

УДК 621.34-52

**В.І. Теряєв**, канд. техн. наук

**М.О. Островерхов**

### АЛГОРИТМ СКАЛЯРНОГО КЕРУВАННЯ ЛІНІЙНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ІЗ КОМПЕНСАЦІЄЮ ВПЛИВУ КІНЦЕВИХ ЕФЕКТІВ

***Анотація.** Розроблено алгоритм скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів. Для реалізації алгоритму необхідна інформація про миттєве значення фазного струму індуктора, активні опори індуктора і вторинного елемента, індуктивність вторинного елемента. Для врахування кінцевих ефектів застосовано модель Данкана.*

**В.И.Теряев**, канд. тех. наук

**М.А.Островерхов**

### АЛГОРИТМ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВЛИЯНИЯ КОНЕЧНЫХ ЭФФЕКТОВ

***Аннотация.** Разработан алгоритм скалярного управления линейным асинхронным двигателем с компенсацией влияния концевых эффектов. Для реализации алгоритма необходима информация о мгновенном фазном токе индуктора, активных сопротивлениях индуктора, вторичного элемента, индуктивности вторичного элемента. Для учета концевых эффектов использована модель Данкана.*

**V. I.Terjaev**, PhD

**M.O. Ostroverhov**

### SCALAR CONTROL ALGORITHM FOR LINEAR INDUCTION ENGINE TO COMPENSATE FOR THE INFLUENCE OF END EFFECTS

***Abstract.** Linear induction motor scalar control algorithm with end effects influence compensation was developed. Algorithm implementation requires information about primary's instantaneous phase current, primary and secondary ohmic resistances and secondary inductance. To take end effects into account Duncan's model is adopted*

**Вступ.** В галузях народного господарства, де необхідно створювати поступальний рух робочих механізмів, доцільним є застосування лінійних асинхронних двигунів (ЛАД). Їх основними перевагами є висока надійність, простота та відсутність кінематичних перетворюючих пристроїв. Для застосувань, що не вимагають високої динамічної точності, доцільно використовувати скалярні алгоритми керування. Лінійний асинхронний двигун характеризується значно зменшеною жорсткістю механічних характеристик у порівнянні із обертальними. Причиною цього є збільшений немагнітний зазор, підвищені потоки розсіювання, а також вплив кінцевих ефектів. Застосування стандартного закону скалярного керування  $U_1/f_1=\text{const}$  призводить до погіршення статичної точності у порівнянні із обертальним асинхронним двигуном.

Підвищення жорсткості механічних характеристик та розширення діапазону регулювання при скалярному керуванні звичайно досягаються шляхом стабілізації ЕРС індуктора (статора)  $E_1/f_1=\text{const}$ , стабілізації ЕРС основного магнітного потоку  $E_m/f_1=\text{const}$  та стабілізації ЕРС вторинного елемента  $E_2/f_1=\text{const}$  [1]. Вказані методи дають змогу компенсувати вплив активного опору індуктора та реактивних опорів розсіювання, проте не враховують вплив кінцевих ефектів.

У [5] запропоновано метод компенсації ковзання на основі лінеаризованої механічної характеристики двигуна, у [4] – його модифікація на основі формули Клосса, що забезпечує покращення статичної точності при навантаженнях, вищих за номінальне.

Для врахування впливу кінцевого ефекту застосовуються схеми заміщення із параметрами, які залежать від швидкості [3, 7], у [2] застосовується модифікація статичного зусилля двигуна як функції швидкості. Недоліком останнього методу є відсутність фізичного обґрунтування та необхідність проведення експерименту для отримання моделі.

**Актуальність.** В переважній більшості робіт даної тематики автори опираються на методи векторного керування. Недоліком представлених векторних алгоритмів є чутливість до неточностей визначення параметрів, складність, необхідність застосування датчиків швидкості, які призводять до здорожчання, ускладнення та зниження надійності електропривода. Актуальною задачею є розробка алгоритму скалярного керування, який забезпечує підвищення статичної точності ЛАД без застосування датчика швидкості.

**Мета роботи.** Розробка алгоритму скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів, що забезпечує підвищення статичної точності та критичного зусилля.

#### **Матеріал і результати дослідження.**

1. Компенсація впливу активного опору індуктора.

Одним із простих та ефективних способів підвищення жорсткості та критичного зусилля асин-

хронних двигунів при скалярному керуванні є стабілізація ЕРС індуктора на рівні [1]

$$E_{10} = E_{10H} \frac{f_1}{f_{1H}}, \quad (1)$$

де  $f_1$  – електрична частота індуктора,  $f_{1H}$  – номінальна електрична частота індуктора,  $E_{10H}$  – номінальна ЕРС холостого ходу індуктора.

Рівняння електричної рівноваги кола індуктора [1]

$$U_1 = R_1 I_1 + E_1, \quad (2)$$

де  $U_1$ ,  $I_1$  – фазна напруга та струм індуктора,  $E_1$  – ЕРС індуктора,  $R_1$  – активний опір індуктора.

Модуль напруги, необхідний для стабілізації ЕРС індуктора на рівні величини  $E_1 = E_{10}$ , наближено можна визначити

$$U_1 = E_1 + I_1 R_1 = E_1 + \Delta U, \quad (3)$$

де  $\Delta U$  – додаткова напруга, необхідна для компенсації спаду напруги на активному опорі індуктора

$$\Delta U = I_1 R_1. \quad (4)$$

## 2. Компенсація ковзання

Вважаючи компенсацію активного опору індуктора ідеальним, статичну характеристику ЛАД при частотному керуванні можна представити у наступній формі [1]:

$$F = \frac{2F_K}{\frac{\beta}{\beta_K} + \frac{\beta_K}{\beta}}, \quad (5)$$

де  $\beta_K$  – критичне абсолютне ковзання,  $F_K$  – критичне зусилля;

$$\beta_K = \frac{r_2 x_1}{x_{1\sigma} \cdot x_2 + x_{2\sigma} \cdot x_m}, \quad F_K = \frac{3U_{1H}^2}{2v_{10H}} \frac{x_m}{x_{2\sigma} x_1}$$

$x_1$ ,  $x_{1\sigma}$  – реактивний опір та опір розсіювання індуктора,  $r_2$ ,  $x_2$ ,  $x_{2\sigma}$  – активний опір, реактивний опір та опір розсіювання вторинного елемента,  $x_m$  – реактивний опір намагнічування,  $v_{10H}$  – номінальна швидкість холостого ходу лінійного асинхронного двигуна,  $U_{1H}$  – номінальна фазна напруга індуктора.

Перепишемо (5) відносно  $\beta$

$$\beta_{1,2} = \beta_K \left( \frac{F_K}{F_C} \pm \sqrt{\left(\frac{F_K}{F_C}\right)^2 - 1} \right). \quad (6)$$

Усталеному режиму роботи у I квадранті відповідає абсолютне ковзання

$$\beta_1 = \beta_K \left( \frac{F_K}{F_C} - \sqrt{\left(\frac{F_K}{F_C}\right)^2 - 1} \right). \quad (7)$$

Абсолютному ковзанню  $\beta_1$  відповідає електрична частота вторинного елемента:

$$f_2 = f_{1H} \beta_1. \quad (8)$$

Враховуючи (7) і (8),  $f_2$  можна переписати

$$f_2 = f_{1H} \beta_K \left( \frac{F_K}{F_C} - \sqrt{\left(\frac{F_K}{F_C}\right)^2 - 1} \right). \quad (9)$$

Статичне зусилля можна оцінити на основі співвідношення [2], враховуючи що  $v_1 = 2\tau f_1$ :

$$F_C = \left( \frac{1}{2\tau} \right) \frac{P_{12}}{f_1} = \left( \frac{1}{2\tau} \right) \frac{P_{12}}{f + f_2} = \left( \frac{1}{2\tau} \right) \frac{P_{12}}{f^* + f_2}, \quad (10)$$

де  $P_{12}$  – активна потужність, яка передається від індуктора до вторинного елемента через немагнітний зазор;  $f$  – механічна частота ротора двофазного оберта-

льного аналога ЛАД;  $f_2$  – електрична частота ротора двофазного обертального аналога ЛАД;  $\tau$  – полюсний крок ЛАД.

Потужність  $P_{12}$  можна представити

$$P_{12} = 3U_1 I_1 \cos \phi (1 - f(Q)) - I_1^2 r_1. \quad (11)$$

Введенням функції  $f(Q)$  враховано вплив кінцевих ефектів на основі моделі Данкана [3]:

$$f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q}, \quad (12)$$

$$Q = \frac{l R_2}{v L_2}, \quad (13)$$

де  $l$  – довжина індуктора;  $v$  – швидкість вторинного елемента;  $R_2$ ,  $L_2$  – активний опір та індуктивність вторинного елемента.

Приймаючи вторинний елемент однорідним, а також враховуючи типову конструкцію ЛАД із довгим вторинним елементом та коротким індуктором, індуктивність вторинного елемента  $L_2$  та активний опір  $R_2$  можна прийняти незмінними та рівними їх номінальним значенням.

Вважаючи ковзання в результаті його компенсації незначним, швидкість вторинного елемента може бути прийнята рівною швидкості поля

$$v \approx v_1 = 2\tau f_1. \quad (14)$$

Враховуючи (13), (14), величину  $Q$  можна визначити

$$Q = \frac{l R_2}{2\tau f_1 L_2}. \quad (15)$$

На основі (1), (4), (9)–(12), (15) складається алгоритм скалярного керування ЛАД. Функціональна схема алгоритму представлена на рис. 1. Сигналом завдання швидкості є  $f^*$ . Він визначає задану швидкість вторинного елемента

$$v^* = 2\tau f^*. \quad (16)$$

Вихідними величинами є фазна напруга та частота індуктора  $U_1$ ,  $f_1$  відповідно (обведені пунктиром). Послідовність роботи алгоритму вказана цифрами над блоками. Всередині блоків вказані номери рівнянь. Для роботи алгоритму необхідне вимірювання коефіцієнта потужності  $\cos \phi$ , струму фази індуктора, а також відомості про активний опір та індуктивність індуктора, активний опір вторинного елемента. Для уникнення можливої втрати стійкості внаслідок дії додатного зворотного зв'язку за струмом (рівняння 4) вводиться аперіодична ланка 9.

Робота алгоритму була перевірена методом математичного моделювання. При цьому була застосована двофазна динамічна модель ЛАД, доповнена моделлю Данкана для врахування впливу кінцевих ефектів.

Електромагнітні параметри ЛАД [6] наведені у таблиці. На рис. 2 представлено сімейство механічних характеристик ЛАД, отриманих методом математичного моделювання, при  $f^* = 15, 30, 40, 50$  Гц. Суцільною лінією зображені механічні характеристики при застосуванні запропонованого алгоритму скалярного керування, пунктирною – стандартного закону  $U_1/f_1 = \text{const}$ .

Електромагнітні параметри ЛАД

Параметр	Значення
Лінійна напруга $U_l$ , В	240
Номинальне статичне зусилля $F_{ch}$ , Н	190
Активний опір індуктора $R_l$ , Ом	13.2
Активний опір вторинного елемента $R_2'$ , Ом	11.78
Індуктивність індуктора $L_l$ , Гн	0.42
Індуктивність вторинного елемента $L_2$ , Гн	0.42
Індуктивність намагнічування $L_m$ , Гн	0.4
Полосний крок $\tau$ , м	0.0465
Довжина індуктора $l$ , м	0.48

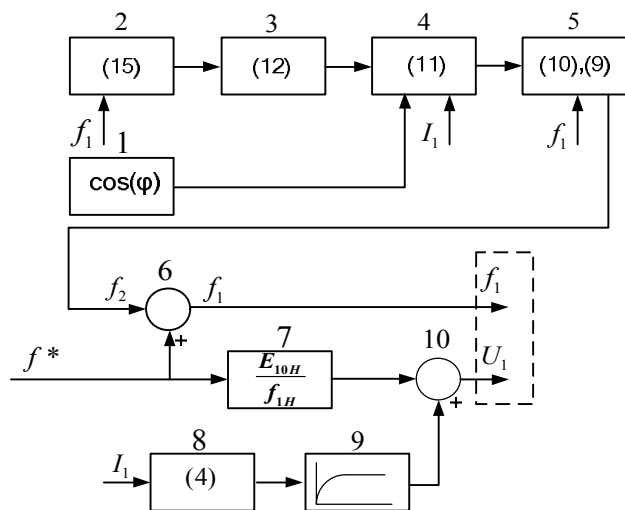


Рис.1. Функціональна схема алгоритму скалярного керування ЛАД із компенсацією впливу кінцевих ефектів

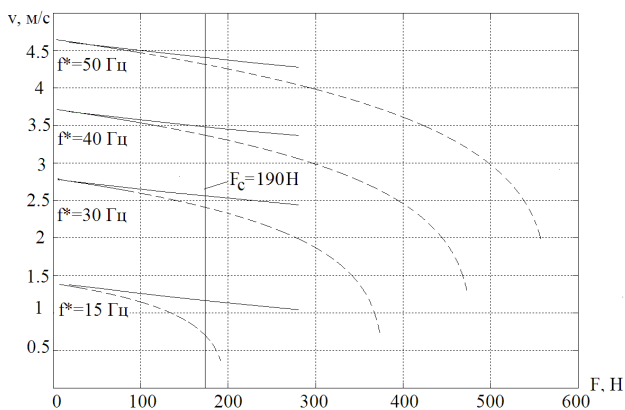


Рис.2. Механічні характеристики ЛАД при застосуванні стандартного та запропонованого алгоритму частотного керування

### Висновки

Розроблено скалярний алгоритм керування лінійним асинхронним двигуном, який забезпечує підвищення жорсткості та критичного зусилля статичних характеристик ЛАД у порівнянні із стандартним законом  $U_l/f_i = \text{const}$ . Перевагою представленого алгоритму є відсутність необхідності вимірювання швидкості. Вимірюваними в процесі роботи величинами є лише фазний струм індуктора та коефіцієнт потужності лінійного асинхронного двигуна. Для реалізації

алгоритму необхідні відомості про активний опір та індуктивність індуктора, активний опір вторинного елемента

### Список використаної літератури

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Усольцев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Chin-I Huang. Adaptive backstepping speed/position control with friction compensation for linear induction motor / Chin-I Huang, Li-Chen Fu // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002. V. 1. P. 474-479.
3. Jeong-Hyoun Sung. A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects / Jeong-Hyoun Sung, Kwanghee Nam // Industry applications conference, 1999. 34 IAS annual meeting. Conference record of the 1999 IEEE. P. 2284-2289.
4. Alfredo Munoz-Garcia. A new induction motor V/f control method capable of high performance regulation at low speeds / Alfredo Munoz-Garcia, Thomas A.Lipo and Donald W. Novotny // IEEE transactions on industry applications. V. 34. – № 4, July–August 1998. – P. 813-821.
5. K. Koga. Constitution of V/f control for reducing the steady state speed error to zero in induction motor drive system / K. Koga, R. Ueda, T. Sonoda // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – P. 463-471.
6. Kuang-Yow Lian. Robust Adaptive Control of Linear Induction Motors With Unknown End-Effect and Secondary Resistance / Kuang-Yow Lian, Cheng-Yao Hung, Chian-Song Chiu, Li-Chen Fu // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2008. – V. 23. – P. 412-422.
7. You-tong Fang. Single neuron network PI control of high reliability linear induction motor for Maglev / You-tong Fang, Cheng-zhi Fan // Journal of ZHEJIANG University – Science A, Volume 8. – № 3. – P.408-411  
Отримано 05.07.2011



Островерхов  
Максим Олександрович,  
асистент, Нац. техніч. ун-т  
України “КПІ”  
м. Київ, пр. Перемоги, 37  
(044) 406-83-56  
M.Ostroverkhov@gmail.com



Теряев  
Віталій Іванович,  
канд. техн. наук,  
Нац. техніч. ун-т  
України “КПІ”  
м. Київ, пр. Перемоги, 37  
(044) 406-83-56  
kpivit@gmail.com