

УДК 621.797

О.І. ЯРЕМОВ, М.Я. ОСТРОВЕРХОВ (д-р техн. наук, доц.)

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут”

yaremoff@gmail.com ostroverkhov@list.ru

АНАЛІЗ ОДНОВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ПОЛЯ

Розкриваються основні положення теорії лінійних асинхронних машин на основі одновимірної моделі. Подані пояснення основних параметрів машин лінійного типу, що визначають ступінь і інтенсивність впливу поздовжніх крайових ефектів на статичні характеристики лінійного асинхронного двигуна. Як результат дослідження приведена графічна інтерпретація розподілу електромагнітного поля в зазорі машини і механічні характеристики машини з врахуванням і без впливу крайових ефектів. Проведений аналіз отриманих результатів щодо можливості їх застосування для синтезу законів керування координатами лінійного електроприводу.

Ключові слова: лінійний асинхронний двигун, теорія поля, статичний крайовий ефект, поздовжній крайовий ефект, одновимірна модель, двовимірна модель.

Вступ. Основними роботами, присвяченими теорії лінійних машин є роботи С Ямамури [1] та І. Болдеа, С.А. Насара [2, 3], які розвивались практично одночасно і дали можливість отримувати ефективні характеристики лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) на основі геометричних параметрів машини. До того часу теорія лінійних машин в основному базувалась на емпіричних даних, які отримувались шляхом проведення складних і вимірювань для кожної, окремо взятої машини. Натомість не існувало універсальної теорії, яка б описувала покрокову методику отримання характеристик машини на основі її параметрів. Вище згадані теорії лінійних електричних машин також дозволили проводити ефективний аналіз статичних крайових ефектів: поздовжнього – для одновимірної моделі, поздовжнього і поперечного – для двовимірної моделі.

Мета роботи полягає в отриманні робочих характеристик ЛАД з використанням одновимірної моделі, що базується на елементах теорії поля, а також в порівнянні і аналізі результатів з раніше проведеними дослідженнями даної тематики.

Матеріали дослідження. Графічна інтерпретація одновимірної моделі двостороннього ЛАД в системі координат x - y представлена на рис. 1 [1]. Двигун має двосторонній короткий первинний елемент (статор, індуктор) і довгий вторинний елемент (реактивна шина). В залежності від конкретного застосування двигуна рухомим може бути як вторинний, так і первинний елемент. В теорії, як правило, це не має значення, тому покладено, що реактивна шина рухається в повітряному зазорі між первинними елементами в напрямку збільшення координати x зі сталою швидкістю V . Покладається, що струми в обмотках первинних елементів мають напрямок z , а розподіл магнітної індукції в зазорі – в напрямку y .

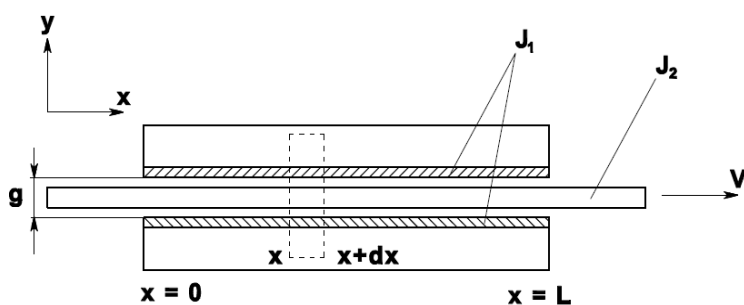


Рисунок 1 – Одновимірна модель ЛАД.

Первинний і вторинний струми J_1 , J_2 а також індукція B є функціями від шляху x і часу t [1].

Застосовуючи закон Ампера (ротор магнітного поля) до виділеного пунктирною лінією фрагменту моделі, отримується рівняння зміни електромагнітної індукції в зазорі машини:

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\partial B(x,t)}{\partial x} = J_1(x,t) + J_2(x,t), \quad (1)$$

де $B(x,t)$ [Т] – просторовий вектор електромагнітної індукції в зазорі; $J_1(x,t)$, $J_2(x,t)$ [А/м] – просторовий вектор лінійної щільності струму в обмотках первинного елемента і вектор щільності вторинного струму (на поверхні шини) відповідно; g [мм] – величина повітряного зазору; μ_0 – магнітна проникність повітря.

Застосовуючи закон Фарадея (ротор ЕРС) до поверхні реактивної шини в межах виділеного пунктирною лінією фрагменту, отримується рівняння зміни ЕРС (2), індукованої вихровими струмами в шині:

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial B(x,t)}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial B(x,t)}{\partial x}, \quad (2)$$

© Яремов О.І., Островерхов М.Я., 2013

де V – швидкість руху реактивної шини; $E(x,t)$ [V/m] – вектор напруженості електричного поля машини.

Згідно з законом Ома напруженість електричного поля визначається як (3):

$$E(x,t) = J_2(x,t) \cdot \rho_s, \quad (3)$$

де ρ_s [Om] – поверхневий опір реактивної шини ($\rho_s = \rho / d$); ρ [Om·m] – питомий опір матеріалу шини; d [m] – товщина шини.

В результаті поєднання рівнянь (1) – (3) отримується рівняння зміни електромагнітної індукції (4):

$$\frac{g}{\mu_0} \cdot \frac{\partial^2 B(x,t)}{\partial x^2} - \frac{V}{\rho_s} \cdot \frac{\partial B(x,t)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{\partial B(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial J_1(x,t)}{\partial x} \quad (4)$$

Покладаючи, що щільність струму в обмотках індуктора змінюється за законом:

$$J_1(x,t) = J_{1m} \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right)}, \quad (5)$$

розв'язання рівняння (4) запишемо у вигляді:

$$B(x,t) = B_s \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\pi x + \delta_s}{\tau}\right)} + B_1 \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\pi x}{\alpha_1}\right)} + B_2 \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\pi x}{\alpha_2}\right)} \cdot e^{j\left(\omega t + \frac{\pi x}{\tau_e}\right)}, \quad (6)$$

$$\delta_s = \arctg\left(\frac{\pi \cdot \rho_s \cdot g}{\mu_0 \cdot \tau \cdot (V_s - V)}\right), \quad (7)$$

де V_s , V [m/s] – відповідно синхронна швидкість поля і швидкість руху вторинного елемента відносно первинного; τ [m] – полюсний крок індуктора; α_1 , α_2 [m] – величини, що характеризують проникнення прямої і зворотної хвиль крайових ефектів; τ_e [m] – довжина півхвилі крайового ефекту.

Перша складова в рівнянні (6) має амплітуду B_s і є хвилею, яка рухається з синхронною швидкістю електромагнітного поля. Друга складова в (6) – хвиля з амплітудою B_1 , що рухається в напрямку, співпадаючим з напрямком руху основної хвилі; третя складова в (6) – хвиля з амплітудою B_2 , що рухається в напрямку протилежному хвилі нормальної. Інтенсивність впливу кожної з хвиль B_1 і B_2 зменшується з віддаленням від їх джерела виникання (тобто від набігаючого та збігаючого країв обмоток індуктора). Обидві хвилі затухають з різним коефіцієнтом демпфірування, що характеризується параметрами α_1 , α_2 .

Отримання значень параметрів α_1 , α_2 та τ_e передбачає розв'язання системи рівнянь (8) відносно X , Y (X , Y в системі (8) не є координатами x , y):

$$\begin{cases} X^2 - Y^2 = \left(V \cdot \frac{\mu_0}{\rho_s \cdot g}\right)^2; \\ 2 \cdot X \cdot Y = 4 \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{\rho_s \cdot g}. \end{cases} \quad (8)$$

Параметри α_1 , α_2 залежать від швидкості руху вторинного елемента, зазору і матеріалу шини.

$$\alpha_{1,2} = \frac{2 \cdot \rho_s \cdot g}{\rho_s \cdot g \cdot X \mp \mu_0 \cdot V}; \quad (9)$$

$$\tau_e = \frac{2 \cdot \pi}{Y}. \quad (10)$$

З отриманих розв'язків обираються пара додатніх чисел (X , Y), які використовуються для визначення параметрів α_1 , α_2 та τ_e (9 та 10). На рис.2 для двигуна, дані якого подані в Додатку І, представлені графіки зміни довжини півхвилі крайового ефекту τ_e та глибин проникнення прямої та зворотної хвиль α_1 та α_2 в залежності від зміни швидкості переміщення вторинного елемента.

Оскільки значення τ_e змінюється зі зміною швидкості V , то швидкість переміщення хвилі крайового ефекту відрізняється від швидкості переміщення основної хвилі електромагнітного поля (11):

$$V_e = 2 \cdot \tau_e \cdot f. \quad (11)$$

Амплітуди B_1 і B_2 є арбітральними константами і визначаються з граничної умови (9)[1].

$$\int_0^L B(x,t) dx = 0. \quad (12)$$

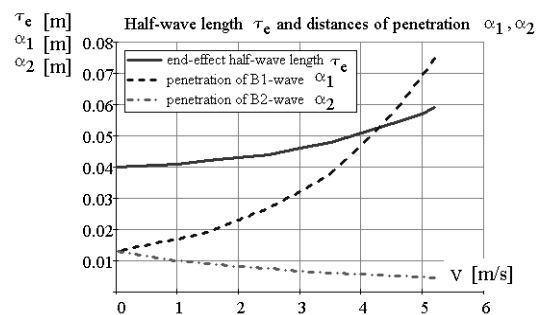


Рисунок 2 – Залежності параметрів α_1 , α_2 та τ_e від швидкості переміщення

Диференціюючи рівняння (12) по x , отримуємо граничні умови на набігаючому (13) та збігаючому (14) краях індуктора, покладаючи, що на набігаючому краю ($x = 0$) вплив B_2 – хвилі, так як і на збігаючому ($x = L$) вплив B_1 – хвилі є незначними.

$$B_1 = -B_s \cdot e^{j\delta_s} \quad (x = 0, B_2 = 0); \quad (13)$$

$$B_2 = -B_s \cdot e^{j\delta_s} \cdot e^{-j\pi \cdot L \cdot (\tau + \tau_e)} \cdot e^{-\frac{L}{\alpha_2}} \quad (x = L, B_1 = 0). \quad (14)$$

Оскільки довжина індуктора L є на кілька порядків більшою величиною, ніж величина α_2 , то множник e^{-L/α_2} в рівнянні (14) буде величиною нескінченно малою. Тому хвиля з амплітудою B_2 має незначний вплив на характеристику двигуна і для спрощення обчислень без значної втрати точності приймається $B_2 = 0$. Тоді амплітуду B_1 можливо визначити з виконання іншої граничної умови (15) на набігаючому краю індуктора:

$$B(0, t) = -\frac{\rho_s}{V} \cdot J_1(0, t). \quad (15)$$

Покладаючи $B_2 = 0, x = 0$ і підставляючи (15) в (6) отримується рівняння (16):

$$-\frac{\rho_s}{V} \cdot J_{1m} \cdot e^{j\omega t} = B_s \cdot e^{j(\omega t + \delta_s)} + B_1 \cdot e^{j\omega t}. \quad (16)$$

З рівняння (10), поділивши ліву і праву частини рівняння на $e^{j\omega t}$, таким чином виключаючи змінну часу t з рівняння, можна визначити амплітуду хвилі крайового ефекту (17) на набігаючому краю індуктора:

$$B'_1 = -B_s \cdot e^{j\delta_s} - \frac{\rho_s}{V} \cdot J_{1m}. \quad (17)$$

З (17) випливає, що при високих швидкостях руху V друга складова виразу прямуватиме до нуля (18):

$$\lim_{V \rightarrow \infty} \left(\frac{\rho_s}{V} \cdot J_{1m} \right) = 0. \quad (18)$$

В такому випадку амплітуда B_1 визначатиметься за виразом (13). На рис.3 представлені графіки розподілу модуля електромагнітної індукції і її дійсної та уявної складових для швидкостей переміщення $V = 4,99$ m/s і $V = 3,0$ m/s для двигуна, дані якого подані в Додатку I.

Слід відмітити, що кривим, представленим на легенді як $B'(x, t)$, відповідають обчислення модуля розподілу індукції з врахуванням (17), а криві, позначені на легенді як, $B(x, t)$, побудовані з врахуванням (13). Варто відмітити, що для низькошвидкісних двигунів амплітуду хвилі крайового ефекту на набігаючому краю в області робочих швидкостей слід обраховувати за (17), а для високошвидкісних двигунів – за (13).

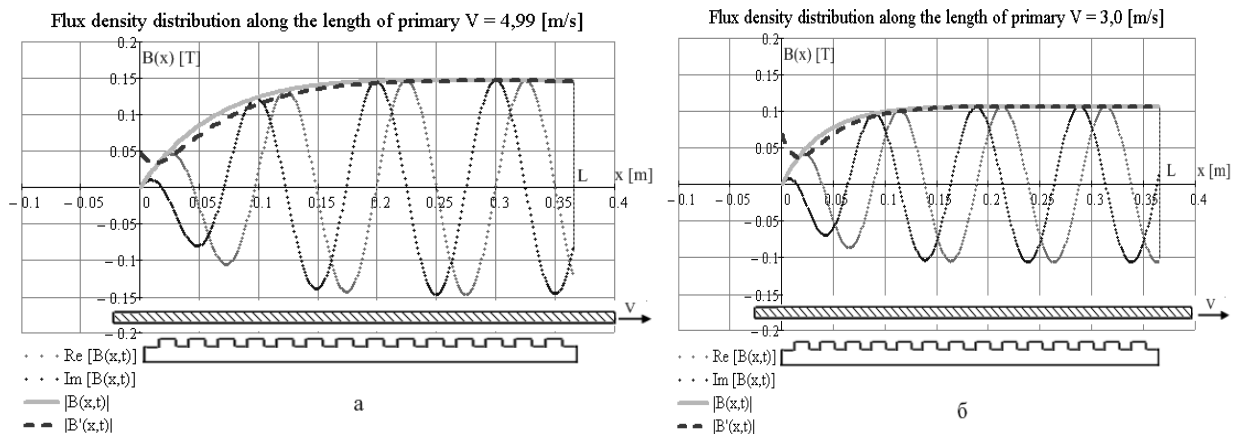


Рисунок 3 – Графіки розподілу модуля електромагнітної індукції в зазорі лінійного асинхронного двигуна для швидкостей переміщення вторинного елемента $V = 4,99$ m/s (а) і $V = 3,0$ m/s (б)

Оскільки отримано розв'язок розподілу електромагнітного поля в вигляді (6), то можливо отримати тягову характеристику двигуна як інтеграл сил, що діють на одиницю dx довжини індуктора:

$$F = \int_0^L \operatorname{Re}[J_1^*(x, t) \cdot B(x, t)] dx, \quad (19)$$

де J_1^* - вектор, комплексно спряжений до вектора J_1 .

Статичні характеристики ЛАД при керуванні з постійним струмом навантаження, обраховані без врахування впливу крайових ефектів і з врахуванням показані на рис. 4. Результати моделювання підтверджують негативний вплив поздовжнього крайового ефекту на статичну характеристику ЛАД, а саме зменшення тягового зусилля двигуна як на робочій ділянці характеристики, так і в області низьких швидкостей, зокрема

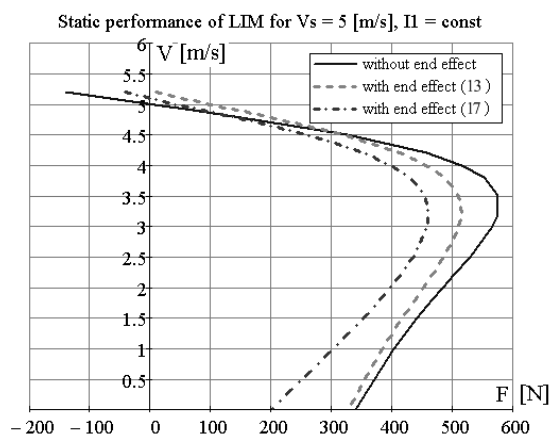


Рисунок 4 – Статичні характеристики ЛАД при керуванні з постійним струмом

обмоточний коефіцієнт; $f_1 = 50$ [Hz] – частота напруги живлення обмоток ЛАД; $J_{1m} = 21800$ [A/m] – амплітуда лінійної щільності струму.

Висновки. Розглянута одновимірна модель ЛАД дозволяє отримати статичні характеристики машини при відомих основних геометричних розмірах та параметрах обмотки первинного елемента (індуктора). Теорія, розвинута на основі одновимірної моделі, дозволяє проводити ефективний аналіз впливу поздовжніх крайових ефектів. Аналіз розподілу електромагнітного поля в зазорі машини дозволив розвинути теорію компенсованих ЛАД [1,5], в яких вплив крайових ефектів зводиться до мінімуму шляхом нових конструкційних розв'язань і рішень. Проте модель лінійної електричної машини на основі теорії поля не дозволяє проводити ефективний синтез законів керування змінними лінійного електроприводу, оскільки за своєю природою задачі керування в складних електромагнітних полях зі змінними параметрами потребують надпотужних обчислювальних ресурсів, що в практиці означало б можливість реалізації лише на надсучасних мікропроцесорних пристроях і з використанням складних вимірювальних систем високої роздільної здатності. Тому в останні роки активно проводяться дослідження в напрямку отримання моделі ЛАД на основі схеми заміщення фази обмотки індуктора, які полягають на можливих шляхах модифікації схеми в результаті врахування балансу потужностей [4,6] або зміни параметрів кола намагнічування машини [7].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yamamura S. Theories of the linear induction motor and compensated linear induction motor / S. Yamamura, H. Ito, Y. Ishulawa // Power Apparatus and Systems, IEEE Winter Meeting, New York, N.Y.- 1972.- PAS-91(4).- P.1700-1710.
2. Nasar S. A. Electromagnetic fields and forces in a linear induction motor, taking into account edge effects / S. A. Nasar // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, London.- 1969.- 116(4).- P. 605-609.
3. Boldea I. Improved performance of high speed single sided linear induction motor, a theoretical study / I. Boldea, S. A. Nasar // Electric Machines and Electromechanics: An International Quarterly.- 1978.- 2.- P. 155-166.
4. Kuijpers A.A. Force Analysis of Linear Induction Motor for Magnetic Levitation System /A.A. Kuijpers, C. Nemlioglu, F. Sahin, A.Verdel, J.C. Compter, E.A. Lomonova // 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC.- 2010.- S3.- P.17-20.
5. Fujii N. Basic Consideration of End Effect Compensator of Linear Induction Motor for Transit / N. Fujii, T. Harada // Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference.- 2000.- 1.- P.1-6.
6. Boldea I. A complete equivalent circuit of a linear induction motor with sheet secondary / I.Boldea, S.A.Nasar // IEEE Transactions on Magnetics.- 1988.- 24.- P. 639–654.
7. Duncan J. Linear induction motor – equivalent-circuit model / J. Duncan, C.Eng // IEE Proceedings of Electric Power Applications.- 1983.- 130(1).- P.51-57.

REFERENCES

1. S. Yamamura, H. Ito, Y. Ishulawa. Theories of the linear induction motor and compensated linear induction motor. Power Apparatus and Systems. New York, N.Y., 1972; PAS-91(4):pp.1700-1710.
2. S. A. Nasar. Electromagnetic fields and forces in a linear induction motor, taking into account edge effects. Institution of Electrical Engineers. London, 1969; 116(4): 605-609.
3. I. Boldea, S. A. Nasar. Improved performance of high speed single sided linear induction motor, a theoretical study. Electric Machines and Electromechanics: An International Quarterly, 1978; 2(2): 155-166.

4. A.A. Kuijpers, C. Nemlioglu, F. Sahin, A. Verdel, J.C. Compter, E.A. Lomonova. Force Analysis of Linear Induction Motor for Magnetic Levitation System. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, 2010; S3: pp.17-20.
5. N. Fujii, T. Harada. Basic Consideration of End Effect Compensator of Linear Induction Motor for Transit. IEEE Industry Applications Conference. 2000; 1: pp.1-6.
6. I. Boldea and S.A. Nasar. A complete equivalent circuit of a linear induction motor with sheet secondary. IEEE Transactions on Magnetics, 1988; 24(1): 639–654.
7. J. Duncan, C. Eng. Linear induction motor – equivalent-circuit model. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 1983; 130(1): 51-57.

Надійшла до редакції 08.04.2013

Рецензент: М.М. Федоров

О.И. ЯРЕМОВ, Н.Я. ОСТРОВЕРХОВ

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

Анализ одномерной модели линейного асинхронного двигателя с использованием элементов теории поля. В статье раскрываются основные положения теории линейных асинхронных машин на основе одномерной модели. Приведены разъяснения основных параметров машин линейного типа, которые определяют уровень и интенсивность влияния продольных краевых эффектов на статические характеристики линейного асинхронного двигателя. Как результат исследования приведена графическая интерпретация распределения электромагнитного поля в зазоре машины и механические характеристики машины с учетом и без влияния краевых эффектов. Проведенный анализ полученных результатов на возможность их использования для синтеза законов управления координатами линейного электропривода.

Ключевые слова: *линейный асинхронный двигатель, теория поля, статический краевой эффект, продольный краевой эффект, одномерная модель, двумерная модель.*

O.IAREMOV, M.OSTROVERKHOV

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

The One-Dimensional Model of Linear Induction Motor Analysis Using Field Theory Approach. The paper describes the principles of the theory of linear induction motor based on the one-dimensional model, proposed by S. Yamamura. The basic parameters of the linear electric machine which determine the longitudinal end effect influence and its intensity were described. The main influence of the end-effects is associated with the distortion of the flux density distribution along the length of the primary and is defined as forward and backward waves on the entry and exit ends respectively. The forward wave makes a main negative impact on the field distribution in the air gap of the motor and as a result the flux density increases exponentially from its initial value to steady value on the entry end of the primary. It is noted that the end effect action appears more as the speed of the secondary motion rises. Therefore, there are two approaches to forward end-effect wave magnitude calculation: the first one is for low-speed linear induction motors and the second one is for high-speed linear motion applications. The main advantage of the one-dimensional model of linear induction motor based on the field theory approach is that it is required to know only the main dimensions of the linear motor and secondary sheet material data for the static performance calculation. However the one-dimensional model of linear induction motor can not be used for control algorithms synthesis due to the complicated nature of the tasks of control strategy in the electromagnetic fields with variable parameters. Besides the one-dimensional theory of linear induction motor can not be used for a dynamic modes analysis. That's why the new theories were developed, which allow to calculate performance of linear induction motor using the equivalent circuit model with modifications in the magnetization branch or by adding the resistance in the secondary branch, referred to primary, due to the add losses of end-effect action.

Key words: *linear induction motor, field theory, static end effect, longitudinal end effect, one-dimensional model, two-dimensional model.*