

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

**Кочерга О.І., аспірант, Болюх В.Ф., д.т.н., проф.**  
НТУ «ХПІ», кафедра загальної електротехніки

**Вступ.** У багатьох галузях науки і техніки широко використовуються лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі, які забезпечують потужні силові імпульси [1, 2]. Одними з найбільш перспективних являється перетворювачі електродинамічного типу, в якому нерухомий індуктор та рухомий ярір виконані у вигляді багатовиткових котушок, що електрично з'єднані між собою [3]. Індуктор і ярір лінійного імпульсного електродинамічного перетворювача (ЛЕП) збуджуються струмом від ємнісного накопичувача енергії за допомогою електронних приладів аперіодичним струмом.

**Мета роботи.** Дослідження впливу захисного електропровідного диску (ЗЕД), що розташовується між ярором та ударно-виконавчим елементом, і схеми з'єднання яроря та індуктора на силові показники ЛЕП.

**Матеріали і результати досліджень.** На рис. 1 представлена схема ЛЕП, що включає індуктор 1, ярір 2, ударно-виконавчий елемент 3 та ЗЕД 4.

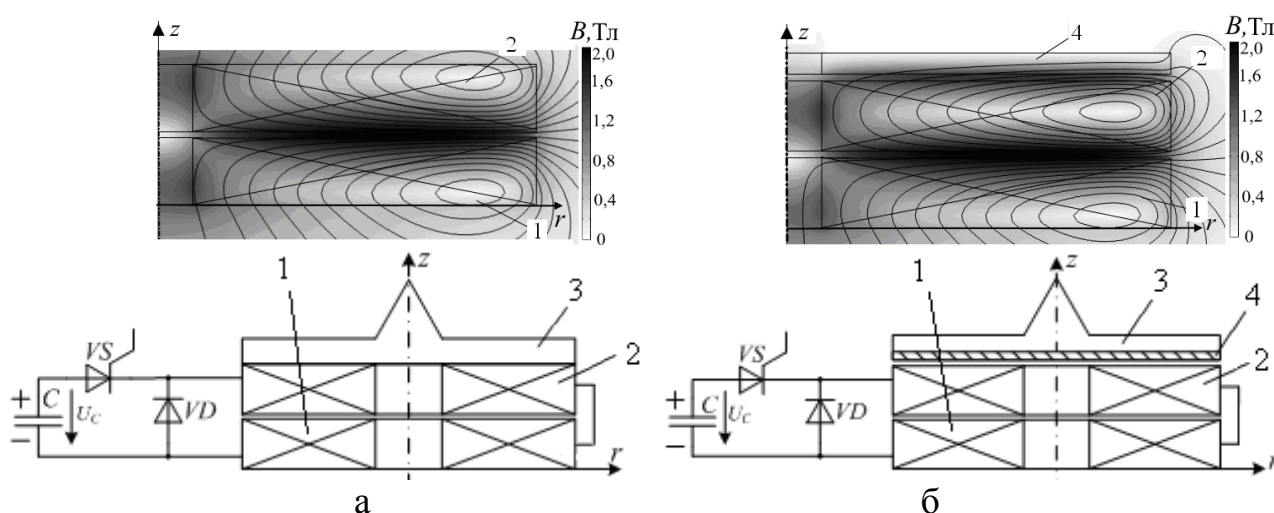


Рисунок 1 – Схема ЛЕП при відсутності (а) та наявності (б) ЗЕД з розподілом магнітних полів при максимальному струмі в індукторі

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

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

де  $\mu$  – магнітна проникливість;  $\sigma$  – електропровідність активного елемента;  $j_n$  – густина струму в активному елементі;  $n=1, 2$  – індекси індуктора, яроря.

Струм індуктора  $i_1$  описується рівнянням:

$$(R_e + R_1) \cdot i_1 + L_e \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + \frac{N_1}{s} \int_v \frac{dA_1}{dt} dv = 0; \quad \frac{1}{C} \int_0^t i_1 \cdot dt = U_0,$$

де  $R_e, R_1$  – активний опір, відповідно, зовнішнього кола та індуктора;  $L_e$  – індуктивність зовнішнього кола;  $U_0, C$  – напруга та ємність ємнісного накопичувача;  $N_1$  – число витків індуктора;  $s$  – площа поперечного перетину індуктора;  $A_l$  – проекція векторного магнітного потенціалу на напрям обходу контуру;  $V$  – об’єм індуктора.

Електродинамічні сили, що діють на якір, знаходяться з використанням тензора тяжіння Максвелла. Математична модель ЛІЕП представлена в роботі [4] і реалізована в програмному пакеті *Comsol Multiphysics* при адаптивній зміні розрахункової сітки та контролі похибок на кожному кроці. Розрахунковий часовий крок автоматично змінювався в залежності від умов збіжності та показників похибки. Рішення системи рівнянь, що описують взаємопов’язані електромагнітні, механічні та теплові процеси здійснювалось методом BDF (*backward differentiation formula*) з нерівномірною сіткою та з використанням вирішувача PARDISO [4].

Індуктор і якір ЛІЕП мають наступні параметри: зовнішній діаметр – 100 мм, внутрішній діаметр – 10 мм, кількість витків – 46 шт. шини з перерізом  $1,8 \times 4,8 = 8,64 \text{ мм}^2$ . ЗЕД виконаний з зовнішнім діаметром – 100 мм і висотою 3 мм. Ємнісний накопичувач має ємність 3000 мкФ і заряджений до напруги 400 В. На рис.2 представлені електромеханічні характеристики ЛІЕП без ЗЕД, а на рис. 3 з ЗЕД при послідовному та паралельному з’єднанні індуктора і якоря.

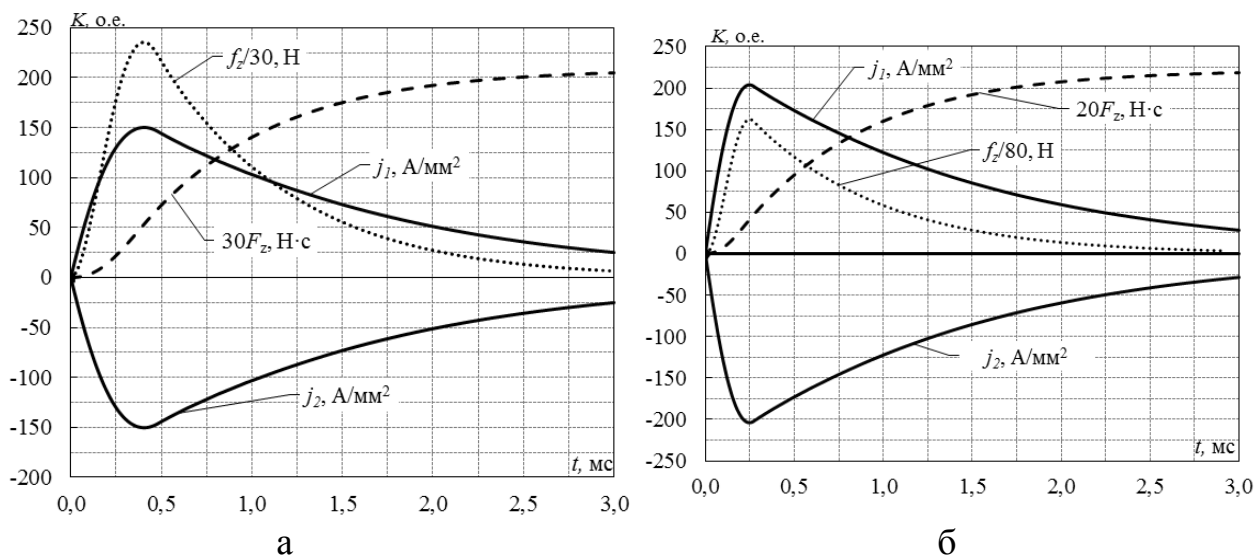


Рисунок 2 – Електромеханічні характеристики ЛІЕП без ЗЕД при послідовному (а) та паралельному (б) з’єднанні індуктора і якоря

В ЛІЕП без ЗЕД густини струмів індуктора  $j_1$  і якоря  $j_2$  мають форми апериодичних імпульсів з коротким переднім фронтом (рис. 2). Внаслідок чого електродинамічна сила  $f_z$  має аналогічний характер. А величина імпульсу цієї сили  $F_z = \int f_z dt$  зростає, досягаючи сталого значення в кінці робочого процесу. При послідовному з’єднанні індуктора і якоря максимальна густина струму індуктора складає  $150,28 \text{ А/мм}^2$ , максимальна сила –  $7,05 \text{ кН}$ , а імпульс сили –  $6,94 \text{ Нс}$ . При паралельному з’єднанні індуктора і якоря максимальна густина

струму індуктора збільшується на 35,7 %, максимальна електродинамічна сила – на 84 %, а імпульс сили – на 60 %.

При наявності ЗЕД в ньому виникають вихрові струми, які істотно впливають на характер силових процесів ЛЕП. Так при послідовному з'єднанні індуктора і якоря максимальна густина струму в індукторі складає 163,1 А/мм<sup>2</sup>, що незначно вище, ніж при відсутності ЗЕД. Крім того максимальна густина індукованого струму в ЗЕД  $j_4$  сягає 138,5 А/мм<sup>2</sup>. Але силові показники цього перетворювача знижуються: максимальне значення електродинамічної сили сягає 6,88 кН, а імпульс сили – 6,02 Нс.

При паралельному з'єднанні індуктора і якоря максимальна густина струму індуктора збільшується на 71,2 %, максимальна електродинамічна сила – на 79,3 %, імпульс сили - на 38 %. При цьому максимальна щільність індукованого струму в ЗЕД збільшується істотно – у 2,62 рази.

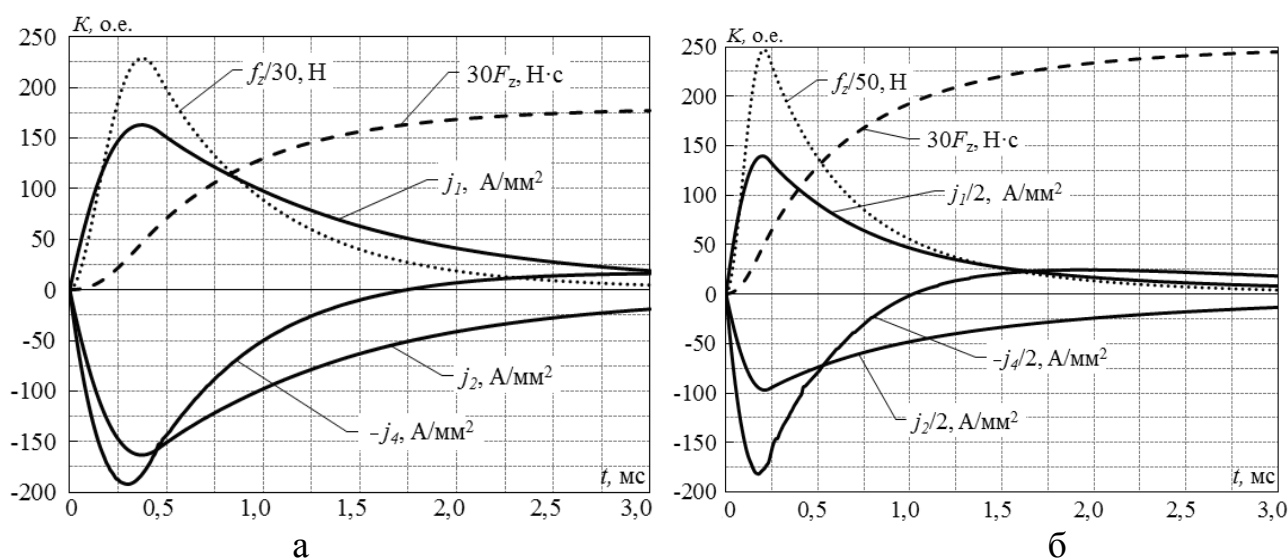


Рисунок 3 – Електромеханічні характеристики ЛЕП з ЗЕД при послідовному (а) та паралельному (б) з'єднанні індуктора і якоря

**Висновки.** Визначено, що захисний електропровідний диск, що розташовується між якорем та ударно-виконавчим елементом, зменшує силові показники лінійного імпульсного електродинамічного перетворювача. При паралельному з'єднанні якоря та індуктора силові показники зазначеного перетворювача вище, ніж при їх послідовному з'єднанні.

#### 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. Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. – № 1. – С. 24–27.
3. Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – №3. – С.31-40.
4. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционно-динамические преобразователи. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing. – 2014. – 496 с.