

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ  
ĐẾN ĐẶC TÍNH LỰC ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ TUYẾN TÍNH**  
INVESTIGATION INTO INFLUENCE OF A NUMBER OF ELEMENTS  
ON FORCE CHARACTERISTICS OF LINEAR INDUCTION MOTOR

*Nguyễn Thế Công, Lê Văn Doanh*  
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Trương Minh Tấn*  
Trường Đại học Quy Nhơn

**TÓM TẮT**

*Động cơ không đồng bộ tuyến tính (ĐTT) có nhiều ưu điểm, thí dụ như cấu trúc đơn giản, thích hợp với hệ truyền động tĩnh tiến, hiệu suất đẩy cao và bảo dưỡng dễ dàng. Cho nên, ĐTT đã được sử dụng một cách rộng rãi trên nhiều lĩnh vực khác nhau trong vài thập kỷ qua. Cần tìm kiếm chiến lược điều khiển cao nhằm đạt được chất lượng hệ thống tốt nhất. Điều khiển vectơ là phương pháp được quan tâm nhiều, bởi vì ĐTT về bản chất có các đặc điểm giống như động cơ không đồng bộ quay thông dụng. Tuy nhiên, một số đặc điểm điện từ cần phải làm rõ như ảnh hưởng của trễ dòng điện xoáy và tính không đối xứng của từ trường hay còn gọi là hiệu ứng đầu cuối gây ra sức từ động không sin. Nội dung bài báo đã phát triển mô hình động của ĐTT có xét đến hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy và qua đó tiến hành khảo sát các ảnh hưởng của chúng đến đặc tính lực động và từ thông trong động cơ. Đồng thời, bài báo cũng khảo sát ảnh hưởng của độ dẫn điện phía thứ cấp, độ lớn khe hở không khí đến đặc tính lực của động cơ. Các kết quả nhận được sẽ là nền tảng cơ bản để phát triển và thực hiện mô hình điều khiển ĐTT phù hợp. Phương pháp phần tử hữu hạn và mô phỏng thực nghiệm trên phần mềm Matlab được sử dụng trong nghiên cứu này.*

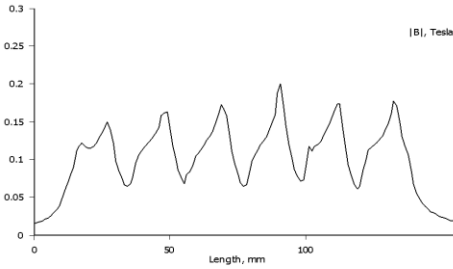
**ABSTRACT**

*Linear induction motor (LIM) offers advantages such as simple construction, fitted with translate drive, high propulsive performance and easy maintenance. Therefore, for the recent decades LIM have been widely used in various areas. It is necessary to look for a high control strategy to achieve the best system quality. Vector control has been a preferred method of control in LIM because LIM possesses similarities from its rotary counterpart. However, some electromagnetic characteristics such as trailing eddy current effects and magnetic asymmetry effects that so-called "end effect" cause non-sinusoidal magneto-motive force have been proven to undermine the proper functionality of vector control for LIM. The work developed in the paper deals with construction LIM dynamic models which is considering two these effects. In addition, the investigation on air gap length effect and secondary electric conductivity effect has been development of the in-depth knowledge of LIM which results in further differences in the way these machines should be controlled. Therefore, the in-depth exploration of LIM has been a fundamental step for investigation of LIM. Finite element method (FEM) and software Matlab are used in this procedure.*

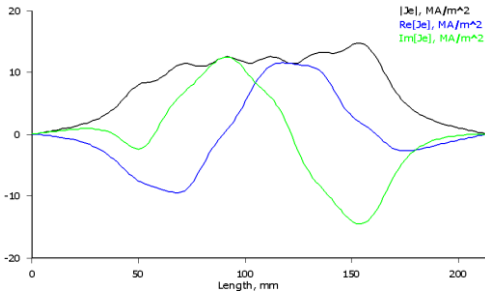
**I. ĐẶT VẤN ĐỀ**

Động cơ không đồng bộ tuyến tính làm việc dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ [3], về bản chất giống như động cơ quay thông dụng. Từ trường chạy trong khe hở không khí tác dụng với dòng điện cảm ứng trong phần thứ cấp (còn gọi là rotor) sinh ra lực từ có xu hướng kéo phần động trong ĐTT chuyển động tịnh tiến vận tốc v. Mặt khác, do mạch từ hở nên từ thông không liên tục từ cực này đến cực khác

mà nó bị cắt ra ở đoạn đầu và đoạn cuối làm từ trường trong động cơ mất đối xứng (hình 1) và gọi là hiệu ứng đầu cuối. Thêm vào đó, có sự trễ của dòng điện xoáy (hình 2) trong mạch thứ cấp gây ra sức từ động không sin. Đây là một số đặc điểm riêng trong ĐTT chỉ ra sự khác biệt so với động cơ không đồng bộ quay và làm thay đổi quan điểm về phương pháp điều khiển vectơ động cơ truyền thống với giả thiết sức từ động sin.



Hình 1. Phân bố mật độ từ thông trong khe hở không khí [1]



Hình 2. Mật độ dòng điện xoáy trong tấm nhôm phía thứ cấp [1]

Bằng nhiều cách tiếp cận khác nhau, các nghiên cứu đã đề cập đến các tác động của hiệu ứng đầu cuối [2÷9] và dòng xoáy [3,4] đến đặc tính lực: Phương pháp dùng mô hình mạch trên cơ sở đánh giá các hệ số [2÷5]; Phương pháp dùng mô hình trường [6÷8]; Xây dựng mối quan hệ điện từ trong khe hở không khí thông qua phân tích chuỗi Fourier [9].

Nội dung bài báo trình bày mô hình động của ĐTT có xét đến hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy trên cơ sở hàm  $f(\xi)$  công thức (1) [2] và qua đó tiến hành khảo sát các ảnh hưởng của chúng đến đặc tính lực động và từ thông trong động cơ. Đồng thời, bài báo cũng khảo sát ảnh hưởng của độ dẫn điện phía thứ cấp, độ lớn khe hở không khí đến đặc tính lực của động cơ. Đây có thể xem là nền tảng cơ bản cho nghiên cứu ĐTT để phát triển và thực hiện mô hình điều khiển phù hợp. Phương pháp phần tử hữu hạn và mô phỏng thực nghiệm trên phần mềm Matlab được sử dụng trong nghiên cứu này.

## II. MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ CÓ XÉT ĐẾN THÀNH PHẦN HIỆU ỨNG ĐẦU CUỐI VÀ DÒNG XOÁY

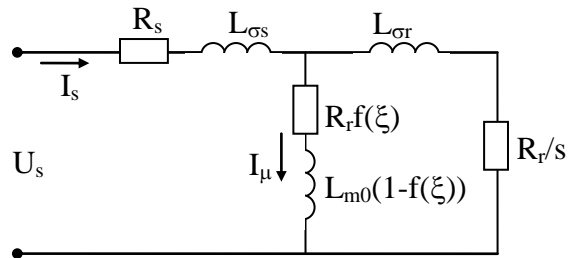
Thành phần phản ánh hiệu ứng đầu cuối [2]:  $L_m \cdot (1-f(\xi))$

$$\text{với } \xi = \frac{l \cdot R_r}{L_r \cdot v} \text{ và } f(\xi) = \frac{1 - e^{-\xi}}{\xi} \quad (1)$$

Khi ĐTT chuyển động, trong tấm nhôm phía thứ cấp tồn tại thành phần dòng điện xoáy và gây ra tổn hao

$$P_{dx} = R_r \cdot I_\mu^2 \frac{1 - e^{-\xi}}{\xi} = I_\mu^2 R_r f(\xi) \quad (2)$$

Thành phần đặc trưng cho tổn hao này là  $R_r \cdot f(\xi)$ , được mắc nối tiếp trong nhánh từ hóa (hình 3), với  $L_{m0} = 2L_m/3$  [2].



Hình 3. Mạch điện tương đương 1 pha

Trên hệ tọa độ quay 2 pha tựa theo từ thông rotor (dq). Mô hình động của ĐTT được mô tả như sau:

$$p \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \psi_{2d} \\ \psi_{2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D' & \frac{\pi}{\tau} v_k & B' & \frac{\pi}{\tau} v C \\ -\frac{\pi}{\tau} v_k & -D & -\frac{\pi}{\tau} v C & B \\ F' & 0 & -E' & \frac{\pi}{\tau} v_k - \frac{\pi}{\tau} v \\ 0 & F & -(\frac{\pi}{\tau} v_k - \frac{\pi}{\tau} v) & -E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ \psi_{2d} \\ \psi_{2q} \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó:  $p = d/dt$

$$A = \frac{L_r - L_m \cdot f(\xi)}{(L_s - L_m f(\xi)) \cdot (L_r - L_m f(\xi)) - (L_m (1 - f(\xi)))^2}$$

$$B = \frac{R_r \cdot L_m (1 - f(\xi))}{(L_r - L_m f(\xi))}$$

$$E = \frac{1}{L_s - L_m f(\xi) \cdot (L_r - L_m f(\xi)) - (L_m (1 - f(\xi)))^2}$$

$$B' = \frac{\left[ R_r \cdot f(\xi) - \frac{L_m(1-f(\xi))}{L_r - L_m f(\xi)} (R_r + R_r f(\xi)) \right]}{1}$$

$$C = \frac{L_s - L_m f(\xi) \cdot (L_r - L_m f(\xi)) - (L_m(1-f(\xi)))^2}{L_m(1-f(\xi))}$$

$$D = \frac{R_s \cdot (L_r - L_m f(\xi))^2 + R_r \cdot (L_m(1-f(\xi)))^2}{(L_r - L_m f(\xi))}$$

$$D' = \frac{\left[ R_s + R_r f(\xi) - \frac{2 \cdot R_r f(\xi) \cdot L_m(1-f(\xi))}{L_r - L_m f(\xi)} + \frac{(R_r + R_r f(\xi)) \cdot (L_m(1-f(\xi)))^2}{(L_r - L_m f(\xi))^2} \right]}{L_r - L_m f(\xi)}$$

$$\frac{(L_s - L_m f(\xi)) \cdot (L_r - L_m f(\xi)) - (L_m(1-f(\xi)))^2}{E = \frac{R_r}{L_r - L_m f(\xi)}; E' = \frac{R_r + R_r f(\xi)}{L_r - L_m f(\xi)}$$

$$F = \frac{R_r \cdot L_m(1-f(\xi))}{L_r - L_m f(\xi)}$$

$$F' = \frac{(R_r + R_r f(\xi)) \cdot L_m(1-f(\xi))}{L_r - L_m f(\xi)} - R_r f(\xi)$$

Lực điện từ của động cơ:

$$F_e = \frac{3}{2} p_c \frac{\pi}{\tau} \cdot k_F \cdot (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) \quad (4)$$

Hệ số lực:

$$k_F = \frac{L_m(1-f(\xi))}{L_r - L_m f(\xi)} \quad (5)$$

$$F_c = m \dot{v} + nv + F_L \quad (6)$$

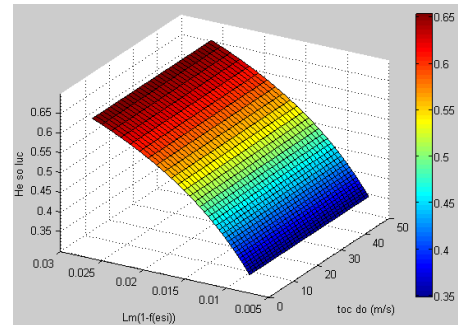
Ở đây:  $R_s, R_r, L_s, L_r$  - điện trở và điện cảm thành phần của sơ cấp (thứ cấp);  $L_m$  - hồ cảm giữa sơ cấp và thứ cấp;  $u_{1d}, u_{1q}$  - các thành phần theo các trục d và q của vectơ điện áp cấp cho động cơ;  $i_{1d}, i_{1q}$  - các thành phần vectơ dòng điện phía sơ cấp trên hệ tọa độ dq;  $\psi_{2d}, \psi_{2q}$  - các thành phần của vectơ từ thông phía thứ cấp trên hệ tọa độ dq;  $v_k$  - vận tốc dài đồng bộ của từ

trường;  $v$  - vận tốc dài chuyển dịch của phần động;  $\dot{v}$  - gia tốc;  $F_e$  - lực điện từ của động cơ;  $p_c$  - số đôi cực;  $\tau$  - bước cực;  $F_L$  - lực tải;  $m$  - khối lượng;  $n$  - hệ số ma sát;  $l$  - chiều dài phần sơ cấp.

### III. ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ ĐẾN ĐẶC TÍNH LỰC

Mô phỏng được thực hiện trên Simulink/Matlab với ĐTT đơn biên 3 pha [1]: Điện áp 380/220V đầu Y/Δ;  $f = 50\text{Hz}$ ;  $p_c = 2$ ;  $l = 126,3\text{mm}$ ;  $\tau = 63,15\text{mm}$ ; Độ lớn khe hở không khí  $\delta = 5\text{mm}$ ;  $R_s = 1,06 \Omega$ ;  $R_r = 3,532 \Omega$ ;  $L_s = 45,2 \text{mH}$ ;  $L_r = 40 \text{mH}$ ;  $L_m = 26,2 \text{mH}$ .

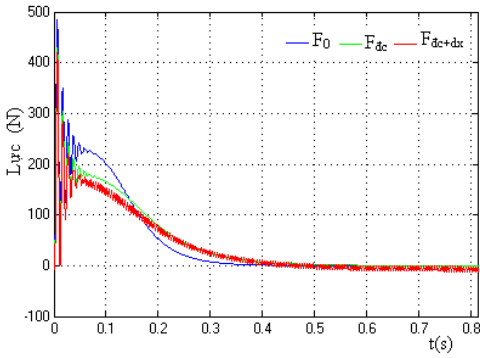
#### 3.1 Ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy



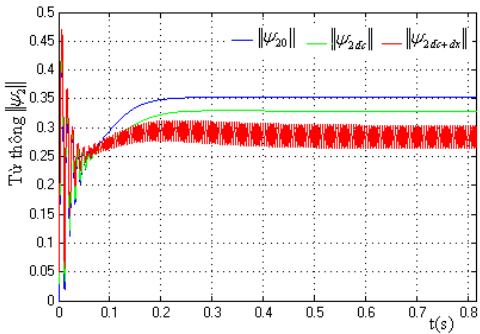
Hình 4. Quan hệ giữa  $v, L_m(1-f(\xi))$  và  $k_F$

Thành phần điện cảm  $L_m(1-f(\xi))$  và hệ số lực  $\frac{L_m(1-f(\xi))}{L_r - L_m f(\xi)}$  tỷ lệ nghịch với tốc độ (hình 4). Dễ nhận thấy rằng, khi tốc độ tăng thì cả hai thành phần này đều bị suy giảm. Cụ thể, so với giá trị ban đầu, tại tốc độ 12m/s điện cảm giảm khoảng 30% và hệ số lực giảm khoảng 15%.

Hình 5, trình bày ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối và kết hợp cả hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy đến lực động của ĐTT so với trường hợp không xét đến hai yếu tố này. Ở vùng tốc độ thấp đáp ứng lực hầu như không có gì khác biệt, hay ảnh hưởng của các yếu tố là không lớn, nhưng khi tốc độ càng tăng thì sự khác biệt càng rõ ràng hơn. Cụ thể tại tốc độ 12m/s, lực quá độ lớn nhất trong trường hợp xét đến ảnh hưởng của 2 yếu tố chỉ bằng 84% so với trường hợp không xét. Thời gian đạt đến trạng thái xác lập chậm hơn, điều này làm hạn chế khả năng tăng tốc của ĐTT khi khởi động.



Hình 5. Đáp ứng của lực khi  $v = 12\text{m/s}$



Hình 6. Đáp ứng của  $\|\psi_2\|$  khi  $v = 12\text{m/s}$

Bảng 1. So sánh tỷ thông khi xét hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy

Tốc độ (m/s)	Chỉ xét hiệu ứng đầu cuối	Xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy
3	↓ 1,4%	↓ 8,1%
6 (đm)	↓ 1,7%	↓ 8,6%
9	↓ 5,3%	↓ 14,7%
12	↓ 6,9%	↓ 17,4%
15	↓ 8,3%	↓ 18,1%

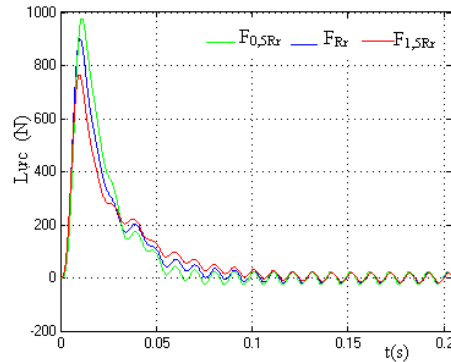
Đáp ứng tỷ thông được trình bày ở hình 6. Khi tốc độ càng tăng, tác động của hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy càng lớn, làm suy giảm tỷ thông trong động cơ một cách đáng kể. Kết quả như trong bảng 1.

### 3.2 Ảnh hưởng của độ dẫn điện phía thứ cấp

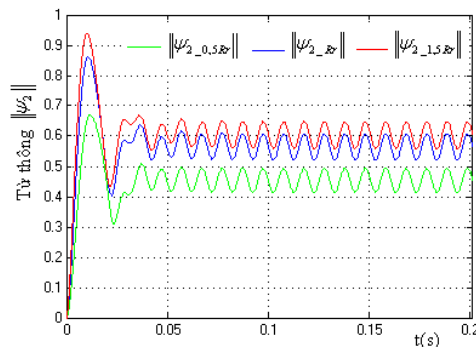
Điện trở của tấm nhôm phần thứ cấp là đối tượng chịu tác động của sự thay đổi nhiệt độ môi trường xung quanh và hiệu ứng nhiệt gây ra bởi dòng điện xoáy. Giá trị điện trở được xác định theo công thức:

$$R_r = \frac{234,5 + t_r}{234,5 + t_{rdm}} R_{rdm} \quad (7)$$

Trong đó:  $R_{rdm}$ -giá trị danh định ứng với nhiệt độ  $t_{rdm}$ ,  $R_r$ -giá trị thực ứng với nhiệt độ  $t_r$ .



Hình 7. Đáp ứng lực khi  $v = 6\text{m/s}$  (mô hình xét đến hiệu ứng đầu cuối và dòng xoáy)



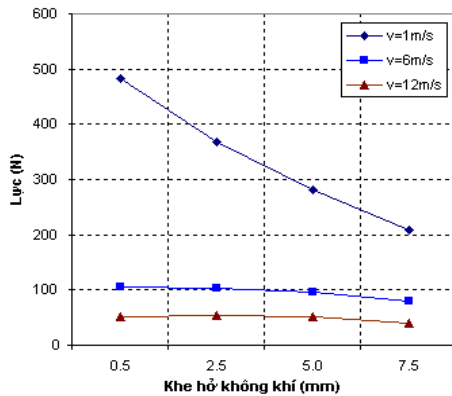
Hình 8. Đáp ứng của  $\|\psi_2\|$  khi  $v = 6\text{m/s}$

Sự biến đổi giá trị điện trở phần thứ cấp làm ảnh hưởng đến độ dẫn điện của tấm nhôm. Khi  $R_r$  thay đổi thì quan hệ lực có sự thay đổi rõ rệt (hình 8). Khởi động với tốc độ 6m/s, giá trị lực lớn nhất tăng khoảng 8,2% ứng với 50% $R_{rdm}$  và giảm 14,4% ứng với 150% $R_{rdm}$  so với trường hợp  $R_{rdm}$ . Thời gian xác lập càng chậm khi  $R_r$  tăng càng lớn. Đồng thời, do ảnh hưởng của các yếu tố (mục 1) làm cho mức độ dao động của lực và tỷ thông lớn trong trạng thái xác lập (hình 8).

### 3.3 Ảnh hưởng của độ lớn khe hở không khí

Hình 9, xét trường hợp ảnh hưởng của độ lớn khe hở không khí ( $\delta$ ) đến độ lớn của lực. Khi thay đổi  $\delta$  theo các giá trị 0,5mm; 2,5mm; 5mm và 7,5mm ứng với tốc độ làm việc 1m/s, 6m/s, 12m/s. Ở vùng tốc độ thấp, độ lớn của lực suy giảm mạnh khi  $\delta$  tăng nhưng ở vùng tốc độ định mức trở lên, khả năng suy giảm này hầu như không đáng kể. Độ lớn lực suy giảm

khoảng 9% và 1,1% khi  $\delta$  thay đổi từ 0,5mm đến 5mm ứng với tốc độ 6m/s và 12m/s.



Hình 9. Quan hệ giữa lực và độ lớn khe hở không khí  $\delta$

#### IV. KẾT LUẬN

- Sự mất đối xứng của từ trường và hiện tượng trễ của dòng xoay phía thứ cấp trong ĐTT đều có những ảnh hưởng nhất định đến trạng thái làm việc của động cơ, làm suy giảm độ lớn lực và thay đổi hình dáng đường đặc tính lực động trong động cơ nhất là ở vùng tốc độ cao. Tại tốc

độ 12m/s, lực quá độ lớn nhất trong trường hợp xét đến ảnh hưởng của 2 yếu tố chỉ bằng 84% so với trường hợp không xét.

- Từ thông trong ĐTT cũng chịu sự tác động lớn từ các hiệu ứng này. Ở tốc độ định mức, từ thông giảm 8,6% nhưng khi tốc độ càng tăng, khả năng mất đối xứng của từ trường càng lớn và sự suy giảm từ thông càng mạnh. Ở tốc độ 12m/s, từ thông giảm 17,4%.

- Sự biến đổi giá trị điện trở phần thứ cấp làm thay đổi biên độ dao động của lực và thời gian đạt đến trạng thái xác lập. Tại tốc độ 6m/s, khi khởi động giá trị lực lớn nhất tăng 8,2% và giảm 14,4% tương ứng với  $50\%R_{rdm}$  và  $150\%R_{rdm}$  so với  $R_{rdm}$ .

- Khe hở không khí  $\delta$  có ảnh hưởng nhất định đến độ lớn của lực. Khi tốc độ càng tăng, mức độ thay đổi này càng giảm.

- Các kết quả về các ảnh hưởng này sẽ là nền tảng cơ bản cho nghiên cứu ĐTT để phát triển và thực hiện mô hình điều khiển phù hợp.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Trương Minh Tấn, Nguyễn Thế Công, Lê Văn Doanh, Phùng Anh Tuấn*; Về thuật toán thiết kế tối ưu lực động cơ không đồng bộ tuyến tính đơn biên; Tạp chí KH & CN các trường đại học kỹ thuật, số 70, pp 1-5, 2009.
2. *Trương Minh Tấn, Nguyễn Thế Công, Lê Văn Doanh*; Nghiên cứu ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối trong động cơ không đồng bộ tuyến tính; Tạp chí KH & CN các trường đại học kỹ thuật, số 66, pp 63-67, 2008.
3. *J.F. Gieras*; Linear Induction Drives; Oxford University Press, Inc., New York 1994
4. *J.Duncan and C.Eng*; Linear induction motor equivalent circuit model; Proc.IEEE, Vol.130, No 1, pp.51-57, 1983.
5. *Ali Suat Gercek, Vedat M.Karsh*; Performance Prediction of the single sided linear induction motors for transportation considers longitudinal end effect by using analytic method; Contemporary engineering sciences, Vol.2, No.2, pp 95-104, 2009.
6. *H.Yu, B.Fahimi*; An investigation on asymmetry effects in linear induction machines; Applied power electronics conference, APEC 2007-Twenty second annual IEEE Feb.2007, pp.390-395.
7. *Yuichiro Nozaki, Takafumi Koseki*; Analysis of linear induction motor for HSST and linear metro using finite difference method; The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo 113-0033, JAPAN, 2006
8. *T.Sadauskas, A. Smilgevičius, Z. Savickienė*; Distribution of Magnetic Field of Linear Induction Motor; ISSN 1392-1215, Electronics and electrical engineering, 2007. Nr. 4(76)
9. *Sakutarō Nonaka, Koukichi Ogawa*; Slot harmonics and end effect of high speed linear induction motor; Electrical engineering in Japan. Vol.108, No.4, pp 104-112, 1998

Địa chỉ liên hệ: Nguyễn Thế Công - Tel. 0903.418.713, email: nthecong@yahoo.com  
 Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hà Nội  
 Trương Minh Tấn - Email: tantmqn@gmail.com  
 Khoa KT&CN, Trường Đại học Quy Nhơn – Số 170, An Dương Vương, Tp. Quy Nhơn