

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Кочерга О.І. аспірант

Науковий керівник: Болюх В.Ф., д.т.н., проф.

(Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна)

## СИЛОВІ ПОКАЗНИКИ ЛІНІЙНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТА ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ТИПІВ

У багатьох галузях науки і техніки широко використовуються лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі (ЛЕП), які забезпечують потужні силові імпульси. Одними з найбільш ефективних являються ЛЕП індукційного, електромагнітного та електродинамічного типів [1, 2]. ЛЕП електромагнітного типу має феромагнітний яркір, що призводить до зменшених силових показників [2]. При цьому виникає питання порівняння силових показників ЛЕП індукційного та електродинамічного типів.

В ЛЕП індукційного типу з індуктором 1 взаємодіє яркір 2а, який виконаний у вигляді електропровідного масивного диску (рис.1), а в ЛЕП електродинамічного типу з індуктором 1 взаємодіє яркір 2б, який виконаний у вигляді багатовиткової котушки, що живиться з індуктором одним струмом (рис.2). В ЛЕП електродинамічного типу індуктор і яркір можуть бути з'єднані як послідовно, так і паралельно. Якоря зазначених ЛЕП взаємодіють з ударним виконавчим елементом 3. Суміжно з індуктором 1 розташований феромагнітний екран 4, який виконаний з магнітодіелектрика [3]. Індуктор збуджується від ємнісного накопичувача енергії  $C$  за допомогою електронних елементів, що формують аперіодичний імпульс струму.

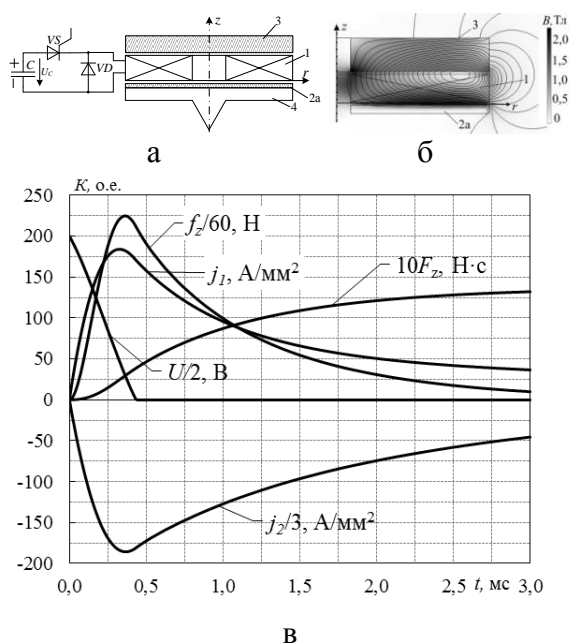


Рисунок 1 – Схема (а), розподіл магнітних полів (б) та електромеханічні характеристики (в) ЛЕП індукційного типу

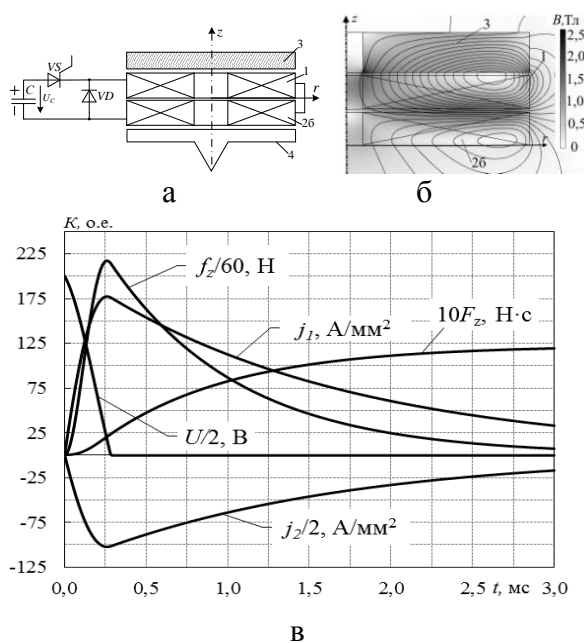


Рисунок 2 – Схема (а), розподіл магнітних полів (б) та електромеханічні характеристики (в) ЛЕП електродинамічного типу

Мета дослідження полягає у визначенні перетворювача, що забезпечує найбільші силові імпульси. Для рішення поставленої задачі була розроблена комп'ютерна модель ЛЕП в програмному пакеті *Comsol Multiphysics*, яка дозволяє адаптивно змінювати розрахункову сітку [3]. Моделювання електричних процесів здійснюється фізичними

модулями «*Electrical circuit*», який розраховує перехідні електричні процеси, та «*Magnetic fields*», який розраховує параметри ЛЕП на основі магнітного поля. Крім того, за допомогою модуля «*Magnetic fields*» розраховувались електромагнітні поля для кожного вузла розрахункової сітки.

Для визначення електромагнітних параметрів ЛЕП в циліндричній системі координат  $\{r, z\}$  розраховується векторний магнітний потенціал  $A$  з рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0.$$

де  $\mu(B)$  – магнітна проникливість, яка залежить від індукції магнітного поля  $B$  феромагнітного екрану;  $\sigma$  – електропровідність якоря та індуктора.

Межевими умовами системи виступає рівняння  $n \times A = 0$ , де  $n$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні. Струм в індукторі  $i_1$  описується рівнянням:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int_V \frac{dA_l}{dt} dv = 0 \qquad \frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0,$$

де  $R_e$  – активний опір зовнішнього кола;  $R_1$  – активний опір індуктора;  $L_e$  – індуктивність зовнішнього кола;  $U_0$ ,  $C$  – напруга та ємність накопичувача енергії;  $N_1$  – число витків індуктора;  $s$  – площа поперечного перетину індуктора, що пронизується магнітним потоком;  $A_l$  – проекція векторного магнітного потенціалу;  $V$  – об'єм індуктора.

Електродинамічні сили, що діють на якір, визначаються з використанням тензора натягу Максвелла:

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

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

На рис. 1, 2 представлені електромеханічні характеристики та розподіли магнітних полів в момент максимуму дії електродинамічної сили ЛЕП індукційного та електродинамічного типу. В ЛЕП індукційного типу максимальні значення густини струмів в індукторі  $j_{1m} = 185,7$  А/мм<sup>2</sup>, в якорі –  $j_{2m} = 500,5$  А/мм<sup>2</sup>. Внаслідок взаємодії розрядного та індукваного струмів на якір діє електродинамічна сила  $f_z$ , максимальне значення якої складає 13,5 кН. Імпульс електродинамічної сили, який визначає силову дію якоря на ударний виконавчий елемент

$$F_z = \int_0^t f_z dt, \text{ складає } 13,6 \text{ Нс.}$$

В ЛЕП електродинамічного типу електромеханічні показники суттєво залежать від схеми з'єднання якоря з індуктором. При послідовному з'єднанні максимальна густина струму в індукторі складає  $j_{1m} = 136,7$  А/мм<sup>2</sup>, на якір діє максимальна електродинамічна сила  $f_z = 6,91$  кН та її імпульс  $F_z = 7,5$  Нс. При паралельному з'єднанні максимальна густина струму в індукторі складає  $j_{1m} = 177,7$  А/мм<sup>2</sup>, на якір діє максимальна електродинамічна сила  $f_z = 13,0$  кН та її імпульс  $F_z = 12,3$  Нс.

Таким чином, при паралельному з'єднанні якоря і індуктора ЛІЕП електродинамічного типу силові показники краще, ніж при послідовному збудженні. Але ЛІЕП індукційного типу має найкращі силові показники, що, враховуючи більш надійну конструкцію, робить його найбільш ефективним та привабливим.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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.
2. Болух В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов // Технічна електродинаміка. - 2016. – № 5. – сс. 46-48.
3. Bolyukh V. F., Oleksenko S. V. The influence of the parameters of a ferromagnetic shield on the efficiency of a linear induction—dynamic converter // [Russian Electrical Engineering](#). – 2015. – Vol. 86, Issue 7. – P. 425-431.