

КОМПЕНСАЦІЯ ПУЛЬСАЦІЙ ЗУСИЛЛЯ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА

© Харчишин Б.М., Дзьоба Т.Я., Петрова О.А., Хай В.М., 2013

Описано спосіб модернізації лінійного двигуна для підвищення його вихідного зусилля. Встановлено спосіб компенсації пульсацій зусилля. Визначено оптимальні параметри модернізації. Наведено результати експериментів.

Ключові слова: лінійний двигун, постійні магніти, компенсація пульсацій зусилля, оптимізація.

We have described the way of modernizing the linear motor to increase its initial forcing. We have found the way to compensate for force ripple. The optimum parameters of modernization have been set, and the results of the experiments have been provided.

Key words: linear motor, permanent magnets, compensation of force ripple, optimization.

Вступ

Завдання створення конкурентоспроможних процедурних тренажерів пілотів літаків можна виконати шляхом їх здешевлення при збереженні основних їх технічних характеристик. Зокрема цьому сприяє мініатюризація лінійних двигунів (ЛД) системи завантаження тренажера з можливістю застосування їх у короткотривалих граничних режимах.

Аналіз останніх досліджень і постановка задачі

Відомо, що вихідне зусилля лінійного двигуна для m -фазного його виконання $F = \sum_{i=1}^m \Psi_i \cdot i_i$,

де Ψ_i – потокозчеплення обмоток фаз; i_i – m -фазна система струмів, що спеціально сформовані залежно від положення повзуна двигуна.

Розглянемо величину та пульсації вихідного зусилля ЛД для основних варіантів його виконання – двофазного та трифазного за умови симетричності гармонічних потокозчеплень та струмів фаз одиничної амплітуди:

$$\begin{aligned}
 F_{AB} &= \Psi_A \cdot i_A + \Psi_B \cdot i_B = \sin \gamma \cdot \sin \gamma + \cos \gamma \cdot \cos \gamma = 1 \\
 F_{abc} &= \Psi_a \cdot i_a + \Psi_b \cdot i_b + \Psi_c \cdot i_c = \\
 &= \sin \gamma \cdot \sin \gamma + \sin(\gamma - 120) \cdot \sin(\gamma - 120) + \sin(\gamma + 120) \cdot \sin(\gamma + 120) = \frac{3}{2},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де γ – лінійне положення повзуна, виражене у електричних градусах.

Зрозуміло, що для симетричних m -фазних структур зусилля є сталим і величина пульсацій зусилля дорівнює нулю.

Для випадку несиметричності потокозчеплень фаз з'являється змінна складова зусилля, яку називають пульсацією. Відомо [1, 2], що пульсації зусилля можна компенсувати за допомогою спеціально сформованого закону зміни струмів фаз від положення повзуна.

Завданням цього дослідження

Завданням цього дослідження є встановлення величини пульсації зусилля за зміни взаємного розташування осей котушок фаз, способу компенсації цих пульсацій та визначення на скільки можна збільшити зусилля двофазного двигуна для випадку незмінності електромагнітних навантажень.

Об'єктом досліджень

Об'єктом досліджень у цій статті є силова характеристика, зокрема пульсація вихідного зусилля лінійного двигуна ЛД/СЗТ-45-2, розробленого в НДЛ-68 СКБ ЕМС Львівської політехніки (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд лінійного двигуна з постійними магнітами

Виклад основного матеріалу

Бажання збільшити величину зусилля у заданому габариті за допомогою збільшення густини струму (тобто збільшення діаметра обмоткового провідника) обмежується зростанням тепловиділення та перегріванням обмотки внаслідок обмеженої теплопередачі. Цьому може зарадити тільки збільшення об'єму міді, що можна здійснити шляхом розширення котушок, порушивши тим самим симетричність структури обмоток і магнітної системи.

Така модернізація структури активної зони ЛД для двофазного його виконання показана на рис. 2.

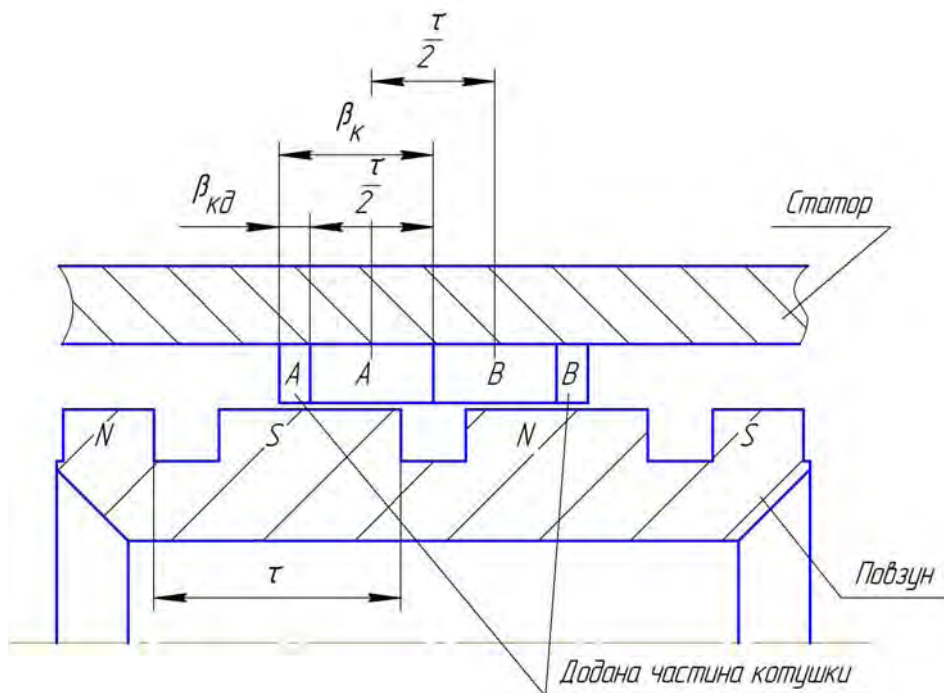


Рис. 2. Структура активної зони циліндричного лінійного двигуна

Відстань між осями котушок фаз А і В у такому випадку змінюється з $\frac{\tau}{2} = 90$ ел. град до

$\frac{\tau}{2} + \beta_{\kappa\delta} = \beta_{\kappa}$, де $\beta_{\kappa\delta}$ і β_{κ} -- виражена в ел. град. додаткова та повна ширина котушки відповідно.

Відтак і поточкозчеплення фаз матиме для основної гармоніки поля вигляд синусоїд, зміщених між собою не на $\frac{\tau}{2}$, а на β_{κ} , що при живленні симетричними струмами одиничної амплітуди $i_A = \sin \gamma$, $i_B = \cos \gamma$ призведе до появи значних пульсацій, що змінюються за синусоїдним законом з подвійною частотою. Вираз для відносного значення зусилля у цьому випадку матиме вигляд

$$F'_{AB} = \sin(\gamma + \varepsilon) \cdot \sin \gamma + \cos(\gamma - \varepsilon) \cdot \cos \gamma = \frac{1}{2} [2 \cos \varepsilon + \cos(2\gamma + \varepsilon) - \cos(2\gamma - \varepsilon)] = \cos \varepsilon - \sin \varepsilon \cdot \sin 2\gamma, \quad (2)$$

де $\varepsilon = \frac{\beta_{\kappa\delta}}{2}$.

Амплітуда пульсацій зусилля дорівнює $\sin \varepsilon$. Звичайно і рівень зусилля (постійна складова в (1) та (2)) знизиться від 1 до $\cos \varepsilon$.

Математичні дослідження показали, що таким пульсаціям можна зарадити шляхом внесення відповідної несиметрії у струми фаз (змінити кут комутації), які для одиничної амплітуди мають вигляд

$$i_A = \sin(\gamma - \varepsilon), \quad i_B = \cos(\gamma + \varepsilon).$$

Тоді відносне значення зусилля двофазного ЛД у функції положення γ для деякого ε

$$F''_{AB} = \sin(\gamma + \varepsilon) \cdot \sin(\gamma - \varepsilon) + \cos(\gamma - \varepsilon) \cdot \cos(\gamma + \varepsilon) = \cos 2\varepsilon = \text{const},$$

і позбавлене пульсацій незалежно від положення повзуна.

Отже, збільшення ширини котушки, з одного боку, призводить до збільшення її поточкозчеплення, а відтак, і зусилля, однак не лінійно, бо зменшується коефіцієнт розподілу K_p витків котушки (для

базового варіанта $\beta = \frac{\tau}{2} = 90$ ел.град – становить $K_{p\delta} = \frac{\sin \frac{\tau/4}{\frac{\tau}{4} \cdot \frac{\pi}{180}} = 0,9$). Окрім того, компенсація

пульсацій зусилля зміною кута комутації фаз теж знижує середній рівень зусилля, що показано на рис. 3.

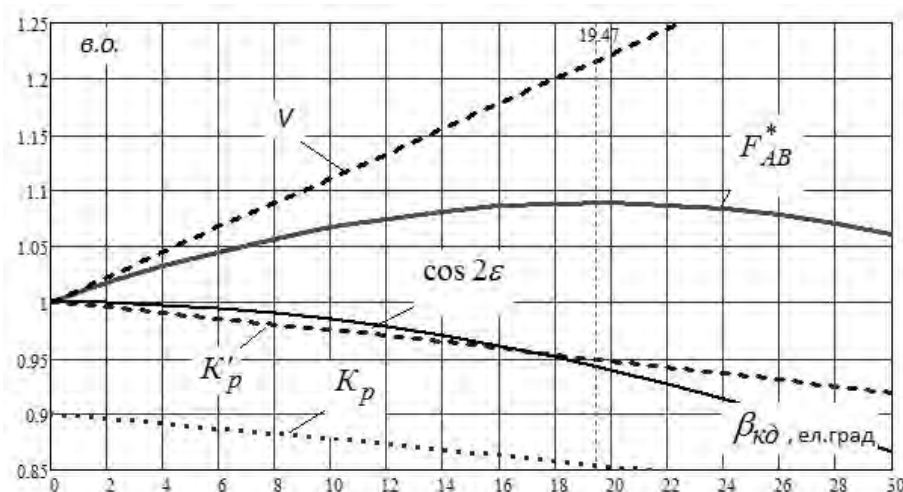


Рис. 3. Залежності параметрів двигуна від величини додаткової ширини котушки $\beta_{\kappa\delta}$:

V – об'єм міді котушки; K_p – абсолютна величина коефіцієнта розподілу витків котушки;

K'_p – приведена до базової $K_{p\delta} = 0,9$ величина коефіцієнта розподілу; F_{AB}^* – відносна величина зусилля; $\cos 2\varepsilon$ – відносна величина втрат зусилля внаслідок зміни кута комутації фаз

Відносна величина зусилля за умови незмінності електромагнітних навантажень з урахуванням зміни коефіцієнта розподілу у функції ε

$$F_{AB}^* = \left(1 + \frac{2\varepsilon}{\tau/2}\right) \cdot K'_p \cdot \cos 2\varepsilon = \left(1 + \frac{\varepsilon}{45}\right)^2 \cdot (\cos \varepsilon - \sin \varepsilon),$$

де $K'_p = \frac{K_p}{K_{p\delta}} = \frac{\cos \varepsilon + \sin \varepsilon}{1 + \frac{\varepsilon}{45}}$ – приведена до базової величина коефіцієнта розподілу.

Аналіз цієї функції вказує на існування екстремуму при деякому значенні

$$\varepsilon = \frac{\arcsin \frac{1}{3}}{2} = 9,74 \text{ ел. град.}$$

Отже, збільшення ширини котушки є виправданим тільки до певної величини $\beta_{\text{код max}} = 19,47 \text{ ел. град.}$, адже надалі коефіцієнт розподілу стрімко спадає. Зусилля при цьому за умови незмінності електромагнітних навантажень зростає на 8,87 %.

Експериментальне підтвердження

Проведені дослідження дозволяють поставити цілком прагматичне завдання — які зміни обмоткових даних слід здійснити у двофазному лінійному двигуні ЛД/СЗТ45-2 для оптимального розширення котушок фаз із скомпенсованою пульсацією зусилля при незмінних електромагнітних навантаженнях.

Запишемо вихідні вирази, що пов'язують параметри базового (котушки без розширення) та модифікованого (котушки з шириною β_k) варіантів двигунів

$$V_M = V_\delta \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{45}\right), \quad j_M = j_\delta,$$

де $V_\delta, V_M, j_\delta, j_M$ – об'єм міді та густина струмів базового та модифікованого двигунів.

Звідси

$$w_M = w_\delta; \quad R_M = \frac{R_\delta}{1 + \frac{\varepsilon}{45}}; \quad S_M = S_\delta \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{45}\right); \quad I_M = I_\delta \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{45}\right),$$

де $w_M, w_\delta, R_M, R_\delta, S_M, S_\delta, I_M, I_\delta$ – базові та модифіковані величини кількості витків, опору, площі перетину провідника та струму.

Отже, діаметр провідника модифікованого двигуна

$$d_M = d_\delta \cdot \sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{45}},$$

де d_δ – діаметр обмоткового провідника базового варіанта.

Для величин $V_\delta = 36,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, $R_\delta = 1,05 \text{ Ом}$, $S_\delta = 0,785 \text{ мм}^2$, $w_\delta = 146 \text{ витків}$, $d_\delta = 1 \text{ мм}$ базового лінійного двигуна відповідні величини модифікованого будуть $V_M = 44,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, $R_M = 0,86 \text{ Ом}$, $S_M = 0,96 \text{ мм}^2$, $w_M = 146 \text{ витків}$, $d_M = 1,12 \text{ мм}$ за незмінних напруги та густини струму.

На рис. 4 показано потокозчеплення, зміщені за фазою струми та сумарне зусилля модифікованого двигуна у відносних одиницях, що за амплітудою приблизно на 9 % перевищує зусилля базового варіанта.

Це підтверджує наведені вище дослідження про можливість вдосконалення двофазного лінійного двигуна з однокотушковими фазами шляхом розширення його котушок.

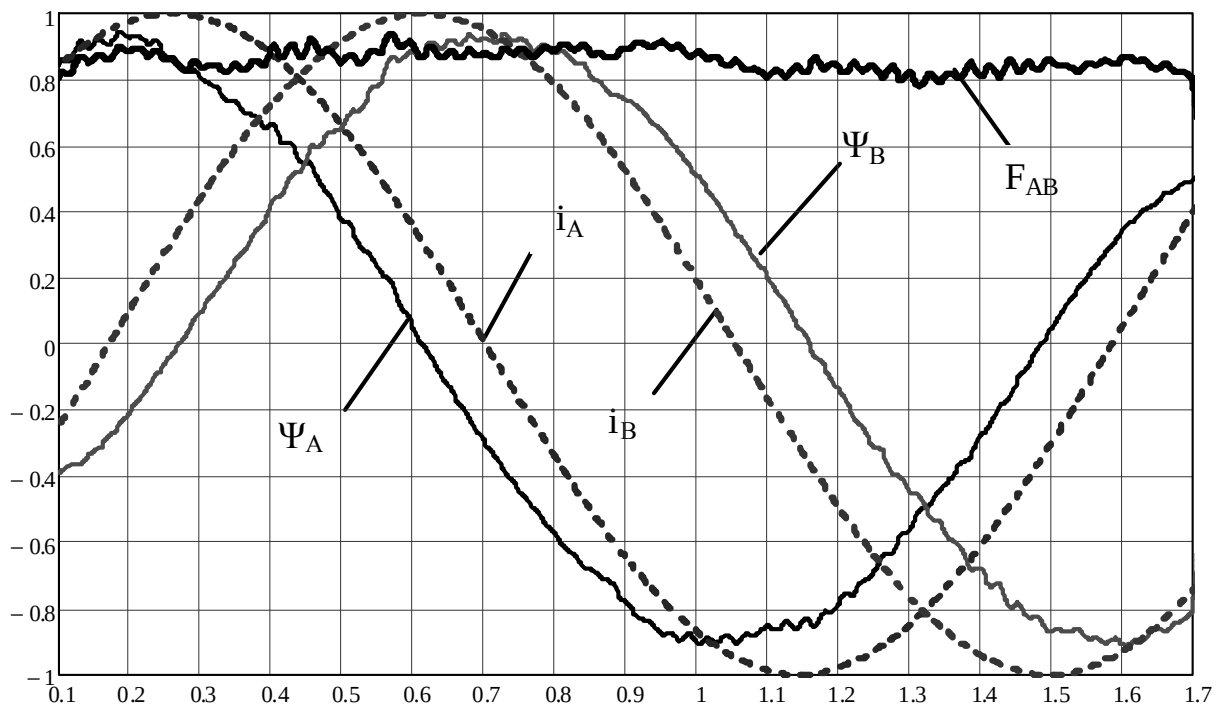


Рис. 4. Потокосцеплення, струми фаз та сумарне зусилля модифікованого двигуна

Висновки

Проведені математичні дослідження дають змогу твердити, що:

- в заданому габариті двофазного лінійного двигуна є можливість збільшити зусилля за заданих електромагнітних навантажень шляхом розширення котушок на кут $\beta_{\text{кд}}$;
- пульсації зусилля, що виникають внаслідок асиметрії потокосцеплень можна компенсувати відповідною зміною кута комутації фаз, протилежною до напрямку розширення котушок;
- така компенсація призводить до деякого зниження середнього значення зусилля;
- існує оптимальне значення розширення котушки $\beta_{\text{кд max}} = \arcsin \frac{1}{3}$ з погляду максимального зусилля.

1. Бешта О.С., Фурса С.Г., Прохоров А.І., Балахонцев О.В.. Зменшення пульсацій моменту в електроприводі на базі синхронного двигуна з вбудованими постійними магнітами // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – № 11(186). – С. 54–59. 2. Holtz J. Identification and compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives / J. Holtz, L. Springob // IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 43, N 2, April 1996.. – P. 309–320.