

## STUDII DE CÂMP ELECTROMAGNETIC ȘI TERMIC PENTRU MAȘINI ELECTRICE SPECIALE

Ioana IONICĂ<sup>1,2</sup>, Mircea MODREANU<sup>1</sup>, Alexandru M. MOREGA<sup>2</sup>, Cristian BOBOC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Icpe, București, România

<sup>2</sup>Universitatea Politehnică din București, București, România,  
ioana.messico@icpe.ro, mircea.messico@icpe.ro, amm@iem.pub.ro,  
cristianboboc.messico@icpe.ro

**Rezumat:** Această lucrare își propune analiza electromagnetică și termică pentru un motor de cuplu cu unghi limitat, folosind modele numerice bi- și tri-dimensionale. Sunt considerate o serie de modelări și simulări care sunt utilizate în proiectare, în vederea stabilirii unei soluții constructive optime din punct de vedere al tuturor cerințelor motorului stabilite în Specificația Tehnică. Cu ajutorul modelării termice se stabilește timpul în care temperatura din înfășurări ajunge la valoarea maximă admisă pentru motorul de cuplu cu unghi limitat. Modelarea numerică oferă posibilitatea evaluării diferitelor configurații ale motorului de cuplu cu unghi limitat.

### 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, elementele suplimentare de transmisie mecanică (cuplajele elastice și reductoarele) nemaifiind necesare [1-3]. Motoarele DC-LATM sunt destinate aplicațiilor care necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular [4].

Aceste tipuri de motoare nu au sistemul perie-colector al motoarelor clasice de curent continuu, prin urmare nu prezintă cuplu de frecări mecanice. De asemenea, DC-LATM au un cuplu de agățare magnetică foarte redus, ceea ce le recomandă pentru acționări cu unghi limitat, cu performanțe foarte ridicate [5]. Datorită lipsei creșterilor 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 mare sau multipolară, pentru domeniu unghiular mai mic și cuplu maxim mare [6]. Sursele de câmp magnetic din acest DC-LATM sunt înfășurările statorice parcurse 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, tehnică militară, medical etc. Pentru aplicațiile speciale (de exemplu aerospațial) este necesară asigurarea unei redundanțe a sistemelor [7].

### 2. MODELUL MATEMATIC

Metoda cea mai utilizată pentru evaluarea comportamentului electromagnetic și termic al mașinilor electrice se bazează pe modelele numerice bidimensionale și tridimensionale.

Modelarea numerică se va realiza cu ajutorul unui pachet de programe pentru modelare electromagnetică care are la bază metoda elementului finit [4 - 8]. Folosind modelarea numerică, se pot evalua cu precizie ridicată diferite configurații pentru o mașină electrică, însă fără a se mai realiza modelul experimental. Astfel, se reduce la minimum numărul modelelor fabricate în faza de prototipizare, ceea ce reprezintă un avantaj economic deoarece se reduc costurile.

Această lucrare prezintă analiza, dezvoltarea și prezentarea modelelor numerice bidimensionale și tridimensionale pentru un motor de cuplu de curent continuu cu unghi limitat, tip TQR 10/2. Motorul este proiectat pentru aplicații care necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular, respectiv  $\pm 90^\circ$ . 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  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  28H și sunt caracterizați de inducții remanente de 1.09 T.

Cuplul electromagnetic, principalul parametru funcțional al acestui tip de motor este [9 - 11]

$$M = 2 \cdot p \cdot R_{\text{rot}} \cdot F_{\text{pol}}, \quad (1)$$

unde  $p$  este numărul perechilor de poli,  $R_{\text{rot}}$  [m] este brațul forței, iar  $F_{\text{pol}}$  [N] este forța electromagnetică pe un pol

$$F_{\text{pol}} = B_{\delta} \cdot N \cdot \frac{\alpha_p}{\tau} \cdot I_p \cdot l_{\text{pachet}}. \quad (2)$$

Aici,  $B_{\delta}$  [T] este inducția magnetică medie în întrefier,  $N$  este numărul de conductoare al unei bobine (pe un pol),  $\tau$  este pasul polar,  $I_p$  [A] este curentul prin bobinaj iar  $l_{\text{pachet}}$  este lungimea pachetului de tole.

Formula analitică de calcul a cuplului (1) ține cont de structura motorului (Fig. 1). Pe baza acestor formule analitice, a fost dezvoltat un algoritm iterativ de calcul al principalilor parametri ai motorului [1].

Astfel, se stabilesc datele modelului: dimensiunile magneților, materiale, date de bobinaj, caracteristicile magneților etc. Rezultatele calculului analitic sunt folosite pentru a defini modelul electromagnetic al mașinii electrice, care va fi rezolvat cu ajutorul modelării numerice. Modelarea numerică se va realiza cu ajutorul COMSOL Multiphysics, un pachet de programe pentru modelare electromagnetică ce are la bază metoda elementului finit [12 - 13].

Prin procesul de modelare, se urmărește calcularea unor mărimi și caracteristici specifice motoarelor de cuplu cu unghi limitat: inducția magnetică în circuitul magnetic al motorului și caracteristica cuplu-unghi pe domeniul de lucru al motorului [14 - 16].

Într-o primă etapă sunt folosite modele fizice bidimensionale simplificate, care rețin doar componentele constructive importante din punct de vedere magnetic: sursele de câmp magnetic, înfășurările statorice și magneții permanenți de excitație, situați pe rotor [14] și regimul magnetic staționar, prin ecuațiile

- 1) Legea circuitului magnetic (legea lui Ampere)

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}. \quad (3)$$

- 2) Legea fluxului magnetic (legea lui Gauss pentru magnetism)

$$\text{div} \vec{B} = 0. \quad (4)$$

- 3) Relația constitutivă de material

$$\overline{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu_r \overline{\mathbf{H}} + \overline{\mathbf{B}}_r, \quad (5)$$

unde:  $\mathbf{H}$  [A/m] este intensitatea câmpului magnetic,  $\mathbf{J}$  [A/m<sup>2</sup>] este densitatea de curent,  $\mathbf{B}$  [T] este inducția magnetică,  $B_r$  [T] este inducția magnetică remanentă,  $\mu_0$  este permeabilitatea magnetică a vidului iar  $\mu_r$  permeabilitatea magnetică relativă.

Inducția este câmp solenoidal, astfel, conform ecuației (4), se va folosi formularea în potențial magnetic vector  $\mathbf{A}$  [T/m]

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}. \quad (6)$$

Bobinele se definesc prin curentul injectat, aria secțiunii conductorului și numărul de spire, excitarea acestora făcându-se prin densitatea de curent,

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{I}_{\text{coil}}}{S}. \quad (7)$$

unde:  $I_{\text{coil}}$  [A] este curentul injectat,  $S$  [m<sup>2</sup>] este aria secțiunii conductorului, iar  $N$  reprezintă numărul de spire. Tensorul tensiunilor Maxwell  $T_2$  [N/m<sup>2</sup>] [15,16]

$$n_1 T_2 = -\frac{1}{2} n_1 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}) + (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{H}) \mathbf{B}^T, \quad (8)$$

este utilizat pentru calculul cuplului față de un punct  $O$

$$\mathbf{M}_0 = \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times (\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{T}_2) dS, \quad (9)$$

unde  $\mathbf{M}_0$  [Nm] este cuplul electromagnetic,  $\mathbf{r}_0$  este originea axei de rotație (în care este centrat modelul), iar  $\partial\Omega$  este frontiera domeniului de calcul.

Pentru studiul transferului de căldură în mașinile electrice, se folosesc modele numerice bidimensionale și tridimensionale, folosind metoda elementului finit [17 - 22].

Motorul considerat este construit în clasa F de izolație. Astfel, temperatura maximă admisă este de 155°C.

Au fost folosite modele numerice tridimensionale pentru analiza termică în regim tranzitoriu a motorului prezentat anterior. Modelele 3D reflectă soluția constructivă reală a motorului.

Ecuația pentru transferul de căldură care apare prin conducție între părțile solide, în regim tranzitoriu este

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q, \quad (10)$$

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

Pe frontieră, s-a considerat răcire prin convecție naturală:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = h(T_{\text{amb}} - T). \quad (11)$$

unde  $k$  [Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>] este conductivitatea termică,  $T$  [K] este temperatura,  $h$  [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>] coeficientul de transfer de căldură prin convecție și  $T_{\text{amb}}$  este temperatura ambientală.

### 3. STUDII DE CÂMP ELECTROMAGNETIC PENTRU UN MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT, TQR 10/2

Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat TQR 10/2 este destinat aplicațiilor ce

necesită rotirea într-un anumit domeniu unghiular.

Acest tip de motor prezintă particularități constructive (Fig. 1), și anume: folosirea materialelor magnetice dure (magneți permanenți) și materialelor magnetice moi (tablă pentru pachetul stator).

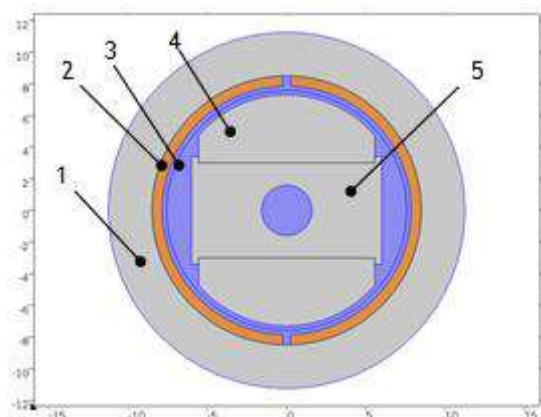


Fig. 1. Părțile constructive folosite în modelarea numerică. Dimensiunile sunt în milimetri

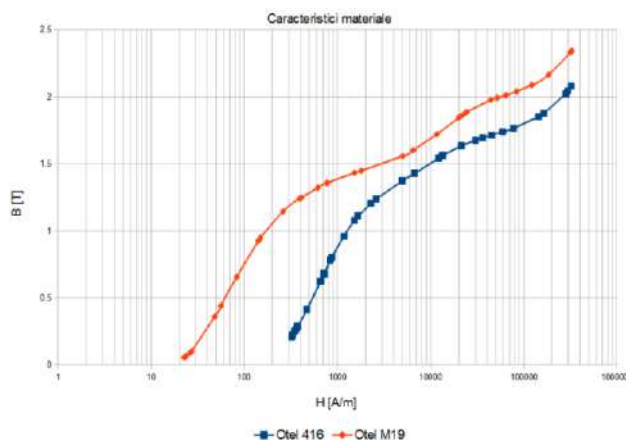


Fig. 2. Caracteristicile B-H pentru materialele feromagnetice

Figura 1 evidențiază elementele constructive ale motorului folosite în modelul numeric bidimensional. În construcția circuitului magnetic se folosesc atât materiale magnetice dure pentru magneții permanenți cât și materiale magnetice moi pentru pachetul statoric [4], astfel:

- 1- tablă electrotehnică Fe-Si (Oțel M19) pentru pachetul de tole;
- 2- cupru pentru bobinaj;
- 4- magneți pe bază de pământuri rare de tip  $Sm_2CO_{17}$  28H;
- 5- oțel feromagnetic pentru jugul rotoric.

Proprietățile magnetice ale materialelor folosite în calculul câmpului electromagnetic sunt descrise în tabelul următor:

**Tabel 1. Proprietățile magnetice ale materialelor folosite în calculul câmpului electromagnetic [13]**

Denumire material	Proprietate	Nume	Valoare	Unitate de măsură
Oțel M19	Conductivitate electrică	$\sigma$	1.12e7	[S/m]
	Permitivitate relativă	$\epsilon_r$	1	-
Cupru	Permeabilitate relativă	$\mu_r$	1	-
	Permitivitate relativă	$\epsilon_r$	1	-
	Conductivitate electrică	$\sigma$	5.998e7	[S/m]
Magneți $Sm_2CO_{17}$ 28H	Conductivitate electrică	$\sigma$	1176000	[S/m]
	Permeabilitate relativă	$\mu_r$	1.093	-
	Permitivitate relativă	$\epsilon_r$	1	-
	Inducția remanentă	$B_r$	1.09	[T]
Oțel feromagnetic	Conductivitate electrică	$\sigma$	1.12e7	[S/m]
	Permitivitate relativă	$\epsilon_r$	1	-

Părțile constructive folosite în modelarea numerică și caracteristicile B-H pentru materialele feromagnetice sunt prezentate în Fig. 1.

Au fost studiate diferite cazuri și pe baza lor, s-a stabilit varianta constructivă a modelului experimental. Programul de modelare permite realizarea de diferite modele geometrice, precum și

evaluarea acestora în vederea obținerii geometriei cu cele mai bune caracteristici funcționale. În studiul efectuat au fost considerate principalele părți componente: statorul (torul bobinat) și rotorul (axul cu magnetii permanenți și doi magneti) (Fig. 1).

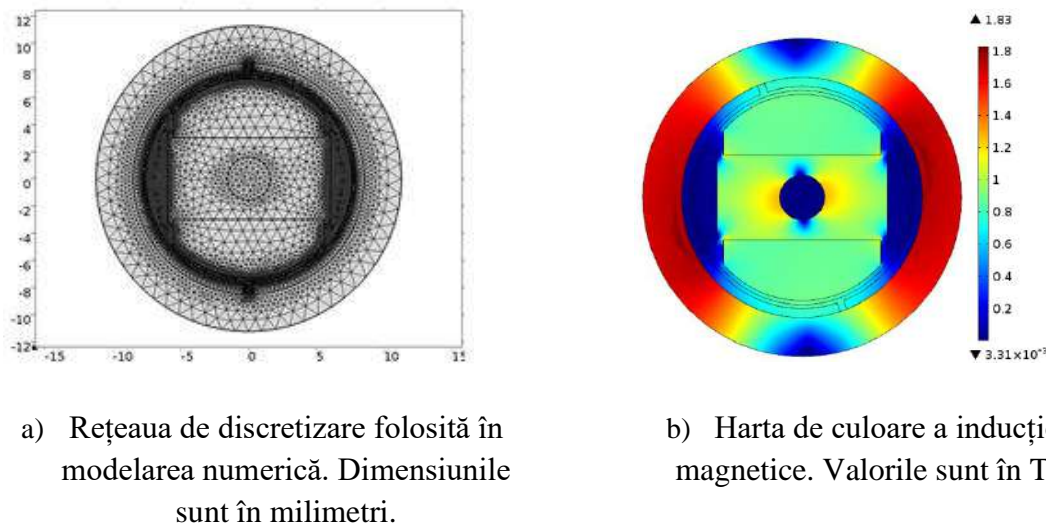


Fig. 3 Rețeaua de discretizare și inducția magnetică pentru TQR 10/2.

Figura 3. arată harta de culoare a inducției magnetice, care evidențiază anumite secțiuni ale statorului care se apropie de limita de saturație (punctual, aceste valori ating o valoare maximă a inducției magnetice egală cu 1.83 T). Valorile inducției magnetice obținute sunt acceptabile pentru materialele alese.

Pentru caracteristica cuplu-unghi a fost realizat un studiu parametric față de poziția relativă stator-rotor. Incrementul unghiular este ales convenabil astfel încât să satisfacă atât acuratețea caracteristicii cuplu-unghi cât și timpul de calcul al modelului.

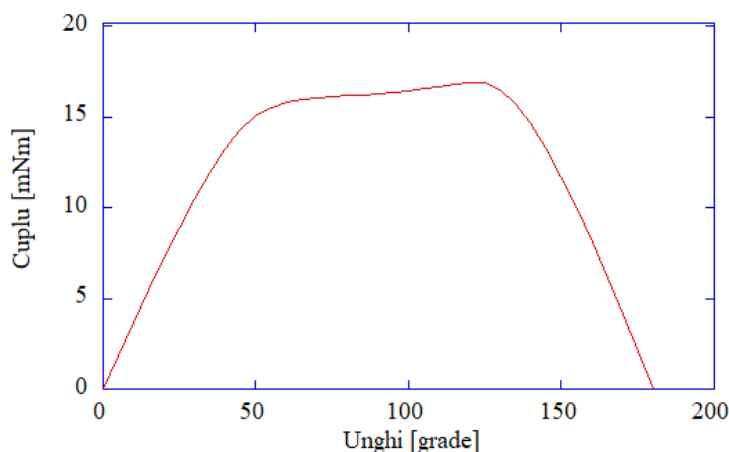


Fig. 4 Caracteristica cuplu-unghi.

În continuare este dezvoltat un model mai realist, tridimensional, care elimină ipotezele simplificatoare ale modelului bidimensional. Ca și modelul bidimensional, modelul tridimensional conține doar componentele semnificative din punct de vedere electromagnetic: sursele de câmp magnetic, înfășurările statorice și magnetii permanenți de excitație, situați pe rotor.

Figura 5 prezintă părțile constructive ale modelului utilizat în modelarea numerică: (1) pachetul de tole stator; (2) înfășurarea statorului; (3) întrefierul, (4) magnetul, (5) arborele rotorului și (6) domeniul de aer. Pentru modelarea tridimensională s-a ales prima variantă a modelului bidimensional diferită din punct de vedere al soluției constructive, deoarece aceasta a produs

valori mai mari ale cuplului.

Problema câmpului magnetic este închisă la distanță finită (Fig. 5) utilizând un volum finit de aer. Proprietățile magnetice ale materialelor folosite în calculul câmpului electromagnetic sunt descrise în Tabel 1..

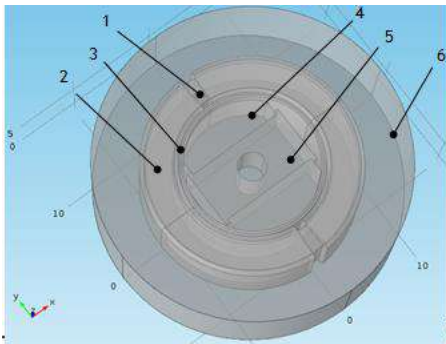


Fig. 5. Părțile constructive folosite în modelarea numerică. Dimensiunile sunt în milimetri.

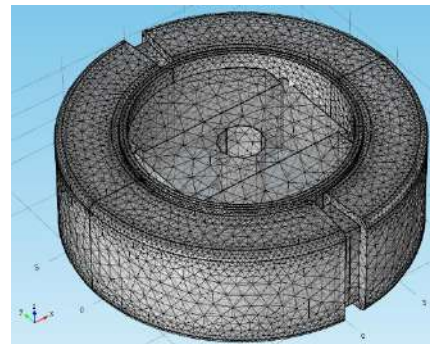


Fig. 6. Rețeaua de discretizare.

În figurile 7 și 8 sunt prezentate: harta de culoare a inducției magnetice, spectrul liniilor de câmp și circuitul magnetic. Se poate observa că valoarea maximă a inducției atinge 1.4 T în stator, valoare acceptabilă pentru materialele alese în analiza numerică a acestui tip de motor.

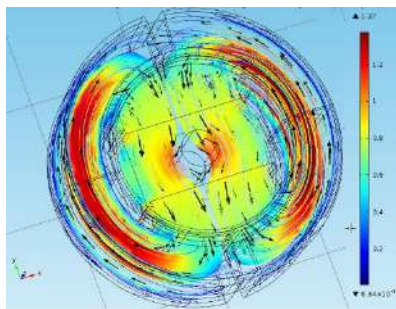


Fig. 7. Spectrul liniilor de câmp și direcția câmpului magnetic.

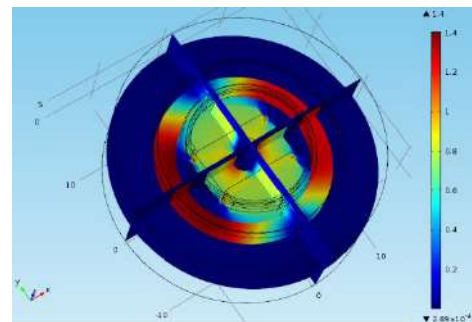


Fig. 8. Harta de culoare a inducției magnetice. Valorile sunt în Tesla.

Caracteristicile cuplu-unghi pentru modelele numerice bi- și tridimensionale obținute în urma modelării numerice sunt prezentate în Fig. 9.

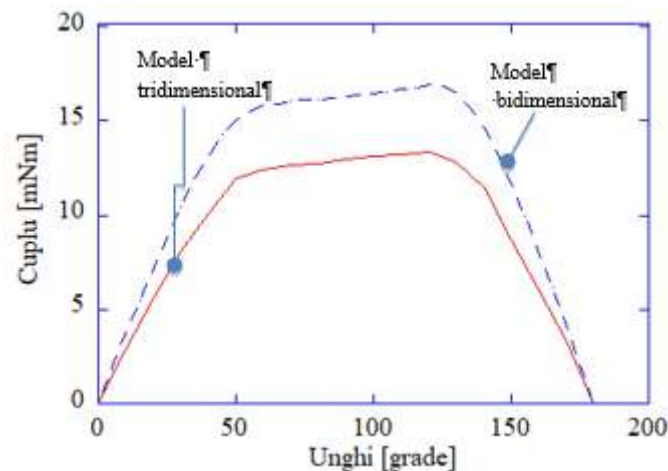


Fig. 9. Caracteristica cuplu-unghi obținută din modelele numerice bi- și tridimensionale.

Valorile cuplului obținute din modelul 3D sunt mai mici decât cele produse de modelul

bidimensional. O comparație a celor două modele este prezentată în Fig. 9. Această diferență între valorile cuplului se poate datora faptului că modelele numerice bidimensionale se bazează pe ipoteze simplificatoare, care presupun că toate părțile modelului au aceeași lungime axială. Aceste ipoteze simplificatoare sunt eliminate în modelele numerice tridimensionale.

#### 4. STUDII DE CÂMP TERMIC PENTRU UN MOTOR DE CUPLU DE CURENT CONTINUU CU UNGHI LIMITAT, TQR 10/2

Motorul de cuplu de curent continuu cu unghi limitat de tip TQR-10/2 este construit în clasa F de izolație. În studiul numeric al acestui motor, au fost folosite modele numerice tridimensionale pentru analiza termică în regim tranzitoriu ale motorului prezentat pentru a se putea observa distribuția temperaturii în motor.

Modelul tri-dimensional conține pachetul de tole, sursa de căldură - înfășurările statorice, magnetii permanenți de excitație și situați pe rotor.

##### 4.1. Motor cu carcasă

Motorul este introdus într-o carcasă și este prezentat în Fig. 10.

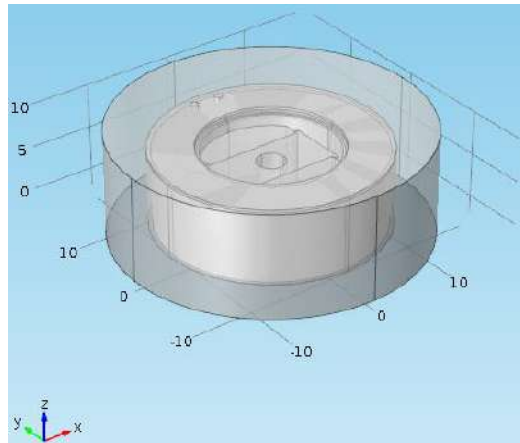


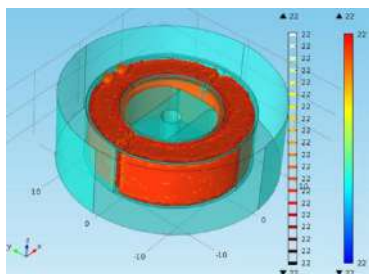
Fig. 10. Modelul tridimensional al motorului de cuplu cu unghi limitat.

##### 4.1.1 Curentul DC LATM: $I = 0.243 A$

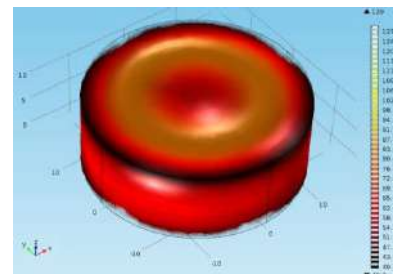
S-a considerat curentul motorului de cuplu de curent continuu cu unghi limitat ca fiind:  $I = 0.243 A$  (cazul considerat presupune funcționarea motorului la  $1/3 \cdot I_p$ ,  $I_p$  fiind curentul de vârf, pentru o perioadă scurtă de timp).

##### Regim tranzitoriu

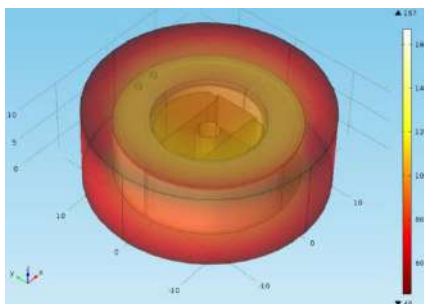
- Coeficientul de transfer de căldură prin convecție:  $h = 8 Wm^{-2}K^{-1}$



a)  $t = 0$  min.



b)  $t = 10$  min.

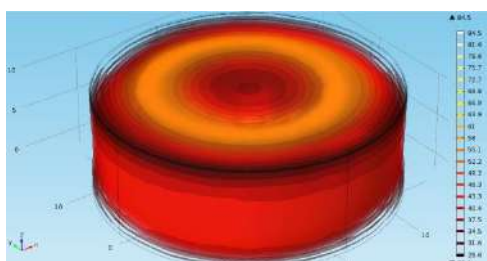


c)  $t = 15$  min.

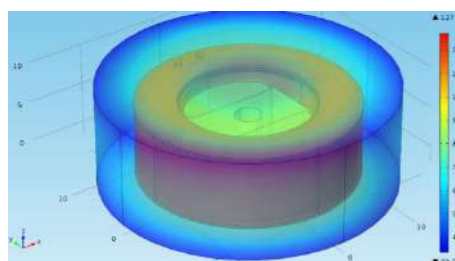
Fig. 11. a) – c) Distribuția temperaturii în întreg motorul.

Figura 11 prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, la  $t = 0, 10$  și  $15$  min. Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la o valoare egală cu  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  în înfășurările motorului la  $t = 10$  min.

- Coeficientul de transfer de căldură prin convecție:  $h = 10\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



a)  $t = 5$  min.



b)  $t = 10$  min.

Fig. 12. a) – b) Distribuția temperaturii în întreg motorul.

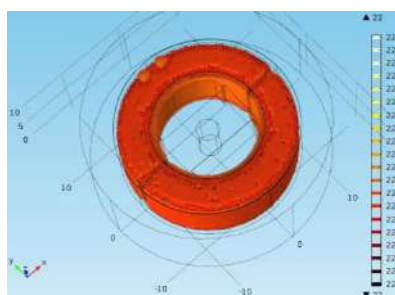
Figura 12 prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu,  $h = 10\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , la  $t = 5$  și  $10$  min. Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la valoarea maximă de  $126\text{ }^{\circ}\text{C}$  în înfășurările motorului la  $t = 10$  min.

#### 4.1.2 Curentul DC LATM: $I = 0.48667\text{ A}$

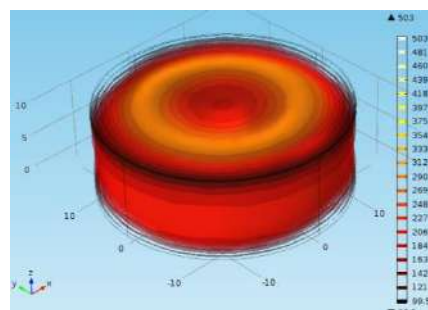
S-a considerat curentul motorului de cuplu de curent continuu cu unghi limitat ca fiind:  $I = 0.48667\text{ A}$  (presupunând funcționarea motorului la  $2/3 \cdot I_p$  analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii în motorul studiat). A fost folosit modelul geometric al motorului prezentat în Fig. 10.

#### Regim tranzitoriu

- Coeficientul de transfer de căldură prin convecție:  $h = 8\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



a)  $t = 0$  min.



b)  $t = 10$  min.

Fig. 13. a) – b) Distribuția temperaturii în întreg motorul.

Figura 13 prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu,  $h = 8\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , la  $t = 0$  și  $10$  min. Analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii, funcție de coeficientul de transfer de căldură prin convecție și implicit determinarea timpului în care



temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă.

#### 4.2. Motor cu carcasă și ax

Motorul este introdus într-o carcasă și este prezentat în Fig. 14.

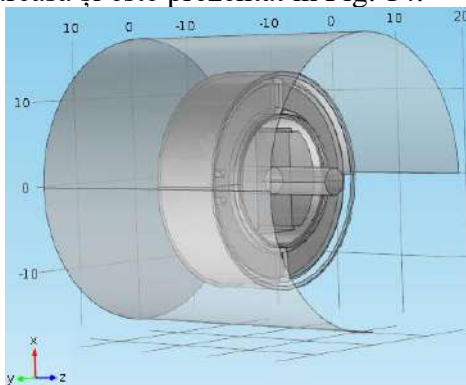


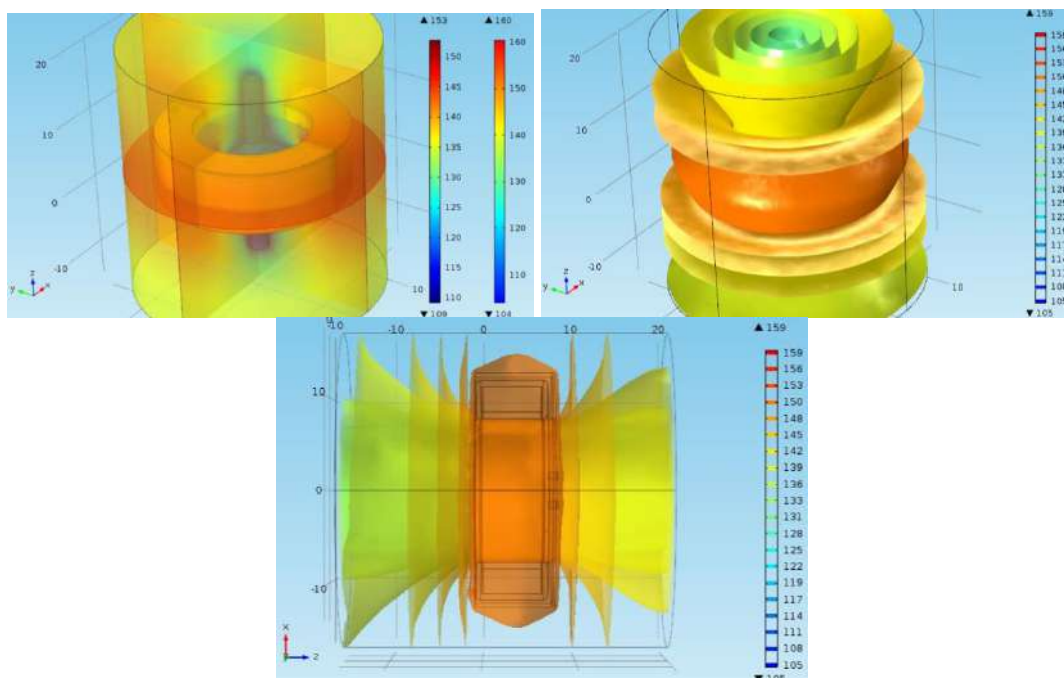
Fig. 14. Modelul tridimensional al motorului de cuplu cu unghi limitat.

##### 4.2.1 Curentul DC LATM: $I = 0.243 A$

S-a considerat curentul motorului de cuplu de curent continuu cu unghi limitat ca fiind:  $I = 0.243 A$  (cazul considerat presupune funcționarea motorului la  $1/3 \cdot I_p$ ,  $I_p$  fiind curentul de vârf, pentru o perioadă scurtă de timp).

##### Regim tranzitoriu

- Complet izolat

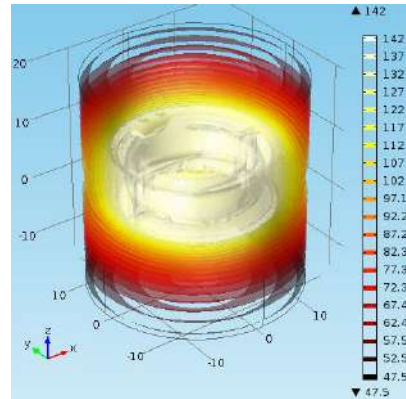
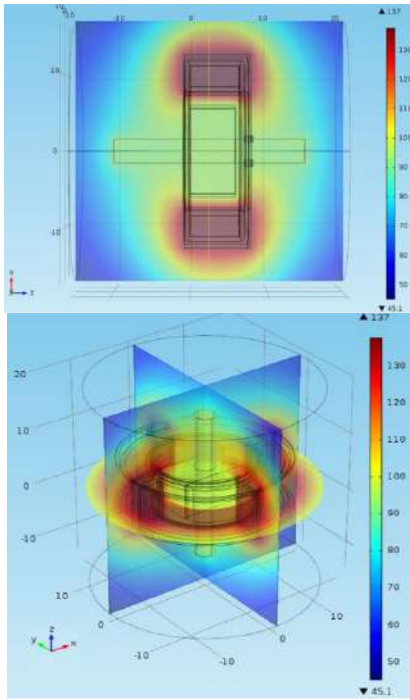


a)  $t = 10 \text{ min.}$

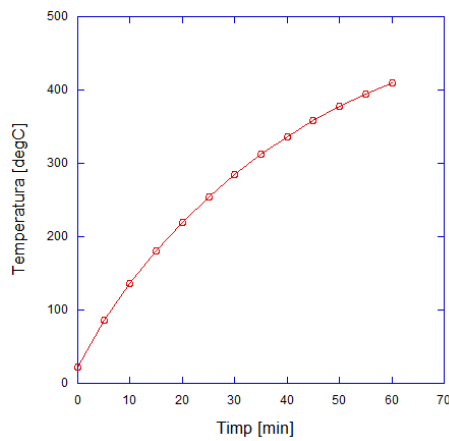
Fig. 15. a) Distribuția temperaturii în întreg motorul.

Figura 15 prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu, complet izolat, la  $t = 10 \text{ min.}$  Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la o valoare egală cu  $160^\circ\text{C}$  la  $t = 10 \text{ min}$  în înfășurările motorului când nu există transfer de căldură cu exteriorul.

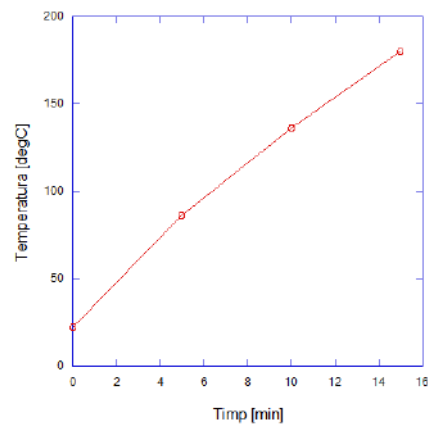
- Coeficientul de transfer de căldură prin convecție:  $h = 2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



a)  $t = 10$  min;

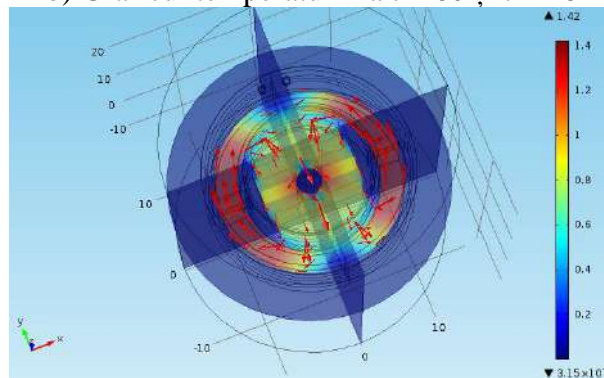


$t = 60$  min.



$t = 16$  min.

b) Graficul temperaturii la  $t = 60$  și  $t = 16$  min



b) Harta de culoare a inducției magnetice.

Fig. 16. a) Distribuția temperaturii în întreg motorul la  $t = 10$  min; b) Graficul temperaturii în înfășurarea motorului, la  $t = 60$  min și c) Harta de culoare a inducției magnetice. Valorile sunt în Tesla.

Figura 16 a) prezintă distribuția temperaturii în întreg motorul în regim tranzitoriu,  $h = 2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , la  $t = 10$  min, b) reprezintă graficul temperaturii la  $t = 60$  min și c) reprezintă

harta de culoare a inducției magnetice. Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la o valoare egală cu 142°C la  $t = 10$  min. Temperatura maximă admisă a motorului tip TQR-10/2 este de 155°C. Analiza numerică și-a propus să arate evoluția în timp a temperaturii, funcție de coeficientul de transfer de căldură prin convecție și implicit determinarea timpului în care temperatura din înfășurări ajunge la temperatura maximă admisă.

- Coeficientul de transfer de căldură prin convecție:  $h = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

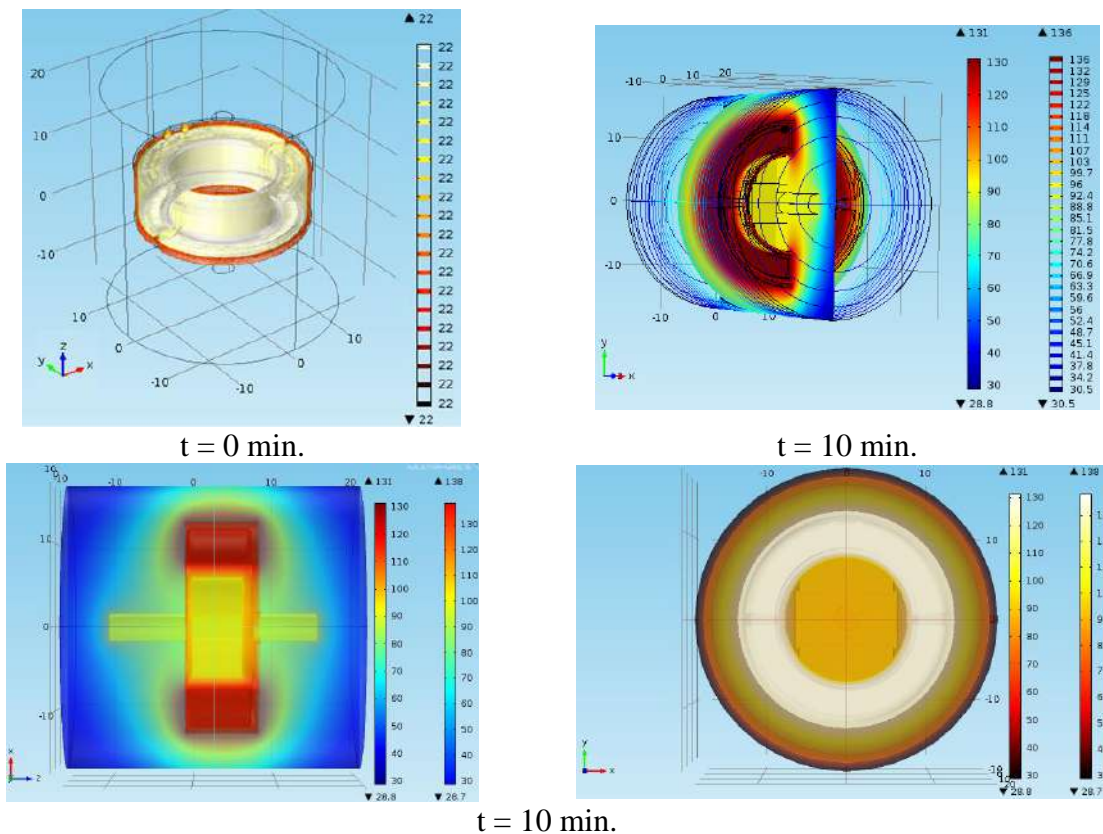


Fig. 17. Distribuția temperaturii în întreg motorul.

Figura 17 prezintă distribuția temperaturii pentru  $h = 5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , la  $t = 10$  min. Se poate observa că anumite zone se încălzesc, temperatura ajungând la o valoare egală cu 138°C la  $t = 10$  min.

## 5. CONCLUZII

Din analiza numerică realizată se poate observa că valorile cuplului pentru modelul bidimensional sunt mai mari comparativ cu valorile cuplului pentru modelul tridimensional. Acest lucru se întâmplă datorită ipotezelor simplificatoare considerate în modelele numerice bidimensionale. Acestea se bazează pe ipoteze simplificatoare, care presupun că toate părțile modelului au aceeași lungime axială.

Prin urmare, pentru rezultate mai apropiate de cele experimentale, a fost realizat un model numeric tridimensional care elimină ipoteza simplificatoare a modelului numeric bidimensional. Rezultatele obținute în urma modelării ne arată o inducție magnetică maximă egală cu 2.37 T. De asemenea, în această lucrare s-a prezentat și analiza termică a motorului de cuplu cu unghi limitat studiat, folosind modele numerice tridimensionale.

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

Au fost considerate mai multe modelări prin variația coeficientului de transfer de căldură prin convecție. Astfel, s-a considerat  $h = (0...10) \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Așa cum era de așteptat, temperatura scade în cazul unui coeficient mare de transfer de căldură prin convecție și crește cu scăderea

coeficientului de transfer de căldură prin convecție, în cazul motorului de cuplu cu unghi limitat considerat.

## 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] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Măgureanu R., *Mașini electrice speciale pentru sisteme automate*, Editura Tehnică, București, 1981.
- [12] 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*.
- [13] Comsol Multiphysics documentation: <http://www.comsol.com/>
- [14] "Componente electromecanice pentru sisteme high tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD", *Raport tehnic*, etapa 1.
- [15] "Componente electromecanice pentru sisteme high tech direct drive realizate cu linii tehnologice flexibile – HTDD", *Raport tehnic*, etapa 2.
- [16] 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.
- [17] A. Boglietti, A. Cavagnino, D.A. Staton, "Thermal Analysis of TEFC Induction Motors", Proc. of IEEE International Conference PEDS 2003, Singapore, 2003.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.