

PHÂN TÍCH TÍNH HIỆU QUẢ CỦA HAI PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ ĐỘNG CƠ ĐIỆN KHÔNG ĐỒNG BỘ BA PHA TỰA THEO TỪ THÔNG FOC VÀ ĐIỀU KHIỂN TRỰC TIẾP MÔ-MEN DTC SỬ DỤNG TRÊN XE Ô TÔ ĐIỆN

AN EFFECTIVE ANALYSIS OF TWO METHODS OF SPEED CONTROL FOR
THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR BASED ON FIELD ORIENTED
CONTROL AND DIRECT TORQUE CONTROL APPLIED ON ELECTRIC VEHICLES

Đào Quang Khanh*, Hứa Xuân Long, Tống Lâm Tùng
Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT

Truyền động điện động lực bằng động cơ điện không đồng bộ ba pha đang được áp dụng rộng rãi trên các xe ô tô điện vì những ưu điểm cấu tạo đơn giản, vận hành tin cậy, ít bảo trì sửa chữa, giá thành chế tạo thấp, hiệu suất cao. Trong bài báo này trình bày cơ sở lý thuyết của hai phương pháp điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ ba pha tựa theo từ thông (FOC) và điều khiển trực tiếp mô-men (DTC) áp dụng trên hệ truyền động điện động lực cho xe ô tô điện. Trên cơ sở đó, xây dựng mô phỏng chi tiết các thành phần của hai cấu trúc điều khiển trên bằng công cụ Matlab – Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy, các đặc tính tốc độ, dòng điện, mô-men theo thời gian đã chỉ rõ ưu, nhược điểm của hai phương pháp điều khiển FOC và DTC. Ngoài ra, kết quả mô phỏng cũng cho thấy ưu điểm của hệ truyền động điện sử dụng động cơ không đồng bộ ba pha sử dụng trên xe ô tô điện.

Từ khóa: Điều khiển tựa theo từ thông; Điều khiển trực tiếp mô-men; Điều khiển xe điện.

ABSTRACT

Electric powertrain using a three-phase asynchronous motor is being widely applied on electric vehicles because of the advantages of simple structure, reliable operation, less maintenance and repair, and low cost, high efficiency. In this paper, the theoretical basis of two methods of speed control of a three-phase asynchronous motor based on Field Oriented Control (FOC) and Direct Torque Control (DTC) is presented electric powertrain systems for electric vehicles. On that basis, the simulation model of the two control structures above using Matlab – Simulink software were built. The simulation results showed that the characteristics of speed, current, and torque over time clearly indicate the advantages and disadvantages of the two control FOC and DTC methods. In addition, the simulation results also showed the advantages of the electric powertrain system using three-phase asynchronous motors used in electric cars.

Keywords: Field Oriented Control – FOC; Direct Torque Control – DTC; Electric Vehicle Control. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự ra đời của các van bán dẫn công suất lớn tạo nên các cấu hình bộ biến đổi đa dạng cho các hệ thống điều khiển truyền động điện biến tần động cơ. Với các công bố của Hasse năm 1969, Blaschke năm 1972 đã tạo nên một bước đột phá trong kỹ thuật điều khiển biến tần động cơ không đồng bộ và đã nhận được sự quan tâm lớn của giới khoa học và công nghiệp. Các tiến bộ vượt bậc trong công nghệ vi xử lý, vi điều khiển, và đặc biệt là DSP cho phép thực hiện các thuật toán phức tạp trong thời gian thực đã giúp cho các phương pháp điều khiển vector, hay còn được gọi là điều khiển tựa từ thông (Field Oriented Control – FOC) trở thành các công nghệ điều khiển động cơ xoay chiều được chuẩn hóa trong công nghiệp. Phương pháp điều khiển trực tiếp mô-men (Direct Torque Control – DTC) do Takahashi đề xuất năm 1986 và Depenbrock năm 1987 là một phương pháp điều khiển khác cần đề cập. Từ đó, có rất nhiều các công trình mô phỏng hệ thống truyền động điện biến tần động cơ được đề cập nhiều trong các nghiên cứu trong và ngoài nước [2], [3], [4], [5], [6],... Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ mô phỏng hệ thống truyền động điện biến tần động cơ KĐB cho xe ô tô điện và phân tích, đánh giá tính hiệu quả của hai phương pháp điều khiển trên.

2. NỘI DUNG

2.1. Cấu trúc hệ truyền động điện động cơ đồng bộ ba pha cho xe ô tô điện

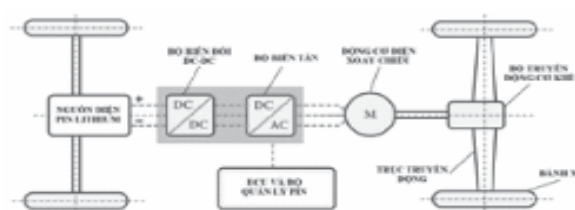
So với các loại ô tô sử dụng động cơ đốt trong, xe ô tô điện có các bộ phận chuyển động ít hơn đến 90%. Một số bộ phận chính của xe ô tô điện được thể hiện trong hình 1, bao gồm các bộ phận:

1 – Động cơ điện trên xe ô tô điện cung cấp năng lượng cho xe để quay các bánh xe. Động cơ này có thể là loại DC (một chiều) hoặc AC (xoay chiều), nhưng phổ biến hơn vẫn là AC;

2 – Pin: Ô tô điện dùng pin để lưu trữ năng lượng cần thiết cho xe chạy;

3 – Bộ điều khiển: Có thể nói, bộ điều khiển trên ô tô điện như một bộ não của xe, bộ phận này quản lý tất cả các thông số và kiểm soát tốc độ sạc thông qua cách xử lý thông tin từ pin. Thêm vào đó, bộ điều khiển cũng có thể chuyển áp lực lên bàn đạp ga để điều chỉnh tốc độ trong biến tần của động cơ xe.

4 – Biến tần: Biến tần là một thiết bị dùng để chuyển đổi nguồn điện một chiều thành nguồn điện xoay chiều. Bộ phận này có thể thay đổi tốc độ quay của động cơ thông qua cách điều chỉnh tần số của dòng điện xoay chiều. Thêm vào đó, có thể thông qua cách điều chỉnh biên độ của tín hiệu biến tần để tùy chỉnh công suất hoặc mô-men xoắn của động cơ theo các phương pháp khác nhau như FOC, DTC,... [4].



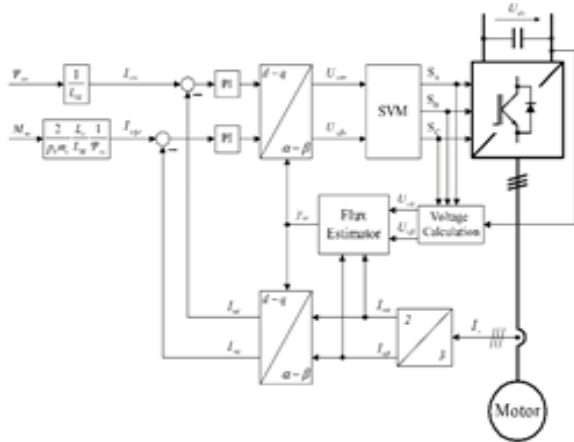
Hình 1. Cấu tạo của xe ô tô điện

2.2. Bộ biến tần động cơ không đồng bộ ba pha sử dụng phương pháp FOC và DTC

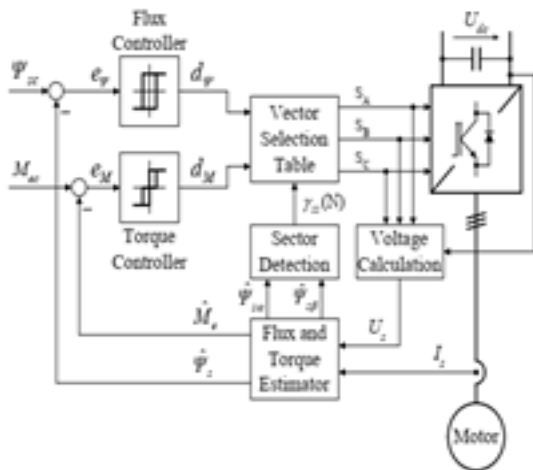
2.2.1. Phương pháp điều khiển FOC

Điều khiển động cơ điện không đồng bộ với phương pháp điều khiển vector, hay

còn được gọi là điều khiển tựa từ thông (Field Oriented Control – FOC) đã trở nên dễ điều khiển, đạt được các tính năng cao, do vậy đã dần thay thế động cơ một chiều trong những ứng dụng đòi hỏi phải điều khiển trơn tốc độ trong một phạm vi rộng [1], [7]. Cấu trúc bộ điều khiển FOC được thể hiện trong hình 2a.



(a)



(b)

Hình 2. a – Cấu trúc bộ điều khiển FOC,
b – Cấu trúc bộ điều khiển DTC

Trong cấu trúc FOC (hình 2a) bao gồm: bộ điều khiển PI cho từ thông và bộ điều khiển PI cho mô-men và các khâu biến đổi Clark thuận, Clark ngược, Park thuận, Park ngược,...

2.2.2. Phương pháp điều khiển DTC

Trong phương pháp điều khiển trực tiếp mô-men DTC (hình 2b), mô-men của động cơ không được điều khiển một cách “gián tiếp” thông qua dòng điện mà được điều khiển “trực tiếp” thông qua việc đóng mở các van công suất theo quy luật dựa vào trạng thái tức thì của mô-men và từ thông. Phương pháp này đã cho phép đáp ứng mô-men của hệ truyền động nhanh hơn gấp hàng chục lần so với phương pháp điều khiển vector thông thường [1], [7].

2.2.3. Cơ sở lý thuyết của hai phương pháp FOC và DTC

Bộ điều khiển dòng điện và các khâu biến đổi trong cấu trúc của hai phương pháp điều khiển FOC và DTC bao gồm [1], [7]: phép biến đổi Clark thuận, Clark nghịch, Park thuận, Park nghịch, bộ ước lượng từ thông, Bộ điều khiển PI, Bộ điều chế vector không gian,... được thể hiện trong các công thức (1)-(13):

Phép biến đổi Clark thuận:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Phép biến đổi Clark nghịch:

$$\begin{bmatrix} v_{ref1} \\ v_{ref2} \\ v_{ref3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Phép biến đổi Park thuận:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Phép biến đổi Park nghịch:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bộ ước lượng từ thông và mô-men:

$$\hat{M}_e = \frac{3p}{2} (\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (6)$$

Trong đó:

$$\psi_\alpha = \int U_\alpha - R_s i_\alpha, \quad \psi_\beta = \int U_\beta - R_s i_\beta, \quad \hat{\psi}_s = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}.$$

Tính toán dòng điện trên stator:

$$i_{ds}^* = \frac{\psi_r^*}{L_m} \quad (7)$$

Tính toán dòng điện trên stator:

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \frac{1}{p} \frac{L_r}{L_m} \frac{1}{\psi_r} T_e \quad (8)$$

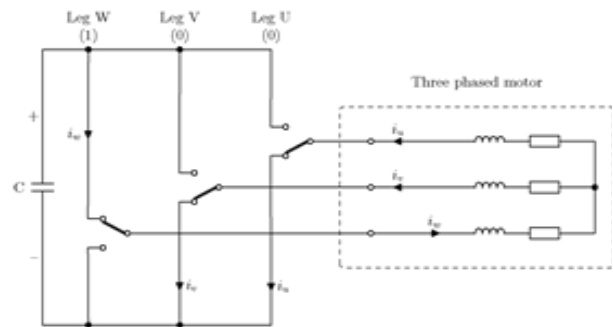
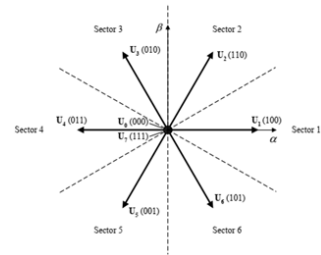
$$\text{Tính toán từ thông rotor: } \psi_r = \frac{L_m i_{ds}}{1 + s T_r},$$

$$\text{trong đó: } T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (9)$$

Tính toán góc lệch từ thông:

$$\theta_e = \int (\omega_r + p \omega_m) dt, \text{ trong đó: } \omega_r = \frac{L_m i_q}{\psi_r T_r} \quad (10)$$

- Điều chế vector không gian: là kỹ thuật điều khiển được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển thiết bị điện tử công suất. Trạng thái đóng cắt của 6 khóa điện tử công suất (S1~S6) dựa trên thuật toán SVM tạo thành tám vector điện áp cung cấp cho động cơ. Trong đó vector U0 và U7 cho điện áp ngõ ra bằng không. Vì vậy, vector điện áp Uout trên động cơ được tính toán dựa trên 6 vector còn lại được tổng hợp theo bảng 1, bộ phát hiện các vùng đóng mở van điện tử [1], [7].



Hình 3. Các vector điện áp cung cấp cho động cơ

Bảng 1. Bảng lựa chọn vùng đóng mở van điện tử

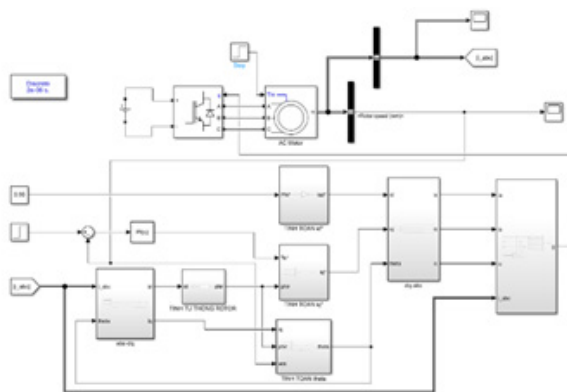
d_ψ	d_M	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6
1	1	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₁
	0	U ₇	U ₀	U ₇	U ₀	U ₇	U ₀
	-1	U ₆	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅
0	1	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₁	U ₂
	0	U ₀	U ₇	U ₀	U ₇	U ₀	U ₇
	-1	U ₅	U ₆	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄

Bảng 2. Thông số của động cơ không

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Công suất	P(W)	7000
Điện áp	U(V)	460
Tần số	f(Hz)	60
Điện trở stator	R _s (Ω)	0,6837
Điện kháng stator	L _s (H)	0,004152
Điện trở Rotor	R _r (Ω)	0,451
Điện kháng Stator	L _r (H)	0,004152
Điện kháng hồ cảm	L _m (H)	0,1486
Mô-men quán tính	J (kg.m ²)	0,05
Số đôi cực từ	p	2

2.4. Mô phỏng hệ thống điều khiển FOC và DTC

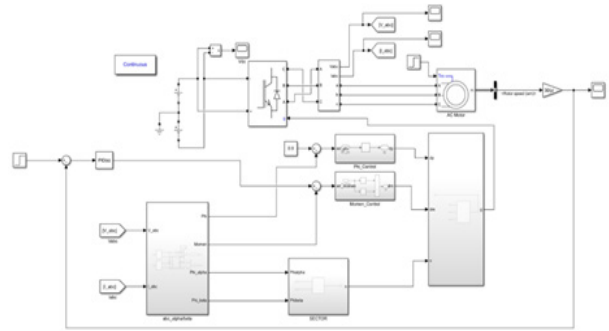
Thực hiện mô phỏng hệ thống, ta khảo sát động cơ điện không đồng bộ ba pha với các thông số theo bảng 2. Từ các công thức (1)-(10) sử dụng công cụ Matlab – Simulink, ta xây dựng các khối tính toán cho hệ thống FOC và DTC [1], [7], từ đó ta ghép được sơ đồ mô phỏng điều khiển động cơ không đồng bộ ba pha theo phương pháp FOC và DTC như trong hình 4 và hình 5.



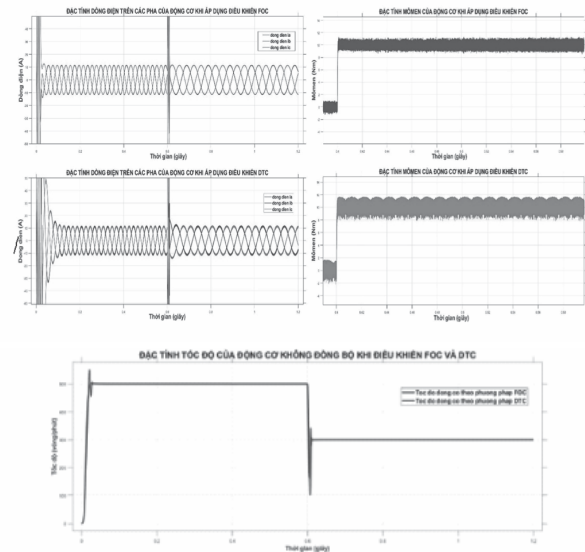
Hình 4. Sơ đồ mô phỏng biến tần điều khiển động cơ KĐB bộ ba pha bằng phương pháp FOC

Bộ điều khiển tốc độ PI được thêm vào hệ thống, tốc độ của động cơ không đồng bộ ba pha được phản hồi về bộ điều khiển tốc độ PI. Lúc này, ta có thể điều khiển động cơ không đồng bộ ba pha bám theo tốc độ đặt trước của hệ thống như hình 4, 5. Tín hiệu dòng điện ba pha đo được từ động cơ phản hồi về qua phép biến đổi Clark và Park, các tín hiệu từ tốc độ, góc từ thông, mô-men,... xác định được dòng điện i_d và i_q , tín hiệu này sử dụng để so sánh với tín hiệu đo được thông qua Clark và Park [7].

Sau khi đã kiểm tra toàn bộ chức năng của từng khối trong mô hình mô phỏng Simulink được thiết lập như trong hình 4, hình 5.



Hình 5. Sơ đồ mô phỏng biến tần điều khiển động cơ KĐB bộ ba pha bằng phương pháp DTC



Hình 6. Kết quả mô phỏng của hai phương pháp điều khiển FOC và DTC

2.5. Kết quả và thảo luận

Sau khi thay các thông số trong bảng 2 vào động cơ và mô-men cần đặt vào động cơ là 10 Nm tại thời điểm 0,4s. Cho chạy mô phỏng hình 4, hình 5 đồng thời với thời gian mô phỏng là 1,2s với các giá trị tốc độ đặt ban đầu là 500 v/p sau thời gian 0,6s cho động cơ giảm tốc độ xuống 300 v/p và ổn định ở tốc độ đó trong suốt thời gian mô phỏng có kết quả mô phỏng trong hình 6. Bảng 3 so sánh đặc tính động (thời gian quá độ t , độ quá điều chỉnh σ) của các đáp ứng đầu ra.

Bảng 3. So sánh đáp ứng đầu ra của DTC và FOC

Đáp ứng đầu ra	FOC		DTC	
	t (s)	σ (%)	t (s)	σ (%)
Tốc độ	0.06	0.1	0.02	10
Mô-men	0.06	2	0.03	2
Dòng điện	0.07	400	0.1	300

Bảng 4. Nhận xét hai phương pháp điều khiển DTC và FOC

Phương pháp điều khiển DTC	Phương pháp điều khiển FOC
Phương pháp này không điều khiển gián tiếp qua dòng điện mà được điều khiển trực tiếp qua các van công suất dựa vào trạng thái tức thì của từ thông và mô-men	Phương pháp này điều khiển gián tiếp từ thông và mô-men qua dòng i_d và i_q thông qua các phép biến đổi Clark và Park, từ đó tính toán trạng thái mở van công suất
Ưu điểm của phương pháp điều khiển DTC: cho phép đáp ứng mô-men, tốc độ của động cơ trong hệ truyền động nhanh hơn phương pháp FOC. Cấu trúc điều khiển đơn giản hơn phương pháp FOC	Ưu điểm của phương pháp FOC: khi ở trạng thái xác lập dòng điện hình sin trên các pha của động cơ không bị biến dạng và thời gian xác lập nhanh hơn phương pháp DTC
Nhược điểm của phương pháp DTC: độ nhấp nhô của mô-men lớn; dòng điện bị biến dạng khi ở trạng thái xác lập; thời gian xác lập chậm hơn phương pháp FOC	Nhược điểm của phương pháp FOC: đáp ứng mô-men, tốc độ chậm hơn phương pháp DTC; cấu trúc điều khiển phức tạp hơn phương pháp DTC

Các thuật toán phức tạp thực hiện trong thời gian thực đã giúp cho phương pháp điều khiển vector FOC trở thành các công nghệ điều khiển động cơ xoay chiều được chuẩn hóa trong công nghiệp. Phương pháp điều khiển trực tiếp DTC được coi là phương pháp thay thế cho phương pháp FOC cho những ứng dụng đòi hỏi điều khiển tốc độ và mô-men nhanh mà không yêu cầu về độ chính xác mô-men như ô tô điện. Tuy nhược điểm của phương pháp điều khiển DTC được các nhà nghiên cứu cải thiện bằng dạng biến tần ma trận [2] nhưng vẫn chưa được cải thiện triệt để.

3. KẾT LUẬN

Điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ bằng biến tần sử dụng hai phương pháp DTC và FOC đã được mô phỏng thành công với công cụ Matlab & Simulink. Kết quả mô phỏng của hai phương pháp cho thấy ưu và nhược điểm của phương pháp DTC và FOC thể hiện trong các đặc tính và dữ liệu đã tổng hợp được. Bài báo này đã góp phần kiểm chứng hoạt động của hai phương pháp điều khiển biến tần động cơ không đồng bộ ba pha DTC và FOC, là phương pháp điều khiển hiện đại, linh hoạt cho đối tượng là động cơ không đồng bộ ba pha phổ biến hiện nay đang sử dụng trên các xe ô tô điện. Việc nghiên cứu hệ truyền động điện biến tần động cơ không đồng bộ ba pha áp dụng phương pháp điều khiển vector FOC hoặc DTC là nghiên cứu quan trọng trong thiết kế xe ô tô điện với mục tiêu tiết kiệm điện năng, kéo dài thời gian hoạt động cho một lần sạc điện.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT22-23.50.❖

Ngày nhận bài: 02/3/2023

Ngày phản biện: 14/3/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Phùng Quang; *Truyền động điện thông minh*, NXB. Khoa học Kỹ thuật, 2002.
- [2]. Bùi Quốc Khánh, Trần Trọng Minh, Phạm Văn Bách; *Hoàn thiện phương pháp điều khiển trực tiếp mômen động cơ không đồng bộ dùng trên biến tần kiểu ma trận*, Tạp chí Khoa học Công nghệ các Trường Đại học Kỹ thuật, số 74-2009.
- [3]. Nguyễn Vũ Quỳnh, Hoàng Thị Nga, Nguyễn Hoàng Huy, Lương Hoàng Sơn; *Mô phỏng và thực nghiệm bộ điều khiển tốc độ động cơ PMSM bằng phương pháp vector và thuật toán SVPWM dựa trên công nghệ FPGA*, Tạp chí Khoa học Lạc Hồng, số 4 – 2015.
- [4]. John G. Hayes, G. ABAS Goodarzi, *Electric Powertrain*, JohnWiley – USA, 2018.
- [5]. Brahim Gasbaoui, Chaker Abdelkader, Adellah Laoufi, *Adaptive Fuzzy PI of Double Wheeled Electric Vehicle Drive Controlled by Direct Torque Control*, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2010.
- [6]. Gasbaoui Brahim, Abdelkader Chaker, Abdelfatah Nasri, *The Efficiency of Direct Torque Control for Electric Vehicle Behavior Improvement*, Serbian Journal of Electrical Engineering, 2011.
- [7]. Marcin Żelechowski, *Space Vector Modulated – Direct Torque Controlled (DTC – SVM) Inverter – Fed Induction Motor Drive*, Ph.D.Thesis - Institute of Control and Industrial Electronics, Warsaw University of Technology, 2005.