

ĐIỀU KHIỂN TÁCH KÊNH CHO ĐỘNG CƠ TUYỀN TÍNH KÍCH THÍCH VĨNH CỦU DẠNG POLYSOLENOID

Nguyễn Hồng Quang¹, Đào Phương Nam², Nguyễn Như Hiển^{1*}, Nguyễn Ngọc Liêm¹

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Hiện nay, việc tạo ra các chuyển động thẳng hầu hết được thực hiện gián tiếp bằng các động cơ quay, kéo theo nhiều nhược điểm như kết cấu cơ khí phức tạp do tồn tại các phần tử trung gian, độ chính xác và hiệu suất của hệ thống thấp do sai số tích lũy của các phần tử trong toàn hệ thống. Bằng cách sử dụng các loại động cơ có khả năng tạo chuyển động thẳng trực tiếp (động cơ tuyến tính) cho phép loại trừ những nhược điểm trên. Bài báo này giới thiệu một giải pháp điều khiển tách kênh động cơ tuyến tính loại kích thích vĩnh cửu dạng Polysolenoid cho phép các đại lượng vật lý bám theo quy đạo cho trước. Toàn bộ động điện được huy động để tạo lực đẩy cho động cơ ngay cả khi mô hình chiều chính xác về thông số kỹ thuật hay ảnh hưởng bởi nhiễu.

Từ khóa: Điều khiển tách kênh, Lin. Polysolenoid linear motors, điều chế vector không gian, nghịch lưu hai pha

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
L_{sd}, L_{sq}	H	Điện cảm dọc trục và ngang trục của stator
m	Kg	Khối lượng của bộ phận sơ cấp (stator)
u_s, i_s	V, A	Vector điện áp, dòng stator
R_s	Ω	Điện trở stator
v_s, v_i	m/s	Vận tốc cơ, điện
F_m, F_c	N	Lực đẩy, lực cản
I_m, I_q	A	Động điện trục d, q
u_{sd}, u_{sq}	V	Điện áp trục d, q
p	mm	Bước cự
r	Wb	Tứ thông cự từ
w_e	Rad/s	Vận tốc góc điện
x_p	mm	Vị trí của động cơ

Chữ viết tắt

TTHCX	Tuyến tính hóa chính xác
ĐB-KTVC	Đồng bộ - kích thích vĩnh cửu
ĐCD	Điều chỉnh dòng
ĐC, ĐK	Điều chỉnh, điều khiển
TKTT	Tách kênh trực tiếp
PHTT	Phản hồi trạng thái
VDK	Vị điều khiển
SVM	Điều chế vecto không gian
MIMO	Multi input - multi output

ĐẶT VÂN ĐÈ

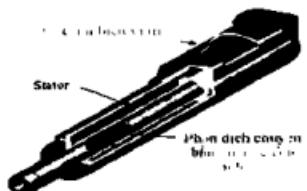
Động cơ tuyến tính kích thích vĩnh cửu dạng Polysolenoid làm việc dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ với nguyên tắc hoạt động đã được trình bày ở [1], [2], [3], [4].

Đối với hệ truyền động ĐCTT, tuy loại bô được cơ cấu cơ khí trung gian nhưng khiến cho hệ thống trở nên kém bền vững, rất nhạy đổi với các tác động phụ như lực ma sát, hiệu ứng đầu cuối, tải thay đổi, phân bố từ không sin,... gây ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Một số nghiên cứu tiêu biểu đã đề cập đến khả năng khắc phục những ảnh hưởng nêu trên, đó là [5] đã đưa ra phương án thiết kế bô điều chỉnh tốc độ theo phương pháp điều khiển PI - *Tư chỉnh* kết hợp với những kỹ thuật ước lượng phù hợp ở vùng tốc độ thấp giúp đạt được chất lượng tốt ở vùng làm việc này. Tuy nhiên trong trường hợp tài biến động (ví dụ như thay đổi khối lượng vật nặng,...) sẽ gây ra sự thay đổi lực ma sát và các lực cản khác, lúc này bô điều khiển PI - *Tư chỉnh* không còn hiệu quả và phương pháp điều khiển *thích nghi theo mô hình mẫu* dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov đã được vận dụng trong trường hợp này [6]. Phương pháp thiết kế cuốn chiếu Backstepping cũng được sử dụng để khắc phục ảnh hưởng của ma sát và lúc này bô điều khiển được thiết kế dựa trên mô hình ước lượng ma sát Lugrie [7]. Tuy vậy ma sát là một ảnh hưởng phụ thuộc nhiều vào điều kiện làm việc (nhiệt độ, độ ẩm,...) nên những mô hình ước lượng ma sát

* Email: nhuhienhdktcn@gmail.com

sẽ gặp sai số trong ứng dụng thực tế. Việc vận dụng phương pháp điều khiển mang nỗ lực, thích nghi sẽ giúp khắc phục khó khăn này [8]. Phương pháp giúp chính định các thông số bộ điều khiển dựa trên những giả định và luật thích nghi, đảm bảo kết quả hội tụ đến giá trị thực. [9] cũng trình bày một phương pháp khác khắc phục ảnh hưởng của ma sát nhờ vào bộ điều khiển *mở thích nghi*.

Động cơ tuyến tính ĐB - KTVC dạng *POLYSOLENOID* (hình 1) làm việc dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ. Khi các cuộn dây được cấp nguồn thì dòng xoay chiều hai pha trên hai cuộn dây sẽ tạo thành vectơ dòng di chuyển theo phương nằm ngang và thành phần dòng trục q của nó sẽ tương tác với từ thông ϕ của nam châm vĩnh cửu, tạo ra lực đẩy các cuộn dây trong bộ phận sơ cấp của động cơ tuyến tính *Polysoleonoid*. Dựa trên cấu trúc của động cơ tuyến tính *Polysoleonoid*. Hệ thống điều khiển này cần có khả năng cách ly hai thành phần tạo lực và từ thông. Giải pháp điều khiển phi tuyến dựa trên cấu trúc nối tầng và tuyến tính hóa chính xác giúp thực hiện mục tiêu nói trên.



Hình 1. Động cơ tuyến tính động bộ - kích thích vĩnh cửu dạng Polysoleonoid

PHƯƠNG PHÁP TTHCX VÀ ÁP DỤNG CHO ĐỘNG CƠ TUYẾN TÍNH ĐB - KTVC
Xét hệ phi tuyến MIMO như sau

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + H(x)u = f(x) + \sum_{i=1}^m h_i(x)u_i \\ y = g(x) \end{cases}, \quad (1)$$

ở đó:

$$x = x_1, \dots, x_n, \quad g(x) = [g_1(x), \dots, g_m(x)]^T$$

$$u = u_1, \dots, u_m, \quad H(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]^T$$

Nếu đổi trong MIMO phi tuyến mô tả bởi (1) có vectơ bậc tương đối tối thiểu r_1, r_2, \dots, r_m thỏa mãn:

$$r = r_1 + \dots + r_m = n \quad (2)$$

thì nó sẽ TTHCX được thành hệ tuyến tính:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu \\ y = Cz \end{cases} \quad (3)$$

bằng phép đổi trực toạ độ thích hợp

$$z = m x \quad (4)$$

Phương pháp TTHCX có nhiệm vụ xác định được cấu trúc, tham số của bộ ĐK PHIT:

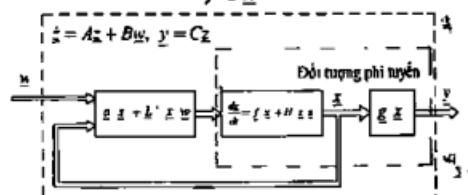
$$\begin{aligned} u &= -L^{-1}(x p x + L^{-1} x w \\ &= \underline{a} x + L^{-1} x w \end{aligned} \quad (5)$$

sao cho hệ kinh phi tuyến trở thành tuyến tính vào - ra trên không gian trạng thái mới (hình 2)

$$\text{với } \underline{p} x = [L_f^1 g_1(x) \dots L_f^m g_1(x)]^T \quad (6)$$

$$L x = \begin{bmatrix} L_h L_f^{h-1} g_1(x) & L_h L_f^{h-1} g_1(x) \\ \vdots & \vdots \\ L_h L_f^{h-1} g_m(x) & L_h L_f^{h-1} g_m(x) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{ở đó: } L_f g x = \frac{\partial g}{\partial x} f x \quad (8)$$



Hình 2. Cấu trúc của đổi tương phi tuyến sau khi đã TTHCX (chuyển tọa độ trạng thái)

Sau khi TTHCX đổi tương phi tuyến (1), hệ kinh tuyến tính sẽ có khả năng tách được thành m kênh riêng biệt. Do đó bộ ĐK như vậy còn có tên gọi là bộ ĐK TKTT.

Xuất phát từ quan hệ tương đương về mặt điện ta có thể mô tả đổi tương thông qua các phương trình cơ bản sau:

$$w_r = \frac{2}{\tau} v \quad (9)$$

$$u_i' = R_i j_s' + \frac{d}{dt} \quad (10)$$

$$F = \frac{2p\pi}{\tau} (\psi_p + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd}) i_{sq} \quad (11)$$

$$F_m - F_c = \frac{m}{p} \frac{dv_p}{dt} \quad (12)$$

Mô hình động cơ tuyến tính ĐB – KTVC có đặc điểm phi tuyến mang tính cấu trúc như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{1}{T_{sd}} i_{sd} + \frac{2}{L_{sd}} v_{sq} + \frac{1}{L_{sd}} u_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{2}{L_{sq}} v_{sq} i_{sd} - \frac{i_{sq}}{T_{sq}} + \frac{u_{sq}}{L_{sq}} - \frac{2}{L_{sq}} v \frac{v}{L_{sq}} \\ \frac{dx_p}{dt} = v \end{cases} \quad (13)$$

Với việc nhìn nhận biến trạng thái là $x = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad x_p]^T$ và tín hiệu điều khiển là $u = [u_{sd} \quad u_{sq} \quad v]^T$

Kiểm tra và thực hiện TTTHCX hệ (13) theo các điều kiện (1) – (4) thu được bộ ĐK PHTT có dạng (14) với w_1 và w_2 có thứ nguyên vật lý là [A/s]; w_3 có thứ nguyên [m/s]. Và ta nhận được mô hình tuyến tính mới có khả năng tách được thành 3 kênh riêng biệt thông qua cấu trúc ĐK PHTT (hình 3) đặt ở vòng điều chỉnh trong cùng của hệ thống.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_{sd}}{T_{sd}} x_1 \\ \frac{L_{sq}}{T_{sq}} x_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 & -\frac{2}{L_{sd}} L_{sq} x_2 \\ 0 & L_{sq} & \frac{2}{L_{sq}} L_{sd} x_1 + v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Thay (14) vào trong hệ (13) ta thu được hệ mới.

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = w_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = w_2 \\ \frac{dx_3}{dt} = w_3 \end{cases} \quad (15)$$

Đến đây, hệ nhiều vào ra (13) được chuyển thành hệ (15) tách kênh. Việc tách kênh sẽ khiến cho việc thiết kế bộ điều khiển vòng trong dễ dàng. Ta có nhiều giải pháp để giá trị biến trạng thái x bám giá trị đặt. Có thể thiết kế một khâu truyền thẳng và bù sai lệch bằng khâu PI hay sử dụng bộ điều khiển trượt. Ở đây, ta sử dụng bộ điều khiển đơn giản thiết kế theo lý thuyết Lyapunov.

Mạch vòng điều chỉnh dòng điện

Viết lại hệ (15) thành:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = w_1 \\ \frac{di_{sq}}{dt} = w_2 \end{cases} \quad (16)$$

Như đã biết, hệ thống ĐK cần đảm bảo vectơ i , có hướng vuông góc với vectơ từ thông cực, do đó không tồn tại thành phần dòng từ hóa i_{sd} (luôn được đặt là 0) mà chỉ có thành phần tạo lực đẩy i_{sq} . Điều đó có nghĩa là cấu trúc mạch vòng ĐC bên ngoài chỉ tồn tại mạch vòng ĐC tốc độ và không cần mạch vòng ĐC từ thông.

Vì dòng i_{sd} được đặt là 0 nên ta chọn luật điều khiển như sau để đảm bảo i_{sd} hồi tụ về 0:

$$w_1 = -k_3 i_{sd} \quad (17)$$

Để i_{sq} bám lượng đặt i_{sq}^r ta chọn luật điều khiển như sau:

$$w_2 = \frac{di_{sq}^r}{dt} - k_4 (i_{sq} - i_{sq}^r) \quad (18)$$

Với luật điều khiển (17) và (18) đã chọn ta được:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} + k_3 i_{sd} = 0 \\ \frac{d}{dt} (i_{sq} - i_{sq}^r) + k_4 (i_{sq} - i_{sq}^r) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Với k_3, k_4 được chọn là các hằng số dương thì hệ (19) ổn định, do đó ta có $i_{sd} \rightarrow 0$ và

$$i_{sq} \rightarrow i_{sq}^r$$

Ở cấu trúc ĐK TKTT (hình 3) còn có thành phần SVM có thể được xem như đóng vai trò của một khâu truyền đạt 1/1 theo nghĩa: đại lượng đầu ra đảm bảo trung thành với đại lượng đầu vào cả về module, tần số, pha. Do đó, khi tổng hợp hệ có thể bỏ qua khâu này trong sơ đồ cấu trúc. Tuy nhiên, khi mô phỏng hệ thống, để đảm bảo sự phù hợp giữa mô hình mô phỏng và hệ thống thực tế thì cần phải đưa khâu này vào thuật toán [10], [11] vào trong mô hình.

Mạch vòng điều chỉnh vị trí

Mô hình:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{P}{m}(F - F_c) \\ F = \frac{2\pi}{\tau} [\psi_p i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] \end{cases} \quad (20)$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

Ở đây ta cũng tách thành 2 vòng điều khiển, mạch vòng bên trong coi như v là đầu ra cần bám theo v_c còn mạch vòng bên ngoài coi như mạch vòng bên trong là tuyệt đối đưa ra v_c để vị trí x bám giá trị đặt x_r . Ta lựa chọn luật điều khiển như sau :

$$\begin{cases} v_c = \dot{x}_r - k_1(x - x_r) \\ \hat{F}_c + \frac{m}{p} \dot{v}_c - k_2(v - v_c) \\ i_{sq}^r = \frac{2\pi}{\tau} [\psi_p + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd}] \end{cases} \quad (21)$$

Ở đây \hat{F}_c là tải được ước lượng bởi khâu ước lượng tải như sau :

$$\hat{F}_c = \frac{2\pi}{\tau} [\psi_p i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] - \frac{m}{p} \ddot{v} \quad (21)$$

Xem như $\hat{F}_c \approx F_c$ và từ luật điều khiển (21) cùng với mô hình (20) ta có :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(x - x_r) + k_1(x - x_r) = 0 \\ \frac{d}{dt}(v - v_c) + k_2(v - v_c) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Với k_1, k_2 chọn là các hằng số dương ta có hệ (22) là ôn định, do đó có được $v \rightarrow v_c$ và $x \rightarrow x_r$.

Như vậy ta đã chứng minh được các bộ điều khiển đưa ra làm cho các hệ con ôn định, do đó ta có vị trí x bám giá trị x_r mong muốn.

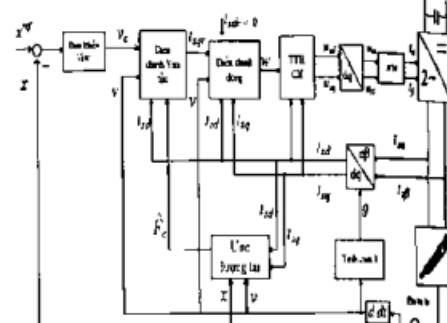
KIỂM CHỨNG BẰNG MÔ PHỎNG

Các tham số của động cơ được lấy từ loại động cơ LinMot P01_48x240/390x540_C.

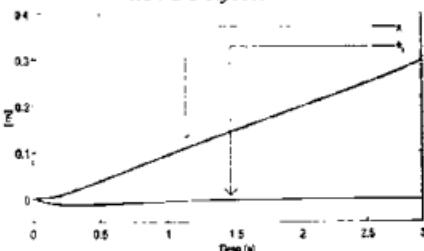
- Số dây cực 4
- Bước cực 60 mm
- Khối lượng rotor 15 Kg

- R cuộn dây mỗi pha 3.1 Ω
- Điện cảm dọc trực 2.182 mH
- Điện cảm ngang trực 2.182 mH

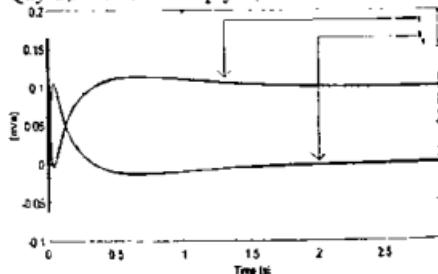
Từ thông 9.31 Wb



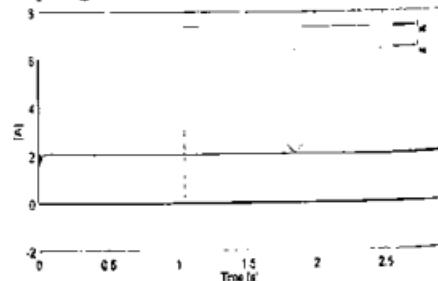
Hình 3. Cấu trúc DK động cơ tuyến tính DB-KTTC Polysolenoid

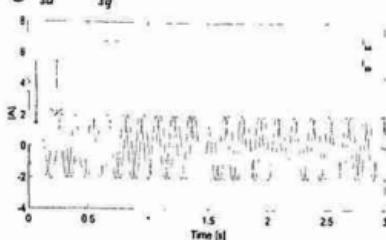


Quỹ đạo và sai lệch quỹ đạo

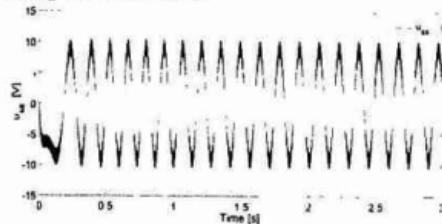
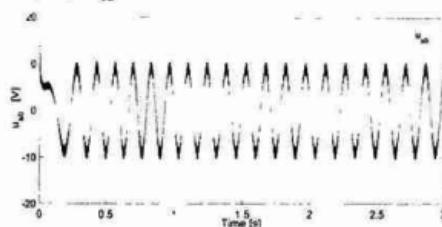
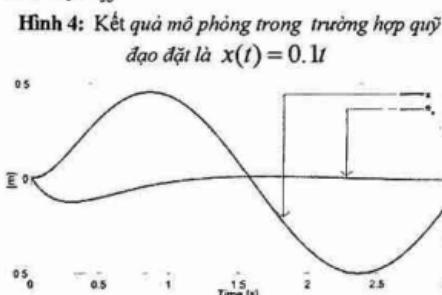


Đáp ứng vận tốc và sai lệch vận tốc

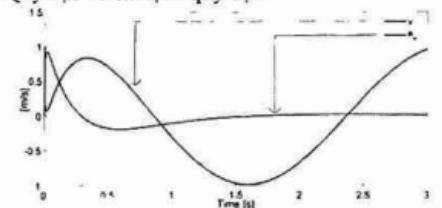


Đòng i_{sd} và i_{sg} 

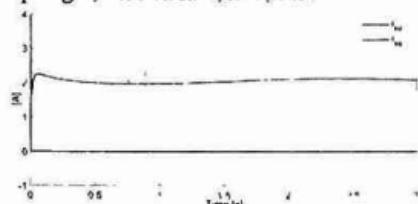
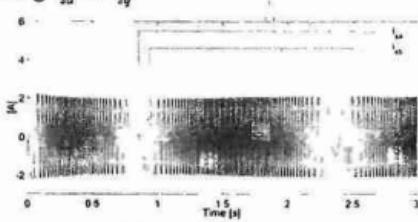
Đòng trên cuộn Stator

Điện áp u_{sa} Điện áp u_{sb} 

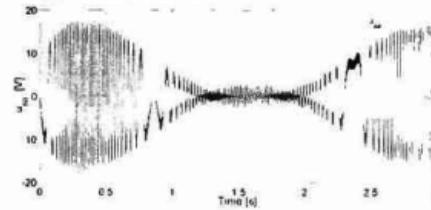
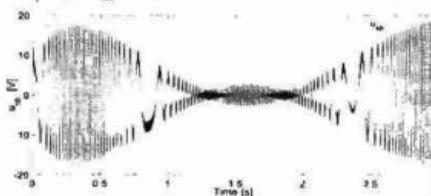
Quỹ đạo và sai lệch quỹ đạo



Đáp ứng vận tốc và sai lệch vận tốc

Đòng i_{sd} và i_{sg} 

Đòng trên cuộn Stator

Điện áp u_{sa} Điện áp u_{sb}

Hình 5. Kết quả mô phỏng trong trường hợp quỹ đạo đặt dạng hình sin: $X(t) = 0.5 \sin(2t)$

Nhận xét:

Các kết quả đáp ứng về các đại lượng: Vị trí, Tốc độ và áp đặt vào động cơ đã cho thấy khả năng làm việc của cầu trục này. Với yêu cầu động cơ làm việc ở chế độ chuyển động thẳng đều $x(t) = 0.1t$ hoặc dao động điều hòa $x(t) = 0.5 \sin(2t)$, đáp ứng ở hình 4 và hình 5 cho thấy chất lượng của bộ điều khiển. Vị trí và vận tốc động cơ bám tin hiệu đặt rất nhanh, gần như ngay lập tức. Điện áp a và pha b có dạng dao động, lệch pha nhau 90° điện.

Nhờ có bộ ĐK mà động cơ phát huy được khả năng làm việc của nó thể hiện ở giá trị I_m nhanh chóng tiến đến 0. Điều đó có nghĩa là toàn bộ vector dòng I_s được huy động để tạo lực đẩy cho động cơ.

KẾT LUẬN

Qua những kết quả mô phỏng trên, ta có thể khẳng định cấu trúc ĐK TKTT là phù hợp với động cơ tuyến tính ĐB – KTVC. Ngoài ra, cũng cần nhận thấy rằng các bộ DC nằm trong cấu trúc ĐK của hệ thống: Bộ DC dòng R_{bd} , R_{sq} hay bộ DC tốc độ đều có thể được giàn đoạn hóa nên cho phép chuyển nội dung của chúng vào trong VDK. Không những thế, việc chuyên thuật toán SVM vào VDK hoàn toàn có thể thực hiện được. Một lần nữa cũng cần lưu ý rằng, bộ điều khiển TTHCX cũng hoàn toàn có khả năng được đưa vào VDK do việc thực hiện chúng chỉ bằng các phép toán đại số (cộng, trừ, nhân, chia)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. www.htmot.com
- 2 Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech (2011), "Bronislaw Tomczuk Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems 2nd Edition". CRC press.
- 3 I Boldea (2013), Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook CRC press.
- 4 Daniel Ausderau (2004), *Polysolenoid – Linearantrieb mit genutetem Stator*, Zurich. PhD Thesis

SUMMARY

DECOUPLING CONTROL FOR STRUCTURE FOR POLYSOLENOID PERMANENT STIMULATION LINEAR MOTORS

Nguyen Hong Quang¹, Dao Phuong Nam², Nguyen Nhu Hien^{1*}, Nguyen Ngoc Liem¹

¹University of Technology – TNU,

²Hanoi University of Science and Technology

Nowadays, linear motions are almost indirectly realized by rotational motors, which cause several inherent weaknesses such as mechanical complication due to intermediate modules, low accuracy and performance because of accumulating errors of all elements in the systems. Using motors able to create directly linear movements is capable of removing the above limitations. This paper presents a control solution for Polysolenoid permanent-stimulation linear motors according to the decoupling control that enable physical outputs to follow reference inputs. All of currents are mobilized to make the propulsion force of the linear motors even when there is lack of the model's parameters or under effects of disturbances

Keywords: decoupling control, Lim, Polysolenoid linear motors, STM, two-phase inverter

Ngày nhận bài: 16/3/2017; Ngày phản biện: 11/4/2017; Ngày duyệt đăng: 31/5/2017

5 Jul – Ki Seok, Jong – Kun Lee, Dong – Choon Lee (2006). "Sensorless Speed Control of Nonsalient Permanent Magnet Synchronous Motor Using Rotor – Position – Tracking PI Controller", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No 2, pp.399 – 405

6 Yuan – Rui Chen, Jie Wu, Nobert Cheung (2004), "Lyapunov's Stability Theory – Based Model Reference Adaptive Control for Permanent Magnet Linear Motor Drives" *Proc of Power Electronics Systems and Application*, pp. 260 – 266

7 Chin – I Huang, Li Chen Fu (2002), "Adaptive Backstepping Speed/Position Control with Friction Compensation for Linear Induction Motor" *Proceeding of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, USA, pp. 474 – 479

8 Ying – Shieh Kung (2004), "High Performance Permanent Magnet Linear Synchronous Motor using TMS320F2812 DSP Controller" *IEEE Asia – Pacific Conference on Circuit and System*, pp. 645 – 648

9 Faa – Jeng Lin, Po – Hung Shen (2004), "A DSP based Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Servo Drive Using Adaptive Fuzzy – Neural – Network Control" *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 601 – 606

10. Nguyen Phung Quang, Jorg Andresas Dittmich, Vector Control of Three – Phase AC Machines – System Development in the Practice, Springer, 2008.

11 Do-Hyun Jang, Duck-Yong Yoon (2003), "Space-Vector PWM Technique for Two-Phase Inverter-Fed Two-Phase Induction Motors", *IEEE transactions on industry applications*, vol 39, no 2, march/april 2003