

STUDII DE TRANSFER DE CĂLDURĂ ÎN MAȘINI ELECTRICE UTILIZATE ÎN CONDIȚII DE FUNCȚIONARE SPECIALE

Ioana IONICĂ¹, Mircea MODREANU¹, Alexandru M. MOREGA², Cristian BOBOC¹

¹Icpe, București, România

²Universitatea Politehnica din București, București, România

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

cristianboboc.messico@icpe.ro

Rezumat. În această lucrare ne propunem analiza transferului de căldură a unui motor de cuplu cu unghi limitat, în condiții speciale, de spațiu. Vor fi folosite modele tri-dimensionale și se vor considera două valori ale curentului. Ca ipoteză de lucru vor fi analizate numerice variante în care condițiile la limită (frontieră) vor lua în calcul valori diferite ale emisivității suprafețelor motorului variind în intervalul $0,2 \div 1$. În interiorul subsansamblurilor motorului transferul de căldură se va realiza prin conducție iar între motor și mediul ambiant prin radiație. Cu ajutorul modelării termice, se va putea stabili timpul în care temperatura din înfășurare ajunge la valoarea maximă admisă pentru motorul de cuplu cu unghi limitat, în condiții de spațiu.

1. INTRODUCERE

Motoarele de cuplu cu unghi limitat (DC-LATM) se dezvoltă și se comercializează în țară [1] și în străinătate [2-5]. Aceste motoare fac parte din categoria motoarelor de curent continuu fără perii. De asemenea, DC-LATM sunt montate direct pe arborele de acționare și sunt destinate aplicațiilor care necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular [4].

DC-LATM prezintă un cuplu de agățare magnetică foarte redus și performanțele funcționale ridicate le recomandă pentru acționări cu unghi limitat [5]. Datorită lipsei creștăturilor în stator, cuplul de agățare magnetică este redus practic la zero. Prin urmare, se obține o caracteristică cuplu-unghi uniformă pe domeniul de lucru.

Înfășurarea statorică a acestui DC-LATM este toroidală și multistrat. Aceasta poate fi dipolară, pentru un domeniu unghiular mai mare (domeniul de lucru al motorului este $45 \div 135$ grade) sau multipolară, pentru domeniu unghiular mai mic și cuplu maxim mare [6]. Sursele de câmp magnetic din acest DC-LATM sunt înfășurarea statorică parcursă de curent și magneții permanenți pe bază de pământuri rare, situați pe rotor.

Aceste tipuri de motoare sunt utilizate în aplicații unde atât volumul cât și greutatea sistemului în care acestea se montează sunt cerințe critice.

Aplicațiile DC-LATM sunt diverse: în domeniile aerospațial, spațial, tehnică militară, medical etc. Pentru aplicațiile speciale (de exemplu aerospațial, spațial) este necesară asigurarea unei redundanțe a sistemelor [7].

Industria spațială reprezintă un domeniu de maxim interes din punct de vedere științific, economic, strategic. Comparativ cu alte domenii, creșterea sa din ultimii ani este extraordinară, dovada la îndemâna tuturor fiind serviciile de telecomunicații. Sectorul nu a fost afectat de criza economică, numărul țărilor implicate devine din ce în ce mai mare, iar cercetarea și dezvoltarea sunt atent planificate în conformitate cu strategiile agențiilor spațiale. În paralel, apar aplicații terestre ale tehnologiilor dezvoltate pentru programele spațiale [8].

Cerințele motorului date de aplicația în care acesta este folosit inclusiv condițiile de mediu în care motorul funcționează vor stabili datele de intrare ale problemei de transfer de căldură.

Există două categorii de cerințe care sunt la fel de importante: generale de funcționare (mecanic, termic, electric) și de mediu (stabilitate la vid și radiație, rezistență la AO - oxigen atomic) etc. De asemenea, trebuie luate în considerare mai multe aspecte, cum ar fi: efectele mediului (LEO – Low Earth Orbit sau GEO – Geostationary Orbit), constrângerile aplicabile materialelor (temperatură, vid, cicluri termice, chimice - coroziune, compatibilitate galvanică, oxigen atomic, absorbție / desorbție a umezelii, compatibilitatea fluidului), dacă materialele se vor degrada în timp, sistemul în care produsul va fi integrat, interfețele [8].

Produsele care vor fi expuse la radiații de tip particule / UV (radiație solară, oxigen atomic) vor fi evaluate pentru a determina capacitatea lor de a rezista la tipul și gradul de dozare a radiației așteptat în timpul misiunii.

Analiza de transfer de căldură abordată în această lucrare stabilește comportamentul DC-LATM din punct de vedere termic în condiții de spațiu.

2. MODELUL MATEMATIC

Metoda cea mai utilizată pentru evaluarea comportamentului termic al mașinilor electrice se bazează pe modelele numerice bi- și tri-dimensionale. Analiza numerică se va realiza cu ajutorul unui pachet de programe care are la bază metoda elementului finit [6 – 9]. Folosind modelarea numerică, se va putea stabili timpul în care temperatura din înfășurare ajunge la valoarea maximă admisă pentru motorul de cuplu cu unghi limitat, în condiții de spațiu.

Această lucrare prezintă analiza, dezvoltarea și prezentarea modelelor numerice tridimensionale pentru un motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat, talie 10, cu 2 poli, simbolizat DC-LATM-S cu caracteristicile tehnice specifice TQR-10/2-0.35 [10]. Motorul este proiectat pentru aplicații care necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular, respectiv $\pm 90^\circ$ [11 – 14, 16 - 18]. Motorul este construit folosind materiale magnetice dure (magneții permanenți din pământuri rare), materiale magnetice moi (tablă electrotehnică Fe-Si pentru pachetul stator), oțel feromagnetic pentru jugul rotoric și cupru pentru bobinaj. Magneții pe bază de pământuri rare sunt de tipul Sm₂Co₁₇ 28H și sunt caracterizați de inducții remanente de 1,09 T.

Pentru studiul transferului de căldură în DC-LATM, se folosesc modele numerice tridimensionale, folosind metoda elementului finit [15, 19 - 25].

Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat DC-LATM-S este construit în clasa F de izolație. Astfel, temperatura maximă admisă este de 155°C.

Problema de transfer de căldură în DC-LATM este rezolvată pentru conducție termică și radiație termică. Sunt elaborate și analizate modelele matematice pentru estimarea temperaturilor în înfășurarea DC-LATM, în regimuri tranzitorii, cu sursă internă de căldură reprezentată de înfășurarea motorului. Modelele 3D reflectă soluția constructivă a acestuia, însă sunt considerate anumite ipoteze simplificatoare (nu se folosesc tole pentru pachetul statoric ci material masiv, nu se consideră conductoare ci material masiv pentru bobinaj).

Transferul de căldură prin radiație termică se realizează prin unde electromagnetice. Radiația termică este emisă de orice substanță care are o temperatură finită și este în esență un proces legat de suprafețele corpurilor [8]. Legea Stefan-Boltzmann exprimă fluxul de căldură maxim la care radiația termică poate fi emisă de suprafața unui corp, numit radiator ideal sau corp negru [8]. Valorile emisivității găsite în literatura de specialitate sunt doar valori approximate pentru materialele reale. O gamă de valori a emisivităților este de obicei dată pentru multe materiale a căror emisivitate poate fi afectată de rugozitatea suprafeței (gradul de

finisare). Emisivitatea este un număr cuprins între 0 și 1, egal cu 1 în cazul radiatorului ideal sau corp negru. Fluxul de căldură radiativ emis de o suprafață reală, „gri”, este o fracție a celei emise de suprafața neagră [8].

Ecuția pentru transferul de căldură care apare 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/m³] este densitatea materialului, C_p [J/kg K] este capacitatea calorică, t [s] este timpul, T [K] este temperatura, k [Wm⁻¹K⁻¹] este conductivitatea termică și Q [W/m³] este sursa de căldură.

Pe frontieră s-a considerat radiație față de mediul ambiant

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

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

unde T_{inf} [K] este temperatura de referință, E este emisivitatea suprafeței, T [K] este temperatura mediului ambiant, J_0 [W/m²] este radiozitatea suprafeței, G [W/m²] este iradiația mediului ambiant și σ este constanta Stefan - Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴). Deși în relația generală (2) este prezentată și o componentă de convecție pentru transferul de căldură pe frontieră, în modelul numeric se consideră doar radiație pe frontiera motorului cu exteriorul.

3. STUDII DE CÂMP TERMIC PENTRU UN MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT, DC-LATM-S

În studiul numeric al acestui motor, au fost folosite modele numerice tri-dimensionale pentru analiza termică în regim tranzitoriu ale motorului prezentat pentru a se putea observa distribuția temperaturii în motor.

3.1 Motor montat în carcasă

Modelul tri-dimensional conține pachetul de tole, sursa de căldură - înfășurarea statorică înglobată în rășină epoxidică, carcasa și magneții permanenți de excitație situați pe jugul rotor. Motorul introdus într-o carcasă este prezentat în Fig. 1.

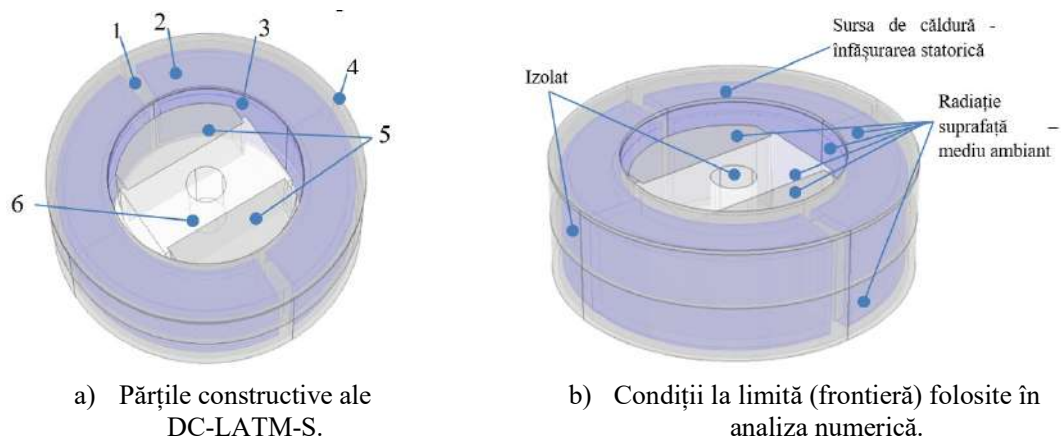


Fig. 1. Părțile constructive și condițiile la limită (frontieră) folosite în analiza numerică.

Figura 1 evidențiază elementele constructive ale motorului folosite în modelul numeric

tri-dimensional: 1 – pachetul de tole din tablă electrotehnică Fe-Si (Oțel M19); 2 – bobinaj din cupru; 3 – rășină epoxidică; 4 – carcasă din inox nemagnetic; 5 – magneți pe bază de pământuri rare de tip $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 28H; 6 – jugul rotoric din oțel feromagnetic.

Proprietățile materialelor folosite în calculul câmpului termic sunt prezentate în Tabelul 1:

Tabelul 1. Proprietățile materialelor folosite în calculul câmpului termic [13]

Denumire material	Proprietate	Simbol	Valoare	Unitate de măsură
1. Oțel M19	Conductivitate termică	k	24,9	W/(m·K)
	Densitate	ρ	7800	kg/m ³
	Capacitatea calorică	C_p	460	J/(kg K)
2. Cupru	Conductivitate termică	k	400	W/(m·K)
	Densitate	ρ	8700	kg/m ³
	Capacitatea calorică	C_p	385	J/kg K
3. Rășină epoxidică	Conductivitate termică	k	0,2	W/(m·K)
	Densitate	ρ	1200	kg/m ³
	Capacitatea calorică	C_p	1200	J/kg K
	Emisivitatea suprafeței	E_{rad}	0,2 ÷ 1	-
4. Inox nemagnetic	Conductivitate termică	k	16,1	W/(m·K)
	Densitate	ρ	8027	kg/m ³
	Capacitatea calorică	C_p	0,2 ÷ 1	J/kg K
	Emisivitatea suprafeței	E_{rad}	0,2 ÷ 1	-
5. Magneți $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 28H	Conductivitate termică	k	11,63	W/(m·K)
	Densitate	ρ	8,12	g/cm ³
	Capacitatea calorică	C_p	335	J/kg K
	Emisivitatea suprafeței	E_{rad}	0,2 ÷ 1	-
6. Oțel feromagnetic	Conductivitate termică	k	24,9	W/(m·K)
	Densitate	ρ	7800	kg/m ³
	Capacitatea calorică	C_p	460	J/kg K
	Emisivitatea suprafeței	E_{rad}	0,2 ÷ 1	-

În studiul de câmp termic au fost considerate două valori ale curentului. Ca ipoteză de lucru vor fi analizate numeric variante în care condițiile la limită (frontieră) vor lua în calcul valori diferite ale emisivității suprafețelor motorului variind în intervalul 0,2 ÷ 1. Toate aceste variante sunt prezentate în diagrama logică din Fig. 2.

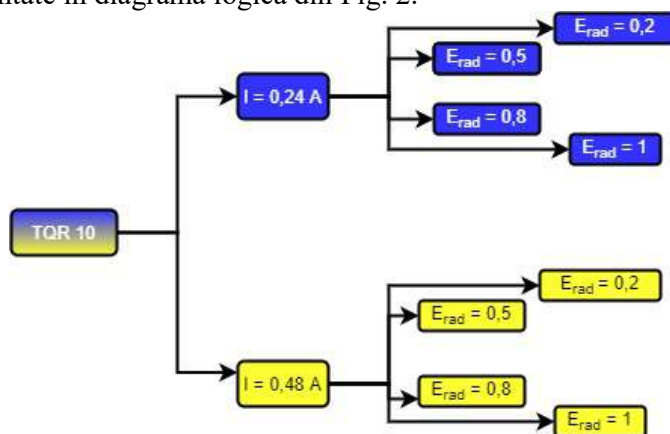


Fig. 2. Variante de funcționare abordate în analiza numerică.

Soluția constructivă consideră motorul montat în carcasă. S-au analizat numeric două cazuri de funcționare ($1/3 \cdot I_m$ și $2/3 \cdot I_m$, I_m fiind curentul maxim).

3.1.1 Curentul DC LATM: $I = 0,24 A$

S-a considerat curentul motorului de cuplu de curent continuu cu unghi limitat ca fiind: $I = 0,24 \text{ A}$ (cazul considerat presupune funcționarea motorului la $1/3 \cdot I_m$, I_m fiind curentul maxim, pentru o perioadă scurtă de timp).

Motorul abordat este în clasa F de izolație. Prin urmare, temperatura maximă admisă a DC-LATM-S este de 155°C . Analiza numerică și-a propus să determine timpul în care temperatura din înfășurare ajunge la temperatura maximă admisă, considerând temperatura mediului ambiant de 22°C . S-a analizat numeric distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu. Rezultatele din etapa de postprocesare sunt prezentate în Fig. 3.

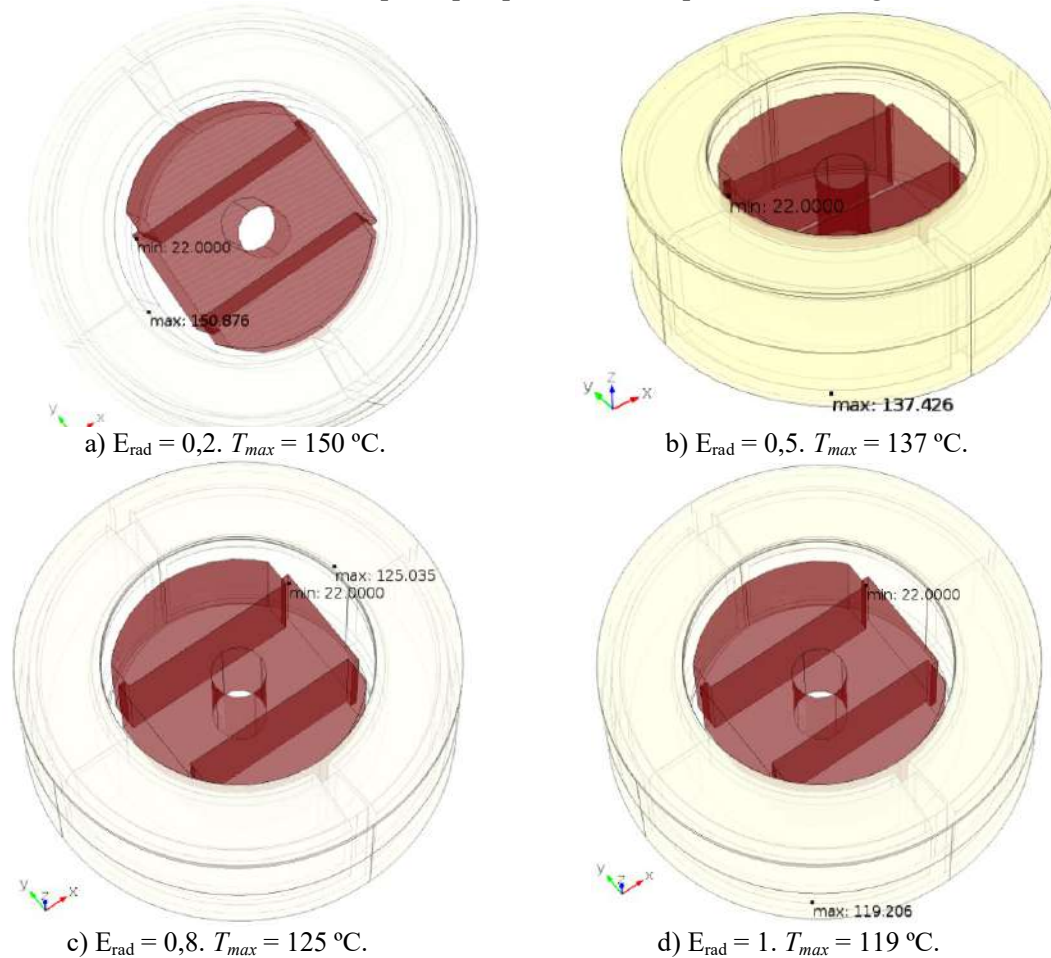


Fig. 3. Distribuția temperaturii în întreg motorul, $t = 10 \text{ min}$.

Figura 3 prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu după $t = 10 \text{ min}$, considerând diferite emisivități ale materialelor. Temperatura maximă se află în înfășurarea motorului (sursa de căldură) și variază punctual (de ordinul sutimilor de grad). Condițiile de frontieră pe carcasa motorului (izolat pe partea de sus a carcasei și radiație suprafață – mediu ambiant pe partea de jos a acesteia) conduc la o diferență de temperatură în rezultatele de postprocesare. Această diferență nu este vizibilă pe carcasa motorului, așa cum se poate observa în Fig. 3, deoarece condiția de radiație suprafață – mediu ambiant cu un coeficient al emisivității materialelor cuprins între $0,2 \div 1$ are o influență similară cu cea a condiției de izolare termică. De exemplu, în cazul emisivității egală cu 1, diferența valorilor temperaturii între cele două suprafețe este de $0,5^\circ\text{C}$.

Se poate observa că temperatura scade cu creșterea emisivității. La $t = 10 \text{ min}$, pentru cazul în care $E_{\text{rad}} = 0,2$ valoarea temperaturii este $T = 150^\circ\text{C}$, pentru $E_{\text{rad}} = 0,5$ valoarea

temperaturii este $T = 137\text{ }^{\circ}\text{C}$, pentru $E_{\text{rad}} = 0,8$ valoarea temperaturii este $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ iar pentru $E_{\text{rad}} = 1$ valoarea temperaturii este $T = 119\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 4 prezintă graficul temperaturii considerând cazurile în care valorile emisivității materialelor diferă, și anume, $E_{\text{rad}} = 0,2$, $E_{\text{rad}} = 0,5$, $E_{\text{rad}} = 0,8$ și $E_{\text{rad}} = 1$.

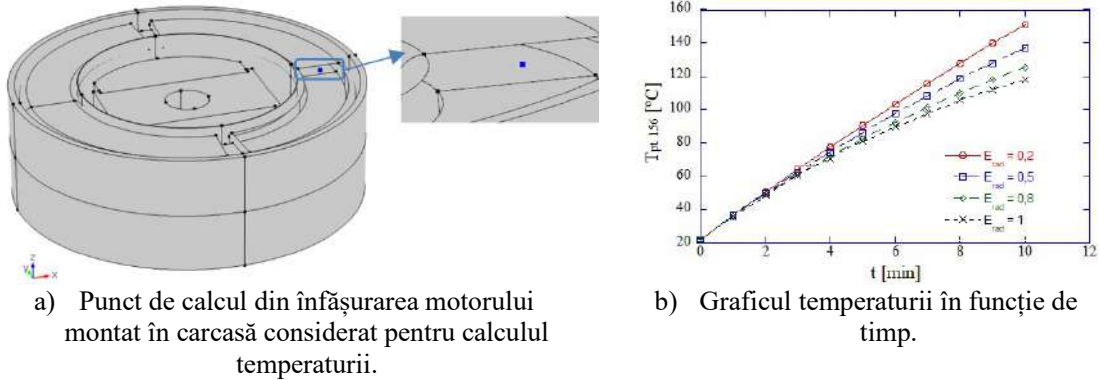


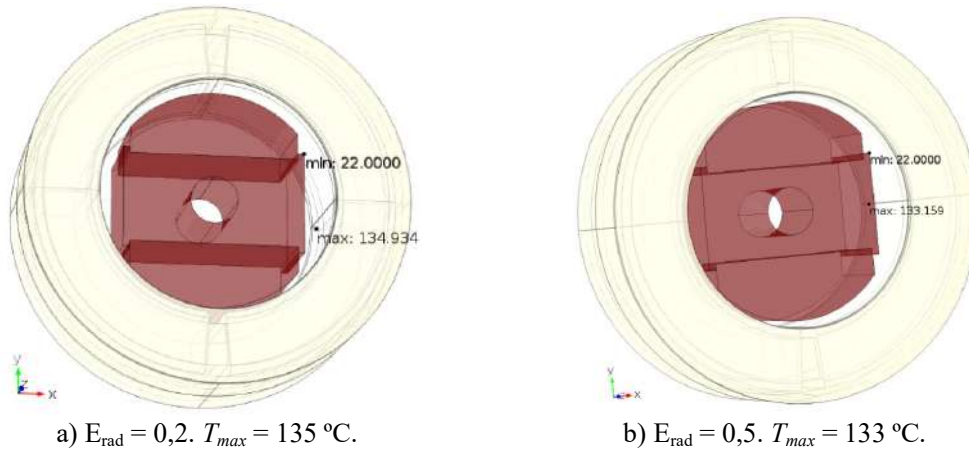
Fig. 4. Graficul temperaturii în punctul evidențiat din înfășurarea motorului, $t=10$ min.

Figura 4 b) prezintă valoarea temperaturii în punctul evidențiat din înfășurarea motorului prezentat în Fig. 4 a), la $t = 10$ min. Se poate observa că temperatura scade cu creșterea valorii emisivității E_{rad} .

3.1.2 Curentul DC LATM: $I = 0,48\text{ A}$

S-a considerat curentul motorului de cuplu de curent continuu cu unghi limitat ca fiind: $I = 0,48\text{ A}$ (cazul considerat presupune funcționarea motorului la $2/3 \cdot I_m$, I_m fiind curentul maxim, pentru o perioadă scurtă de timp).

S-a analizat numeric distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu. Rezultatele din etapa de postprocesare sunt prezentate în Fig. 5.



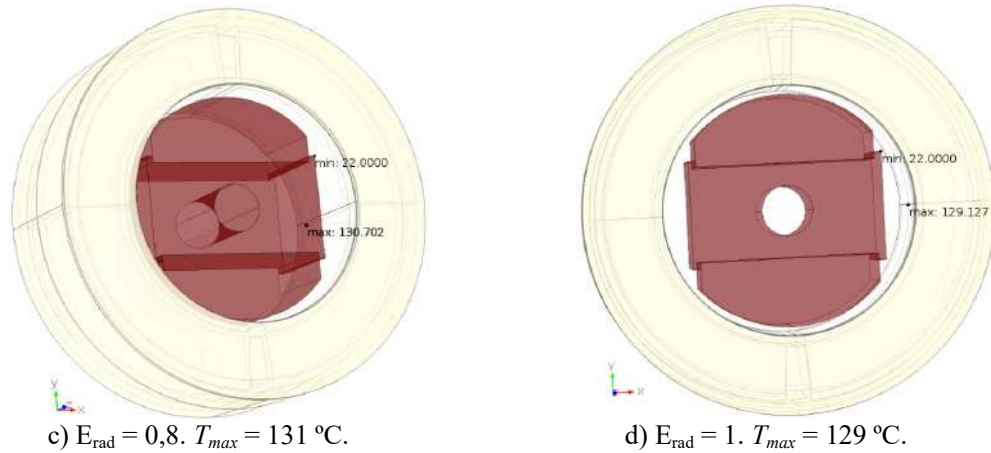


Fig. 5. Distribuția temperaturii în întreg motorul, $t = 2$ min.

Figura 5 evidențiază distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu. Și în acest caz, temperatura maximă se află în înfășurarea motorului (sursa de căldură) și variază punctual (de ordinul sutimilor de grad). Condițiile la limită (frontieră) pe carcasa motorului conduc la o diferență de temperatură în rezultatele de postprocesare. Și în acest caz, această diferență nu este vizibilă pe carcasa motorului, așa cum se poate observa în Fig. 5. La $t = 2$ min, distribuția temperaturii în întreg motorul arată că temperatura în înfășurarea statorică scade cu creșterea emisivității E_{rad} . Constatând timpul în care temperatura maximă în înfășurarea statorică ajunge la valoarea maximă admisă pentru clasa motorului și anume $t = 2$ min, graficul temperaturii funcție de timp este prezentat în Fig. 6. Temperatura este calculată în același punct de calcul din înfășurarea motorului montat în carcasă considerat și în cazul funcționării motorului la $I = 0,24$ A, evidențiat în Fig. 4.

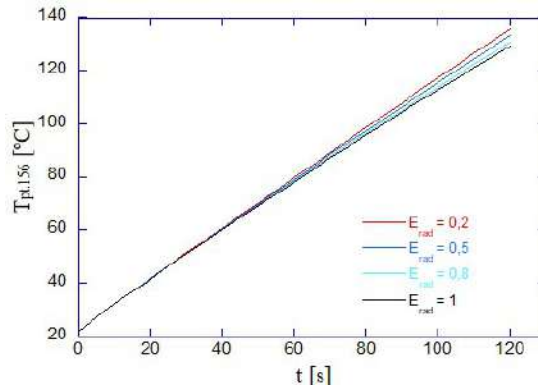


Fig. 6. Graficul temperaturii în funcție de timp, $t=120$ s.

Din Figura 6 se poate observa că valoarea temperaturii este mai ridicată în acest caz comparativ cu varianta precedentă în care $I = 0,24$ A. În cel mai defavorabil caz, $E_{rad} = 0,2$, temperatura ajunge la o valoare egală cu 135 °C la $t = 120$ s.

4. CONCLUZII

În această lucrare s-a prezentat analiza termică a unui motor de cuplu cu unghi limitat, folosind modele numerice tridimensionale, în condiții speciale, de spațiu. Astfel, transferul de căldură s-a realizat doar prin conducție (în interiorul subsansamblurilor) și radiație (între subsansambluri și mediul ambiant).

În studiul de câmp termic au fost considerate două valori ale curentului (cazul considerat a presupus funcționarea motorului la $1/3 \cdot I_m$ și $2/3 \cdot I_m$, I_m fiind curentul maxim).

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 $0,2 \div 1$.

Cu ajutorul modelării termice, s-a stabilit timpul în care temperatura din înfășurare ajunge la valoarea maximă admisă pentru motorul considerat.

În cazul $I = 0,24 A$, la $t = 10$ min, pentru cazul în care $E_{rad} = 0,2$ valoarea temperaturii este $T = 150$ °C, pentru $E_{rad} = 0,5$ valoarea temperaturii este $T = 137$ °C, pentru $E_{rad} = 0,8$ valoarea temperaturii este $T = 125$ °C iar pentru $E_{rad} = 1$ valoarea temperaturii este $T = 119$ °C. Graficul temperaturii în punctul evidențiat din înfășurarea motorului la $t=10$ min arată scăderea temperaturii cu creșterea emisivității materialelor.

În cazul $I = 0,48 A$, s-au prezentat rezultatele analizelor numerice și graficul temperaturii în funcție de timp la $t=120$ s. Valoarea temperaturii este mai ridicată la această variantă comparativ cu cea precedentă în care $I = 0,24 A$. În cel mai defavorabil caz, $E_{rad} = 0,2$, temperatura ajunge la o valoare egală cu 135 °C la $t = 120$ s.

În ambele cazuri prezentate, temperatura maximă se află în înfășurarea motorului (sursa de căldură) și variază punctual (de ordinul sutimilor de grad). Condițiile de frontieră pe carcasa motorului (izolat pe partea de sus a carcasei și radiație suprafață – mediu ambiant pe partea de jos a acesteia) conduc la o diferență de temperatură în rezultatele de postprocesare. Această diferență nu este vizibilă pe carcasa motorului deoarece condiția de radiație suprafață – mediu ambiant cu un coeficient al emisivității materialelor cuprins între $0,2 \div 1$ are o influență similară cu cea a condiției de izolare termică. De exemplu, în cazul emisivității egală cu 1, diferența valorilor temperaturii între cele două suprafețe este de $0,5$ °C.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Stoia D., "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, vol.93, no.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, vol.42, no.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] Ipe 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, Vol. 51, No. 5/2011, pp.75-83.
- [12] Andrei M.I., Modreanu N.M., "Numeric Modelling of a Two-Channel Limited Angle Torque Motor", in EEA – Electrotehnică, Electronică, Automatică, Editura. ELECTRA, Vol. 62, Nr. 1, 2014 pp. 26-31.
- [13] Măgureanu R., Mașini electrice speciale pentru sisteme automate, Editura Tehnică, București, 1981.
- [14] Andrei M.I., Modreanu M., Ghițulescu L., "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, Vol. 62, No. 3, Jun-Sep. 2014 pp. 11-17.

- [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, ISBN 9780124713703, <https://doi.org/10.1016/B978-012471370-3/50008-5>.
- [20] A. Boglietti, A. Cavagnino, D.A. Staton, "Thermal Analysis of TEFC 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, Vol. 39, Issue 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, Vol. 39, Issue 5, pp. 1314 – 1322, 2003.
- [23] E. Lebenhaft, "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, No. 37, pp. 10 – 11, 2001.