

ANALIZE NUMERICE DE CÂMP TERMIC ÎN MOTOARE ELECTRICE REDUNDANTE

Ioana IONICĂ^{1,3}, Alexandru M. MOREGA^{2,3}, Cristian BOBOC¹

¹ICPE, București, România

²Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, Facultatea de
Inginerie Electrică, București, România

³Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, Școala
Doctorală de Inginerie Electrică, București, România

ioana.messico@icpe.ro, amm@iem.pub.ro, cristianboboc.messico@icpe.ro

Rezumat. În această lucrare ne propunem să analizăm transferul de căldură al unui motor de cuplu cu unghi limitat, în condiții speciale, de spațiu. Se vor folosi modele tri-dimensionale și în analiza numerică se vor considera două valori ale curentului. De asemenea, variante în care condițiile la limită vor lua în calcul valori diferite ale emisivității suprafețelor motorului vor fi analizate. În interiorul subsansamblurilor stator și rotor ale motorului, transferul de căldură se va realiza prin conducție iar între motor și mediul ambiant prin radiație. Folosind analiza numerică, se va putea stabili timpul în care temperatura din înfășurare ajunge la valoarea maximă admisă pentru motorul de cuplu cu unghi limitat, în condițiile menționate.

1. INTRODUCERE

Motoarele de cuplu de curent continuu cu unghi limitat sunt dezvoltate în țară [1] și în străinătate [2-5]. Acest tip de motoare face parte din categoria motoarelor de curent continuu fără perii. Acestea se deosebesc de mașinile electrice clasice prin caracteristicile, construcția și aplicațiile la care se folosesc și care solicită rotirea într-un anumit domeniu unghiular [4]. În aceste aplicații, mașinile clasice nu pot funcționa din cauza condițiilor la care motoarele sunt supuse.

Aceste motoare au un cuplu de agățare magnetică foarte redus datorită lipsei creștăturilor în stator și prezintă performanțe funcționale ridicate. Aceste două caracteristici le recomandă pentru acționări cu unghi limitat [5]. Sunt dezvoltate pentru aplicații în care rotirea pe un anumit domeniu unghiular este principala cerință. Aceste motoare sunt proiectate să funcționeze în construcția direct-drive și sunt construite pentru a produce un cuplu printr-un unghi de rotație mai mic de 180 de grade. Sunt utilizate pe scară largă pentru poziționarea antenelor, pentru acționarea brațelor unui robot și pentru a conduce alte sisteme care se rotesc în unghiuri mici. Principalele avantaje ale acestei construcții sunt [8]:

- montarea directă a acestora pe axul principal;
- raport mare: cuplu [Nm] / moment inerție[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$];
- raport mare: cuplu mecanic util [Nm]/ putere utilă [W];
- constanta electrică de timp [ms] mică;
- funcționare fără zgomot și vibrații – în foarte multe cazuri, acest tip de motoare se solicită în construcție direct-drive. În acest mod, se elimină vibrațiile mecanice de la rulmenți.

Datorită avantajelor pe care le prezintă, DC-LATM sunt folosite în aplicații de tehnică specială. Sunt disponibile diverse configurații iar soluția constructivă este aleasă în funcție de aplicația necesară clientului.

Motorul abordat în această lucrare are două canale și asigură rolul a două motoare de c.c. de cuplu, cu unghi limitat [6]. Este în construcție “direct - drive” și este utilizat în aplicații în care performanțele funcționale, volumul, masa și fiabilitatea sunt critice.

Sursa de căldură din acest motor este înfășurarea statorică parcursă de curent.

Statorul acestui motor prezintă două pachete de tole de formă toroidală fără creștături din tablă electrotehnică de tip FeSi care au o înfășurare în inel, multistrat, cu $2p = 2$ poli. Statorul este montat într-o carcasă fabricată din oțel inoxidabil și apoi se înglobează în rășină epoxidică [6].

Rotorul acestui motor este construit din două rotoare identice cu $2p = 2$ poli. Fiecare rotor are doi magneți permanenți din pământuri rare care formează polii și arborele care este construit pentru acționare directă.

Analiza de transfer de căldură prezentată în această lucrare stabilește comportamentul acestui motor din punct de vedere termic [9 – 14, 16 - 22].

2. MODELUL MATEMATIC

Analiza numerică se va realiza cu ajutorul unui pachet de programe care are la bază metoda elementului finit [9 – 12]. Folosind analiza numerică, se va analiza comportamentul acestui motor din punct de vedere termic, considerând două cazuri: $1/3 \cdot I_m$ și $2/3 \cdot I_m$, I_m fiind curentul maxim. Pentru studiul transferului de căldură, se vor utiliza modele numerice tridimensionale, folosind metoda elementului finit [7 – 23].

La primul pas în studiul numeric se stabilește domeniul fizic care include părțile constructive ale motorului.

Datele necesare formulării problemei de transfer de căldură pentru realizarea modelului numeric sunt soluția constructivă, materialele și sursa de căldură. Motorul considerat este construit în clasa F de izolație. Astfel, temperatura maximă admisă este de 155°C .

Problema de transfer de căldură în motorul studiat consideră conducție și radiație termică. Sunt elaborate și analizate modelele matematice pentru estimarea temperaturilor în înfășurarea DC-LATM, în regimuri tranzitorii având înfășurarea motorului ca sursă internă de căldură.

Ecuția pentru transferul de căldură realizat prin conducție între părțile solide, în regim tranzitoriu este

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q, \quad (1)$$

unde ρ [kg/m^3] este densitatea materialului, C_p [$\text{J}/\text{kg K}$] este capacitatea calorică, t [s] este timpul, T [K] este temperatura, k [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] este conductivitatea termică și Q [W/m^3] este sursa de căldură.

Pe frontieră s-a considerat radiație față de mediul ambiant

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h(T_{inf} - T) + E(G - \sigma T^4), \quad (2)$$

$$(1 - E)G = J_0 - E\sigma T^4, \quad (3)$$

unde T_{inf} [K] este temperatura de referință, E este emisivitatea suprafeței, T [K] este temperatura mediului ambiant, J_0 [W/m^2] este radiozitatea suprafeței, G [W/m^2] este iradiația mediului ambiant și σ este constanta Stefan - Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$). Deși în relație este prezentată și o componentă de convecție pentru transferul de căldură pe frontieră, în modelul numeric se va considera doar radiație pe frontiera motorului cu exteriorul.

Software-ul folosit pentru modelarea numerică este COMSOL Multiphysics, un pachet de programe pentru modelare ce are la bază metoda elementului finit [15].

3. STUDII DE CÂMP TERMIC PENTRU UN MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT

Pentru acest studiu, se folosesc modele numerice tri-dimensionale pentru analiza termică a DC-LATM. Modelul tri-dimensional (Fig. 1) conține (1) și (6) pachete de tole, (2) jugul rotor, (3) magneții permanenți de excitație, (4) și (5) înfășurarea statorică.

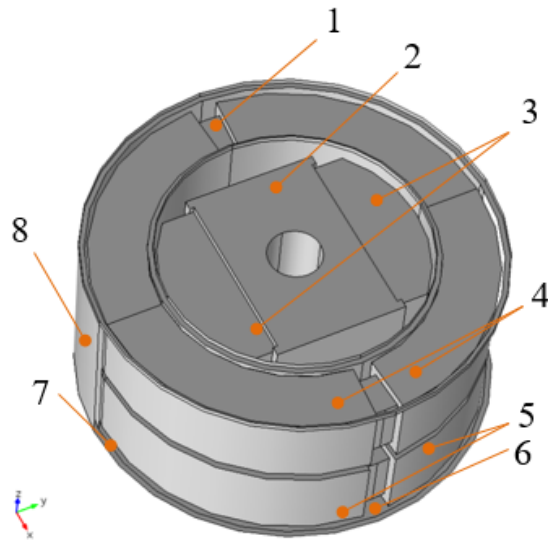


Fig.1 Părțile constructive ale DC-LATM.

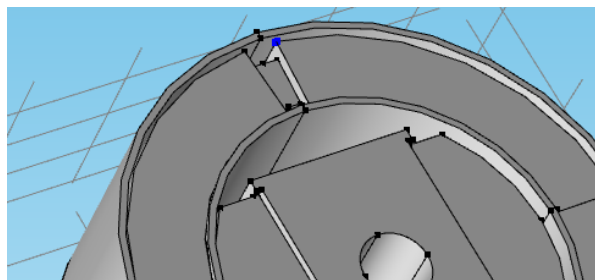
În construcția circuitului magnetic se folosesc materiale magnetice moi și dure pentru rotor și materiale magnetice moi pentru stator:

- tablă electrotehnică Fe-Si pentru pachetul de tole stator;
- conductor de cupru pentru bobinaj, izolat – lac poliesteric, clasă F;
- magneți pe bază de pământuri rare de tip NdFeB 37;
- oțel feromagnetic (Oțel 416) – pentru arborele rotorului.

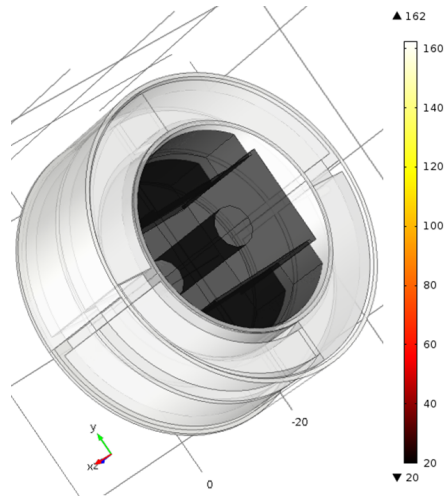
Pentru analiza numerică a acestuia s-au considerat două cazuri, și anume $1/3 \cdot I_m$ și $2/3 \cdot I_m$, $I_m = 2$ A fiind curentul maxim.

3.1 DC LATM: $I = 0.66$ A

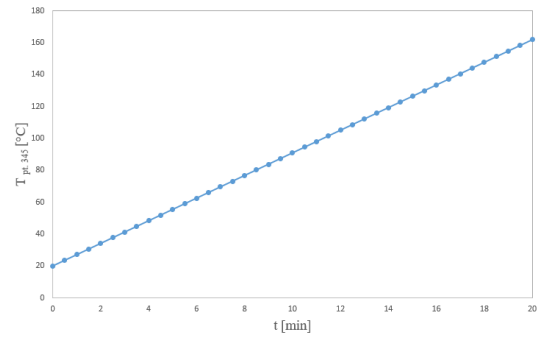
La curentul $I = 0.66$ A, s-a analizat numeric distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, considerandu-se temperatura mediului ambiant egală cu 22 °C. Punctul de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii este prezentat în Fig. 2.a).



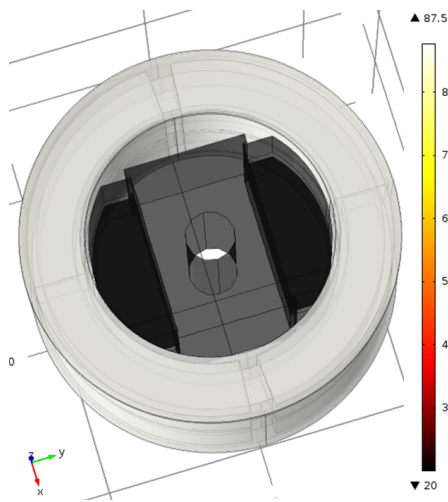
a) Punct de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii.



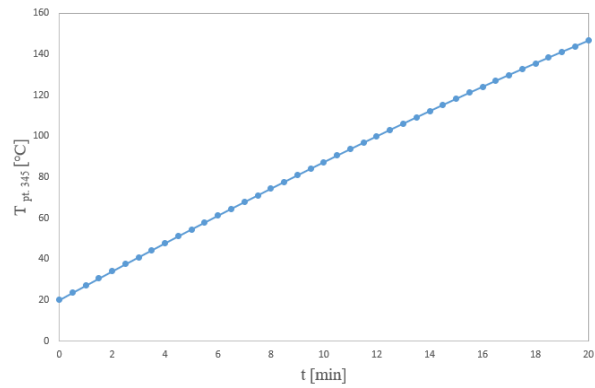
b) Caz izolat. Distribuția temperaturii în întreg motorul, $t = 20$ min. $T_{max} = 162$ °C.



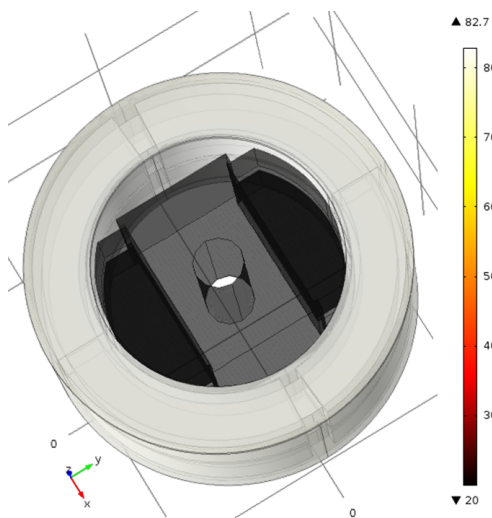
c) Caz izolat. Graficul temperaturii în funcție de timp.



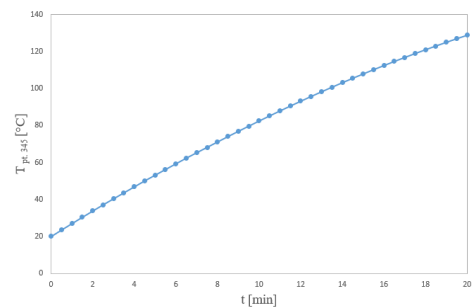
d) $\epsilon_{rad} = 0.2$; $T_{max} = 88$ °C.



e) $\epsilon_{rad} = 0.2$. Graficul temperaturii în funcție de timp



f) $\epsilon_{rad} = 0.5$; $T_{max} = 83$ °C.



g) $\epsilon_{rad} = 0.5$. Graficul temperaturii în funcție de timp

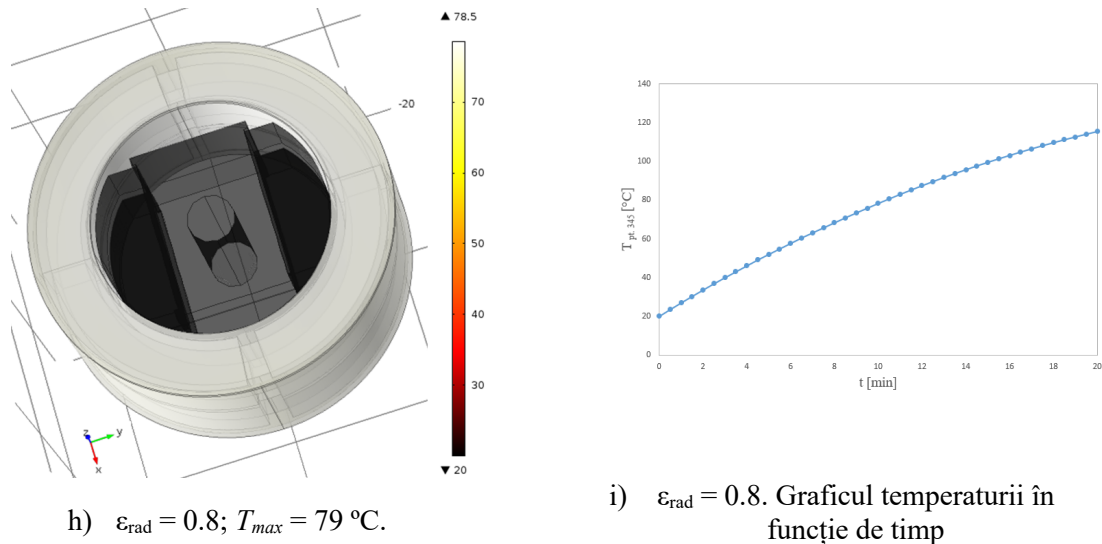


Fig. 2. Distribuția temperaturii în întreg motorul, $t = 10 \text{ min}$. și graficul temperaturii în funcție de timp considerând diferite emisivități.

Fig. 2.b) - i) prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, la $t = 10 \text{ min}$ pentru diferite cazuri. Se poate observa că temperatura maximă se află în înfășurările motorului.

Analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii și implicit determinarea timpului în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă. Astfel, Fig. 3 prezintă graficul temperaturii în funcție de timp, $t = 20 \text{ min}$.

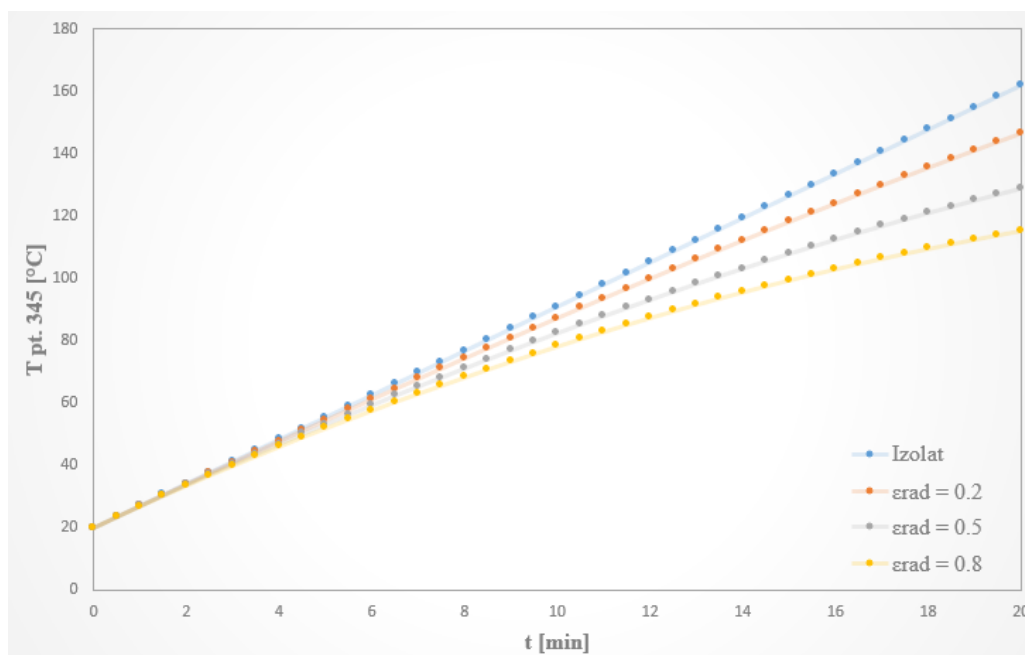
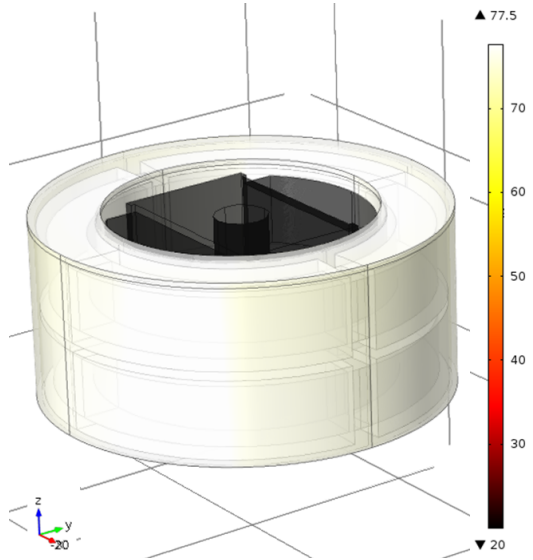


Fig. 3. Graficul temperaturii în funcție de timp, $t = 20 \text{ min}$.

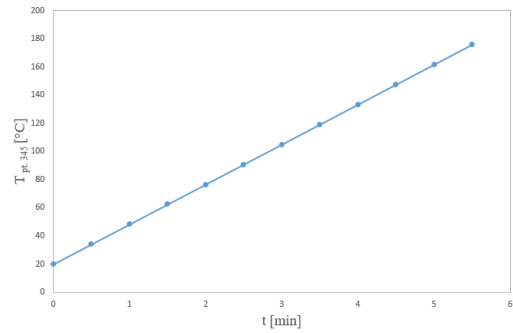
Din graficul prezentat în Fig. 3, se poate observa că temperatura scade cu creșterea valorii emisivității ϵ_{rad} . În cel mai defavorabil caz, izolat, temperatura ajunge la o valoare egală cu $162 \text{ }^\circ\text{C}$ la $t = 20 \text{ min}$.

3.2 DC LATM: $I = 1.33 A$

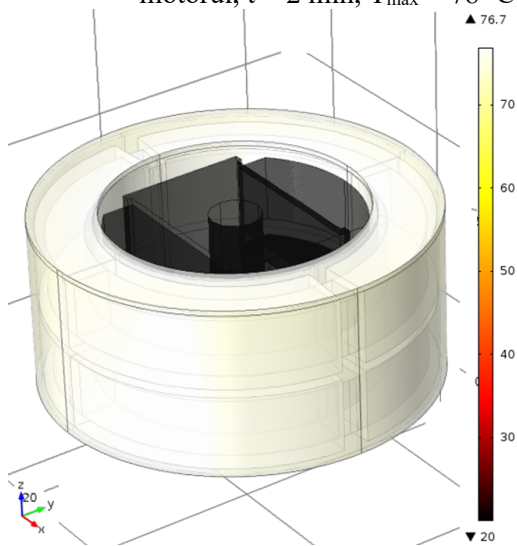
La curentul $I = 1.33 A$, s-a analizat numeric distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, considerandu-se temperatura mediului ambiant egală cu $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Punctul de calcul din înfășurarea motorului considerat pentru calculul temperaturii este prezentat în Fig. 4.a).



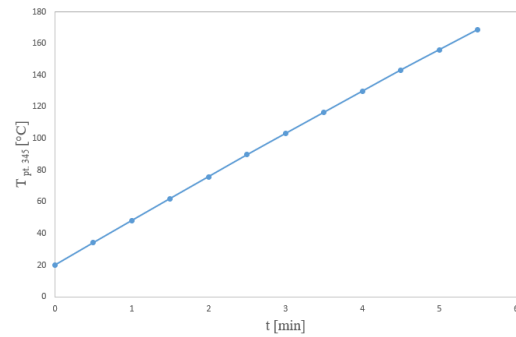
a) Caz izolat. Distribuția temperaturii în întreg motorul, $t = 2\text{ min}$, $T_{\max} = 78\text{ }^{\circ}\text{C}$.



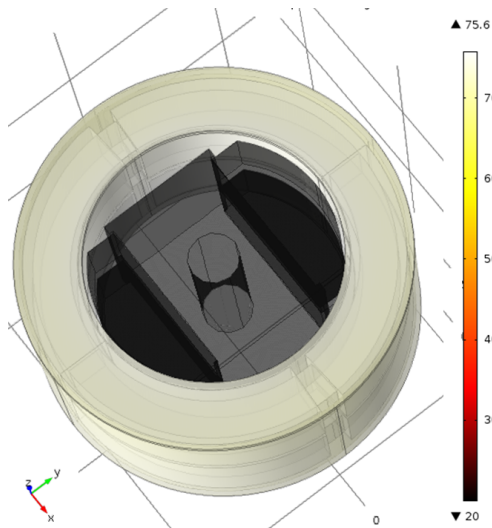
b) Caz izolat. Graficul temperaturii în funcție de timp.



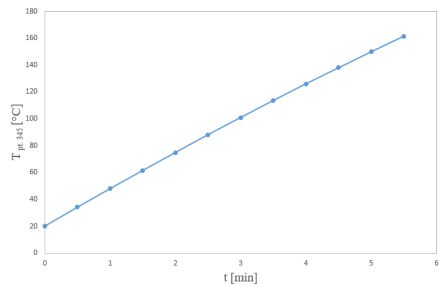
c) $\epsilon_{\text{rad}} = 0.2$; $T_{\max} = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$.



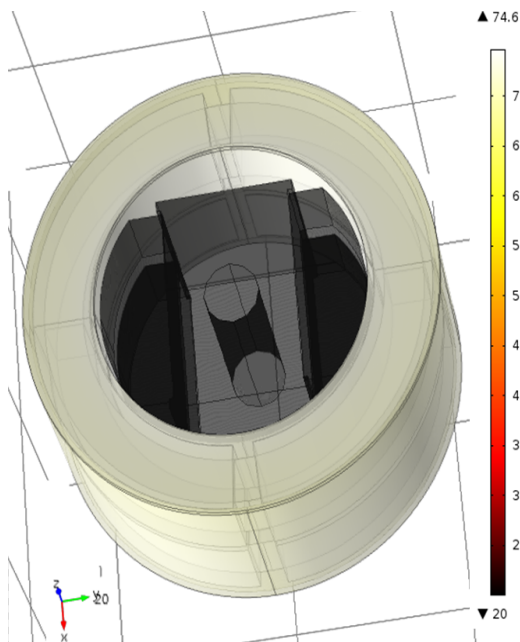
d) $\epsilon_{\text{rad}} = 0.2$. Graficul temperaturii în funcție de timp



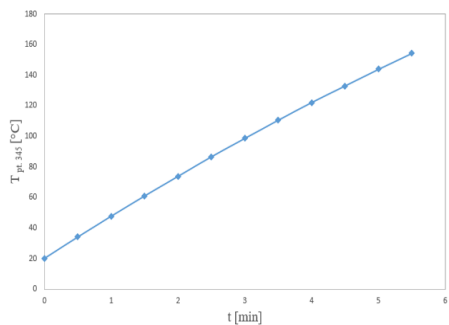
e) $\epsilon_{\text{rad}} = 0.5$; $T_{\text{max}} = 76 \text{ }^\circ\text{C}$.



f) $\epsilon_{\text{rad}} = 0.5$. Graficul temperaturii în funcție de timp



g) $\epsilon_{\text{rad}} = 0.8$; $T_{\text{max}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$.



h) $\epsilon_{\text{rad}} = 0.8$. Graficul temperaturii în funcție de timp

Fig. 4. Distribuția temperaturii în întreg motorul, $t = 2 \text{ min}$. și graficul temperaturii în funcție de timp considerând diferite emisivități.

Figura 4.a) - h) prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, la $t = 2 \text{ min}$ pentru diferite cazuri. Se poate observa că temperatura maximă se află în înfășurările motorului (sursa de căldură).

Analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii și implicit determinarea timpului în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă. Astfel, Fig. 5 prezintă graficul temperaturii în funcție de timp, $t = 6 \text{ min}$.

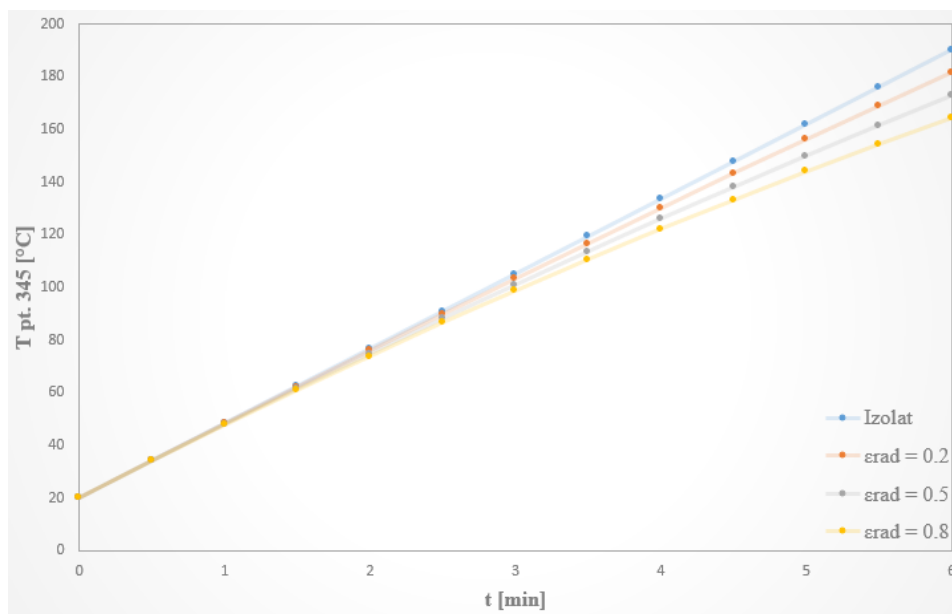


Fig. 5. Graficul temperaturii în funcție de timp, $t = 6$ min.

Din graficul prezentat în Fig. 5, se poate observa că temperatura scade cu creșterea valorii emisivității ϵ_{rad} . După același timp de funcționare, valoarea temperaturii este substanțial mai ridicată în acest caz comparativ cu varianta precedentă în care $I = 0.66$ A.

În cel mai defavorabil caz, izolat, temperatura ajunge la o valoare egală cu 133 °C la $t = 4$ min. În cazul $I = 0.66$ A, temperatura ajunge la 134 °C la $t = 16$ min.

4. CONCLUZII

În această lucrare s-a studiat și prezentat analiza de câmp termic a unui motor de cuplu cu unghi limitat, folosind modele numerice tridimensionale.

Au fost considerate două valori ale curentului ($1/3 \cdot I_m$ și $2/3 \cdot I_m$, I_m fiind curentul maxim). S-a studiat un caz al funcționării DC-LATM în care ambele înfășurări sunt alimentate.

Transferul de căldură a considerat conducție (în interiorul subsansamblurilor) și radiație (între subsansambluri și mediul ambiant).

Pentru ambele variante, ca ipoteză de lucru au fost analizate numeric variante în care condițiile la limită (frontieră) au luat în calcul valori diferite ale emisivității suprafețelor motorului variind în intervalul $0.2 \div 0.8$.

S-a stabilit evoluția în timp a temperaturii din înfășurarea motorului, considerând cele două variante prezentate.

În ambele cazuri, temperatura maximă se află în înfășurarea motorului (sursa de căldură) și variază punctual (de ordinul sutimilor de grad).

Graficul temperaturii în funcție de timp pentru ambele variante arată scăderea temperaturii cu creșterea emisivității materialelor.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XIX, ediția 2023.

BIBLIOGRAFIE

1. D. Stoia, *Motoare de curent continuu excitate cu magneți permanenți*, Editura Tehnică, București, 1983.
2. ***AXYS Catalogue, Brushless DC Motors, 2002.

3. ***Moog Catalogue, Direct Drive Brushless DC Torque Motors, 2013.
4. ***Precilec Catalogue, Permanent Magnet generators and motors, 2013.
5. ***Bental Motion Systems, “Brushless Motors”, 2013.
6. P.R. Upadhyay, K.R. Rajagopal and B.P. Singh, *Computer aided design of an axial-field permanent magnet brushless dc motor for an electric vehicle*, Journal of Applied Physics, **93**, 10, pp.8689,8691, May 2003.
7. P.R. Upadhyay and K.R. Rajagopal, *FE Analysis and Computer-Aided Design of a Sandwiched Axial-Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor*, IEEE Transactions on Magnetics, **42**, 10, pp.3401,3403, Oct. 2006.
8. I. Ionică, *Modele numerice și experimentale de câmp electromagnetic și transfer de căldură în mașini electrice speciale*, Teză de doctorat, Septembrie 2020.
9. P.R. Upadhyay and K.R. Rajagopal, *FE analysis and CAD of radial-flux surface mounted permanent magnet brushless DC motors*, Digests of the IEEE International Magnetics Conference -INTERMAG Asia 2005-, pp.729-730, 4-8 April 2005.
10. Icp Catalogue, Special Electric Machines, 2019.
11. R. Obreja, I.R. Edu, *Limited Angle Torque Motors having high torque density, used in accurate Drive Systems*, Acta Polytechnica, **51**, 5, pp.75-83, 2011.
12. M.I. Andrei, N.M. Modreanu, *Numeric Modelling of a Two-Channel Limited Angle Torque Motor*, in EEA – Electrotehnică, Electronică, Automatică, Editura. ELECTRA, **62**, 1, pp. 26-31, 2014.
13. R. Măgureanu, *Mașini electrice speciale pentru sisteme automate*, Editura Tehnică, București, 1981.
14. M.I. Andrei, M. Modreanu, L. Ghițulescu, *ACES Methodology for a DC Limited Angle Torque Motor*, in Revue roumaine des sciences techniques, Série Électrotechnique et Énergétique.
15. ***Comsol Multiphysics documentation: <http://www.comsol.com/>
16. “Componente electromecanice pentru sisteme high tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD”, Raport tehnic, etapa 1.
17. “Componente electromecanice pentru sisteme high tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD”, Raport tehnic, etapa 2.
18. M.I. Andrei, N.M. Modreanu, M. Gutu, L. Ghițulescu, *Sistem de măsură asistat de calculator pentru caracterizarea motoarelor de cuplu cu unghi limitat*, EEA - Electrotehnică, Electronică, Automatică, Editura. ELECTRA, **62**, 3, pp. 11-17, Jun-Sep. 2014.
19. A.M. Morega, *7 - Principles of Heat Transfer*, Editor(s): Dan B. Marghitu, In Academic Press Series in Engineering, Mechanical Engineer's Handbook, Academic Press, 2001, Pages 445-557.
20. A. Boglietti, A. Cavagnino, D.A. Staton, *Thermal Analysis of TEF C Induction Motors*, Proc. of IEEE International Conference PEDS 2003, Singapore, 2003.
21. A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli, *A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor*, IEEE Transactions on Industry Application, **39**, 4, pp. 945 – 952, 2003.
22. A. Cassat, C. Espanet, N. Wavre, *BLDC motor stator and rotor iron losses and thermal behavior based on lumped schemes and 3-D FEM analysis*, IEEE Transactions on Industry Application, **39**, 5, pp. 1314 – 1322, 2003.
23. E. Lebenhaf, *Field Evaluation of Slip-Dependent Thermal Model for Motors with High-Inertia Starting*, Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. PCIC '07, pp. 1 – 5, 2007.
24. H.P. Liu, V. Lelos, C.S. Hearn, *Transient 3-D thermal analysis for an air-cooled induction motor*, Proc. of IEEE International Conference IEMDC 2005, pp. 417 – 420, 2005.
25. R. Bernard, R. Glises, D. Chamagne, *3D thermal study of a low power electric motor with Flux3D*, Flux-Magazine, **37**, pp. 10 – 11, 2001.