов. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 46-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.046>

2. Иванов В.В., Паранин С.Н., Ноздрин А.А. Полуавтоматическая установка магнитно-импульсного прессования порошков. *Материаловедение*. 2011. № 7. С. 42-45.

3. 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.

4. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 83-88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083>

5. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Карлов О.М., Пашин М.О., Васюк В.В. Нестационарные электрофизические процессы в системах снижения залишковых напряжений зварных з'єднань. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 10-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010>

6. Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия. *Электротехника*. 2006. № 1. С. 24-27.

7. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>.

8. 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.

9. 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.

10. Bach J., Bricquet C. Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device. Assignee: Schneider Electric Industries SAS. Patent US No 8686814, 2014.

Розглянемо наступні конструктивні типи комбінованих ЛІЕП: 1 – з переднім та заднім ЕЯ (рис. 1); 2 – з КЯ, який з'єднаний паралельно з індуктором; 3 – з КЯ, з'єднаним послідовно з індуктором; 4 – з переднім ЕЯ та КЯ, який з'єднаний паралельно з індуктором; 5 – з переднім ЕЯ та КЯ, який з'єднаний послідовно з індуктором (рис. 2); 6 – з переднім та заднім ЕЯ і КЯ, який з'єднаний паралельно з індуктором; 7 – з переднім та заднім ЕЯ і КЯ, з'єднаним послідовно з індуктором (рис. 3).

Таблиця 2

Схема ЛІЕП	Варіант стратегії				
	I	II	III	IV	V
1	1.569	1.393	1.659	1.544	1.679
2	1.119	1.031	1.125	1.260	1.061
3	0.943	0.938	0.879	0.982	0.972
4	1.011	0.907	1.039	1.084	1.012
5	0.962	0.939	0.892	0.969	1.048
6	2.155	1.832	2.024	1.988	2.778
7	4.028	3.348	3.442	3.438	5.883

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ТИПОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В.Ф. Болюх, докт.техн.наук, **А.И. Кочерга**, **И.С. Щукин**, канд.техн.наук

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина. E-mail: yfbolyukh@gmail.com

Разработана компьютерная модель линейного импульсного электромеханического преобразователя (ЛИЭП) цилиндрической конфигурации, которая описывает электромагнитные и электромеханические процессы с пространственно-распределенными параметрами. Проведен анализ конструктивных типов комбинированных ЛИЭП, предназначенных для создания механических импульсов, якоря которых выполнены в виде медного диска и/или многовитковой катушки, которая последовательно или параллельно соединена с индуктором. Установлены закономерности протекания электромеханических процессов и распределения магнитного поля в активной зоне конструктивных типов комбинированных ЛИЭП. С использованием критерия эффективности, который в относительном виде учитывает электрические, силовые и полевые (индукция магнитного поля рассеяния) показатели и надежность, показано, что по всем вариантам стратегии оценки наиболее эффективным является конструктивный тип ЛИЭП с передним, задним электропроводящими якорями и с катушечным якорем, который последовательно соединен с индуктором. Библ. 10, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: линейный импульсный электромеханический преобразователь, конструктивный тип, электропроводящий якорь, катушечный якорь, критерий эффективности.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE TYPES OF COMBINED LINEAR PULSE ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

V.F. Bolyukh, A.A. Kocherga, I.S. Shchukin

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",

Kirpichova st., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: yfbolyukh@gmail.com

A computer model of a linear pulsed electromechanical converter (LPEC) of a cylindrical configuration that describes electromagnetic and electromechanical processes with spatially-distributed parameters is developed. The analysis of constructive types of combined LPEC designed to create mechanical impulses whose armatures are made in the form of a copper disk and/or multi-turn coil, which is connected in series or in parallel with the inductor, is analyzed. The nature of the electromechanical processes and distribution of the magnetic field in the active zone of the constructive types of combined LPEC is established. Using the efficiency criterion, which takes into account the electrical, force and field (induction of the magnetic scattering field) indicators and reliability in a relative form, it is shown that for all variants of the estimation strategy, the most effective design is the of the constructive type of combined LPEC design with the front and rear electrically conductive armature, and with the coil armature, which is connected in series with the inductor. References 10, figures 3, tables 2.

Key words: linear pulse electromechanical converter, constructive types, electrically conductive armature, coil armature, efficiency criterion.

1. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulsed electromechanical converters of electromagnetic and induction types. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 46-48. (Rus)

DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2016.05.046>

2. Ivanov V.V., Paranin S.N., Nozdrin A.A. Semiautomatic installation of magnetic pulse compaction of powders. *Materialovedenie*. 2011. No 7. Pp. 42-45. (Rus)

3. 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. *Elektrotehnika*. 2013. No 6. Pp. 42-46. (Rus)

4. Kondratenko I.P., Zhiltsov A.V., Pashchin M.O., Vasyuk V.V. Choice of parameters of an electromechanical converter of an induction type for electrodynamic treatment of welded joints. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 83-88. (Ukr)

DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2017.05.083>

5. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhiltsov A.V., Karlov O.M., Pashchin M.O., Vasyuk V.V. Non-stationary electro-physical processes in systems of reduction of residual stresses of welded joints. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp. 10-19. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2016.06.010>

6. Tomaszewski D.N., Koshkin A.N. Modelling of linear impulse motors. *Elektrotehnika*. 2006. No 1. Pp. 24-27. (Rus)

7. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>.

8. 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.

9. 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.

10. Bach J., Bricquet C. Electric switching device with ultra-fast actuating mechanism and hybrid switch comprising one such device. Assignee: Schneider Electric Industries SAS. Patent US No 8686814, 2014.

Надійшла 05.03.2018

Остаточний варіант 19.03.2018