

## MAȘINA ELECTRICĂ SINCRONĂ CU MAGNEȚI PERMANENȚI ÎN CONFIGURAȚIE HALBACH CU STATOR FĂRĂ JUG MAGNETIC ȘI ROTOR EXTERIOR DESTINATĂ APLICAȚIILOR SPECIALE

Bogdan Dumitru VĂRĂTICEANU<sup>1</sup>, Paul MINCIUNESCU<sup>1</sup>, Andrei Emanuel DUMITRU<sup>1</sup> și  
Lucian Nicolae DEMETER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ICPE, Splaiul Unirii, nr.313, 030138, București – România  
email: bogdan.varaticeanu@icpe.ro

**Rezumat.** În lucrare este descrisă o mașină electrică sincronă cu magneți permanenți din pământuri rare în configurație Halbach, cu rotor exterior și stator cu bobine fără jug magnetic din fier. Această mașină electrică este destinată aplicațiilor cu cerințe particulare din punct de vedere al cuplului parazit de agățare magnetică zero, ondulația cuplului electromagnetic semnificativ redusă, lungime axială redusă raportată la dimensiunea diametrul exterior, inerție ridicată a rotorului și randament energetic ridicat. Metoda elementelor finite (FEM) este utilizată pentru analiza structurii mașinii electrice și pentru estimarea performanțelor acesteia.

### 1. INTRODUCERE

Motoarele electrice sunt una din cele mai importante componente care pot oferi putere mecanică continuă mecanismelor folosite în aplicațiile speciale. Motoarele utilizate în astfel de aplicații sunt de cele mai multe ori dezvoltate ca soluții personalizate deoarece anumite caracteristici cum ar fi performanțele tehnice, dimensiunile, randamentul energetic, materialele folosite, dispararea căldurii, etc. sunt specifice fiecărei aplicații.

Mașinile electrice sincrone cu magneți permanenți sunt motoare fără perii fiind o soluție eficientă pentru acționarea mecanismelor speciale. Aceste mașini electrice folosesc comutația electronică pentru a controla curentul prin înfășurarea statorică, eliminând periile și colectorul de la mașina electrică cu perii de curent continuu. În cele mai multe cazuri mașinile electrice sincrone cu magneți permanenți funcționează în buclă închisă având nevoie de un senzor care oferă informații despre poziția unghiulară și despre viteza rotorului.

Prin urmare mașinile electrice sincrone cu magneți permanenți s-au dovedit a fi cea mai bună variantă pentru aplicații speciale [1] datorită caracteristicilor acestora, cum ar fi: durata ridicată de viață, densitatea mare de cuplu, stabilitate ridicată a cuplului (ondulația cuplului redusă), densitate mare de putere, stabilitate ridicată a vitezei (ondulația vitezei redusă), precizie ridicată de control a poziției unghiulare, a vitezei și a cuplului, eficiență energetică ridicată și poate funcționa la viteze ridicate de rotație.

Motorul electric sincron cu magneți permanenți are o capacitate mare de a furniza impulsuri ale cuplului cu valori de peste 5 ori cuplul nominal pentru perioade scurte de timp (limita de timp este fixată de aspecte de natură termică și de riscul de demagnetizare ireversibilă al magneților permanenți).

### 2. CONFIGURAȚIA MAȘINII ELECTRICE SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI

Mașinile electrice folosite în aplicațiile speciale sunt într-o continuă îmbunătățire a caracteristicilor tehnice prin propunerea de configurații noi, utilizarea de materiale cu caracteristici superioare și metode noi de construcție rezultând mașini cu performanțe îmbunătățite și fiabilitate crescută. În acest context ICPE a dezvoltat o nouă configurație de mașini electrice cu performanțe tehnice superioare care permite integrarea în diferite aplicații speciale, cum ar fi: sisteme optice, sisteme giroscopice, sisteme robotice, sisteme spațiale [5], etc.

Noua configurație a mașinii electrice se bazează pe o mașină sincron cu magneți permanenți în configurație Halbach [2], cu rotor exterior și stator cu bobine fără jug magnetic din fier. În Figură 1 este prezentată configurația propusă a mașinii electrice, unde (1) este ansamblul rulmenților, (2) stator în configurație cu bobine fără jug magnetic din fier, (3) magneții permanenți, (4) carcasă și (5) rotor exterior.

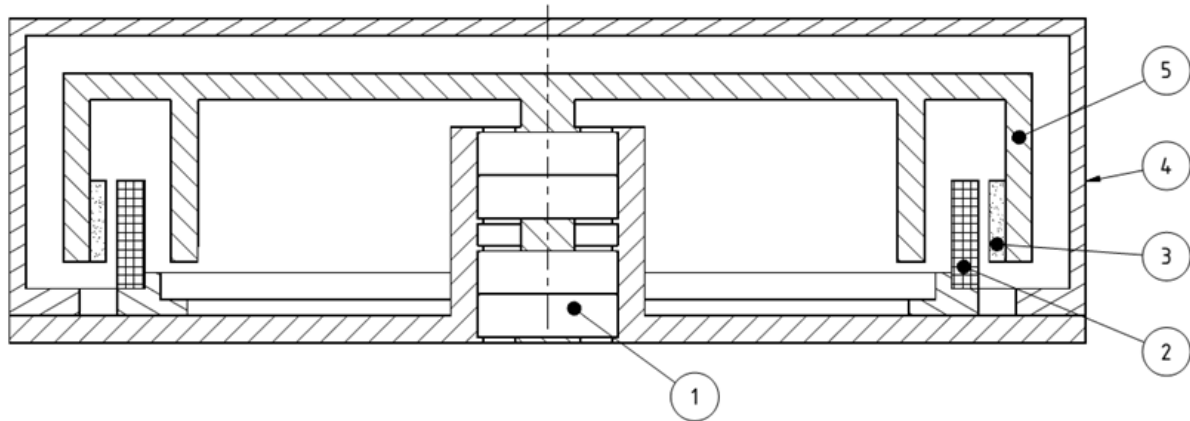


Figura 1. Configurația propusă a mașinii electrice

Configurația mașinii electrice sincrone cu magneți permanenți cu rotor exterior [3] are următoarele avantaje:

- inerție ridicată a rotorului, în acest fel datorită inerției mari rotorul poate înlocui volantul din sistemele giroscopice;
- diametrul mare al rotorului maximizează cuplul electromagnetic care poate fi produs;
- lungimea axială a rotorului va fi mai mică comparativ cu varianta de motor cu rotor interior și același nivel de performanță.

Configurația mașinii electrice sincrone cu magneți permanenți și stator fără jug magnetic [4], [6] are următoarele avantaje:

- pierderile în fier induse în stator sunt zero;
- cuplul parazit de agățare magnetică este zero;
- ondulația cuplului electromagnetic semnificativ redusă.

Înfășurarea statorică nu este plasată în creștături și are un miez magnetic din aer (fără jug magnetic din fier), eliminând cuplurile parazite datorate forței de atracție dintre magneții permanenți și creștăturile statorice. În configurația fără jug magnetic din fier sunt eliminate pierderile datorate efectului de histerezis și pierderile prin curenți turbionari induse în stator, crescând randamentul mașinii electrice oferind posibilitatea acesteia de a funcționa la viteze de rotație ridicate.

### 3. PROIECTAREA ȘI OPTIMIZAREA MAȘINII ELECTRICE

Activitățile de proiectare și simulare a mașinii electrice reprezintă un proces iterativ între calculele electromagnetice și calculele mecanice. Fiecare iterație a procesului de proiectare preliminară se face pe baza următoarelor obiective:

- constrângerile de performanță axate pe randament ridicat, densitate de cuplu mare, densitate de putere mare, cuplu de agățare magnetică zero sau foarte mic, ondulația cuplului electromagnetic redusă;
- constrângeri funcționale axate pe rigiditate crescută, materiale capabile să fie folosite în condiții aspre de funcționare, greutate și volum redus;

- soluție inovativă bazată pe versatilitate, posibilitate de a avea construcție redundantă a înfășurărilor și fiabilitate crescută.

### 3.1 Proiectarea analitică a mașinii sincrone

Mașina electrică sincronă cu magneți permanenți, rotor exterior și stator cu bobine fără jug magnetic din fier poate fi considerată un servosistem (permite un control precis al cuplului, vitezei, și a poziției unghiulare) de acționare directă bazat pe o configurație cu 24 de creștături și 16 poli magnetici.

Rotorul exterior este format din poli magnetici, jugul magnetic exterior și jugul magnetic interior. Statorul mașinii electrice este format dintr-o înfășurare trifazată cu bobine concentrate. Configurația aleasă a înfășurării permite realizarea unei structuri cu sau fără redundanță. Configurația propusă a motorului este prezentată în Figura 2.

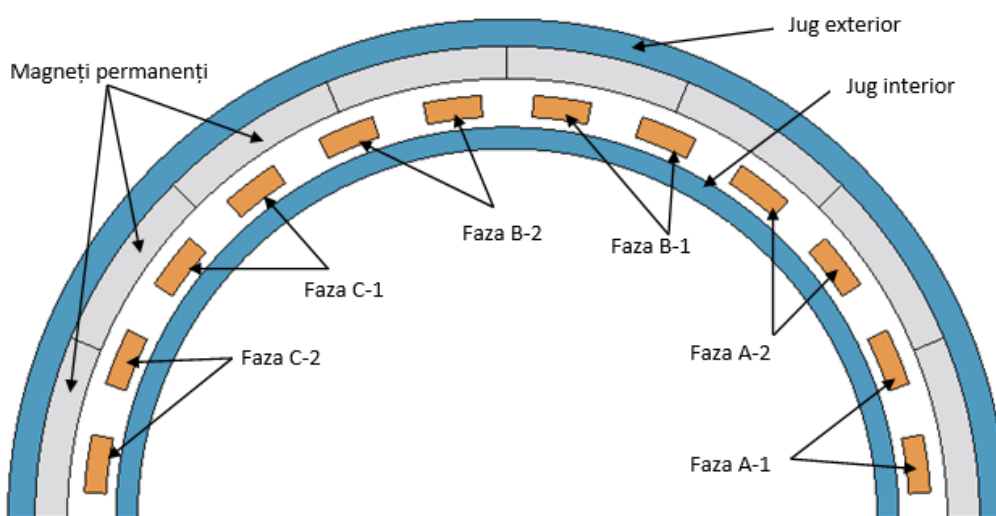


Figura 2. Configurația motorului cu magneți permanenți, rotor exterior și stator cu bobine fără jug magnetic din fier cu înfășurare redundantă

Proiectarea preliminară a mașinii electrice s-a făcut folosind metodele analitice de proiectare a motoarelor electrice cu magneți permanenți. Specificațiile tehnice care au rezultat în urma proiectării sunt prezentate în Tabel 1.

Tabelul 1. Specificația tehnică preliminară a mașinii electrice

Parametru	Valoare
Număr de creștături	24
Număr de poli	16
Diametru exterior	118 mm
Lungime axială maximă	47,5 mm
Întrefier „psihic”	2 mm
Întrefier fizic (distanța magnetică dintre MP și jugul interior)	9 mm
Tipul de MP	SmCo 37MGOe
Viteza nominală	6400 rpm
Viteza de mers în gol	7000 rpm
Tensiunea de alimentare nominală	27 V
Cuplul electromagnetic nominal	0.4 Nm

Puterea nominală	270 W
Număr de faze	3
Tipul înfășurării	Concentrată

### 3.2 Optimizarea configurației Halbach a magneților permanenți

Densitatea de putere a mașinilor electrice cu înfășurări fără jug magnetic poate fi mai mică comparativ cu motoarele cu jug magnetic statoric. Prin folosirea unor magneți permanenți cu densitate mare de energie (cum ar fi SmCo 37MGOe) și prin aranjarea acestora într-o configurație Halbach, densitatea de putere a motorului poate fi mărită. Cu toate acestea principalul dezavantaj al înfășurărilor fără jug magnetic îl reprezintă inductivitatea scăzută care poate influența performanțele dinamice ale motorului.

Rotorul exterior cu magneții aranjați în configurație Halbach necesită o optimizare din două puncte de vedere:

- unghiul de deschidere al celor două tipuri de magneți permanenți care intră în componența configurației Halbach;
- grosimea jugurilor magnetice pentru a reduce greutatea motorului electric și în același timp pentru a evita fenomenul de saturație magnetică.

În aceste condiții optimizarea s-a făcut din punct de vedere al performanțelor electromagnetice (creșterea inducției magnetice din întrefier având ca rezultat creșterea tensiunii electromotoare și creșterea cuplului electromagnetic) și din punct de vedere tehnologic (permițând un proces de fabricație eficient și economic).

Un set de simulări numerice 2D folosind metoda elementului finit (FEM) s-a efectuat pentru a studia diferite unghiuri de deschideri pentru magneții permanenți și pentru a studia grosimea optimă a jugurilor magnetice rotorice (jugul interior și jugul exterior). În Figura 3 de mai jos sunt prezentate o parte a rezultatele obținute în urma simulărilor FEM.

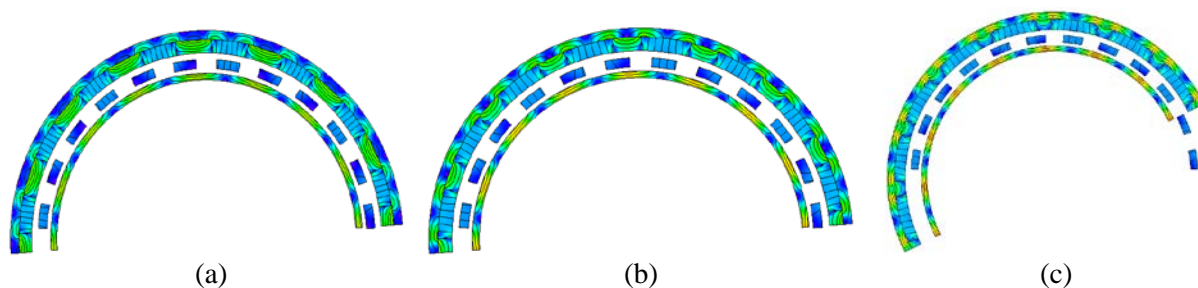


Figura 3.: Liniile de flux și inducția câmpului magnetic pentru diferite configurații Halbach a polilor magnetici: (a) ambii magneți au o deschidere de 11,25 grade, (b) magneți magnetizați radial cu deschidere de 13 grade și magneți magnetizați tangențial cu deschidere de 9,5 grade, (c) magneți magnetizați radial cu deschidere de 15 grade și magneți magnetizați tangențial cu deschidere de 7,5 grade

Tensiunea electromotoare indusă la viteza de rotație de 1000 rpm pentru configurațiile Halbach a polilor magnetici descriși în Figura 3 sunt prezentate mai jos în Figura 4-a. Componenta radială a inducției magnetice simulate în întrefierul mașinii electrice este prezentată în Figura 4-b. Notațiile formelor de undă din Figura 4 au următoarele semnificații:

- MP type 1 reprezintă configurația Halbach a polilor magnetici în care ambii magneți (cu magnetizație radială și tangențială) au deschidere egală de 11,25 grade;
- MP type 2 reprezintă configurația Halbach a polilor magnetici în care magneți magnetizați radial au o deschidere de 13 grade și magneții magnetizați tangențial au o deschidere de 9,5 grade;

- MP type 3 reprezintă configurația Halbach a polilor magnetici în care magneții magnetizați radial au o deschidere de 15 grade și magneții magnetizați tangențial au o deschidere de 7,5 grade.

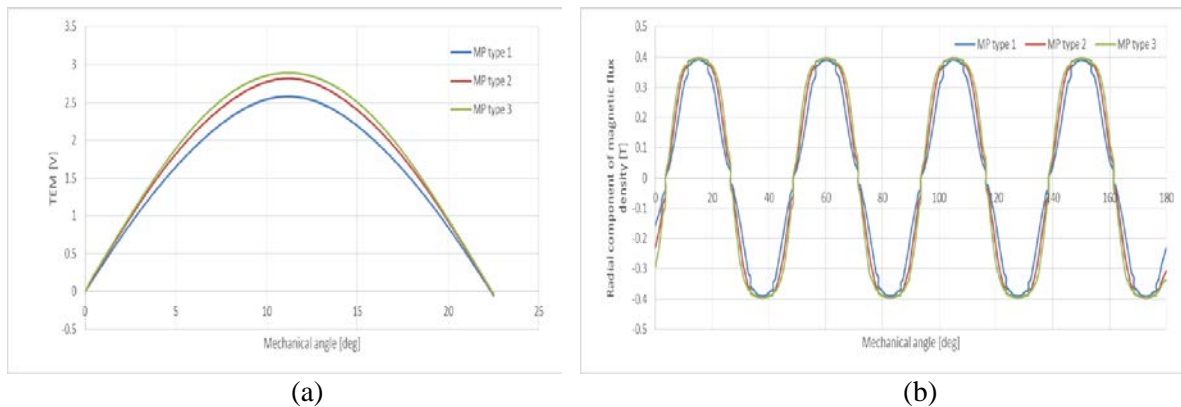


Figura 4.: Performanțele electromagnetice ale mașinii electrice simulate pentru diferite configurații Halbach ale polilor magnetici: (a) tensiunea electromotoare indusă la 1000 rpm, (b) componenta radială a inducției magnetice din întrefier

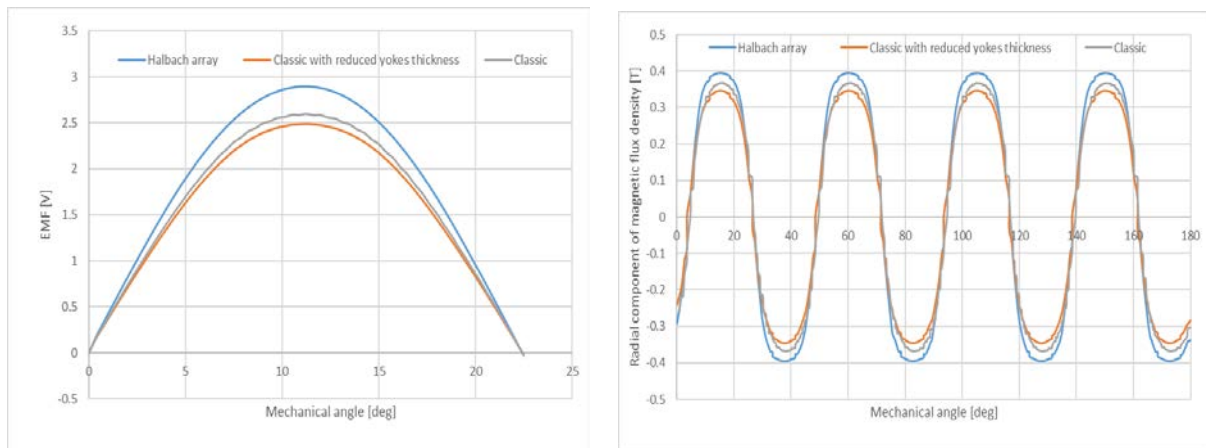
În urma optimizării configurației Halbach a polilor magnetici de pe rotor s-a concluzionat că din punct de vedere al performanțelor electromagnetice dar și din punct de vedere tehnologic configurația MP type 3 din Figura 4 sau configurația (c) din Figura 3 (reprezentând magneții magnetizați radial au o deschidere de 15 grade și magneții magnetizați tangențial au o deschidere de 7,5 grade) reprezintă cea mai bună alegere pentru mașina electrică folosită în aplicațiile speciale.

Pe lângă avantajul legat de creșterea inducției magnetice în întrefier, configurația Halbach oferă posibilitatea de a reduce grosimea jugurilor rotorice (comparativ cu varianta standard cu magneți magnetizați radial) fără o saturare magnetică a acestora. Astfel grosimea jugului rotor exterior a putut fi scăzută de la 5 mm la 4 mm (o reducere de 20% dictată mai mult din motive tehnologice; din punct de vedere electromagnetic grosimea acestui jug putea fi de 3 mm) și grosimea jugului interior poate fi redusă de la 3 la 2 mm (o reducere de 33%) fără a sesiza o creștere semnificativă a nivelului de saturare electromagnetică.

În Figura 5 este prezentată o comparație a tensiunilor electromotoare induse în înfășurarea statorică și a componentei radiale a inducției magnetice în întrefier pentru diferite configurații ale polilor magnetici:

- configurația clasică a motorului (polilor magnetici standard și dimensiune standard a jugurilor);
- configurația Halbach optimizată a polilor magnetici și dimensiune optimizată a jugurilor magnetice;
- configurația clasică a polilor magnetici și juguri magnetice cu dimensiuni optimizate pentru configurația Halbach.

Din punct de vedere al tensiunii electromotoare se observă o creștere de 11,5% pentru configurația Halbach optimizată a polilor magnetici comparativ cu varianta clasică. În același timp rotorul pentru configurația Halbach este mai ușor cu 20% datorită optimizării grosimii jugurilor magnetice (jugul exterior de 4 mm și jugul interior de 2 mm). Comparând configurația Halbach optimizată cu varianta clasică cu juguri magnetice optimizate (ambele configurații au jugurile magnetice rotorice cu aceleași dimensiuni) se poate observa o creștere a tensiunii electromotoare pentru varianta Halbach cu 16%.



(a)

(b)

Figura 5.: Comparație a performanțelor electromagnetice pentru diferite configurații ale polilor magnetici și ale jugurilor pentru motorul sincron, fără perii cu magneți permanenți: (a) tensiunea electromotoare indusă la turația de 1000 rpm, (b) componenta radială a inducției magnetice din întrefier

#### 4. SIMULAREA NUMERICĂ 3D A PERFORMANTELOR ELECTROMAGNETICE A MAȘINII SINCRONE

Geometria finală a mașinii electrice sincrone cu magneți permanenți, cu rotor exterior și cu bobine fără jug magnetic care a rezultat în urma procesului de proiectare și optimizare folosind metode analitice și metode numerice, a fost analizată folosind metoda 3D FEM. Configurația mașinii electrice sincrone cu magneți permanenți permite impunerea condiției de periodicitate pe 90 grade mecanice pentru a reduce domeniul de calcul al problemei 3D.

##### 4.1 Simularea numerică a performanțelor electromagnetice ale mașinii electrice la funcționarea în gol

Distribuția inducției câmpului magnetice la funcționarea în gol este prezentată în Figura 6.

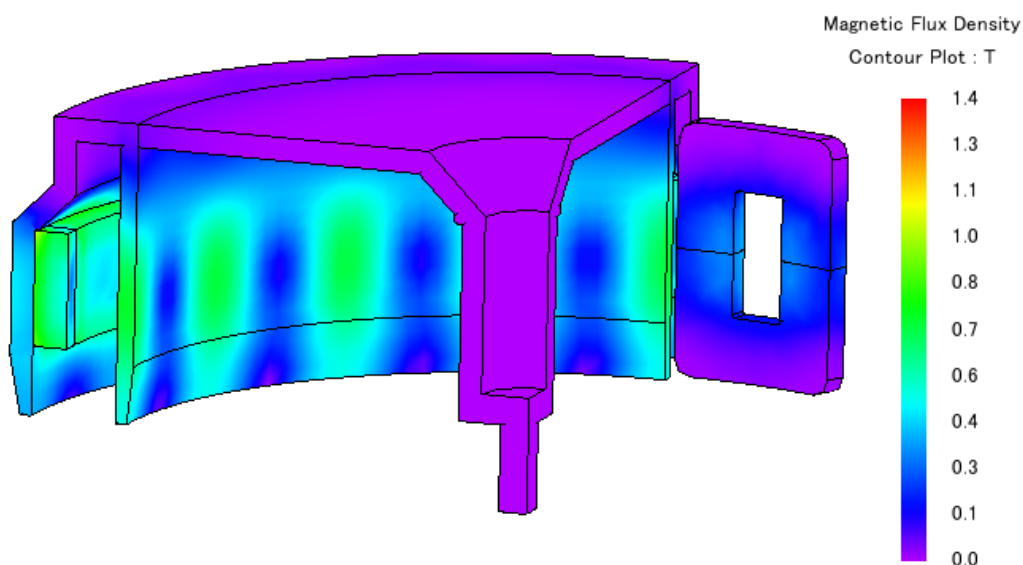


Figura 6.: Distribuția inducției magnetice

Formele de undă ale tensiunilor electromotoare pe fază simulate la turația de 1.000 rpm sunt prezentate în Figura 7-a. În Figura 7-b este prezentată forma de undă a cuplului parazit de agățare magnetică simulat la turație redusă.

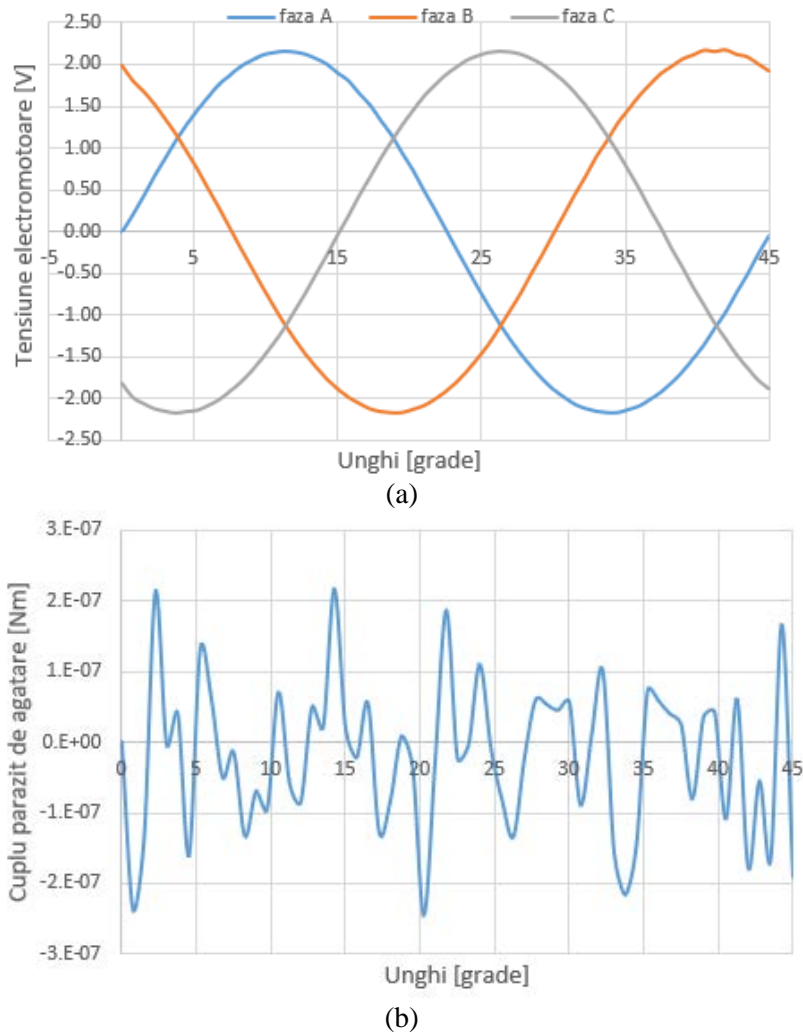


Figura 7.: Performanțele electromagnetice simulate la funcționarea în gol:  
 (a) tensiunea electromotoare pe fază indusă la turația de 1000 rpm, (b) cuplul parazit de agățare magnetică

Tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea statorică are o formă de undă sinusoidală ceea ce demonstrează că motorul electric va permite un control foarte precis al turației și al poziției unghiulare. Valoarea efectivă a tensiunii electromotoare pe fază la turația de 1000 rpm este de 1,5V. Datorită configurației statorice fără circuit magnetic, cuplul parazit de agățare magnetică este nul. În urma simulărilor s-au obținut valori extrem de mici ale cuplului parazit de agățare magnetică de ordinul micro Nm care se datorează erorilor de calcul.

#### 4.1 Simularea numerică a performanțelor electromagnetice ale mașinii electrice la funcționarea în sarcină

Din punct de vedere electromagnetic, cuplul produs de mașina electrică trebuie să aibă o ondulație a cuplului electromagnetic cât mai redusă. Forma de undă a cuplului electromagnetic simulat este prezentată în Figura 8.

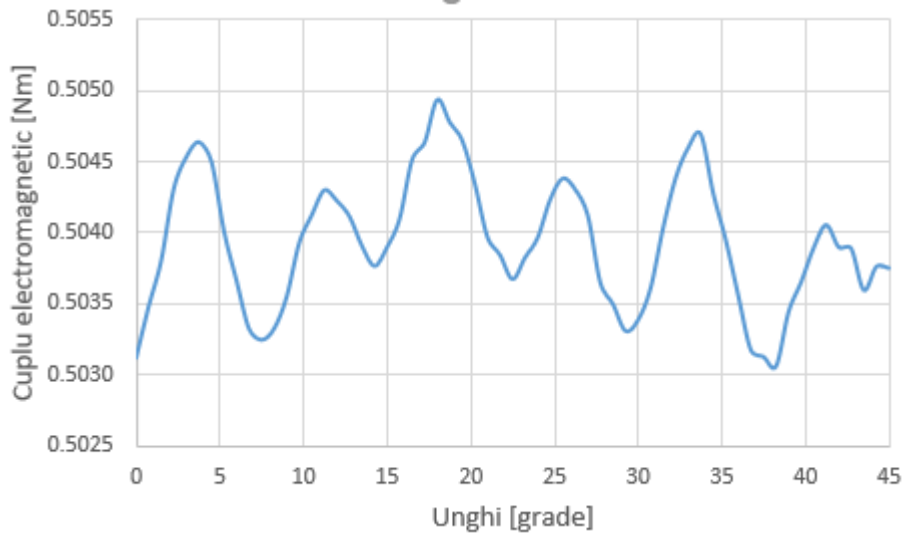


Figura 8.: Forma de undă a cuplului nominal

Prin alimentarea înfășurării statorice cu un curent sinusoidal cu valoarea efectivă de 11,3 A, motorul electric produce un cuplu de 0,5 Nm. Se poate observa că ondulația cuplului electromagnetic este de 0.2 %.

Caracteristicile tehnice ale motorului electric sincron cu magneți permanenți rezultat în urma procesului de proiectare și optimizare sunt prezentate în Tabel 2.

Tabelul 2. Caracteristicile tehnice ale mașinii electrice

Nr. Crt.	Caracteristica	Simbol	Unitate	Mașină sincronă
1.	Putere nominala	$P_n$	W	335
2.	Cuplu nominal	$M_n$	mNm	500
3.	Cuplu parazit maxim	$M_p$	mNm	0
4.	Inertie motor	J	kg·cm <sup>2</sup>	22,5
5.	Numar de poli	$N_p$		16
6.	Clasa de izolare			F
7.	Tensiunea nominala	$U_n$	V <sub>cc</sub>	27
8.	Curentul nominal	$I_n$	A	11,5
9.	Constanta de cuplu	$K_T$	mNm/A	43.5
10.	Constanta TEM	$K_E$	V/krpm	2,6
11.	Turatia nominala	$n_o$	rpm	6400
12.	Turatia de mers în gol	$n_o$	rpm	7000
13.	Rezistenta pe linie	$R_L$	$\Omega$	0.17
14.	Inductivitatea pe linie	$L_L$	mH	0,05

## 5. CONCLUZII

În această lucrare este descrisă o mașină electrică sincronă cu magneți permanenți din pământuri rare în configurație Halbach, cu rotor exterior și stator cu bobine fără jug magnetic din fier destinată aplicațiilor speciale.

Avantajele acestui tip de mașină electrică sunt: randament energetic ridicat, cuplul parazit de agățare magnetică este zero, ondulația cuplului electromagnetic semnificativ redusă, densitate ridicată de cuplu și putere, stabilitate ridicată a vitezei, precizie ridicată de control a poziției unghiulare, a vitezei și a cuplului și poate funcționa la viteze ridicate de rotație.

---

Principalul dezavantaj al acestui tip de mașină electrică îl reprezintă valoarea scăzută a inductivității care poate influența performanțele dinamice ale motorului.

Metoda elementelor finite a fost utilizată pentru optimizarea structurii mașinii electrice și pentru estimarea performanțelor electromagnetice ale acesteia.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

This work was supported by the Executive Agency for Higher Education, Research, Development and Innovation Funding (UEFISCDI) of Romania and by Eurostars Eureka, through the project iTorque - Financial Agreement Eurostars-2019-E!12367-iTorque.

## **BIBLIOGRAFIE**

- [1] J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, “Design of Brushless Permanent-magnet Machines”, *Motor Design Books LLC, USA, 2010*.
- [2] Xu YanliangFeng Kaijie, “Analysis on Toothless Permanent Magnet Machine with Halbach Array”, *IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference 2016*.
- [3] R. A. Inte, F. N. Jurca, B. Vărățiceanu, P. Minciunescu, C. Marțiș, „Performance Analysis of Outer Rotor Synchronous Reluctance Machine with Different Number and Form of Flux Barriers Per Pole”, *Electric Vehicles International Conference, 2019*.
- [4] A. Kaddouri, H. Le-Huy, “Analysis and design of a slotless NdFeB permanent-magnet synchronous motor for direct drive”, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1992*.
- [5] C. Zwysig, T. Baumgartner, J. W. Kolar, “High-Speed Magnetically Levitated Reaction Wheel Demonstrator“, *International Power Electronics Conference - ECCE Asia (IPEC 2014), Hiroshima, Japan, 2014*.
- [6] B.D. Varaticeanu, P. Minciunescu, “Modeling and analysis of dual-sided coreless linear synchronous motor”, *Revue Roumaine Des Sciences Techniques, 60, 1, p. 17–27, 2015*.