

М. М. ЗАБЛОДСЬКИЙ, С. І. КОВАЛЬЧУК

ЕТАЛОННА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛІНІЙНИМ ДВИГУНОМ

Подано результати математичного моделювання лінійного двигуна на основі чисельних методів, що визначають електромеханічні характеристики двигуна. Знайдено закономірності виникнення гальмівних зусиль при збільшенні швидкості руху та розроблено ефективну модель системи адаптивного керування для усунення параметрів невизначеності, пов'язаних з інерційним навантаженням, силою тертя та опором. Досягнуто високої точності та швидкості моделі адаптивного керування лінійним двигуном.

Ключові слова: лінійний двигун, математична модель, еталонна модель адаптивної системи керування.

Представлены результаты математического моделирования линейного двигателя на основе численных методов. Определены электромеханические характеристики двигателя. Получены закономерности возникновения тормозных усилий при увеличении скорости движения и разработана эффективная модель системы адаптивного управления для устранения параметров неопределенности связанных с инерционным нагрузкам, силой трения и сопротивлением. Достигнуты параметры высокой точности и скорости модели адаптивного управления линейным двигателем.

Ключевые слова: линейный двигатель, математическая модель, эталонная модель адаптивной системы управления.

Purpose. Presentation the results of mathematical modelling based on known numerical analysis methods. By writing a model behind the magnetic equivalent circuits method in the MATLAB software environment, the electro-mechanical characteristics of a linear motor and the causes of the occurrence of braking forces with increasing speed were obtained. The Model Reference Adaptive Control (MRAC) for the linear motor was developed in the MATLAB software environment. The model takes into account the influence of the uncertainties parameters of the linear motor due to inertial load, friction, ripple force and electrical parameters. Based on the structure of the motor, the model of MRAC control is utilized to reduce the effect of parametric uncertainties on the motor movement. The developed model achieves high accuracy and speed of adaptive control of a linear motor.

Keywords: linear motor, mathematical model, model reference adaptive control.

Постановка проблеми та її актуальність. Аналіз наукових публікацій. Сучасні електромеханічні системи, що використовуються як електроприводи компресорів, насосів, вібраторів та іншого обладнання, часто вимагають високошвидкісного та високоточного лінійного руху. Як правило, лінійний рух забезпечується обертовими двигунами з механічними передачами, однак механічні передачі значно зменшують швидкість лінійного руху, утворюють люфт та великі інерційні навантаження на механічну систему. Як альтернатива обертовим двигунам, перспективним є використання лінійних двигунів. Лінійний двигун (ЛД) має ряд переваг перед обертовим: відсутність механічних передач; висока вібростійкість; незначні механічні втрати. Однак, ці двигуни чутливі до зміни параметрів навантаження.

Останніми роками, значні зусилля були спрямовані на вирішення труднощів в управлінні лінійними двигунами. Для усунення похибок в керуванні рухом лінійного двигуна було розроблено багато методів, таких як ітеративна модель прогнозованого керування [1], ітеративне керування з навчанням [2], вдосконалення системи управління режимом ковзання [3] та різні методи векторного та скалярного керування [4-5]. Усі ці дослідження базуються на жорсткій динаміці системи. Тому основним обмежуючим фактором, для підвищення показників контролю лінійного двигуна є гнучкі режими.

Еталонна модель адаптивної системи керування (Model Reference Adaptive Control – MRAC) використовується для розробки адаптивного контролера, який регулює свої параметри таким чином, щоб вихідні параметри об'єкту керування відслідковували вихідні параметри еталонної моделі, з тим самим еталонним вхідним сигналом [6-7].

Використання еталонної моделі адаптивної сис-

теми керування будемо розглядати як метод підвищення якості контролю лінійного двигуна у гнучких режимах, тому розробка такої системи є актуальною.

Метою роботи є розробка математичної моделі як засобу дослідження системи керування лінійного двигуна.

Викладення основного матеріалу. В процесі проектування лінійних електричних машин і режимів їх роботи, важливу роль займає математичне моделювання електромеханічних процесів. Математична модель являє собою розрахунок розгорнутих схем заміщення магнітного та електричного кіл лінійного двигуна з постійною апроксимацією параметрів в межах зубцевого ділення [8]. На рис.1 представлена схема заміщення магнітного кола, де, Φ_{n-1} , Φ_n , Φ_{n+1} - контурні магнітні потоки, Вб; R_n , R_{n+1} - магнітний опір повітряних ділянок, Ом.

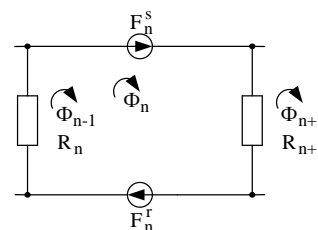


Рис. 1 – Магнітна схема заміщення

Магніторушійна сила струму статора в провідниках пазу визначається за формулою:

$$F_n^s = \omega_s^n \cdot i_s^n, \quad (1)$$

де ω_s^n – кількість провідників в пазу статора;

i_s^n – струм в статорі, А.

Магніторушійна сила струму в стержні ротора:

$$F_n^r = \omega_n^r \cdot i_n^r, \quad (2)$$

де ω_n^r – кількість стержнів в роторі;

i_n^r – струм в роторі, А.

Баланс МРС для « n -ої» ділянки приймає наступний вигляд:

$$F_s^n + F_n^r = \Phi_n \cdot (R_{n+1} + R_n) - \Phi_{n-1} \cdot R_{n+1} - \Phi_{n-1} \cdot R_n \quad (3)$$

Тоді, струм в стержні ротора:

$$i_n^r = -\omega_n^s \cdot i_n^s - \Phi_{n-1} \cdot R_n + \Phi_n \cdot (R_{n+1} + R_n) - \Phi_{n-1} \cdot R_{n+1} \quad (4)$$

Рівняння балансу напруги електричного кола ротора наступне:

$$r^r \cdot i_n^r + L^r \cdot \frac{\partial i_n^r}{\partial t} + L^r \cdot v \cdot \frac{\partial i_n^r}{\partial x} = -\frac{\partial \Phi_n}{\partial t} - v \cdot \frac{\partial \Phi_n}{\partial x} \quad (5)$$

Запишемо похідні в часі через скінченні різниці:

$$\frac{\partial i_n^r}{\partial t} = \frac{i_{n,k}^r - i_{n,k-1}^r}{\Delta t}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_n}{\partial t} = \frac{\Phi_{n,k} - \Phi_{n,k-1}}{\Delta t}, \quad (7)$$

де n - номер зубцевого ділення;

k - номер кроку поділу в часу.

Похідні по просторовій координаті « x » виразимо через середні скінченні різниці:

$$\frac{\partial i_{n,k}^r}{\partial x} = \frac{i_{n+1,k}^r - i_{n-1,k}^r}{2 \cdot t_z}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_{n,k}}{\partial x} = \frac{\Phi_{n+1,k} - \Phi_{n-1,k}}{2 \cdot t_z}. \quad (9)$$

Тоді рівняння (5) прийме наступний вигляд:

$$r^r \cdot i_{n,k}^r + L^r \cdot \frac{i_{n,k}^r - i_{n,k-1}^r}{\Delta t} + L^r \cdot v_{k-1} \cdot \frac{i_{n+1,k}^r - i_{n-1,k}^r}{2 \cdot t_z} = \frac{\Phi_{n,k} - \Phi_{n,k-1}}{\Delta t} - v \cdot \frac{\Phi_{n+1,k} - \Phi_{n-1,k}}{2 \cdot t_z} \quad (10)$$

Виключимо з рівняння (10) струм в роторі:

$$\left[\frac{\omega_n^s \cdot L^r \cdot v_{k-1}}{2 \cdot t_z} \right] \cdot i_{n-1,k}^s + \left[-\omega_n^s \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) \right] \cdot i_{n,k}^s + \left[-\omega_n^s \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2 \cdot t_z} \right] \cdot i_{n+1,k}^s + \left[\frac{R_{n-1} \cdot L^r \cdot v_{k-1}}{2 \cdot t_z} \right] \cdot \Phi_{n-2,k} + \left[-R_n \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) - \left((R_n + R_{n-1}) \cdot L^r + 1 \right) \cdot \frac{v_{k-1}}{2 \cdot t_z} \right] \cdot \Phi_{n-1,k} + \left[(R_{n+1} + R_n) \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) + (R_n - R_{n+1}) \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2 \cdot t_z} + \frac{1}{\Delta t} \right] \cdot \Phi_{n,k} + \left[-R_{n-1} \cdot \left(r^r + \frac{L^r}{\Delta t} \right) + \left((R_{n+2} + R_{n+1}) \cdot L^r + 1 \right) \cdot \frac{v_{k-1}}{2 \cdot t_z} \right] \cdot \Phi_{n+1,k} + \left[-R_{n+2} \cdot \frac{L^r \cdot v_{k-1}}{2 \cdot t_z} \right] \cdot \Phi_{n+2,k} = \left[-\omega_n^s \cdot \frac{L^r}{\Delta t} \right] \cdot i_{n,k-1}^s + \left[-R_n \cdot \frac{L^r}{\Delta t} \right] \cdot \Phi_{n-1,k-1} + \left[\frac{(R_{n+1} + R_n) \cdot L^r + 1}{\Delta t} \right] \cdot \Phi_{n,k-1} + \left[-R_{n+1} \cdot \frac{L^r}{\Delta t} \right] \cdot \Phi_{n+1,k-1} \quad (11)$$

Для проведення моделювання лінійного двигуна рівняння, які наведені вище, приведені до вигляду матриць, зручних для запису в програмному середовищі MATLAB. В моделі прийнято двигун з кількістю пар полюсів $2p = 2$ і загальною кількістю пазів індуктора $z_1 = 12$. Моделювання проведено з кількістю ітерацій $k = 500$. За результатами моделювання отримано залежності швидкості та електромагнітного зусилля від часу, які зображено на рис. 2.

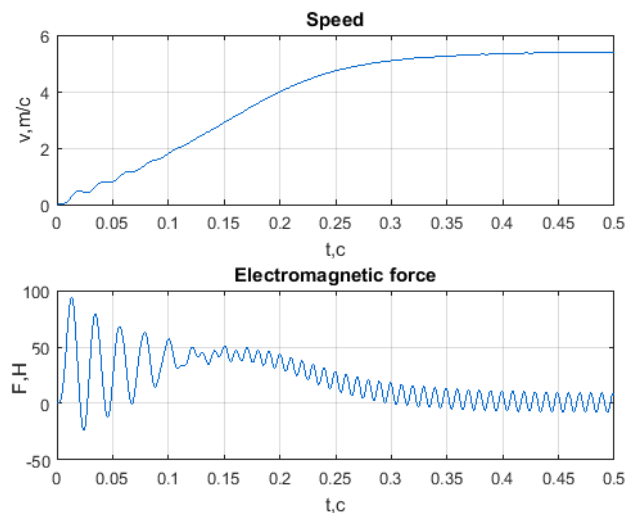


Рис. 2 – Залежність швидкості та електромагнітного зусилля лінійного двигуна від часу

З залежностей помітно, що в лінійному двигунові при зростанні швидкості, зростають гальмівні зусилля від взаємодії струмів в рухомому елементі з нерухомими в просторі і пульсуючими в часі потоками індуктора, що виникають внаслідок розімкнення магнітопроводу. Це, в свою чергу, призводить до зниження швидкості рухомого елемента.

Динамічна модель лінійного двигуна. Для від-

повідності високим вимогам продуктивності, в модель лінійного двигуна необхідно враховувати динамічні нелінійні ефекти, такі як сила тертя, що складається з тертя спокою, кулонівського тертя, що являє собою тертя ковзання (ефект Штрибека) та в'язке тертя.

Лінійний двигун складається з ротора, з різним числом пар сталевих феромагнітних полюсів та статора з постійними магнітами. Сталеві феромагнітні полюси ротора модулюють магнітне поле, створене статором і створюють просторові гармоніки в повітряному проміжку. Модульоване магнітне поле сталевих феромагнітних полюсів взаємодіє з магнітним полем постійних магнітів, тим самим створюючи обертовий момент. Не мало важливим, для лінійного двигуна є ефект насичення магнітним полем. У випадку існування великих значень струму в сталевих феромагнітних полюсах магнітної системи лінійного двигуна, постійна сила двигуна, яка визначається як відношення електромагнітного зусилля до сили струму збудження, значно зменшується, перш ніж струм в сталевому феромагнітному полюсі двигуна досягне свого максимуму магнітного насичення. Тому, система керування повинна обмежувати максимальне значення прискорення двигуна, нижче допустимих меж, щоб запобігти ефекту насичення магнітним полем.

В динамічній моделі лінійного двигуна використано кубічний многочлен для ефективного наближення непередбачуваної не лінійності системи, між електромагнітним зусиллям та струмом збудження двигуна. За такого наближення, ефективно визначаються непередбачувані впливи магнітного поля за великих значень струму збудження. Математична модель такої система може бути описана наступними виразами [9]:

$$M\ddot{y} = F_m(u) - B\dot{y} - A_f S_f(\dot{y}) + F_{dis}, \quad (12)$$

де y , \dot{y} , \ddot{y} – переміщення, швидкість та прискорення інерційного навантаження;

u – керуючий сигнал вхідної напруги;

M – інерція;

B – коефіцієнт в'язкого тертя;

A_f – коефіцієнт кулонівського тертя;

$S_f(\dot{y})$ – являється неперервною або гладкою функцією, що використовується для апроксимації переривчастої функції $\text{sgn}(\dot{y})$ для ефективної компенсації кулонівського тертя;

$F_m(u)$ – електромагнітне зусилля двигуна;

F_{dis} – похибка системи.

Для малих значень струму збудження, ефект нелінійного електромагнітного поля являється не значним та може бути проігнорованим. Електромагнітне зусилля пропорційно залежить від струму збудження. Тоді:

$$F_m(u) = Ku, \quad (13)$$

де $K = K_m \cdot K_i$;

K_m та K_i – середні значення постійної сталої сили двигуна та коефіцієнт підсилення системи.

За великих значень струму збудження, вплив

електромагнітного поля є очевидним. Результуюче значення постійної сталої сили двигуна значно зменшується зі збільшенням струму збудження. Тому, у випадку переміщення великого навантаження, або під час переміщення з великим прискоренням виникають непередбачувані параметри електромагнітного зусилля, що можуть призвести до неточності системи керування. Для того, щоб використовувати максимальні можливості двигуна, необхідно враховувати вплив нелінійного електромагнітного поля. Для досягнення точності моделювання та ідентифікації нелінійного електромагнітного ефекту, не лінійність необхідно обробляти шляхом адаптації параметрів системи. Тому кубічний многочлен керуючого сигналу u , застосовується для апроксимації непередбачуваної електромагнітної не лінійності між електромагнітним зусиллям та керуючим сигналом:

$$F_m(u) = A_1 u + A_2 u|u| + A_3 u^3, \quad (14)$$

де A_1 , A_2 , A_3 – невідомі коефіцієнти кубічного многочлена, з $A_1 > 0$.

Тоді, нелінійні ефекти системи, ефективно фіксуються квадратичним і кубічним членом многочлена, похибка адаптації достатньо мала, для всіх значень струму.

Оскільки коефіцієнти A_2 і A_3 відносно малі в порівнянні до A_1 , ефект квадратичного і кубічного многочлена можна проігнорувати за відносно малих значень струму збудження, що приводять характеристики системи, а саме залежність електромагнітного зусилля від струму збудження, до лінійних $A_1 = K$.

Оскільки нелінійний електромагнітний ефект двигуна, володіє симетрією відносно позитивних та негативних значень струму збудження, керуючий сигнал $|u|$ використовується в квадратичному члені многочлена, щоб гарантувати функцію $F_m(u)$.

Обмежуючи значення A_i , в деяких відомих межах, функцію $F_m(u)$ можна зробити суворо монотонною, де електромагнітне зусилля F_m та керуючий сигнал u , менші своїх максимальних значень. Такі обмеження необхідні, оскільки електромагнітна не лінійність є монотонною. Тоді, для будь-якого електромагнітного зусилля F_m , існує свій керуючий сигнал u :

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (14)$$

$$\Theta_1 \dot{x}_2 = u - \Theta_2 x_2 - \Theta_3 S_f(x_2) + \Theta_4 + \Theta_5 u|u| + \Theta_6 u^3 + \tilde{d}, \quad (15)$$

де x_1 і x_2 – положення та швидкість навантаження.

Набір непередбачуваних параметрів системи прийнятий як:

$$\Theta = [\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6]^T \in R^6, \quad (16)$$

де

$$\Theta_1 = \frac{M}{A_1}; \quad (17)$$

$$\Theta_2 = \frac{B}{A_1}; \quad (18)$$

$$\Theta_3 = \frac{A_f}{A_1}; \quad (19)$$

$$\Theta_5 = \frac{A_2}{A_1}; \quad (20)$$

$$\Theta_6 = \frac{A_3}{A_1}; \quad (21)$$

$$\Theta_4 = \frac{F_{dis}}{A_1}, \quad (22)$$

де Θ_4 – являє собою зміну непередбачуваних нормованих параметрів в часі.

Еталонна модель адаптивної системи керування. Сучасні системи широко використовують адаптивне керування для підвищення продуктивності та точності систем. Еталонна модель адаптивного керування (MRAC) – пряма адаптивна стратегія з деякими регулюючими параметрами контролера та механізмом регулювання. Адаптивні контролери дуже ефективні в роботі з системами, де виникають непередбачувані зміни параметрів. Адаптивний контролер складається з двох контурів, зовнішнього контуру зворотного зв'язку і внутрішнього контуру, еталонного регулювання параметрів.

За умов прийнятих в динамічній моделі лінійного двигуна, можна зробити припущення, що ступінь параметричної невизначеності і не лінійність системи відомі:

$$\Theta \in \Omega_{\Theta} \stackrel{\Delta}{=} \{\Theta : \Theta_{\min} < \Theta < \Theta_{\max}\}; \quad (23)$$

$$\tilde{d} \in \Omega_d \stackrel{\Delta}{=} \{\tilde{d} : |\tilde{d}| \leq \delta_d\}, \quad (24)$$

де

$$\Theta_{\min} = [\Theta_{1\min} \dots \Theta_{4\min}]^T; \quad (25)$$

$$\Theta_{\max} = [\Theta_{1\max} \dots \Theta_{4\max}]^T. \quad (26)$$

Позначимо $\hat{\Theta}$ як точність і $\tilde{\Theta}$, як похибку оцінювання системи.

$$\tilde{\Theta} = \hat{\Theta} - \Theta. \quad (27)$$

З огляду на (27) може бути застосований адаптивний закон з переривчастою модифікацією проєкції:

$$\dot{\hat{\Theta}} = \text{proj}_{\hat{\Theta}}(\Gamma \tau), \quad (28)$$

де $\Gamma > 0$ – діагональ матриці;

τ – функція адаптації; $\text{proj}_{\hat{\Theta}}$ визначається як [10]:

$$\text{proj}_{\hat{\Theta}_i}(\bullet_i) = \begin{cases} 0, \text{ if } \hat{\Theta}_i = \Theta_{i\max} \text{ and } \bullet_i > 0 \\ 0, \text{ if } \hat{\Theta}_i = \Theta_{i\min} \text{ and } \bullet_i < 0 \\ \bullet_i, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (29)$$

Тоді, для будь-якої функції адаптації τ , гарантовано проєкційне відображення:

$$\hat{\Theta} \in \Omega_{\Theta} \stackrel{\Delta}{=} \{\hat{\Theta} : \Theta_{\min} \leq \hat{\Theta} \leq \Theta_{\max}\}; \quad (30)$$

$$\hat{\Theta}^T (\Gamma^{-1} \text{proj}_{\hat{\Theta}}(\Gamma \tau) - \tau) \leq 0 \forall \tau. \quad (31)$$

Визначимо адаптивний закон як:

$$p = \dot{e} + k_1 e = x_2 - x_{2eq}, \quad (32)$$

де

$$x_{2eq} = \dot{y}_d - k_1 e, \quad (33)$$

де $e = y - y_d(t)$ – вихідна похибка системи;

$y_d(t)$ – еталонна траєкторія;

k_1 – будь-який позитивний зворотній зв'язок.

Якщо значення p – наближається до нуля експоненціально, то вихідна похибка відстеження e є не значною, або наближається до нуля оскільки:

$$G_p(s) = \frac{e(s)}{p(s)} = \frac{1}{(s + k_1)}, \quad (34)$$

де, $G_p(s)$ – стійка функція передачі.

Отже, основне завдання адаптивної системи, отримати максимально мале значення p . Тоді:

$$M\dot{p} = u - \Theta_1 \dot{x}_{2eq} - \Theta_2 x_2 - \Theta_3 S_f + \Theta_4 + \tilde{d} = u + \varphi^T \Theta + \tilde{d}, \quad (35)$$

де

$$\dot{x}_{2eq} = \ddot{y}_d - k_1 \dot{e}; \quad (36)$$

$$\varphi^T = [-\dot{x}_{2eq}, -x_2, -S_f(x_2), 1]. \quad (37)$$

Приймаючи до уваги (35), керуючий сигнал матиме наступний вигляд:

$$u = u_a + u_s; \quad (38)$$

$$u_a = -\varphi^T \hat{\Theta}, \quad (39)$$

де u_a – регульована модель компенсації системи, для досягнення еталонних параметрів;

u_s – функція керування.

Об'єднуючи рівняння (35), (38), (39) отримуємо наступне:

$$M\dot{p} = u_s - \varphi^T \tilde{\Theta} + \tilde{d}. \quad (40)$$

Функція керування u_s визначається як:

$$u_s = u_{s1} + u_{s2}; \quad (41)$$

$$u_{s1} = -k_2 p, \quad (42)$$

де u_{s1} – використовується для стабілізації номінальних параметрів системи;

u_{s2} – сигнал зворотного зв'язку, для усунення впливу не визначених параметрів системи.

Тоді виконуються наступні умови:

$$p\{u_{s2} - \varphi^T \tilde{\Theta} + \tilde{d}\} \leq \varepsilon; \quad (43)$$

$$p u_{s2} \leq 0. \quad (44)$$

В рівняннях (43), (44) сигнал зворотного зв'язку синтезовано для усунення непередбачуваних параметрів системи таким чином, щоб не заважати моделі компенсації система u_a .

Математичну модель еталонної моделі адаптивної системи керування реалізовано в програмному середовищі MATLAB. За еталонні параметри моделі прийнято наступні: інерція $M = 0.085$ Н, еквівалентне в'язке тертя $B = 0.35$ Н, коефіцієнт кулонівського тертя $A_f = 0.15$, параметри невизначеності $\Theta_1 = 0.055$ Н, $\Theta_2 = 0.225$ Н, $\Theta_3 = 0.125$, Θ_4 - похибка системи, близька до нуля. В результаті моделювання було отримано графіки контролюючого сигналу, похибки слідування системи та графіки наближення параметрів невизначеності до еталонних значень, які зображено на рис. 3-5.

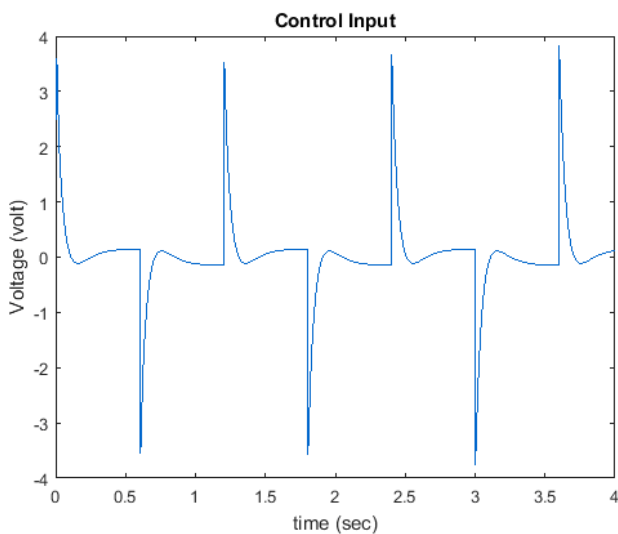


Рис. 3 – Контролюючий сигнал системи адаптивного керування з еталонною моделлю лінійним двигуном

За результатами моделювання можна стверджувати, що еталонна модель адаптивної системи керування лінійного двигуна ефективніша за жорсткі динамічні системи керування [1, 2, 3], оскільки похибка системи MRAC близька до нуля, а час адаптації системи $t = 4$ с, що у випадку ітеративного керування з навчанням [2] становить $t = 10$ с. Також система MRAC значно простіша за ітеративну модель прогнозованого керування [1].

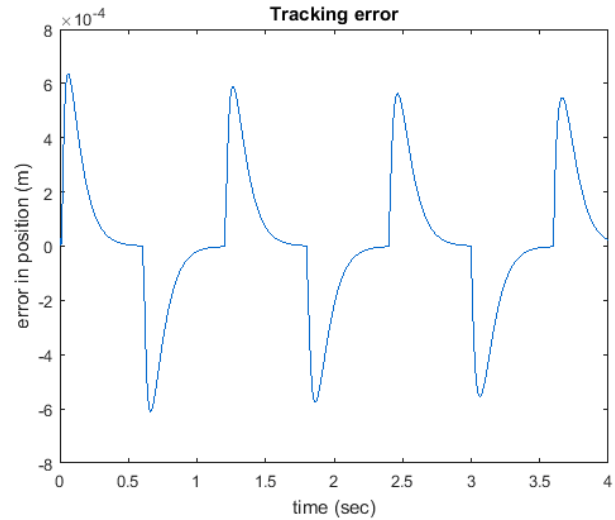


Рис. 4 – Похибка слідування системи

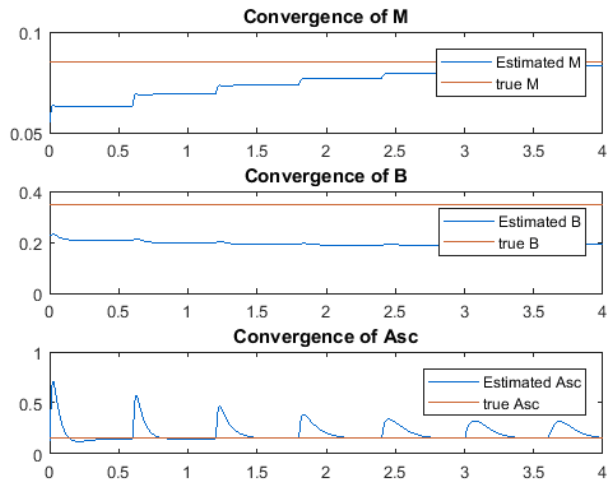


Рис. 5 – Наближення параметрів невизначеності системи $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$, до еталонних значень

Висновки.

1. Моделювання електромеханічних процесів лінійного двигуна дозволило оцінити вплив збільшення швидкості переміщення на електромагнітне зусилля двигуна. Характер зростання гальмівних зусиль від взаємодії струмів в рухомому елементі з нерухомими в просторі і пульсуючими в часі потоками індуктора, що виникають внаслідок розімкнення магнітопроводу, необхідно враховувати при розробці ефективної моделі системи керування двигуном з врахуванням параметрів невизначеності.

2. Розроблена модель контролера для лінійного двигуна на основі одного з методів теорії управління – еталонна модель адаптивної системи керування (Model Reference Adaptive Control – MRAC) дозволяє враховувати вплив параметрів невизначеності моделі, що виникають внаслідок інерційного навантаження, сили тертя, сил пульсацій та опору. Модель контролера гарантує задані перехідні характеристики і високу кінцеву точність. Така система володіє високою швидкістю адаптації параметрів двигуна до еталонних значень.

Список літератури

1. Cao R., Low K. A. repetitive model predictive control approach for precision tracking of a linear motion system / R. Cao, K. Low // IEEE Trans. Ind. Electron. – Jun. 2009. – vol. 56. – pp. 1955-1962. doi:10.1109/TIE.2008.2007034.
2. Wu J., Xiong Z., Lee K.-M., Ding H. High-acceleration precision point-to-point motion control with look-ahead properties / J. Wu, Z. Xiong, K.-M. Lee, H. Ding // IEEE Trans. Ind. Electron. – Sep. 2011. – vol. 58. – pp. 4343-4352. doi:10.1109/TIE.2010.2098363.
3. Lin F. J., Chou P. H., Chen C. S. DSP-based cross-coupled synchronous control for dual linear motors via intelligent complementary sliding mode control / F. J. Lin, P. H. Chou, C. S. Chen // IEEE Trans. Ind. Electron. – Feb. 2012. – vol. 59. – pp. 1061-1073. doi:10.1109/TIE.2011.2157286.
4. Островерхов М. Я. Алгоритм скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів / М. Я. Островерхов, В. І. Теряєв // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – 2011. – Вип. 03 (79). – С. 32-34.
5. Яремов О. І. Дослідження векторно керованого електропривода з лінійним асинхронним двигуном при врахуванні крайових ефектів / О. І. Яремов, М. Я. Островерхов // Електромеханічні системи та автоматизація. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). Частина 2.
6. Xu L., Yao B. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments / L. Xu, B. Yao // Control Applications 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference. – 2000. – pp. 373-378. doi:10.1109/ACC.2000.878674.
7. Nguyen, Nhan T. Model-Reference Adaptive Control / Nguyen, T. Nhan. – USA, Springer International Publishing AG. – 2018. – 444 p. doi:10.1007/978-3-319-56393-0.
8. Сарапулов Ф. Н. Исследование электромеханических переходных процессов линейного асинхронного короткозамкнутого двигателя / Ф. Н. Сарапулов, А. А. Емельянов, С. В. Иваницкий, М. Г. Резин // Электричество. – 1982. – № 10. – С. 54-57.
9. Chen Z., Yao B. Accurate Motion Control of Linear Motors With Adaptive Robust Compensation of Nonlinear Electromagnetic Field Effect / Z. Chen, B. Yao // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – June 2013. – vol. 18. – pp. 1122-1129. doi:10.1109/TMECH.2012.2197217
10. Goodwin G. C., Mayne D. Q. A parameter estimation perspective of continuous time model reference adaptive control / G. C. Goodwin, D. Q. Mayne // Automatica. – vol. 23. – pp. 57-70. doi:10.1016/0005-1098(87)90118-X

References (transliterated)

1. Cao R., Low K. A. A repetitive model predictive control approach for precision tracking of a linear motion system // IEEE Trans. Ind. Electron. Jun. 2009, vol. 56, pp. 1955-1962. doi:10.1109/TIE.2008.2007034.
2. Wu J., Xiong Z., Lee K.-M., Ding H. High-acceleration precision point-to-point motion control with look-ahead properties // IEEE Trans. Ind. Electron. Sep. 2011, vol. 58, pp. 4343-4352. doi:10.1109/TIE.2010.2098363.
3. Lin F. J., Chou P. H., Chen C. S. DSP-based cross-coupled synchronous control for dual linear motors via intelligent complementary sliding mode control // IEEE Trans. Ind. Electron. Feb. 2012, vol. 59, pp. 1061-1073. doi:10.1109/TIE.2011.2157286.
4. Ostroverxov M. Y. Algoritm skalyarnogo keruvannya liniynym asynkronnym dvygunom iz kompensaciyeyu vplyvu kincevix efektyv. [Scalar control algorithm for linear asynchronous motor with compensation of the end effects]. *Elektrotexnichni ta kompyuterni systemy. Naukovo-texnichnyjzhurnal*. 2011, vol. 03 (79), pp. 32-34. (Ukr)
5. Yaremov O. I. Doslidzennya vektornokерованого електропривода z liniynym asynkronnym dvygunom pry vrahuvanni krajovyx efektyv. [Investigation of vector-driven electric drive with linear asynchronous motor taking into account boundary effects]. *Electromexanichni systemy ta avtomatyzaciya*. 2013, vol. 2/2013 (22). Part 2.
6. Xu L., Yao B. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments. *Control Applications 2000 // Proceedings of the 2000 IEEE International Conference*. 2000, pp. 373-378. doi:10.1109/ACC.2000.878674.
7. Nguyen, Nhan T. Model-Reference Adaptive Control. USA, Springer International Publishing AG, 2018, 444 p. doi:10.1007/978-3-319-56393-0.
8. Sarapulov F. N. Issledovanie jelektromexanicheskix perehodnyx processov linejnogo asinhronnogo korotkozamknutogo dvgatelja [Study of electromechanical transients of a linear asynchronous squirrel-cage motor]. *Jelektrichestvo*. 1982, vol. 10, pp. 54-57.
9. Chen Z., Yao B. Accurate Motion Control of Linear Motors With Adaptive Robust Compensation of Nonlinear Electromagnetic Field Effect // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. June 2013, vol. 18, pp. 1122-1129. doi:10.1109/TMECH.2012.2197217
10. Goodwin G. C., Mayne D. Q. A parameter estimation perspective of continuous time model reference adaptive control // *Automatica*. vol. 23, pp. 57-70. doi:10.1016/0005-1098(87)90118-X

Поступила(received) 10.02.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Заблодський М. М. Еталонна модель адаптивної системи керування лінійним двигуном / М. М. Заблодський, С. І. Ковальчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 78-83. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.13.

Заблодский Н. Н. Эталонная модель адаптивной системы управления линейным двигателем / Н. Н. Заблодский, С. И. Ковальчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 78-83. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.13.

Zablodskiy N. N. Model Reference Adaptive Control for linear motor / N. N. Zablodskiy, S. I. Kovalchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion. – 2020. – No. 3 (1357). – P. 78-83. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.13.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Заблодський Микола Миколайович (Заблодский Николай Николаевич, Zablodsky Mykola Mykolayovych) – доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, тел. (097)2318949; ORCID: 0000-0001-8889-8158; e-mail: zablodskiyinn@gmail.com,

Ковальчук Станіслав Ігорович (Ковальчук Станислав Игоревич, Kovalchuk Stanislav Igorovich) – аспірант, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, тел. (093)5283894; e-mail: stas_kovalchuk@outlook.com.