

## МОДЕЛЬ ЕФЕКТУ МАГНІТНОГО ДЕМПФУВАННЯ В ЛІНІЙНОМУ ДВИГУНІ

**Постановка проблеми.** Альтернативою традиційним приводам на основі двигунів обертання з передачами, що перетворюють обертальний рух у прямолінійний і вносять додаткові втрати, є лінійний двигун (ЛД). ЛД широко використовуються як виконавчий механізм, що передбачає утримання зусилля при зворотно-поступальному переміщенні робочого органу, до переваг якого належать відсутність механічних передач, шуму, висока надійність і покращена керованість. В СКБ електромеханічних систем "Львівської політехніки" (СКБ ЕМС) розроблено лінійний двигун з постійними магнітами із зусиллям 600 Н застосовують у приводі тренажера літака. Застосування ЛД у такому приводі дає змогу імітувати завантаження штурвала літака, що викликає необхідність узгодження параметрів і характеристик машини з її робочим органом і характером навантаження. Зрозуміло, що ефективна робота ЛД, як складової частини складної електромеханічної системи, багато в чому залежить від раціонально підібраних розмірів машини, параметрів обмоток та інших чинників, що в подальшому зумовлять ті чи інші електромеханічні характеристики та взаємодію двигуна з робочим органом.

Впровадження розробленого лінійного двигуна вимагає його опису як відповідного динамічного об'єкта з огляду на потребу синтезу системи керування – особливістю даної розробки є застосування в двигуні магнітного демпфера з використанням вихрових струмів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Лінійні електричні машини, на відміну електричних машин традиційної конструкції, є менш популярними і не такими відомими, тому питання математичного опису їх динаміки є менш дослідженим, зокрема, як приклад, можна навести роботи [1, 2]. Проте, у відомих моделях не враховують вплив від наведених постійними магнітами у провідних частинах вихрових струмів.

**Метою статті** є опис дії магнітного демпфера, що використовує ефект вихрових струмів, у лінійному двигуні з постійними магнітами та його структурної моделі.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблений в СКБ електромеханічних систем "Львівської політехніки" лінійний двигун магнітоелектричного збудження має двофазну конструкцію статорних обмоток зі синусно-косинусним живленням його фаз у функції положення повзуна [3]. Особливістю розробки є використання магнітного демпфера (магнітної пружини), який працює за рахунок вихрових струмів, що наводяться потужними магнітами повзуна (ротора) у додаткових алюмінієвих кільцях, і дає змогу демпфувати різкі рухи повзуна як внаслідок дії цифрової системи керування та силового широтно-імпульсного модулятора, так і внаслідок дії людини-оператора. Ефект дії магнітної пружини і демпфування зображено на графіку рис. 1, де показано наведену в результаті експерименту ЕРС в обмотці фази статора і струм живлення іншої обмотки.

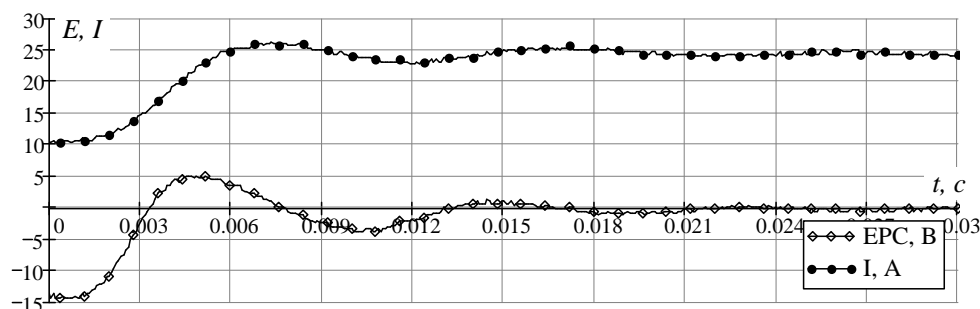


Рис. 1. Ілюстрація загасання коливань на експериментальному стенді внаслідок ефекту магнітної пружини

Ідентифікація впливу контура вихрових струмів була здійснена шляхом постановки відповідних експериментів [3]. Особливості конструкції зумовлюють основні задачі визначення параметрів і побудови структурної моделі магнітного демпфера розробленого двофазного лінійного двигуна:

- врахування наявності розподіленого контура вихрових струмів – вихрові струми існують як у спеціально виконаних демпфуючих алюмінієвих кільцях, які, в основному, і вгамовують рух повзуна, так і в станині;
- врахування ефекту витіснення вихрових струмів (т. зв. поверхневий ефект), який присутній як у масиві станини, так і в масиві демпферних кілець [4, 5]

Відтворити на комп'ютерній моделі ефект магнітної пружини і демпфування вдалося за допомогою структурної моделі, яка показана на рис. 2, де вжито таких позначень:  $I$  – струм в обмотці статора;  $C_F$  –

коефіцієнт передачі ЛД за моментом;  $F$  – створюване зусилля;  $m_n$  – маса рухомої частини механічної системи (повзуна);  $K_V$  – коефіцієнт демпфування (величина реакції демфера на одиницю швидкості);  $T_d$  – стала часу демпфуючої обмотки (демфера);  $V$  – лінійна швидкість переміщення рухомої частини механізму.

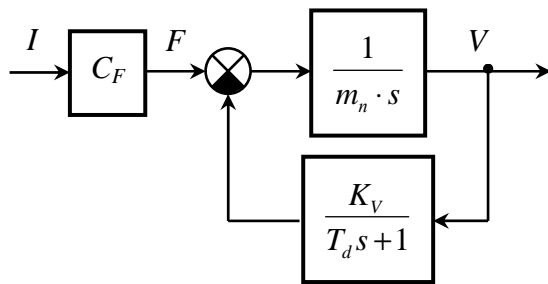


Рис. 2. Структурна модель врахування дії магнітної пружини ЛД

Частина параметрів структурної моделі відома, оскільки їх можна безпосередньо виміряти або розрахувати (наприклад, маса повзуна чи коефіцієнт передачі ЛД за моментом). Величина коефіцієнту демпфування  $K_V$  була виміряна експериментально і склала приблизно 800 Н·с/м, причому ця величина є незалежною від швидкості переміщення повзуна. Става часу демпфуючої обмотки знаходилася розрахунковим шляхом:

$$T_d = \frac{L_d}{R_d}, \text{ де } L_d, R_d - \text{відповідно, індуктивність та опір демпфуючої обмотки.}$$

Індуктивність обмотки визначається з відомої залежності  $L_d = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} w^2 d \cdot \Phi$ , де  $w = 1$  – кількість витків демпфуючої обмотки;  $d$  – її середній діаметр;  $\Phi$  – магнітний потік, який визначається за формулою:

$$\Phi = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{1}{k} \cdot \left( K(k) + \frac{1-\alpha^2}{\alpha^2} E(k) \right) - \frac{1}{\alpha^2} \right), \text{ де } k = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}, \alpha = \frac{a}{d}, a - \text{ширина демпфуючої обмотки.}$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-k^2 \sin^2(x)}} dx, E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2 \sin^2(x)} dx - \text{відповідні еліптичні інтеграли.}$$

Опір визначається з відомої залежності  $R_d = \rho \frac{\pi d}{b \cdot a}$ , де  $\rho$  – питомий опір алюмінію;  $b$  – товщина демпфуючої алюмінієвої обмотки.

Для розробленого ЛД стала часу демпфуючої обмотки складала  $T_d = 0.011$  с, що достатньо точно збігалось з даними експериментальних досліджень.

**Висновки.** Запропонована структурна модель врахування ефекту магнітної пружини розробленого в СКБ електромеханічних систем "Львівської політехніки" ЛД з постійними магнітами дало змогу отримати достатньо точне наближення відтворення перехідних процесів у двигуні. Напрямоком подальших досліджень є:

- врахування нелінійного характеру розподілу магнітного поля, яке створюється постійними магнітами повзуна, у зоні демферних кілець для точнішого врахування ефекту магнітної пружини;
- врахування ефекту витіснення вихрових струмів у масивах демпфуючих кілець з метою виявлення величини його впливу на характер перехідних процесів.

## Література

- [1] Alice Mary K. Modeling, Simulation and Nonlinear Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor / Dr. K. Alice Mary, B. Arundhati, Padma Maridi // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – Vol. 1, Issue. 6, December, 2012. – Pp. 555–562. ISSN: 2278–8875.
- [2] Gieras J. Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, 2<sup>nd</sup> edition / Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Bronislaw Z. Tomczuk. – CRC Press. Taylor & Francis Group. – 2011. – 520 p.
- [3] Мороз В. І. Експериментальні дослідження динамічних властивостей лінійного двигуна з постійними магнітами / В. І. Мороз, П. А. Болкот, К. І. Снітков, Б. М. Харчишин // Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції "Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2013" (КРЕС – 2013). Донецьк, 21-24 травня 2013 р., Донецький національний технічний університет.
- [4] Мороз В. Уточнення моделі двигуна постійного струму послідовного збудження / В. Мороз, Л. Карплюк // Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – 1998. – №347. – С. 118-123.
- [5] Мороз В. Інженерний метод врахування вихрових струмів у електромеханічних системах / В.І. Мороз, І.Ф. Снітков, Б.М. Харчишин // Електротехніка і електромеханіка. – 2012, №2. – С. 50–52.