

# NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG PHẦN MỀM MOTOR-CAD ĐỂ KIỂM NGHIỆM SƠ ĐỒ MẠCH NHIỆT CỦA ĐỘNG CƠ

NCS.ThS. ĐỖ THANH TÙNG, ThS. TRẦN THANH TUYỀN  
 Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh  
 TS. BÙI MINH ĐỊNH - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

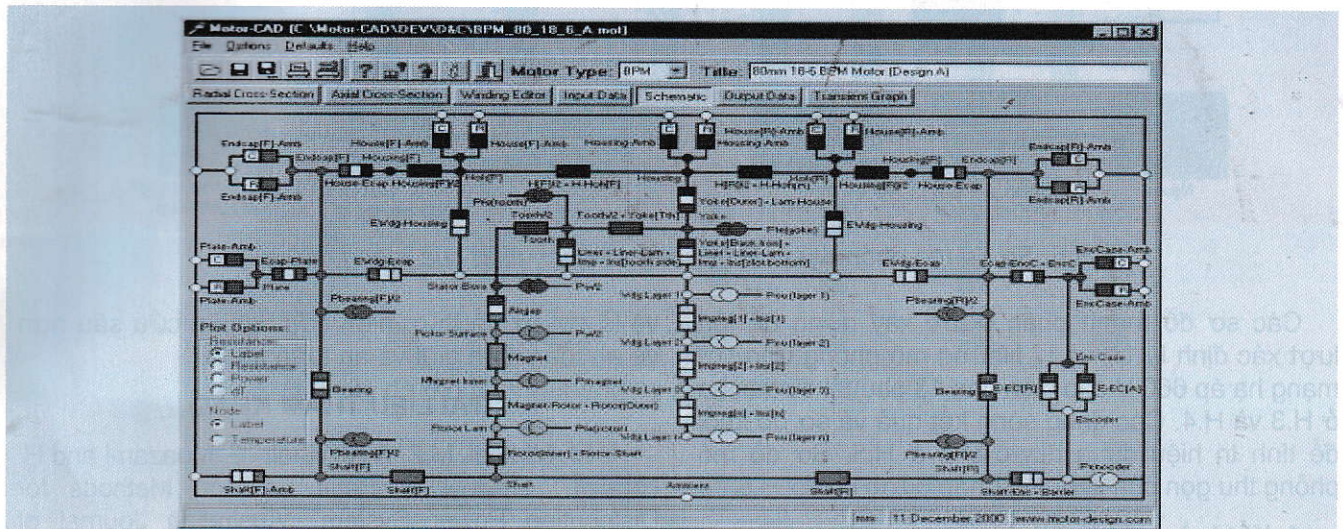
Các tác giả trong [3]-[6] đã phân tích cách xác định nhiệt trở cho các mô hình mạch nhiệt thông số dài cho động cơ không đồng bộ (KĐB) và thấy rằng các giá trị nhiệt trở phụ thuộc vào các kích thước hình học và thông số vật liệu của chúng. Do vậy, để tính toán các nhiệt trở cho mô hình này có hai phương pháp: phương pháp sử dụng dữ liệu thực nghiệm và phương pháp dựa trên một hồ sơ thiết kế mới của động cơ.

Trong bài báo này, các tác giả đề xuất sử dụng phương pháp dựa trên một hồ sơ thiết kế mới của

động cơ, tức là tính toán sơ bộ các thông số mạch nhiệt của động cơ KĐB ba pha công suất nhỏ, sau đó dùng phần mềm Motor Cad để kiểm nghiệm kết quả thu được.

## 1. Phần mềm Motor-CAD

Motor-CAD là phần mềm được viết bởi Dave Staton và các cộng sự tại phòng thí nghiệm SPEED Laboratory Glasgow dựa trên phương pháp phân tích mạch nhiệt. H.1 mô tả một mạch nhiệt được thiết lập trong môi trường làm việc của Motor-CAD.



H.1. Mô hình mạch nhiệt trên phần mềm Motor-CAD

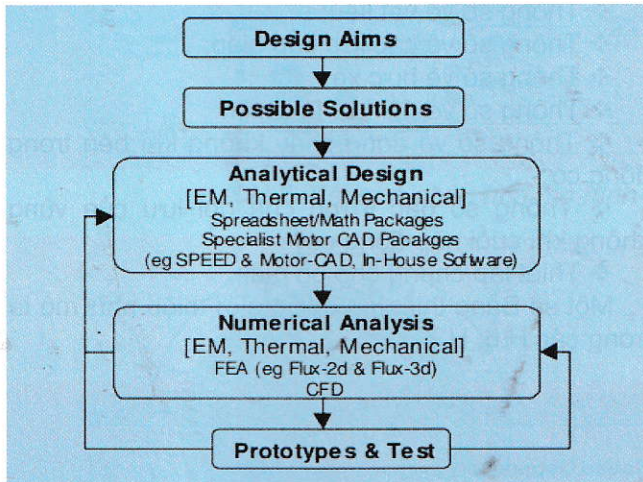
Trên mạch nhiệt này, các nút nhiệt được tự động thiết lập ở những điểm quan trọng trên động cơ như: Gông stato, răng, đầu dây quấn, vỏ máy, trục quay,... Các nút nhiệt này được liên kết với các nhiệt trở dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ. Tổng thất là thông số đầu vào đặt ở các nút phù hợp. Thành phần nhiệt dung được kể đến khi xét đến quá trình quá độ nhiệt trong động cơ. Tất cả các nhiệt trở dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ được tự động tính toán bằng các công thức lý thuyết đã được chứng

minh trong các công trình khoa học công bố có liên quan. Đối với các vấn đề truyền nhiệt xác lập, Motor-CAD có thể tính toán các tham số và đưa ra lời giải gần như tức thời. Với các vấn đề liên quan đến quá độ truyền nhiệt, thông thường mất khoảng vài giây để tính toán. Đây chính là ưu điểm nổi bật của việc sử dụng Motor-CAD so với các phương pháp tính toán khác dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) hoặc dựa trên các tính toán động lực học chất lưu (CFD).



Motor-CAD còn có điểm mạnh nữa đó là khả năng phân tích độ nhạy với nhiều tham số. Phân tích độ nhạy rất hữu ích để được những hiểu biết sâu về quá trình truyền nhiệt trong các động cơ và mức độ ảnh hưởng của các tham số thiết kế, vật liệu để từ đó đưa ra các điều chỉnh nhằm làm mát tốt hơn.

Năm 2001, trong [1] tác giả có đề cập đến xu hướng sử dụng phần mềm tính toán và phân tích nhiệt cho các động cơ điện để đem lại những ưu điểm vượt trội so với các phương pháp phân tích nhiệt truyền thống chỉ dựa trên các thực nghiệm từ động cơ có sẵn, các dữ liệu từ catalog hoặc các hệ số kinh nghiệm. Đồng thời, nhóm tác giả cũng đưa ra quy trình thiết kế một động cơ như mô tả trên H.2.



H.2. Quy trình thiết kế một động cơ [1]

Trong quy trình này, từ các mục tiêu thiết kế, người thiết kế đưa ra các phương án thiết kế có thể có. Sau đó, thiết kế sơ bộ (giải tích) bằng các phần mềm chuyên dụng về điện từ, nhiệt và cơ khí như Motor-CAD. Quá trình tính toán ở giai đoạn này cần nhanh, đưa ra được nhiều phương án thiết kế. Phân tích, so sánh các thiết kế sơ bộ để tìm ra được thiết kế tối ưu với thời gian ngắn nhất. Ở giai đoạn tiếp theo, các phân tích số được sử dụng cho các vấn đề điện từ, nhiệt và cơ khí trên mẫu thiết kế tối ưu đã được lựa chọn từ giai đoạn trước để thu được lời giải có độ chính xác cao hơn. Tất nhiên, các phân tích số sẽ tốn kém nhiều hơn về thời gian và chi phí tính toán. Do đó, chỉ nên dùng phương pháp này khi số mẫu phân tích đã được giới hạn. Cuối cùng, người ta tiến hành các thực nghiệm để hiệu chỉnh lại hai mô hình số và mô hình giải tích để thu được kết quả mô phỏng tốt hơn. Từ đó, tạo cơ sở để thu được các phân tích có độ chính xác cao hơn với mẫu thiết kế cải tiến mới.

Trong [2], các tác giả đã khảo sát và phân tích hàng loạt các dự án, bài báo và công trình khoa học sử dụng phần mềm Motor-CAD để xây dựng

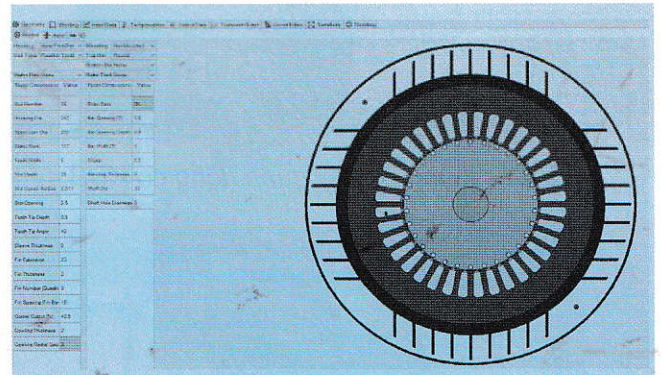
mô hình mạch nhiệt cho các loại máy điện khác nhau mà phổ biến nhất là các động cơ điện KĐB. Có thể kể đến là các công trình của Aldo Boglietti và Andrea Cavagnino ở Politecnico di Torino (Italy) với nhiều bài báo được công bố [3]-[7]. Điều này cho thấy, Motor-CAD là một giải pháp tin cậy, được các chuyên gia hàng đầu trong lĩnh vực phân tích nhiệt trong các động cơ, sử dụng để nghiên cứu và thiết kế làm mát cho các động cơ điện.

Trong chuyên đề này, tác giả sử dụng phần mềm Motor-CAD để tính toán, kiểm nghiệm các kết quả mô phỏng của mô hình mạch nhiệt thông số rải đã được đề xuất.

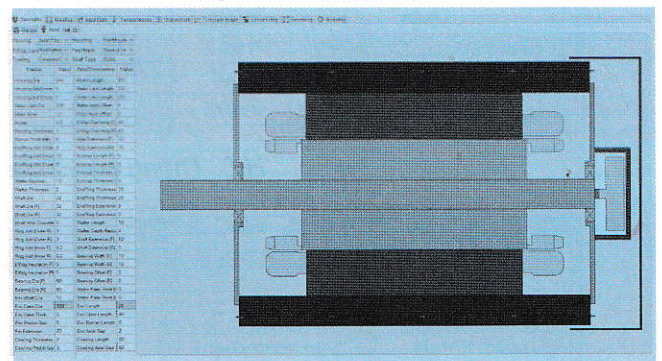
## 2. Mô hình mạch nhiệt cho động cơ KĐB công suất 5,5 kW, sử dụng phần mềm Motor-CAD

### a. Các thông số hình học của động cơ KĐB

Các thông số hình học của động cơ KĐB được thiết lập theo phương ngang trục như mô tả trên H.3.



H.3. Các thông số hình học ngang trục của động cơ



H.4. Các thông số hình học dọc trục của động cơ KĐB

Trong đó: Kiểu cánh làm mát là cánh mở, theo phương dọc trục, phân bố tròn. Số cánh là 36. Các kích thước cánh lần lượt được xác định như sau:

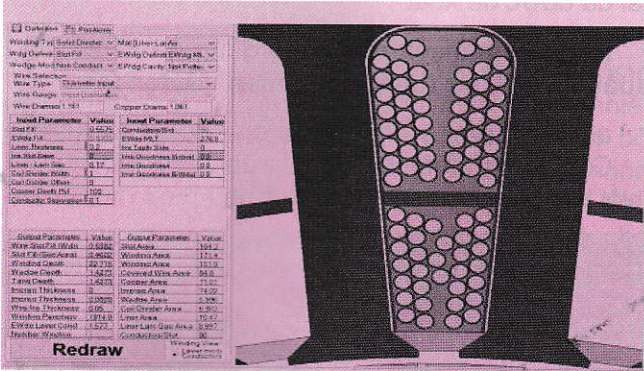
- ❖ Số cánh trên  $\frac{1}{4}$  góc=9 ( cả chu vi là 36 cánh)
- ❖ Khoảng cách giữa hai cánh là: 15 mm;
- ❖ Độ dày của cánh là: 2 mm;
- ❖ Chiều cao của cánh là: 23 mm.



Trong phương án làm mát, có bố trí thêm nắp động cơ bao lấy phần cánh làm mát để tăng cường cho quá trình làm mát cưỡng bức bằng quạt gắn trên trục động cơ. Sau khi thiết lập các thông số ngang trục, nhóm tác giả thiết lập các thông số hình học theo phương dọc trục của động cơ như H.4. Mô hình động cơ KĐB được nhóm tác giả dùng để nghiên cứu thuộc kiểu kín, làm mát bằng quạt gắn trên trục động cơ còn gọi là kiểu TEFC (Total End Fan Cooling).

**b. Các thông số dây quấn động cơ KĐB**

Các thông số tính toán của dây quấn được nhóm tác giả đưa ra trên mô hình nhiệt (H.5).



H.5. Các thông số dây quấn động cơ KĐB

Dây quấn cho mô hình động cơ là kiểu dây quấn 2 lớp với số vòng dây của một bố dây là 40 vòng. Do đó, tổng số thanh dẫn tác dụng trong một rãnh stato là 80. Hệ số điền kín của rãnh là 0,4602. Các tham số đầu vào của dây quấn có ảnh hưởng tới kết quả phân tích nhiệt như là: bề dày lớp giấy cách điện; bề dày phần khe hở giữa cách điện và lõi thép stato, hệ số đánh giá chất lượng tấm sấy.

**c. Thiết lập dữ liệu đầu vào**

Các dữ liệu đầu vào của động cơ không đồng bộ cần thiết lập:

- ❖ Thông số về kiểu làm mát;
- ❖ Thông số về tổn thất;
- ❖ Thông số về vật liệu;
- ❖ Thông số về các lớp tiếp giáp;
- ❖ Thông số về bức xạ;
- ❖ Thông số về đối lưu tự nhiên;
- ❖ Thông số về dòng chảy không khí bên trong động cơ;
- ❖ Thông số đặc trưng của đối lưu của vùng không khí cuối nắp động cơ;
- ❖ Thiết lập chung cho bộ giải;

Một số Bảng thiết lập được giới thiệu như mô tả trong các H.6, H.7.

Loss Models | Loss Distribution

**Loss Variation with Speed:**

$P[\text{speed}] = P[\text{input}] \times \left[ \frac{\text{Shaft Speed}}{\text{Speed}[\text{REF}]} \right]^{\text{coef}[A]}$

Speed Dependent Losses  
Shaft Speed [rpm] 1440

Single value of Speed[REF] [rpm] 1436

Component	P[Input]	Speed[REF]	coef[A]	W/kg	P[speed]
Units	Watts	rpm		W/kg	Watts
Loss [Stator Copper]	199.2	1436	0	23.05	199.2
Loss [Rotor Cage]	246	1436	0	266.2	246
Loss [Stator Back Iron]	60.78	1436	1.5	2.167	61.03

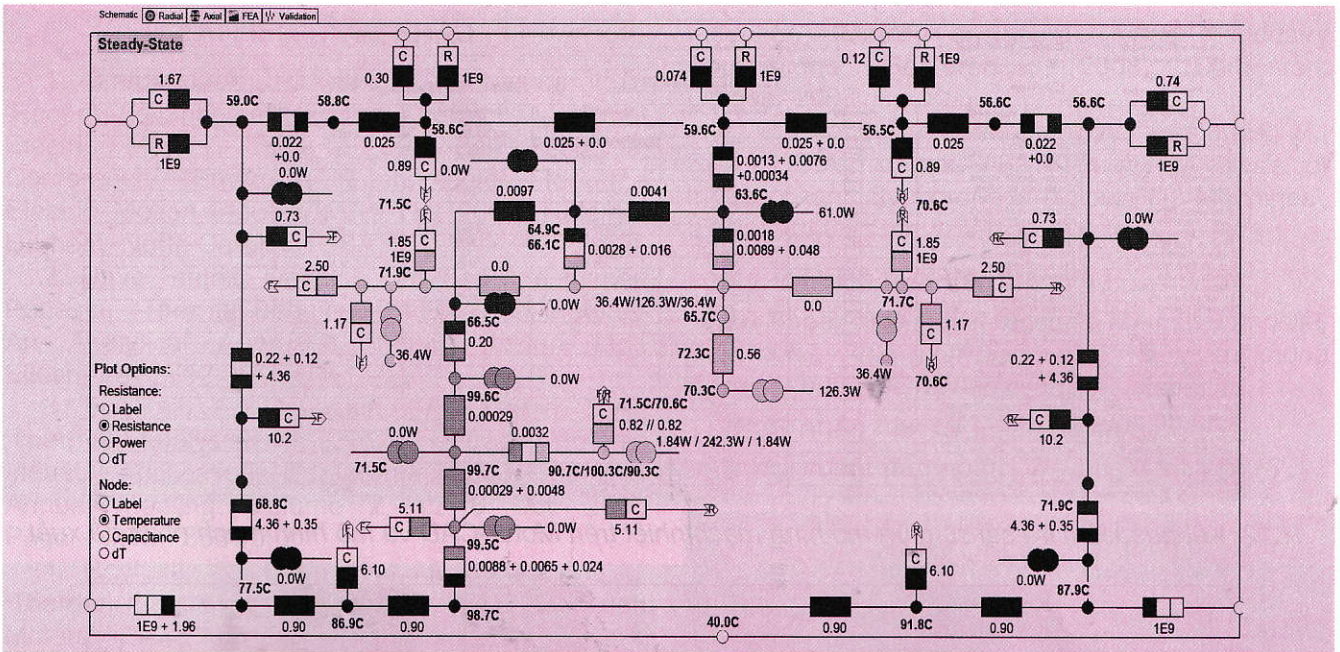
H.6. Thông số về các tổn thất trong động cơ

Cooling | Losses | Materials | Interfaces | Radiation | Natural Convection | Blown Over | End

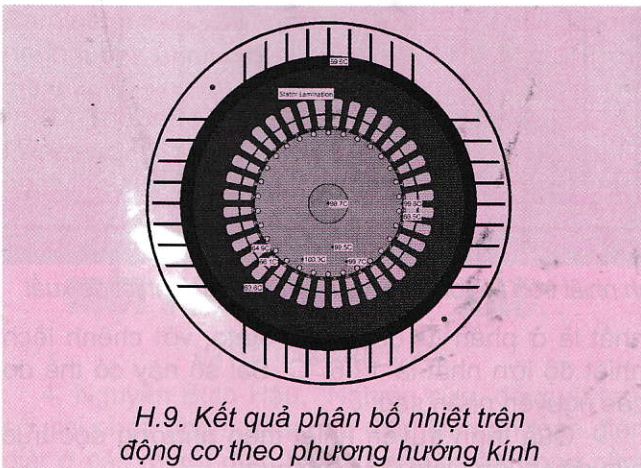
Component	Material from	Thermal	Specifi	Density	Weight	Weight	Weight	Weight
Units		W/m/C	kJ/ka/C	ka/m3	ka		ka	ka
Housing [Active]	Aluminium (Alloy 195)	168	0.833	2790	5.947	1	0	5.947
Housing [Front]	Aluminium (Alloy 195)	168	0.833	2790	1.858	1	0	1.858
Housing [Rear]	Aluminium (Alloy 195)	168	0.833	2790	1.858	1	0	1.858
Housing [Total]					9.664			9.664
Endcap [Front]	Aluminium (Alloy 195)	168	0.833	2790	0.6059	1	0	0.6059
Endcap [Rear]	Aluminium (Alloy 195)	168	0.833	2790	0.6059	1	0	0.6059
Stator Lam (Back)		58	0.46	7800	28.17	1	0	28.17
Inter Lam (Back Iron)		58	0.42	7272	0	1	0	0
Stator Lam (Tooth)		58	0.46	7800	8.964	1	0	8.964
Inter Lam (Tooth)		0.02723	1.007	1.127	0	1	0	0
Stator Lamination					37.13			37.13
Copper [Active]	Copper (Pure)	401	0.385	8933	5.481	1	0	5.481
Copper [Front]	Copper (Pure)	401	0.385	8933	1.58	1	0	1.58
Copper [Rear]	Copper (Pure)	401	0.385	8933	1.58	1	0	1.58
Copper [Total]					8.641			8.641

H.7. Thông số vật liệu chế tạo động cơ và vật liệu làm mát

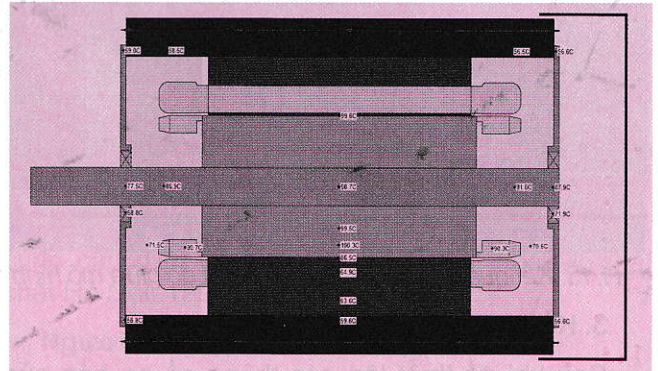




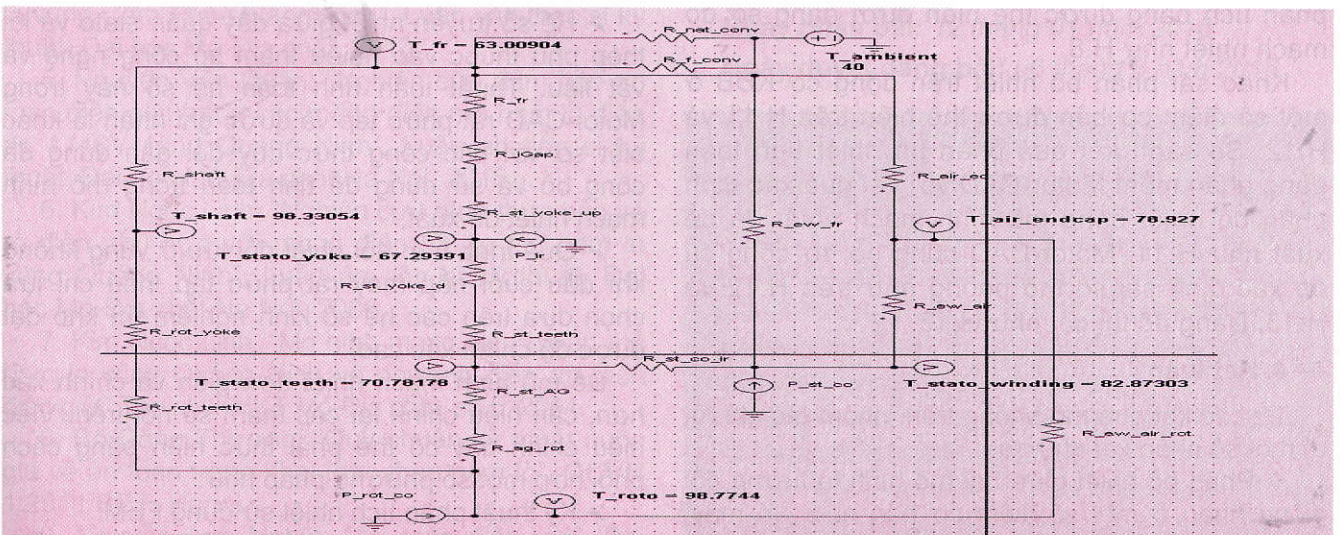
H.8. Kết quả phân tích mô hình mạch nhiệt trên phần mềm Motor-CAD



H.9. Kết quả phân bố nhiệt trên động cơ theo phương hướng kính



H.10. Kết quả phân bố nhiệt trên động cơ theo phương hướng trục

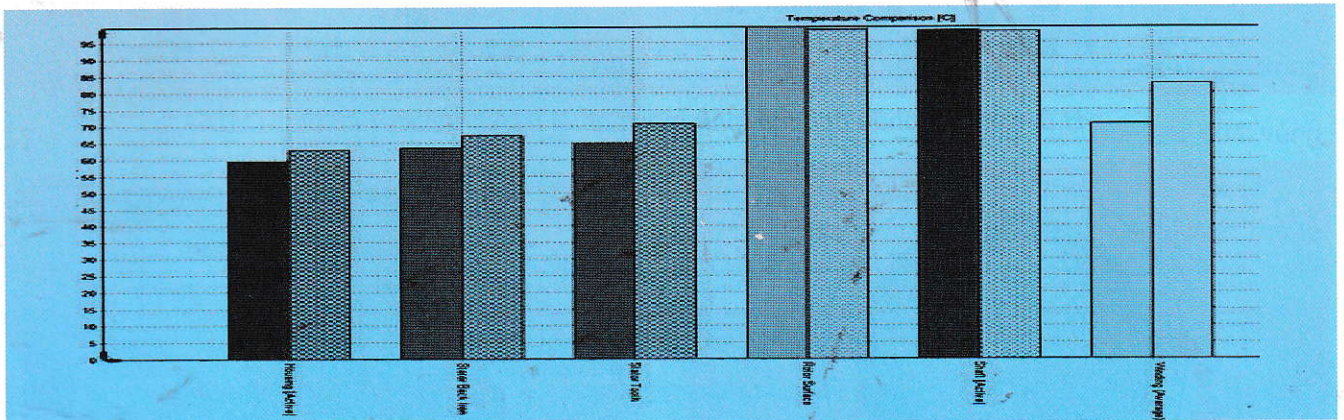


H.11. Kết quả phân bố nhiệt trên mô hình mạch nhiệt đã đề xuất



Node	Legend	Graph	Motor-CAD	Validation	Difference	Percentage
Units						
Ambient	Ambient		C	C	C	%
Housing (Active)	Housing (Active)	<input checked="" type="checkbox"/>	40.0	63.0	-3.4	-5.4
Housing OH (Front)	Housing OH (Front)	<input checked="" type="checkbox"/>	58.6			
Housing (Front)	Housing (Front)	<input checked="" type="checkbox"/>	58.8			
Endcap (Front)	Endcap (Front)	<input checked="" type="checkbox"/>	59.0			
Housing OH (Rear)	Housing OH (Rear)	<input checked="" type="checkbox"/>	56.5			
Housing (Rear)	Housing (Rear)	<input checked="" type="checkbox"/>	56.6			
Endcap (Rear)	Endcap (Rear)	<input checked="" type="checkbox"/>	63.6	67.3	-3.7	-5.5
Stator Back Iron	Stator Back Iron	<input checked="" type="checkbox"/>	64.9	70.8	-5.9	-8.3
Stator Tooth	Stator Tooth	<input checked="" type="checkbox"/>	65.5			
Stator Surface	Stator Surface	<input checked="" type="checkbox"/>	99.6	98.8	0.8	0.8
Rotor Surface	Rotor Surface	<input checked="" type="checkbox"/>	99.7			
Rotor Tooth	Rotor Tooth	<input checked="" type="checkbox"/>	99.5			
Rotor Back Iron	Rotor Back Iron	<input checked="" type="checkbox"/>	98.7	98.3	0.4	0.4
Shaft (Active)	Shaft (Active)	<input checked="" type="checkbox"/>	77.5			
Shaft (Front)	Shaft (Front)	<input checked="" type="checkbox"/>	87.9			
Shaft (Rear)	Shaft (Rear)	<input checked="" type="checkbox"/>	100.3			
Rotor Bar	Rotor Bar	<input checked="" type="checkbox"/>	86.9			
Shaft O-Hand (F)	Shaft O-Hand (F)	<input checked="" type="checkbox"/>	91.8			
Shaft O-Hand (R)	Shaft O-Hand (R)	<input checked="" type="checkbox"/>	71.5			
End Space (R)	End Space (R)	<input checked="" type="checkbox"/>	70.6			
Bearing (Front)	Bearing (Front)	<input checked="" type="checkbox"/>	68.8			
Bearing (Rear)	Bearing (Rear)	<input checked="" type="checkbox"/>	71.9			
Form Wound Tooth	Form Wound Tooth	<input checked="" type="checkbox"/>	66.1			
Rotor End Ring (F)	Rotor End Ring (F)	<input checked="" type="checkbox"/>	90.7			
Rotor End Ring (R)	Rotor End Ring (R)	<input checked="" type="checkbox"/>	90.3			
EWdg O Outer F	EWdg O Outer F	<input checked="" type="checkbox"/>	70.7			
EWdg O Bore F	EWdg O Bore F	<input checked="" type="checkbox"/>	70.7			
EWdg O End F	EWdg O End F	<input checked="" type="checkbox"/>	71.2			
EWdg O Front F	EWdg O Front F	<input checked="" type="checkbox"/>	70.8			
EWdg O Rear F	EWdg O Rear F	<input checked="" type="checkbox"/>	70.7			
EWdg O F (Average)	EWdg O F (Average)	<input checked="" type="checkbox"/>	70.7	82.8	-12.1	-14.6

H.12. Kết quả kiểm tra sai số giữa mô hình mạch nhiệt trên Motor-CAD và mô hình mạch nhiệt đề xuất



H.13. Kết quả so sánh về sai số nhiệt độ giữa mô hình mạch nhiệt trên Motor-CAD và mô hình mạch nhiệt đề xuất

### 3. Kết quả phân tích mô hình

Sau khi đã thiết lập các thông số cơ bản của mô hình mạch nhiệt trên phần mềm Motor-CAD, chạy phân tích nhiệt ở chế độ xác lập. Kết quả phân tích bằng được thể hiện dưới dạng sơ đồ mạch nhiệt như H.8.

Khảo sát phân bố nhiệt trên động cơ KDB ở một số điểm cơ bản được thể hiện trên H.11 và H.12. So sánh kết quả phân bố nhiệt tính toán bằng phần mềm Motor-CAD với kết quả xác định phân bố nhiệt bằng mô hình mạch nhiệt đã đề xuất như H.11. Motor-CAD cũng hỗ trợ công cụ để xác định sai số mô phỏng như trên H.12 và H.13. Dạng đồ thị cột như H.13.

### 4. Kết luận

Từ các kết quả mô phỏng trên, nhóm tác giả rút ra một số nhận xét như sau:

- ❖ Phân bố nhiệt giữa hai mô hình là tương đối giống nhau ở một số điểm cơ bản như: vỏ máy, gông-răng stato, roto, trục quay;
- ❖ Phân bố nhiệt giữa hai mô hình có sai số lớn

nhất là ở phần từ dây quấn stato, với chênh lệch nhiệt độ lớn nhất là 12,6 °C. Sai số này có thể do các nguyên nhân sau:

- Quá trình truyền nhiệt theo phương dọc trục của dây quấn stato đã bị bỏ qua;
- Hệ số truyền nhiệt giữa dây quấn stato và lõi thép phụ thuộc vào nhiều tham số công nghệ và vật liệu. Thuật toán tính toán hệ số này trong Motor-CAD rất phức tạp và được ghi nhận là khác biệt so với các công thức quy đổi gần đúng đã công bố và sử dụng để tính toán trong mô hình mạch nhiệt đề xuất;
- Quá trình trao đổi nhiệt đối lưu ở vùng không khí đầu cuối nắp máy rất phức tạp, nếu chỉ lựa chọn dựa trên các hệ số kinh nghiệm thì khó đạt được độ chính xác cao.

Để mô hình mạch nhiệt đơn giản và chính xác hơn, cần hiệu chỉnh lại các tham số nói trên. Việc hiệu chỉnh này có thể phải thực hiện bằng cách phối hợp một số phương pháp như:

- Kỹ thuật phân tích nhiệt sử dụng FEM;
- Tính toán động học chất lưu CFD;
- Thực nghiệm. □



## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Staton, D.A., Pickering, S.J, Lampard, D: 'Recent Advancement in the Thermal Design of Electric Motors', SMMA 2001 Fall Technical Conference "Emerging Technologies for the Electric Motion Industry", 3-5 Oct 2001, Raleigh-Durham, North Carolina, USA.

2. Dave Staton, Douglas Hawkins and Mircea Popescu, "Thermal Behaviour of Electrical Motors - An Analytical Approach" Motor Design Ltd., Ellesmere, SY12 0EG, U.K.

3. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D.A.: 'Thermal Analysis of TEFC Induction Motors', Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Volume 2, 12-16 Oct. 2003 Page(s):849 - 856 vol.2

4. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D.A.: 'Thermal Sensitivity Analysis of TEFC Induction Motors', IEE PEMD, Edinburgh, April 2004.

5. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D.A.: 'TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis', IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 41, Issue 3, May-June 2005 Page(s): 756-763.

6. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D.A., Popescu, M., Cossar, C., McGilp, M.I.: 'End space heat transfer coefficient determination for different

Induction Motor enclosure types', Industry Applications Conference, 2008. Edmonton, October 2008.

7. Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., Staton, D.A., Vagati, A. : 'Thermal Analysis of Induction and Synchronous Reluctance Machines', IEMDC; 2005, San Antonio, USA, May 2005.

**Người biên tập: Đào Đức Tạo**

**Từ khóa:** mạch nhiệt thông số rỗng; mô hình nhiệt; kiểm nghiệm mô hình mạch nhiệt; động cơ không đồng bộ; phần mềm phân tích nhiệt motor cad

**Ngày nhận bài: 01 tháng 03 năm 2016**

**Ngày duyệt đăng bài: 06 tháng 8 năm 2016**

## SUMMARY

The paper presents some results of testing with thermal model by Motor Cad software. The authors have used proposal thermal circuit model with sprayed parameters to achieve simplicity and accuracy in calculation and design of electric motors.

## MỘT PHƯƠNG PHÁP XÁC...

(Tiếp theo trang 43)

4. Nguyễn Bích Hậu, "Nghiên cứu, đề xuất một số giải pháp nhằm đảm bảo điều kiện an toàn điện giật ở các mạng điện hạ áp xoay chiều trong hầm lò vùng Cẩm Phả-Quảng Ninh", Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, Đại học Mỏ-Địa chất, 2010.

5. Nguyễn Văn Quân, "Nghiên cứu đảm bảo an toàn điện giật trong các mạng điện mỏ hầm lò điện áp 1140V vùng Quảng Ninh", Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Mỏ-Địa chất Hà Nội, 2015.

6. Kim Ngọc Linh, "Nghiên cứu hình thức bảo vệ rò điện phù hợp với mạng điện hạ áp mỏ hầm lò vùng Quảng Ninh", Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Mỏ-Địa chất Hà Nội, 2006.

7. Kim Ngọc Linh, "Mô hình mạng điện hạ áp mỏ hầm lò vùng Quảng Ninh về phương diện an toàn điện giật" Tạp chí KHKT Mỏ-Địa chất, số 5, 2004.

8. Bộ Công Thương, "Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về an toàn trong khai thác than hầm lò", QCVN 1:2011/BCT, Hanoi.

9. Nguyễn Anh Nghĩa, "An toàn điện mỏ", Bài giảng cho học viên cao học ngành "Hệ thống điện,

cung cấp điện và điện khí hóa". Đại học Mỏ-Địa chất Hà Nội, 1997.

**Người biên tập: Đào Đức Tạo**

**Từ khóa:** mạng điện có trung tính cách ly; bảo vệ rò điện; an toàn điện giật; điện trở cách điện; điện dung và điện dẫn của mạng; mô hình mô phỏng

**Ngày nhận bài: 12 tháng 01 năm 2016**

**Ngày duyệt đăng bài: 06 tháng 8 năm 2016**

## SUMMARY

The paper shows the new method to determine the insulation parameters of 660 V network with isolated neutral. The network's capacitance and insulation resistors are deducted from  $U_0$ ,  $I_0$ ,  $I_r$  which are directly resulted from simulation model. The model reflect the realistic of loads, it is also very flexible and allow the users to simulate any type of underground mines' network with variety input parameters.