

УДК 621.313 : 681.52

В.І. МОРОЗ (д-р техн. наук, проф.), **П.А. БОЛКОТ**, **К.І. СНІТКОВ**,
Б.М. ХАРЧИШИН (канд. техн. наук)
Національний університет "Львівська політехніка"
vmoroz@lp.edu.ua snt68@lp.edu.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Розглянуто будову та виконано дослідження динамічних характеристик лінійного двигуна з постійними магнітами, який використовується як привідний у тренажері. На основі проведених експериментів створено структурну модель лінійного двигуна з врахуванням наявності магнітного демпфера та ефектів від нього. Отримана структурна модель проаналізована в середовищі MATLAB-Simulink.

Ключові слова: вихрові струми, ідентифікація об'єктів керування, лінійний двигун з постійними магнітами, магнітний демпфер, система керування, структурна модель.

Постановка проблеми. На сьогодні лінійний двигун (ЛД) є альтернативою традиційним приводам на основі двигунів обертання з передачами, що перетворюють обертальний рух у прямолінійний. Лінійні двигуни широко використовуються як виконавчий механізм, що передбачає утримання зусилля при зворотньо-поступальному переміщенні робочого органу, до переваг якого належать відсутність механічних передач, шуму, висока надійність і покращена керованість. Розроблений в СКБ електромеханічних систем "Львівської політехніки" (СКБ ЕМС) лінійний двигун з постійними магнітами із зусиллям 600 Н застосовують у приводі завантаження штурвала тренажера літака. Особливістю застосування ЛД у такому приводі є те, що рухома частина двигуна безпосередньо приєднується до плеча штурвала, що викликає необхідність узгодження параметрів і характеристик машини з її робочим органом і характером навантаження. 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.

Іншою проблемою впровадження розробленого лінійного двигуна є необхідність 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 попередніх досліджень і публікацій. На відміну від електричних машин з обертовим рухом, лінійні електричні машини є менш популярними і, відповідно, не такими відомими, внаслідок чого питання математичного опису їх динаміки є менш дослідженим, зокрема, як приклад, можна навести роботи [1, 2].

Метою статті є публікація результатів експериментальних досліджень поведінки лінійного двигуна та спроба в першому наближенні описати його динамічні властивості за допомогою структурної моделі з врахуванням дії магнітного демпфера, що використовує ефект вихрових струмів.

Викладення основного матеріалу статті. Як і звичайний електричний двигун, лінійний двигун (рис. 1) складається з двох основних частин: статора (елементи 1–3) і ротора – "повзуна" (елементи 5–7), які з'єднані між собою підшипниковим вузлом (4). Розроблений в СКБ електромеханічних систем "Львівської політехніки" лінійний двигун магнітоелектричного збудження має двофазну конструкцію статорних обмоток (2) з синусно-косинусним живленням його фаз у функції положення повзуна (5-6).

Особливістю розробки є використання магнітного демпфера, який працює за рахунок вихрових струмів, що наводяться потужними магнітами у додаткових алюмінієвих кільцях (див. рис. 1), і дає змогу уникати різких рухів повзуна як внаслідок дії цифрової системи керування та силового широтно-імпульсного модулятора, так і внаслідок дії людини-оператора. Спроба ідентифікувати величину впливу контуру вихрових струмів була здійснена шляхом постановки відповідних експериментів, коли на одну з обмоток статора було подано або стрибкоподібний сигнал, або здійснювався реверс напруги (рис. 2). У той же час з іншої обмотки знімався сигнал ЕРС, за яким, з урахуванням розміщення обмотки, можна мати уявлення про швидкість двигуна.

Згадані особливості конструкції зумовлюють основні задачі визначення параметрів і побудови структурної моделі розробленого двофазного лінійного двигуна:

- врахування наявності розподіленого контуру вихрових струмів – вихрові струми існують як у станині (їхній основний вплив здійснюється на статорні обмотки), так і в спеціально виконаних демпфуючих алюмінієвих кільцях, які, в основному, вгамовують рух повзуна;
- врахування ефекту витіснення вихрових струмів (т. зв. поверхневий ефект), який присутній як у масиві станини, так і в масиві демпферних кілець [3, 4];
- врахування ефекту магнітної пружини внаслідок дії на магніти повзуна контура вихрових струмів у додаткових демпферних кільцях (проявляється як швидко згасаючі коливання лінійної швидкості – див. приклад експериментальних осцилограм на рис. 2).

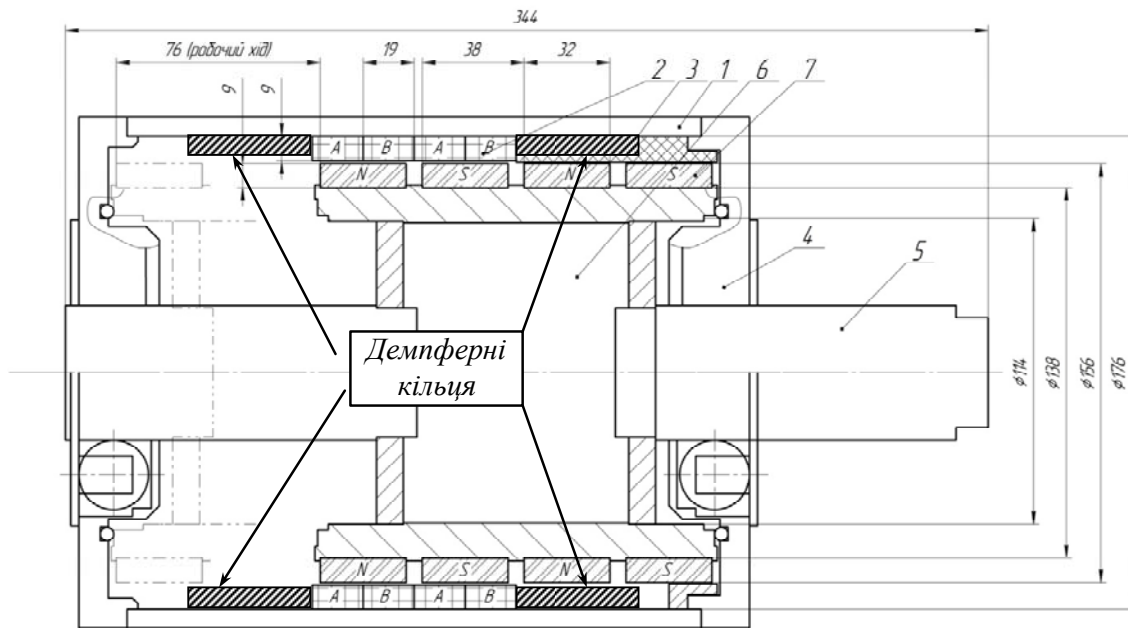


Рисунок 1 – Ескіз конструкції двофазного лінійного двигуна з постійними магнітами

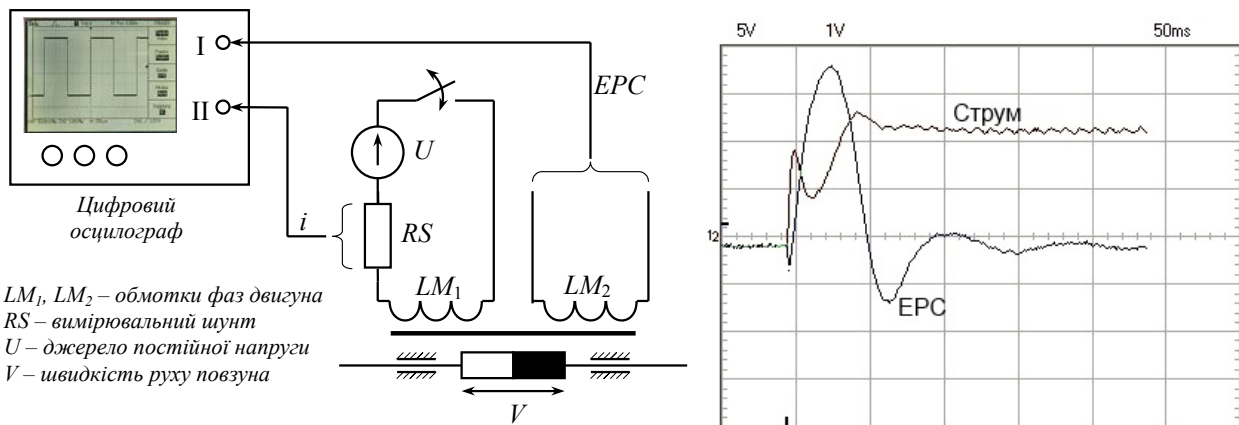


Рисунок 2 – Схема експерименту і приклад осцилограми для прямого пуску при напрузі 27 В

Ускладнювало задачу обробки та інтерпретації експериментальних осцилограм відсутність під час проведення досліджень лінійного тахогенератора для вимірювання швидкості переміщення рухомої частини двигуна, через що для контролю швидкості довелося використати сигнал ЕРС з другої статорної обмотки. Потрібно зазначити, що обмотки двофазного лінійного двигуна з постійними магнітами розраховані на синусо-косинусне живлення, внаслідок чого сигнал ЕРС вимірювальної обмотки не є пропорційним поточному значенню лінійної швидкості. Це пояснюється тим, що величина ЕРС обмотки є доволі складною залежністю між поточним положенням повзуна двигуна та його лінійною швидкістю у зв'язку з наближеним до синусоїдального характером розподілу магнітного поля статорних обмоток, через що пряме використання величини наведеної ЕРС для визначення лінійної швидкості є проблематичним.

Для аналізу і подальшого опису динамічних властивостей досліджуваного лінійного двигуна з постійними магнітами була побудована у першому наближенні структурна модель, у якій прийнято такі допущення:

- вплив вихрових струмів станини і демпфуючих кілець є незалежним, тому його можна описати окремими діями на струми обмоток фаз статора і на магніти повзуна двигуна;
- ефект витіснення вихрових струмів у станині та демпфуючих обмотках не враховується (у випадку потреби, він з достатньою точністю апроксимується в структурній моделі ланкою першого порядку [3, 4]);
- ефект магнітної пружини внаслідок дії демпфуючих кілець (демпфера) може бути з достатньою точністю врахований введенням ланки першого порядку (див. рис. 3).

Експерименти з розробленим варіантом структурної моделі в середовищі MATLAB / Simulink показали достатню збіжність результатів комп'ютерного моделювання та експериментів стосовно відтворення поведінки струмів обмоток фаз статора (через обмежений обсяг статті як прикладна рис. 4 показані результати комп'ютерного моделювання для струму однієї фази статора при подачі напруги 27 В).

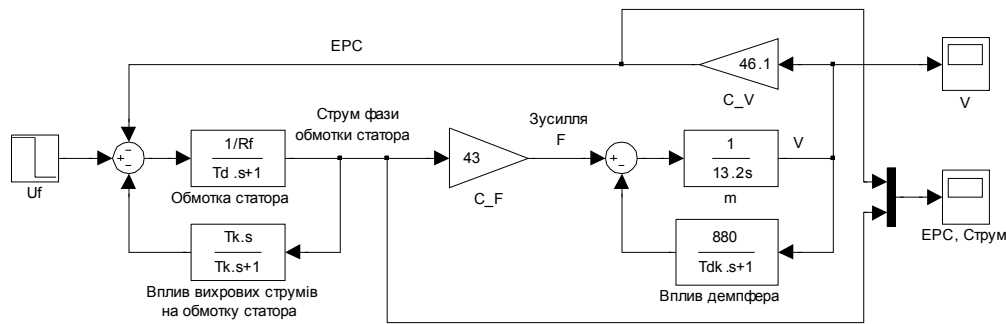


Рисунок 3 – Структурна модель двофазного лінійного двигуна з постійними магнітами у першому наближенні

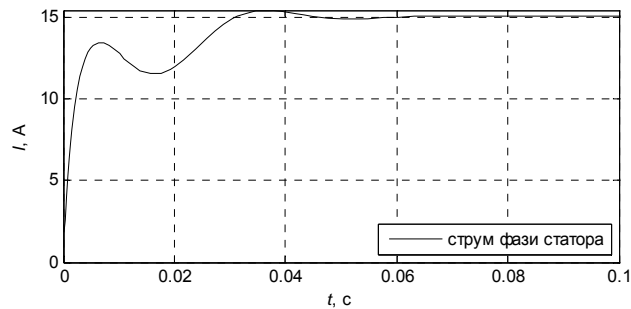


Рисунок 4 – Струм фази статора першого варіанту моделі при пуску з напругою 27 В

Висновки. Запропоноване перше наближення структурної моделі розробленого в СКБ електромеханічних систем "Львівської політехніки" лінійного двигуна з постійними магнітами з урахуванням дії вихрових струмів у станині та демпферних обмотках дало змогу отримати достатньо точне наближення відтворення перехідних процесів струмів обмоток статора. Напрямоком подальших досліджень є:

- врахування характеру розподілу магнітного поля статорних обмоток для точнішого відтворення в розробленій моделі двигуна лінійної швидкості;
- врахування ефекту витіснення вихрових струмів у масивах станини і демпфуючих кілець, вплив якого, за попередньою оцінкою, у даній конструкції може бути суттєвим;
- проведення розширених експериментальних досліджень лінійного двигуна з метою отримання додаткової інформації для уточненої ідентифікації параметрів і структури розробленої моделі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондар Р.П. Розрахунок робочих характеристик лінійного двигуна зворотно-поступального руху в пакеті MATLAB/Simulink / Р.П.Бондар, Г.М.Голєнков, О.Д.Подольцев // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №4. – С. 13-17.
2. Якимчук М. В. Дослідження впливу динаміки лінійних двигунів в модулях переміщення упаковок / М.В. Якимчук [електронний ресурс]. – 2011. – Режим доступу до ресурсу :<http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/840>.
3. 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.
4. 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.

REFERENCES

1. R.Bondar, G. Golenkov, O. Podoltsev. *Rozrahunok robochych harakterystyc liniynogo dvyguna zvorotno-postupal'nogo ruhu v paketi MATLAB/Simulink* [Calculation of the performance of linear motor reciprocating motion in MATLAB/Simulink] // *Electrotehnica I electromechanica* [Electrical engineering and Electromechanics]. – 2010; 4: Pp.13-17.
2. M. Yakymchuk. *Doslidzhennja vplyvu dynamicy liniynych dvyguniv v moduljah peremishchennja upakovok* [Investigation of dynamic linear motors to move the modules packages]. – 2011. – Available online at: <http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/840>.
3. V. Moroz, L. Karpluk. *Utochnennja modeli dvyguna postijnogo strumu poslidovnoho zbudzennja* [Refinement of the series DC motormodel] // *Visnyk DU "L'vivskaPolytechnica" "Electroenergetychny ta electromechanichni systemy"* [Journal of the State University "Lviv Polytechnic" "Electricity and electromechanical systems"]. – 1998; 347: 118-123.

4. V. Moroz, I. Snitkov, B. Kharchyshyn. *Engenerny method vrachuvannja vychrovych strimiv u electromechanichnych systemach* [Accounting eddy currents engineering method in electromechanical systems] // *Electrotehnica i electromechanica* [Electrical engineering and Electromechanics]. – 2012;2: 50–52.

Надійшла до редакції 02.04.2013

Рецензент: М.М. Федоров

В.И. МОРОЗ, П.А. БОЛКОТ, К.И. СНИТКОВ, Б.М. ХАРЧИШИН
Национальный университет "Львовская политехника"

Линейный двигатель с постоянными магнитами как объект системы управления. В статье рассмотрено устройство и выполнено исследование динамических характеристик линейного двигателя с постоянными магнитами, что используется в качестве приводного в тренажере. На основе проведенных экспериментов создана структурная модель линейного двигателя с учетом наличия магнитного демпфера и эффектов от его влияния. Полученная структурная модель проанализирована в среде MATLAB-Simulink.

Ключевые слова: вихревые токи, идентификация объектов управления, линейный двигатель с постоянными магнитами, магнитный демпфер, система управления, структурная модель.

V.MOROZ, P. BOLKOT, K. SNITKOV, B. KHARCHYSHYN
National University "Lviv Polytechnic"

Permanent Magnets Linear Motor as the Controlled Object. The linear motors are no so popular in electric drive systems and their mathematical and the computer models are not very popular also. To improve the model of the designed permanent magnets linear motor the some experiments was made for model structure and parameters identification. The improved model will can be using for design of the digital control systems.

The main goals of the proposed model problems are:

- aluminum damping ring using eddy currents for smoothing movements of motor's rotor;
- consideration of the damping factor by the massive stator eddy currents that influence to the stator winding;
- skin-effect of the massive stator and massive damping rings.

The first iteration of the proposed computer model of the designed linear motor with the permanent magnets based on the ignoring of the skin-effect, separation of the damping impact of stator massive and damping rings eddy currents. Those simplifications provide the proposed mathematical and structure model of the designed linear motor. The eddy current impact was accounted by the using two separated simple first-order blocks in the feedbacks of the stator winding part and mechanical part of the structured model.

Such simplifications provided some good results for stator winding currents in the first iteration of the linear motor model.

The next steps of the investigations will be improvement of the proposed computer model by using skin-effect factor for massive stator and damping rings, improvement linear motor parameter identification for increase model accuracy.

Key words: eddy currents, controlled object identification, control system, permanent magnets linear motor, magnetic damper, structure model.