

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЕКРАНА НА РОБОТУ УДАРНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДИСКОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Досліджено вплив тонкостінного електромагнітного екрана на робочі характеристики ударного електромеханічного перетворювача дискової конфігурації. Запропоновані критерії оцінки ефективності електромагнітного екрана, що враховують магнітне поле, що розсіюється у зовнішній простір, коефіцієнту корисної дії електромеханічного перетворювача та збільшення габаритних розмірів. На базі запропонованих безрозмірних геометричних параметрів визначені основні закономірності впливу геометрії дискового та коаксіального екрану на ефективність роботи перетворювача.

Исследовано влияние тонкостенного электромагнитного экрана на рабочие характеристики ударного электромеханического преобразователя дисковой конфигурации. Предложены критерии оценки эффективности электромагнитного экрана, которые учитывают рассеиваемое во внешнее пространство магнитное поле, коэффициент полезного действия преобразователя и увеличение габаритных размеров. На основе предложенных безразмерных геометрических параметров установлены основные закономерности влияния геометрии дискового и коаксиального экрана на эффективность работы преобразователя.

ВСТУП

При роботі ударних електромеханічних імпульсних перетворювачів (УЕП) виникає проблема електромагнітної сумісності з іншою апаратурою [1, 2]. Генеруючи досить потужні імпульсні електромагнітні поля, що розсіюються у зовнішній простір, УЕП може негативно впливати на роботу чутливих і близько розташованих до них приладів. Та й перебування людини в зоні дії сильних електромагнітних полів не бажано [3]. Таким чином виникає задача зменшення магнітних полів у прилеглому до імпульсного електромеханічного перетворювача зовнішньому просторі.

Знизити зовнішнє магнітне поле можна за рахунок застосування пасивних феромагнітних, електромагнітних та надпровідних екранів, або активних компенсаційних обмоток. Найбільш простим за конструктивними, ваговими та функціональними показниками є електромагнітний екран, що може бути виконаний з тонколистового електропровідного матеріалу. Але такий близько розташований екран, що охоплює активну зону, може впливати і на роботу самого перетворювача, змінюючи його робочі показники. Крім того, екран, що зменшує зовнішні магнітні поля, призводить до збільшення габаритів самого перетворювача, що також можна віднести до негативних наслідків його застосування. До останнього часу такі дослідження по застосуванню електромагнітного екрану були виконані тільки для УЕП, який має коаксіально-циліндричну конфігурацію [4]. Але на практиці широко використовуються УЕП дискової конфігурації, в яких зовнішній електромагнітний екран не застосовувався [5].

Метою дослідження є вивчення впливу геометрії електромагнітного екрана, виконаного з тонколистового електропровідного матеріалу, що повинен в максимальній мірі зменшити зовнішнє магнітне поле при мінімальному негативному впливі на робочі показники та габарити УЕП дискової конфігурації.

КОНСТРУКТИВНА СХЕМА УЕП БЕЗ ЕКРАНУ

Базовим варіантом є УЕП дискової конфігурації без екрану (рис.1).

Він містить нерухомий багатовитковий дисковий індуктор 1, який прикріплений до панелі 4 і збуджується аперіодичним імпульсом при підключенні до ємнісного накопичувача, та масивний дисковий ярмі 2,

до якого приєднаний ударний елемент 3. Пружина 5 забезпечує повернення ярмі 2 у вихідне положення до тісного контакту з індуктором 1 до і після робочого циклу. Усі активні елементи електромеханічного перетворювача – індуктор, ярмі і екран, виконані з технічної міді. Основні розміри та параметри базового варіанту УЕП наведені в табл. 1.

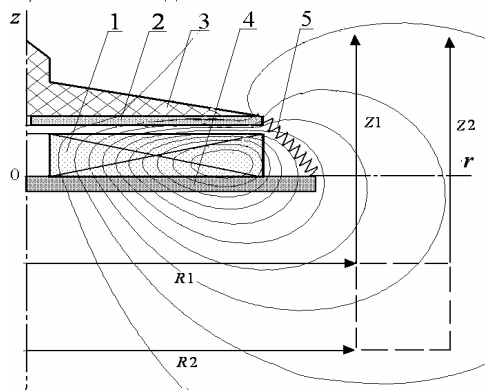


Рис. 1

Таблиця 1

Показник	Позначення	Величина
Зовнішній діаметр індуктора	D_{ex1}	100,0 мм
Внутрішній діаметр індуктора	D_{in1}	10,0 мм
Висота індуктора	H_1	10,0 мм
Зовнішній діаметр ярмі	D_{ex2}	100,0 мм
Внутрішній діаметр ярмі	D_{in2}	2,0 мм
Висота ярмі	H_2	2,0 мм
Початкова відстань між індуктором та ярмем	ΔZ_0	1,0 мм
Кількість витків індуктора	N_1	46 шт
Розмір перерізу одного витка індуктора	$a \times b$	1,8×4,8 мм ²
Коефіцієнт пружності пружини	K_p	75,0 кН/м
Маса ударного елемента, приєднана до ярмі	m_2	0,25 кг
Ємність накопичувача	C	3,0 мФ
Зарядна напруга накопичувача	U_0	0,5 кВ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УЕП З ЕКРАНОМ

При створенні математичної моделі УЕП для врахування нерівномірності розподілу індукованого струму доцільно рухомий ярмі та нерухомий екран уявити сукупністю упорядковано розташованих елементарних короткозамкнених контурів малого поперечного перетину. В такому випадку електричні про-

цеси в УЕІП можна описати системою рівнянь [6]:

$$R_1(T_1)i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^{t_p} i_1(t) dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots$$

$$\dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots$$

$$\dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0;$$

$$\dots$$

$$R_n(T_n)i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{1n}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{n-1,n} \times$$

$$\times \frac{di_{n-1}}{dt} + M_{n+1,n}(z) \frac{di_{n+1}}{dt} + \dots + M_{kn}(z) \frac{di_k}{dt} + i_1(t) \times$$

$$\times V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} + i_{n+1}(t)V(t) \frac{dM_{n+1,n}}{dz} + \dots + i_k(t)V(t) \times$$

$$\times \frac{dM_{kn}}{dz} = 0;$$

$$\dots$$

$$R_k(T_k)i_k(t) + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{nk}(z) \times$$

$$\times \frac{di_n}{dt} + \dots + M_{k-1,k} \frac{di_{k-1}}{dt} + i_{2k}(t)V(t) \frac{dM_{2k}}{dt} + \dots + i_{nk}(t) \times$$

$$\times V(t) \frac{dM_{nk}}{dt} = 0,$$

де 1 – індекс індуктора; 2, ..., n – індекси елементарних контурів якоря, що рухається вздовж осі z зі швидкістю V; n+1, ..., k – індекси елементарних контурів нерухомого екрана; $R_p(T_p)$, L_p , i_p , T_p – відповідно, опір, індуктивність, струм та температура p-го елементарного контуру; M_{nk} – взаємодуктивність між n-им і k-им контурами; C, U_0 , t_p – відповідно, ємність, зарядна напруга та тривалість розрядного імпульсу.

На якір зі сторони індуктора і екрана діє електродинамічна сила

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

$$+ \sum_{s=n+1}^k \sum_{p=2}^n i_s(t) \cdot i_p(t) \frac{dM_{sp}}{dz}(z),$$

що призводить до його переміщення вздовж осі z зі швидкістю V(t):

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} \left\{ i_1(t_n) \cdot \sum_{p=2}^n i_p(t_n) \frac{dM_{1p}}{dz} + \right.$$

$$+ \left. \sum_{s=n+1}^k \sum_{p=2}^n i_s(t_n) \cdot i_p(t_n) \frac{dM_{sp}}{dz}(z) \right\} - K_p \Delta Z(t_n) -$$

$$- 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t_n),$$

де m_1 , m_2 – маса якорю та ударного елемента відповідно; K_p – коефіцієнт пружності пружини; $\Delta Z(t)$ – величина переміщення якорю; γ_a – густина повітря; β_a – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Допускаючи рівномірність розподілу, температури в активних елементах УЕІП опишемо за допомогою рекурентних співвідношень [7]:

$$T_q(t_{k+1}) = \frac{R_q(T_q) \cdot i_q^2(t_k)}{F_{aq} \alpha_{Tq}(T_q)} + \exp \left(- \frac{4 \alpha_{Tq}(T) F_{aq} \cdot \Delta t}{\pi \cdot \gamma \cdot H_q (D_{exq}^2 - D_{inq}^2) c_q(T_q)} \right) \times$$

$$\times \left(T_q(t_k) - T_0 - \frac{R_q(T_q) \cdot i_q^2(t_k)}{F_{aq} \alpha_{Tq}(T_q)} \right) + T_0,$$

де q=1, 2, 3 – індекси відповідних величин для індуктора, якоря та екрана; i_q – струм; R_q – опір; F_{aq} – поверхня тепловіддачі; α_{Tq} – коефіцієнт тепловіддачі; γ – питома густина матеріалу q-го елемента; c_q – питома теплоємність; T_0 – температура навколишнього середовища.

Для визначення впливу УЕІП на прилеглий простір введемо ближню і дальню зону спостереження. Значення модулю індукції магнітного поля в момент, коли на якір діє максимальна електродинамічна сила, в зонах спостереження будуть порівнюватися для різних конфігурацій електромагнітного екрана. Ближня зона окреслена радіальною R1 та аксіальною Z1 лініями (рис. 1). Радіальна лінія R1 довжиною $r_1=70$ мм починається на осі і зсунута на 20 мм в аксіальному напрямку відносно індуктора. Аксіальна лінія Z1 довжиною $z_1=60$ мм зсунута на 20 мм в радіальному напрямку відносно бокової поверхні індуктора. Вона починається з крайньої точки лінії R1 ($r = 70$ мм). Дальня зона окреслена лініями R2 і Z2 (рис. 1), які віддалені на 20 мм відносно аналогічних ліній R1 і Z1, відповідно в аксіальному та радіальному напрямках.

Базовий варіант УЕІП дискової конфігурації без екрана утворює магнітне поле, яке розсіюється у зовнішній простір на значну відстань (рис. 1). При введенні тонкостінного дискового або циліндричного електромагнітного екрана в магнітну систему УЕІП відбувається суттєвий перерозподіл магнітного поля (рис. 2, 3).

ПАРАМЕТРИ ЕКРАНА І КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УЕІП

Дисковий екран 6 (рис. 2) характеризується наступними геометричними параметрами: D_{ex3} , D_{in3} – відповідно, зовнішній та внутрішній діаметри; H_3 – висота; Δz_{13} – відстань між індуктором та екраном в аксіальному напрямку.

Дисковий екран будемо оцінювати безрозмірними параметрами:

$$\epsilon_{ex} = \frac{D_{ex3}}{D_{ex1}}; \quad \epsilon_{in} = \frac{D_{in3}}{D_{ex1}}; \quad \epsilon_{\Delta r} = \frac{D_{ex3} - D_{in3}}{D_{ex1}};$$

$$\delta = \frac{D_{ex3} + D_{in3}}{2 \cdot D_{ex1}}; \quad \lambda_z = \frac{\Delta z_{13}}{H_1}; \quad \chi_z = \frac{H_3}{H_1}.$$

Циліндричний коаксіальний електромагнітний екран 6 (рис. 3) характеризується наступними геометричними параметрами: Δr_{13} – відстань між індуктором та екраном в радіальному напрямку; Δr_3 – товщина екрана в радіальному напрямку; H_3 – висота екрана; σ – зміщення в аксіальному напрямку центру екрана відносно центру індуктора (рис. 3,б). Циліндричний екран будемо оцінювати безрозмірними параметрами:

$$\lambda_r = \frac{\Delta r_{13}}{D_{ex1}}; \quad \chi_r = \frac{\Delta r_3}{D_{ex1}}; \quad \gamma = \frac{H_3 - H_1}{H_1}; \quad \varsigma = \frac{\sigma}{H_1};$$

$$\xi = |\gamma| \cdot \text{sign}(\varsigma).$$

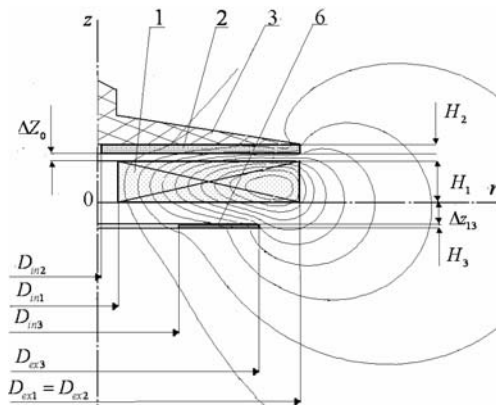


Рис. 2

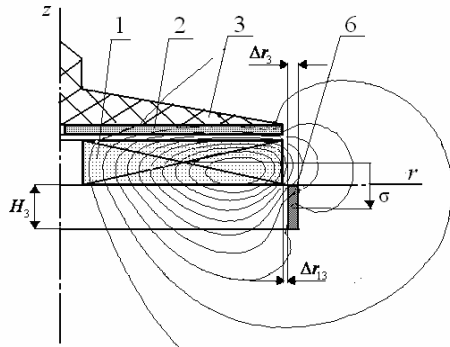


Рис. 3

В якості коефіцієнту корисної дії УЕІП з екраном застосуємо співвідношення, що враховує кінетичну енергію рухомих мас, потенційну енергію пружини та початкову енергію ємнісного накопичувача

$$\eta(t_n) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot V^2(t_n) + K_p \cdot \Delta Z^2(t_n)}{C \cdot U_0^2}.$$

В якості показників інтенсивності поля будемо використовувати осереднене значення магнітного поля на границях ближньої зони спостереження

$$B = \frac{1}{r_1} \int_0^{r_1} \sqrt{B_r^2 + B_z^2} dr + \frac{1}{z_1} \int_0^{z_1} \sqrt{B_r^2 + B_z^2} dz.$$

Будемо оперуватимемо нормованими показниками максимальної сили F_m^* , швидкості V_m^* , ККД η^* , середнього модулю індукції в ближній зоні B^* та габаритами активної частини УЕІП G^* . Нормовані значення характеризують екранований перетворювач відносно базового УЕІП без екрану.

Для оцінки ефективності екрану застосуємо критерії:

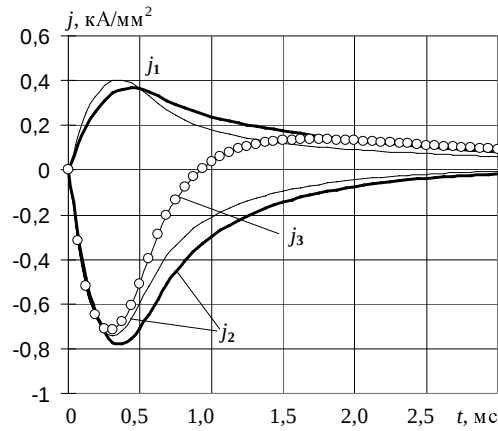
$$K_e^* = \frac{\eta^*}{B^*}; \quad K_g^* = \frac{\eta^*}{B^* \cdot G^*}.$$

ДОСЛІДЖЕННЯ УЕІП З ДИСКОВИМ ЕКРАНОМ

Введення електромагнітного екрану в магнітну систему призводить до зміни в характері робочих процесів в УЕІП. На рис. 4 показані електричні (а) та механічні (б) характеристики УЕІП з дисковим екраном ($\epsilon_{ex} = 1,2$; $\epsilon_{in} = 0$) і базового УЕІП. Величини, що відносяться до базового УЕІП позначені жирною лінією, з екраном – тонкою. Щільність струму в екрані j_3 позначена круговими маркерами.

Поява електромагнітного екрану призводить до того, що:

- максимум щільності струму в індукторі j_1 зростає і зсувається в більш ранні періоди часу;
- максимум щільності струму в якорі j_2 зменшується і зсувається в більш ранні періоди часу;
- електродинамічна сила, переміщення та швидкість якоря знижуються.



а)

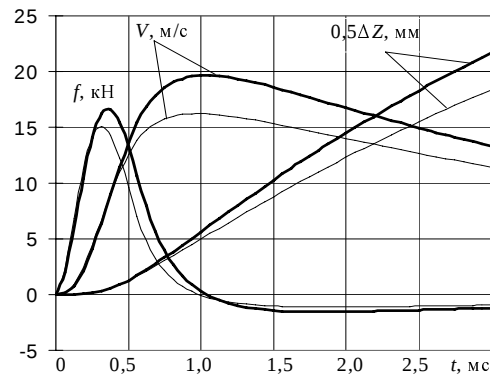


Рис. 4

б)

Для вибору відстані між екраном та індуктором Δz_{13} та висоти екрану розглянемо залежності на рис. 5, де показаний вплив геометричних параметрів λ_z та χ_z дискового екрану на показники роботи УЕІП.

На рис. 5,а показані конфігурації УЕІП з екранами та створене ними магнітне поле. Товстими стрілками зазначаються розраховані параметри при відповідній величині геометричного параметру λ_z .

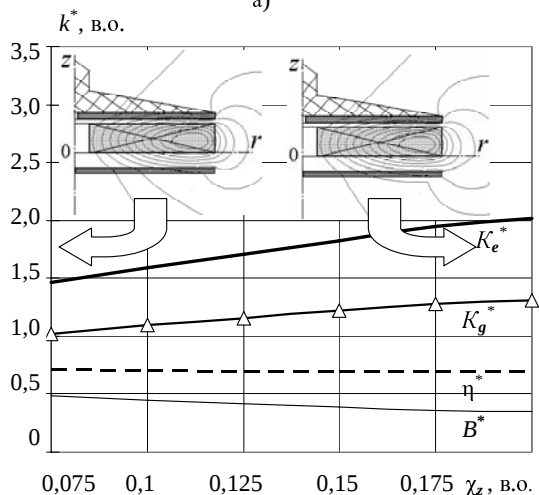
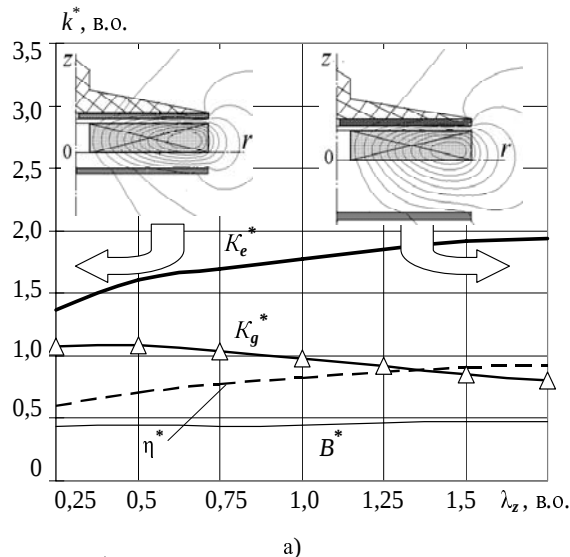
При збільшенні відстані між екраном та індуктором зовнішнє поле майже не змінюється, а коефіцієнт корисної дії η зростає (рис. 5,а).

Це обумовлює зростання критерію K_e^* . Але при цьому зростають і габарити УЕІП, тому критерій K_g^* має максимум при параметрі $\lambda_z = 0,5$; а при зростанні геометричного параметру $\lambda_z > 0,5$ критерій ефективності K_g^* зменшується. Надалі будемо розглядати УЕІП з незмінною відстанню між екраном та індуктором при параметрі $\lambda_z = 0,5$.

Збільшення товщини дискового екрану зменшує зовнішнє поле УЕІП. При цьому ККД η і геометричні розміри майже не змінюються (рис. 5,б). А отже збільшуються значення критеріїв ефективності K_e^* та K_g^* . Враховуючи конструктивні і технологічні показники виберемо екран з параметром $\chi_z = 0,1$.

Розглянемо випадок, коли мінімальний діаметр екрану дорівнює $\epsilon_{in} = 0$, а максимальний збільшується з $\epsilon_{ex} = 0,4$ до $\epsilon_{ex} = 1,4$ (рис. 6). Показники F_m^* , V_m^* зменшуються зі збільшенням екрану, оскільки частина

енергії, що раніше надходила до якоря перерозподіляється на користь екрану. Найбільш сильна залежність вищезгаданих показників від максимального діаметру екрану характерна для проміжку параметрів $\epsilon_{ex} = 0,6 \dots 1,0$. Це природно, оскільки саме на цей проміжок припадає найбільший коефіцієнт магнітного зв'язку, а отже більша частина енергії магнітного поля екранується. ККД η зменшується повільніше, ніж індукція магнітного поля, отже K_e^* зростає зі збільшенням розміру екрану.



б)
Рис. 5

Втім, при $\epsilon_{ex} > 1,0$ екран виходить за межі індуктора, збільшуючи таким чином розмір УЕІП, тому при подальшому зростанні екрану критерій ефективності K_g^* знижується.

Розглянемо випадок, коли незмінною залишається радіальна товщина екрану $D_{ex3} - D_{m3} = 40$ мм ($\epsilon_{\Delta r} = 0,4$). Змінюється мінімальний діаметр екрану при відповідному збільшенню максимального. Конфігурація такого дискового кільцевого екрану характеризується геометричним параметром δ (рис. 7).

Найбільший вплив на УЕІП такий кільцевий екран має у випадку, коли геометричний параметр $\delta = 0,8$. В цьому випадку $D_{ex3} = D_{ex1}$. При подальшому збільшенні параметра δ екран виходить за межі індуктора, тому його здатність екранувати магнітне поле зменшується, а ККД η УЕІП зростає.

При переході від $\delta = 0,8$ до $\epsilon_{\Delta r} = 1,0$ ККД η зростає швидше, ніж магнітне поле в ближній зоні спостереження, що зумовлює максимум K_e^* при значенні $\delta = 1,0$.

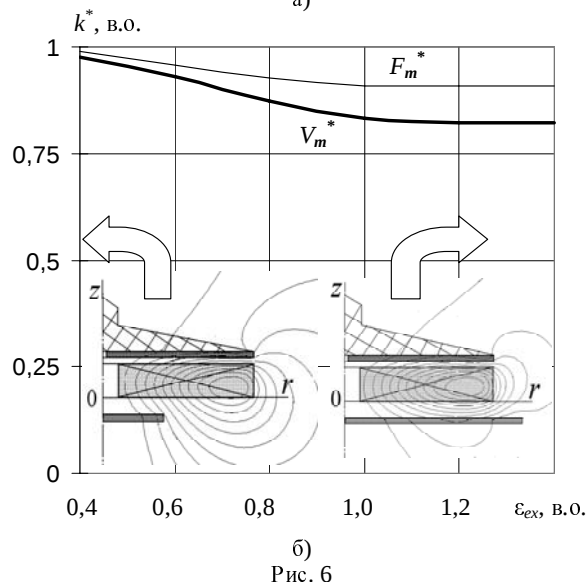
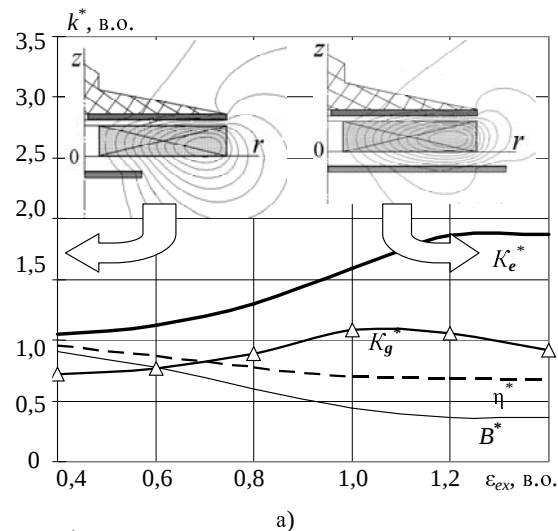


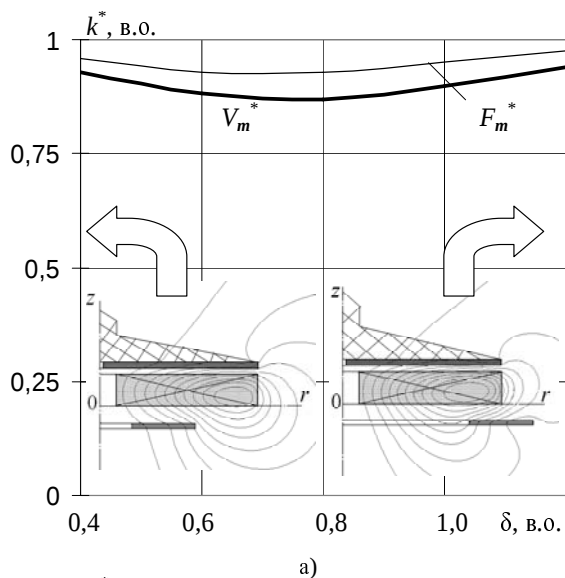
Рис. 6

Це пояснюється тим, що хоча при зсуві екрану за межі індуктора його екрануюча спроможність в радіальній площині (на лінії R1) послаблюється, водночас зростає його екрануючий вплив на аксіальну площину (лінія Z1). Це сповільнює зростання сумарного модулю індукції, і, таким чином, збільшує критерій K_e^* . Втім, збільшення геометричних розмірів УЕІП при $\delta > 0,8$ нівелює цей позитивний ефект, призводячи до зменшення критерії ефективності K_g^* .

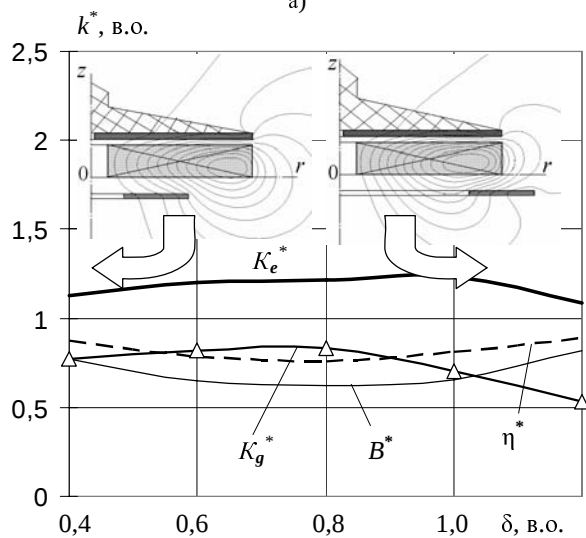
ДОСЛІДЖЕННЯ УЕІП З ЦИЛІНДРИЧНИМ ЕКРАНОМ

Згідно з міркуваннями, аналогічними випадку дискового екрану, прийемо геометричні параметри циліндричного екрану $\lambda_r = 0,01$; $\chi_r = 0,01$. Розглянемо випадок, коли за початкове (нульове) положення приймаємо циліндричний екран з параметрами $H_3 = H_1$ ($\gamma = 0$), $\sigma = 0$ ($\zeta = 0$) (див. рис. 3,а).

Простежимо залежність основних характеристик екрану, збільшуючи його висоту або в напрямку осі z (позитивному) або в протилежному напрямку (негативному) (рис. 8).



а)

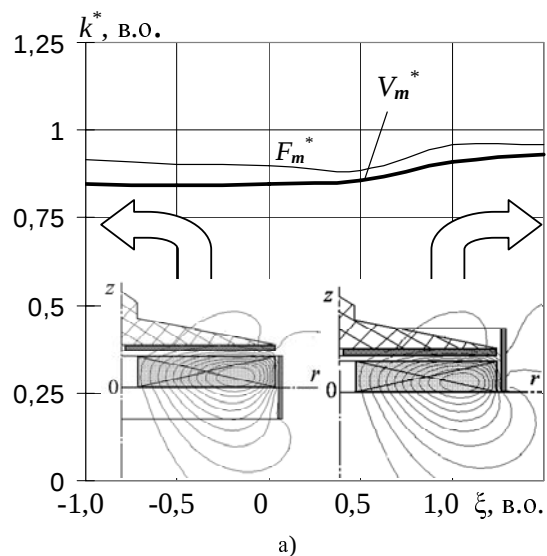


б)
Рис. 7

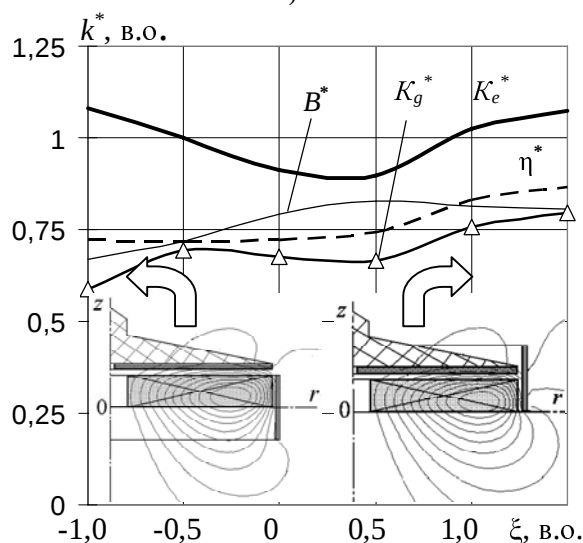
При збільшенні висоти екрану показники F_m^* , V_m^* та η^* не тільки не зменшуються, а навіть дещо зростають. Причому, якщо при значенні параметру $\xi < 0$ це зростання незначне, то при значенні $\xi > 0$ воно набуває досить стрімкого характеру.

У випадку збільшення висоти циліндричного екрану у від'ємному напрямку незначне зростання вищезгаданих показників зумовлене стискуванням лінії індукції магнітного поля, найбільша кількість яких проходить у зовнішній простір саме за індуктором. Це призводить не тільки до зростання струму в індукторі, але, починаючи з деякого значення параметра ξ , і в якорі. Наслідком цього є збільшення максимальних значень показників УЕП. При цьому досягається значне зменшення зовнішнього магнітного поля, однак зростають габарити УЕП, а отже критерій K_g^* падає.

При збільшенні висоти циліндричного екрану в позитивному напрямку ($\xi > 0$) проявляється неоднозначність впливу екрану на якір в залежності від їх взаємного розташування та часових проміжків процесу.



а)



б)
Рис. 8

Так, на початку робочого етапу, при $t < 1$ мс струми в якорі та екрані мають однакову полярність, протилежну полярності струму індуктора (рис. 4,а). Це означає, що в той час, як індуктор відштовхує якір електродинамічною силою F_{12} , екран навпаки, притягує якір силою F_{23} , тобто зменшує ефективність основної складової електродинамічної сили. Це відбувається при умові, коли екран не виходить за межі якоря в аксіальному напрямку. Таким чином, при збільшенні висоти циліндричного екрану до межі якоря збільшується і протидія руху якорю вздовж осі z .

На рис. 9 показана умовна схема УЕП з напрямками струмів та електродинамічних сил, що діють на якір: 1 – індуктор; 2 – якір; 3 – циліндричний екран з параметрами $\xi = 0$ (а) і $\xi = 0,5$ (б). При збільшенні висоти екрану з $\xi = 0$ до $\xi = 0,5$ в геометрії системи відбуваються зміни – деяка частина екрану виходить за межі якоря (рис. 9,б). Маючи на початковому етапі струм однакової полярності, частина циліндричного екрану, що розташована в аксіальному напрямку нижче якоря, утворює паразитну гальмівну силу на якір F'_{23} , а частина циліндричного екрану, що розташована вище якоря утворює позитивну прискорювальну

силу на якір F_{23}'' . При подальшому збільшенні висоти екрану у напрямку осі z , вплив прискорювальної електродинамічної сили F_{23}'' зростає.

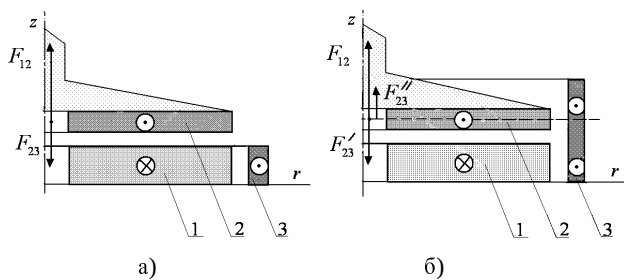


Рис. 9

На рис. 10 показана схема УЕІП з напрямками струмів та електродинамічних сил, що діють на якір: 1 – індуктор; 2 – якір; 3 – циліндричний екран з параметрами $\xi = 1,5$ (а) і $\xi \gg 1,5$ (б). При збільшенні часу роботи УЕІП, тобто коли $t > 1$ мс, струм в екрані змінює напрям і його полярність співпадає з полярністю струму індуктора. Якщо якір за цей час встигає вийти за межі циліндричного екрану в аксіальному напрямку, то на нього зі сторони останнього починає діяти позитивна прискорювальна електродинамічна сила F_{23} (рис. 10,а). Тобто циліндричний екран фактично надає додаткове прискорення якорю на тій траєкторії, де вплив безпосередньо індуктора на якір зменшується. Крім того, якщо на початкових етапах роботи струм в екрані менший за струм в індукторі і значно менший за якірний струм; з часом, коли $t > 1$ мс ці струми приймають практично однакові величини. Отже вплив зовнішнього екрану на якір на цьому етапі роботи стає відчутним. У випадку ж, коли якір не встигає вийти за межі циліндричного екрану, який має значну аксіальну висоту ($\xi \gg 1,5$), частина екрану, що знаходиться попереду якоря вздовж осі z , гальмує якір електродинамічною силою F_{23}' , частково компенсуючи прискорювальну електродинамічну силу F_{23}' частини екрану, що знаходиться позаду якоря (рис.10,б).

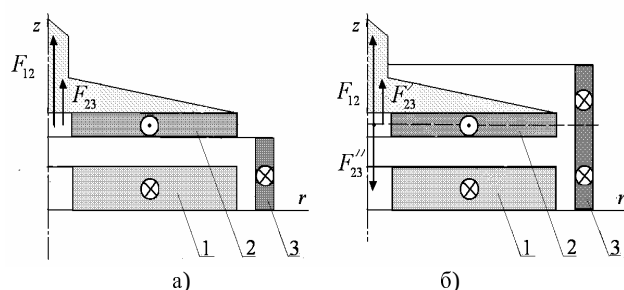


Рис. 10

Таким чином, якщо у циліндричного екрану геометричний параметр ξ знаходиться в діапазоні $1,5 \dots 1,0$, зростання ККД η відбувається менш інтенсивно, ніж в діапазоні $\xi = 1,0 \dots 0,5$. Але збільшення висоти циліндричного екрану до параметра $\xi > 1,5$ недоцільне як через збільшення габаритів УЕІП, так і через підвищені витрати матеріалів.

ВИСНОВКИ

При наявності електромагнітного екрану, розташованого поблизу активної зони, зменшується зовнішнє магнітне поле, але ефективність роботи УЕІП падає.

Найбільший вплив як на зовнішнє магнітне поле, так і на робочі показники УЕІП виявляється при максимальному діаметрі дискового екрану.

Найбільш повно магнітне поле УЕІП зменшується при збільшенні висоти циліндричного екрану, який охоплює індуктор, у напрямку, протилежному якорю. Однак при цьому збільшуються габарити УЕІП.

При збільшенні висоти циліндричного екрану в напрямку руху якоря магнітне поле в ближній зоні зовнішнього простору зменшується не так суттєво. Однак, завдяки взаємодії екрану та якоря зберігаються робочі показники УЕІП.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Barmada, "Field analysis in tubular coilguns by wavelet transform" // IEEE Trans. Magnetics, vol. 39, № 1, pp. 120-124, 2003.
2. T.G.Engel, D.Surls, W.C.Nunnally, "Prediction and verification of electromagnetic forces in helical coil launchers", IEEE Trans. Magnetics, vol. 39, № 1, pp. 112-115, 2003.
3. Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / Под ред. Ф.Херлаха. - М.: Мир, 1988. - 456 с.
4. В.Ф.Болух, Л.А.Любимова, Е.Г.Болух, "Влияние конфигурации электромагнитного экрана на работу криогенного индукционно-динамического двигателя", Электротехника, № 3, С. 28-35, 2006.
5. В.А. Тютюкин, "Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов", Электротехника, № 11, С. 24-28, 2002.
6. В.Ф.Болух, А.М.Марков, В.Ф.Лучук, И.С.Щукин, "Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя", Техн. електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки, Ч. 2, С. 65-70, 2006.
7. Болух В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – 260 с.

Поступила 19.11.2008

Болух Володимир Федорович, д.т.н., проф.,
Рассоха Максим Олексійович
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ",
кафедра "Загальна електротехніка"
тел. (057) 70-76-427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua.