

# THIẾT KẾ ĐIỆN TỬ ĐỘNG CƠ SERVO ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

## ELECTROMAGNETIC DESIGN FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS SERVOMOTOR

**Nguyen Đức Bắc<sup>1</sup>, Trần Tuấn Vũ<sup>1</sup>, Nguyễn Thế Công<sup>1</sup>  
Nguyễn Huy Phương<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Thiện<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, <sup>2</sup>Trường Đại học Xây dựng

Ngày nhận bài: 22/5/2018, Ngày chấp nhận đăng: 2/7/2018, Phản biện: TS. Nguyễn Đăng Toàn

### **Tóm tắt:**

Động cơ servo đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM-Permanent Magnet Synchronuos Motor) với những ưu điểm nổi bật là hiệu suất rất cao, kích thước nhỏ gọn, điều khiển chính xác, được sử dụng nhiều trong các hệ truyền động yêu cầu chính xác về vị trí và tốc độ. Bài báo đưa ra mô hình giải tích của PMSM phục vụ cho việc thiết kế, nhằm đưa ra các thông số về cấu trúc hình dạng cơ bản điện tử của động cơ. Các tác giả sẽ sử dụng phần mềm mô phỏng Ansys Maxwell để phân tích, đánh giá kết quả thiết kế đạt được từ mô hình giải tích. Từ đó bài toán thiết kế tối ưu một số thông số cơ bản với hàm mục tiêu giảm trọng lượng (giá thành) của động cơ được trình bày. Kết quả đạt được đóng góp vào lĩnh vực còn rất mới về nghiên cứu chế tạo sản xuất động cơ servo trong nước.

### **Từ khóa:**

Động cơ servo, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM), mô hình giải tích, thiết kế tối ưu.

### **Abstract:**

Permanent magnet synchronous servomotors (PMSM) with typical advantages are high performance, precise control, compact size, used in many drive systems that request precise speed and position. The paper presents an analytical sizing model of PMSM in order to provide the geometric structure design for the servomotor. The AnsysMaxwel simulation software was used to evaluate and analyze the characteristics of the obtained motor. Then the design optimization problem aiming to minimize the mass (cost) of the motor is presented. The results of electromagnetic optimal design contribute to the novel field of research and development, design and manufacture of servomotors in the local market.

### **Key words:**

Servomotor, permanent magnet synchronous machine (PMSM), analytical model, optimal design.

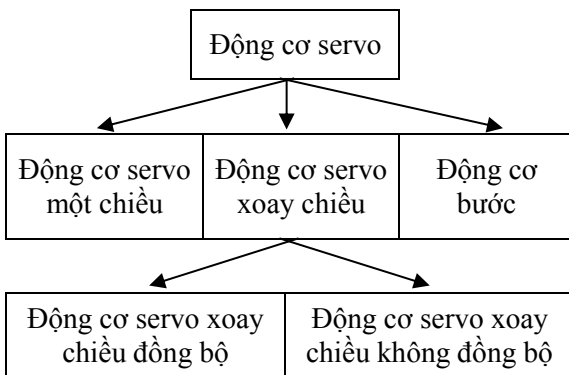
## **1. MỞ ĐẦU**

Động cơ servo thường yêu cầu các thông số kỹ thuật phức tạp: hoạt động trong một

dải mômen lớn - tốc độ rộng, thời gian quá độ nhỏ, trọng lượng nhỏ, điều khiển chính xác, thiết kế nhỏ gọn. Thiết kế máy

điện nói chung cũng như động cơ servo nói riêng thường dựa vào mô hình nguyên mẫu ảo [1]. Tuy nhiên để đạt được các yêu cầu kỹ thuật mong muốn, thiết kế tối ưu về hình dáng và kích thước là công việc khó khăn và phức tạp khi lựa chọn thông số tối ưu với các hàm ràng buộc [1-3]. Bài toán tối ưu cũng góp phần giảm thiểu chi phí sản xuất cho các doanh nghiệp [4].

Động cơ xoay chiều loại đồng bộ và không đồng bộ được sử dụng ngày càng nhiều do có nhiều ưu điểm hơn về mật độ công suất, hiệu suất và độ bền so với động cơ một chiều. Hiện nay động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (permanent magnet synchronous machine-PMSM) được sử dụng phổ biến trong các động cơ chuyên dụng, đặc biệt là động cơ servo (sơ đồ phân loại theo hình 1). Các công trình nghiên cứu, thiết kế động cơ servo PMSM trong [5-8] cùng việc phân tích điện từ và các giải pháp thiết kế trong [9] chưa đưa ra mô hình tổng quan trong thiết kế, đặc biệt đối với bài toán tối ưu.



Hình 1. Phân loại động cơ servo

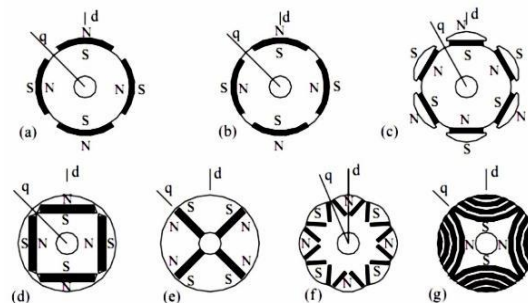
Ưu điểm của động cơ servo PMSM (hình 2) là không có tổn thất đồng ở rotor, tăng

hiệu suất, nhưng kém sự linh hoạt trong điều khiển từ thông so với động cơ đồng bộ kích từ dây quấn. Với những loại nam châm vĩnh cửu có mật độ năng lượng cao sử dụng nam châm đất hiếm NdFeB, kích thước động cơ sẽ nhỏ hơn, momen quán tính thấp, thuận lợi cho nhiều ứng dụng truyền động servo. Trong vài năm trở lại đây, giá thành NdFeB có xu hướng giảm dẫn đến động cơ PMSM kết hợp biến tần càng ngày càng được ứng dụng rộng rãi cho các ứng dụng cần thay đổi vận tốc.



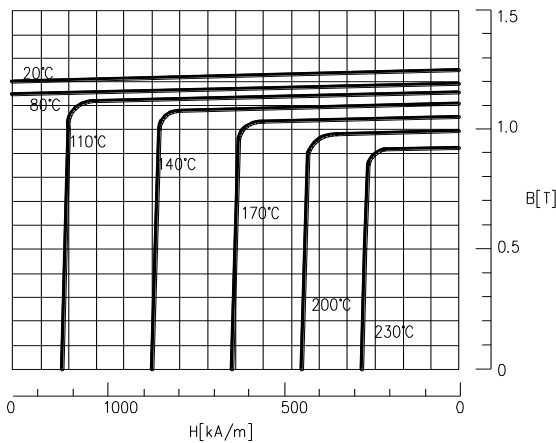
Hình 2. Động cơ servo PMSM

Dựa vào vị trí nam châm người ta phân thành 2 loại: động cơ nam châm bề mặt (Surface - SPMSM) và động cơ nam châm chìm (Interior - IPMSM). Động cơ IPMSM có những ưu điểm so với SPMSM như: Khả năng tạo ra mômen lớn hơn, cho phép tốc độ làm việc cao hơn, điều chỉnh từ thông được nhiều hơn, vì vậy sẽ có nhiều ưu điểm trong điều khiển. Nội dung nghiên cứu của bài báo sẽ là loại IPMSM.



Hình 3. Các kiểu rotor với nam châm gắn ngoài (a, b, c) và gắn trong (d, e, f, g) của PMSM

Vật liệu nam châm đất hiếm có mật độ từ thông lớn, do đó kích thước của rotor không cần quá lớn mà vẫn đạt được từ thông mong muốn, mật độ công suất của IPMSM thường rất cao. Hình 3 đưa ra các kiểu rotor sử dụng trong động cơ nam châm vĩnh cửu. Đặc tính từ hóa của nam châm đất hiếm NdFeB - N39UH phụ thuộc nhiệt độ được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Đặc tính từ hóa vật liệu nam châm NdFeB - N39UH

Nội dung của bài báo trong phần 2 sẽ đưa ra mô hình giải tích của IPMSM với ứng dụng thiết kế cụ thể và mô phỏng kết quả đặc tính yêu cầu của động cơ servo. Phần 3 áp dụng thuật toán tối ưu với hàm mục tiêu giảm thiểu trọng lượng của nam châm vĩnh cửu. Các kết quả được đưa ra bàn luận trong phần 4.

## 2. MÔ HÌNH GIẢI TÍCH

### 2.1. Xác định các kích thước cơ bản

Yêu cầu đặc tính động cơ servo 3 pha cần thiết kế: mômen xoắn 14 N.m, công suất 2,2 kW, hiệu suất 87 %, điện áp điện mức tối đa 380 Vrms, tốc độ tối đa 4000

vòng/phút, tốc độ định mức 1500 vòng/phút tại tần số 50 Hz, làm mát tự nhiên.

Mô hình giải tích tính toán kích thước mạch từ động cơ IPMSM được tóm tắt dưới đây:

Đường kính ngoài (cm) lõi thép stator:

$$D_n = 14,9 \frac{P_s}{\sqrt[3]{B_\delta \cdot A \cdot \lambda}} \quad (\text{cm}) \quad (1)$$

Trong đó :  $P_s$  là công suất biểu kiến (VA).

$$P_s = \frac{P_{đm}}{\eta \cdot \cos\varphi} \quad (2)$$

$P_{đm}$  là công suất cơ định mức và  $\eta$  là hiệu suất động cơ.

$$\lambda = \frac{l}{\tau} \quad (3)$$

là tỷ số giữa chiều dài lõi thép với bước cực.

$$\lambda = 0,45 - 1,0 \text{ khi } 2p=2$$

$$\lambda = 0,8 - 1,4 \text{ khi } 2p=4$$

$A$ : tải đường của stator (A/cm),

$$A = 105 - 150 \text{ A/cm khi } 2p = 2$$

$$A = 120 - 200 \text{ A/cm khi } 2p = 4$$

$B_\delta$ : mật độ từ thông khe hở không khí (T),

$$B_\delta = 0,5 - 0,6 \text{ (T).}$$

Đường kính trong lõi thép stator:

$$D = k_D D_n \quad (4)$$

$k_D$ : Hệ số kết cấu

$$k_D = 0,485 - 0,615 \text{ khi } 2p = 2$$

$$k_D = 0,495 - 0,655 \text{ khi } 2p = 4$$

Bước cực:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (5)$$

$p$  là số cặp cực

Chiều dài lõi thép:

$$l = \lambda \tau \quad (6)$$

Khe hở không khí (mm):

$$\delta = 0,2 + \frac{D}{200} \text{ (mm)} \quad (7)$$

Số rãnh của stator:

$$Z_s = 2 \cdot m \cdot p \cdot q \quad (8)$$

Với  $m$  là số pha;  $q$  là số rãnh cho một pha dưới một cực từ.

Số vòng dây mỗi pha:

$$W_f = \frac{U_{đm} \cdot k_e \cdot 10^8}{4 \cdot k_s \cdot f \cdot \Phi \cdot k_{dq}} \quad (9)$$

Trong đó:  $k_s$  là hệ số sóng,  $k_s = 1,07 \div 1,1$

$$k_e = \frac{U_{đm}}{E_{đm}} \quad (10)$$

với  $U_{đm}$ ,  $E_{đm}$ : điện áp định mức và sức điện động,  $k_e = 0,7 \div 1,05$

Từ thông khe hở không khí:

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l \cdot B_\delta \quad (11)$$

Với  $\alpha_\delta$ : hệ số cung cực từ tính toán,  $\alpha_\delta = 0,5 \div 0,73$

Số thanh dẫn trong một rãnh:

$$U_s = \frac{w_s \cdot a}{q \cdot p} \quad (12)$$

$a$  là số mạch nhánh song song

Tiết diện dây quấn:

$$S_s = \frac{I_{đm}}{a \cdot J \cdot n''} \quad (13)$$

Trong đó:  $I_{đm}$  là dòng điện định mức;  $J$  là mật độ dòng điện,  $J = 5-8 \text{ (A/mm}^2\text{)}$ ;  $n''$  là số sợi chập.

Đường kính ngoài rotor:

$$D_r = D - 2 \times \delta \quad (14)$$

Chiều cao nam châm được xác định [10]:

$$h_m = \frac{B_g \delta}{B_g - B_r} \quad (15)$$

Trong đó:  $B_g$  là mật độ từ thông khe hở không khí,  $B_r$  là mật độ từ dư nam châm vĩnh cửu.

Hoặc có thể xác định theo [11], thể tích nam châm là:

$$V_m = c_v \frac{P_{đm}}{f \cdot B_r \cdot H_c} \quad (16)$$

$H_c$  là lực kháng từ (A/m);

$f$  là tần số dòng điện stator;

$c_v$  là hệ số thể tích nam châm

$$c_v = \frac{2 \cdot k_{ocf} \cdot k_{fd} \cdot (1+\exists)}{\pi^2 \cdot \xi} \quad (17)$$

$k_{ocf}$  là hệ số quá tải của động cơ;

$\xi$ : hệ số tận dụng hóa;

$k_{fd}$ : hệ số hình dáng từ hóa dọc trục.

$$\exists = 0,6 \div 0,95$$

Chiều cao nam châm:

$$h_m = \frac{V_m}{4 \cdot w_m \cdot l_m} \quad (18)$$

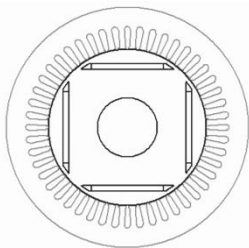
Kết quả các thông số điện tự định dạng động cơ servo theo yêu cầu, áp dụng mô hình giải tích được trình bày trong bảng 1.

**Bảng 1. Kích thước cơ bản của động cơ IPMSM**

Tên thông số	Giá trị	Đơn vị
Đường kính ngoài stator	200	mm
Đường kính trong stator	131	mm
Khe hở không khí	0,5	mm
Chiều dài mạch từ stator	100	mm
Số rãnh stator	48	-
Chiều cao rãnh stator	14,7	mm
Khoảng cách rãnh stator	5	mm
Độ rộng miệng rãnh stator	2,2	mm
Chiều cao chân rãnh	1	mm
Số vòng dây	192	-
Số sợi chập	4	-
Đường kính dây	0,75	mm
Đường kính ngoài rotor	130	mm
Đường kính trong rotor	50	mm
Chiều rộng nam châm	60	mm
Chiều cao nam châm	4,6	mm

## 2.2. Kết quả mô phỏng đặc tính

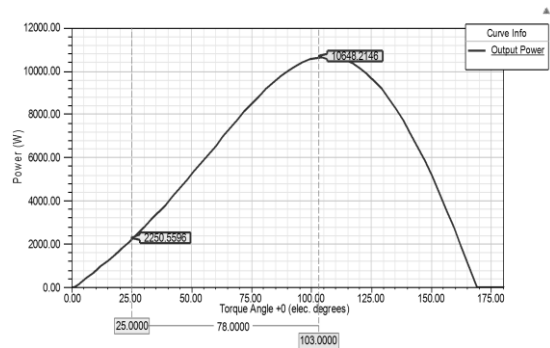
Sử dụng phần mềm Ansys Maxwell để mô phỏng động cơ servo PMSM với kích thước trong bảng 1 được thể hiện trong hình 5.



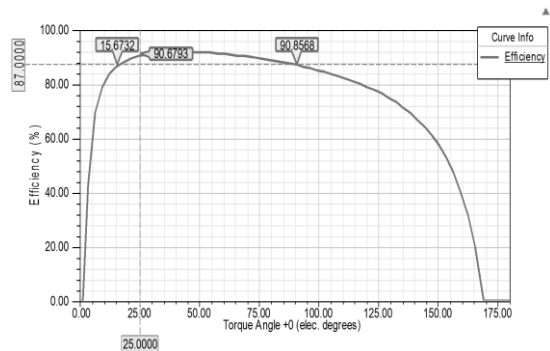
**Hình 5. Mô hình động cơ IPMSM đạt được, chiều dài mạch từ 100 mm**

Hình 6 biểu diễn đặc tính công suất theo góc quay mômen tại điểm hoạt động định

mức 1500 vòng/phút. Động cơ đạt công suất 2,2 kW tương ứng với góc quay 25°. Công suất tối đa động cơ có thể sản sinh ra là 10,6 kW. Tuy nhiên điểm hoạt động này không thỏa mãn điều kiện làm mát tự nhiên của động cơ. Nói một cách khác thời gian khi công suất hoạt động lớn hơn 2,2 kW sẽ bị giới hạn.

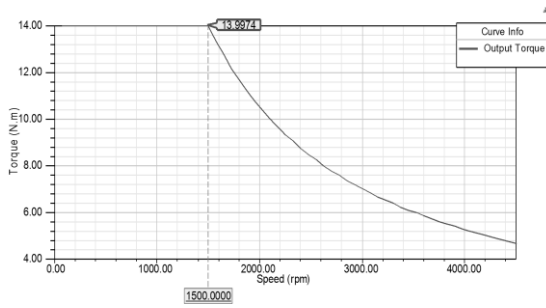


**Hình 6. Đặc tính quan hệ công suất và góc mômen quay**



**Hình 7. Đường cong mối quan hệ giữa hiệu suất động cơ và góc mômen**

Đặc tính hiệu suất của động cơ tại 1500 vòng/phút được biểu diễn tại hình 7. Tại thời điểm góc quay 25° tương ứng với công suất 2,2 kW, động cơ đạt được hiệu suất 90,6 % thỏa mãn với yêu cầu thiết kế. Mặt khác, với góc quay trong khoảng 15,6° ÷ 90° thì động cơ đạt hiệu suất hoạt động trên 87 %.



Hình 8. Đặc tính mômen vận tốc cho dải công suất 2,2 kW

Hình 8 biểu diễn đặc tính mômen (công suất) theo tốc độ. Động cơ thiết kế đáp ứng đúng yêu cầu động cơ servo về dải hoạt động mômen 14 N.m và công suất 2,2 kW đến trên 4000 vòng/phút.

### 3. THIẾT KẾ TỐI ƯU ĐỘNG CƠ IPMSM

Giá thành của động cơ phụ thuộc vào nhiều thành phần, trong đó giá thành của nam châm đất hiếm NdFeB trong động cơ PMSM chiếm tỷ trọng cao. Vì vậy cần tối ưu hóa kích thước nam châm NdFeB-N39UH với mục tiêu giảm giá thành nhưng vẫn đảm bảo đặc tính công suất và hiệu suất yêu cầu.

Trong trường hợp này, bài toán tối ưu động cơ được miêu tả như sau: Hàm mục tiêu là khối lượng nam châm  $M(l_{N39UH}, w_{N39UH}, h_{N39UH})$  với các biến liên tục cần tối ưu  $l_{N39UH}$  là chiều dài nam châm,  $w_{N39UH}$  là chiều rộng nam châm,  $h_{N39UH}$  là chiều cao nam châm; công suất và hiệu suất là các ràng buộc. Vùng giá trị của các biến này được đưa trong PT(19).

Thuật toán tối ưu SQP (Sequential Nonlinear Programming) [12] được sử dụng để giải bài toán thiết kế tối ưu với

các biến liên tục. Thuật toán này cần biết giá trị của điểm bắt đầu để thuật toán tính toán. Các giá trị này chính là kết quả của thiết kế phần trước.

$$\min M(l_{N39UH}, w_{N39UH}, h_{N39UH}) \text{ (kg)}$$

$$l_{N39UH} \in [60 \ 120] \text{ (mm)}$$

$$w_{N39UH} \in [40 \ 80] \text{ (mm)}$$

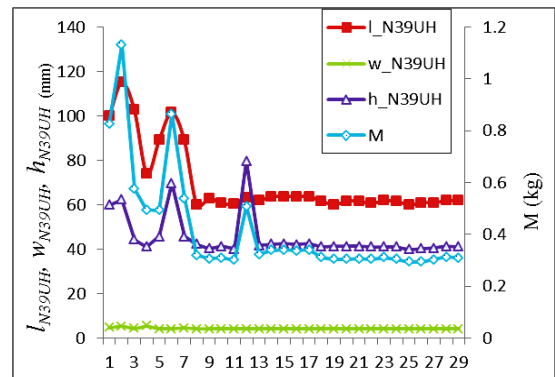
$$h_{N39UH} \in [4 \ 7] \text{ (mm)} \quad (19)$$

ràng buộc

$$P_{cor} = 2,2 \text{ kW}$$

$$eff_{dc} \geq 87,0 \%$$

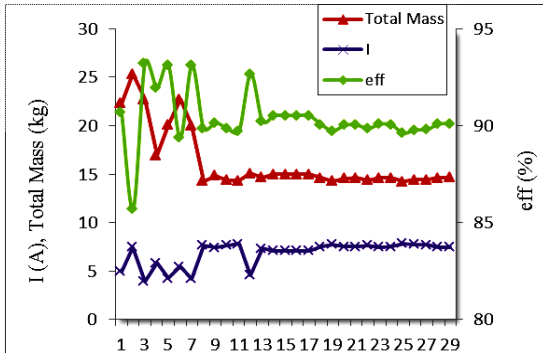
Kết quả hội tụ sau 29 lần tính toán tối ưu hóa của hàm mục tiêu và các biến thiết kế được thể hiện trong hình 9. Kích thước nam châm được tối ưu đã thay đổi so với kích thước ban đầu. Chiều dài mạch từ stator/rotor giảm từ 100 mm về 63 mm.



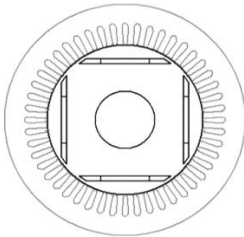
Hình 9. Kết quả hội tụ của hàm mục tiêu và biến thiết kế

Hình 10 cho kết quả hội tụ thể hiện hiệu suất (eff), dòng điện pha (I) và tổng khối lượng phần điện tử gồm mạch từ, dây quấn và nam châm của động cơ servo (Total Mass). Hiệu suất và Total Mass của

động cơ tương ứng với kết quả tối ưu tại vòng lặp thứ 29 đạt 90,1% và 15,2 kg.



Hình 10. Hiệu suất, dòng điện stator, tổng khối lượng phần điện từ



Hình 11. Kết quả thiết kế tối ưu động cơ IPMSM, với chiều dài mạch từ 63 mm

Hình 11 thể hiện thay đổi kích thước nam châm động cơ sau khi thiết kế tối ưu so với trước khi tối ưu (hình 5). Kết quả đã giảm được 62,6% khối lượng nam châm và 34,4% tổng khối lượng điện từ so với thiết kế ban đầu, tuy nhiên vẫn giữ nguyên hiệu suất thỏa mãn yêu cầu bài toán thiết kế đặt ra ban đầu.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo nêu ra các bước thiết kế phần điện từ động cơ servo đồng bộ nam châm vĩnh cửu gắn trong rotor IPMSM. Kết quả đạt được dựa trên mô phỏng Ansys Maxwell là phù hợp với yêu cầu đặt ra cho động cơ servo 2,2 kW.

Kết quả thiết kế tối ưu mạch từ nam châm NdFeB để giảm giá thành của động cơ, giảm quán tính rotor do giảm khối lượng giúp tăng thời gian đáp ứng mà vẫn đảm bảo hiệu suất cũng như công suất động cơ.

Kết quả của bài báo sẽ là tiền đề cho việc tiến tới tính toán nhiệt, tối ưu toàn bộ kích thước và dải hoạt động của động cơ, nghiên cứu tính toán công nghệ khác PMSM, kết hợp sản xuất và thử nghiệm mẫu thử, hỗ trợ doanh nghiệp trong nước thương mại sản phẩm mới có lĩnh vực áp dụng rộng rãi.

#### LỜI CẢM ƠN

Cảm ơn Trung tâm Phát triển và Ứng dụng phần mềm cho ngành công nghiệp (DASI) của Trường Đại học Bách khoa Hà Nội đã cung cấp phần mềm Ansys Maxwell.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST), đề tài T2017-TT-003.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] CIGRE Task Force D1.01.10: Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers”, Brochure N° 323, 2007.
- [2] M. Centner, “Basics and application of motor design optimization in an industrial environment”, 21th International Conference on, Electrical Machines (ICEM), in Berlin, Germany, September 2014.
- [3] S. Stipetic, W. Miebach, D. Zarko, “Optimization in design of electric machines: Methodology and workflow”, 2015 Intl. Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics

and Advanced Electromechanical Motion Systems (ACEMP-OPTIMELECTROMOTION), Side, Turkey, 2015.

- [4] Damir Zarko; Drago Ban; Davor Gooricki, "Improvement of a ServoMotor Design Including Optimization and Cost Analysis", 12th International conference on Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), in Portoroz, Slovenia, 2006.
- [5] J.R. Hendershot and T. J. E. Miller, "Design of Brushless PermanentMagnet Motors". Oxford, U.K.: Clarendon, 1994.
- [6] J.F. Gieras and M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology". New York: Marcel Dekker, 2002.
- [7] D.C. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design". Lebanon, OH: Magna Physics, 2006.
- [8] David G. Dorrell, Min-Fu Hsieh, Mircea Popescu, Lyndon Evans, David A. Staton, and Vic Grout, "A Radial-Flux Brushless Surface and Internal Rare-Earth Permanent-Magnet Motors". IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 58, No. 9, 2011.
- [9] Martin Hafner, Marc Schoning and Kay Hameyer "Automated sizing of permanent magnet synchronous machines with respect to electromagnetic and thermal aspects". The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol. 29, No. 5, 2010.
- [10] A. El Shahat, A. Keyhani, H. El Shewy, "Sizing a high speed PM generator for green energy applications". J. Electrical Systems 6-4 (2010): 501-516.
- [11] Jacek F.Gieras, Mitchell Wing "Permanent magnet motor technology – design and applications". Marcel Dekker, Inc, New York (2002).
- [12] P. Venkataraman, "Applied Optimization with Matlab Programming", A Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons, New York, 2002.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Thế Công nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 1994 tại Viện Bách khoa Grenoble - Cộng hòa Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: động cơ truyền động thẳng, nguồn đóng cắt, phong điện, năng lượng mặt trời.



Tác giả Nguyễn Huy Phương nhận bằng Thạc sĩ năm 1997 và bằng Tiến sĩ năm 2000 về công nghệ tự động hóa tại Viện Kỹ thuật điện Moscow - Liên bang Nga.

Lĩnh vực nghiên cứu: kiểm soát quá trình, kiểm soát hệ thống cơ điện tử, ổ bi từ tích cực (AMB), điều khiển động cơ servo và điều khiển máy CNC.





Tác giả Trần Tuấn Vũ tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, nhận bằng Thạc sĩ năm 2005 tại Viện Bách khoa Grenoble, bằng Tiến sĩ năm 2009 tại Trường Ecole Centrale de Lille tại Cộng hòa Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: thiết kế tối ưu thiết bị điện, nghiên cứu xe điện, năng lượng mới tái tạo, phương pháp và thuật toán tối ưu.



Tác giả Nguyễn Đức Bắc tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2005. Hiện đang là nghiên cứu sinh tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: thiết kế động cơ, thiết kế tối ưu.



Tác giả Nguyễn Văn Thiện nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội chuyên ngành kỹ thuật điện năm 2016.

Lĩnh vực nghiên cứu: thiết kế thiết bị điện.