

Raport BMEnergy 2013

În cadrul proiectului de cercetare INNOWECS, pe parcursul anului 2013, partenerul si-a desfășurat activitatea urmărind și participând la dezvoltarea rotorului turbinei eoliene împreună cu membrii echipei de proiect din cadrul UTCN. Pe lângă această activitate, a avut o implicare determinanta în alegerea și dezvoltarea unei soluții originale de mașină electrică în vederea integrării ei în sistemul eolian cu scopul de a transforma energia mecanică generată de rotorul turbinei eoliene în energie electrică. Dacă munca depusă în conceperea turbinei eoliene va fi prezentată în raportului echipei din cadrul UTCN, în cele ce urmează vom prezenta soluția de generator aleasă și dezvoltată de partener.

Integrându-se în scopul mai larg al proiectului de a avea un sistem eficient, fiabil, robust și accesibil, generatorul a fost conceput în vederea funcționării cu randament ridicat, dorindu-se în același timp a fi fiabil, ușor de construit și cu un preț de producție mic. Astfel, s-a optat pentru soluția unei mașini electrice cu flux axial formată dintr-un stator și două rotoare având particularitatea unei structuri inovative la nivelul rotoarelor. Structura inovativă a fost propusă cu scopul concentrării fluxului magnetilor permanenți în vederea îmbunătățirii performanțelor mașinii. Munca depusă pe această structură, și inovația propusă a fost încununată cu depunerea unei cereri de brevet la oficiul european de patente.

În cele ce urmează se va prezenta pe scurt mașina electrică cu flux axial din punct de vedere constructiv, după care se va detalia soluția dezvoltată.

1. Mașina electrică cu flux axial

Conceptul mașinilor cu flux axial nu este nou, acest tip de mașină fiind dezvoltat încă din anii 1970. O dată cu apariția noii generații de magneti permanenți pe baza de metale rare, ca magnetul Neodim-Fier-Bor (NdFeB), aceste mașini au devenit atragătoare în special în aplicațiile de viteză mică și cuplu mare, ca de exemplu, în tracțiunea electrică (motor-roată) și în conversia energiei din surse regenerabile, datorită configurației fără perii și a randamentului ridicat.

Masina electrica cu flux-axial si cu magneti permanenti, prezentata in **Figura 1**, e compusa dintr-un numar de discuri rotoare si statoare fixate unul fata de altul prin intermediul unui arbore. Discurile statoare si rotoare sunt separate printr-un spatiu de ordinul milimetrilor numit intrefier. Discurile stator si cel rotor pot fi realizate din material magnetic (exemplu: tole din otel electrotehnic) sau ne-magnetic (exemplu: rasina). Discul rotor are in componenta magneti permanenti plasati circumferential pe suprafata discului, astfel incat sa formeze polii magnetici alternanti (nord si sud) pe fata dinspre stator (**Figura 1A**). Pe de alta parte, discul statoric contine infasurarile care pot fi plasate in crestaturi sau direct in intrefier pe suprafata discului statoric.

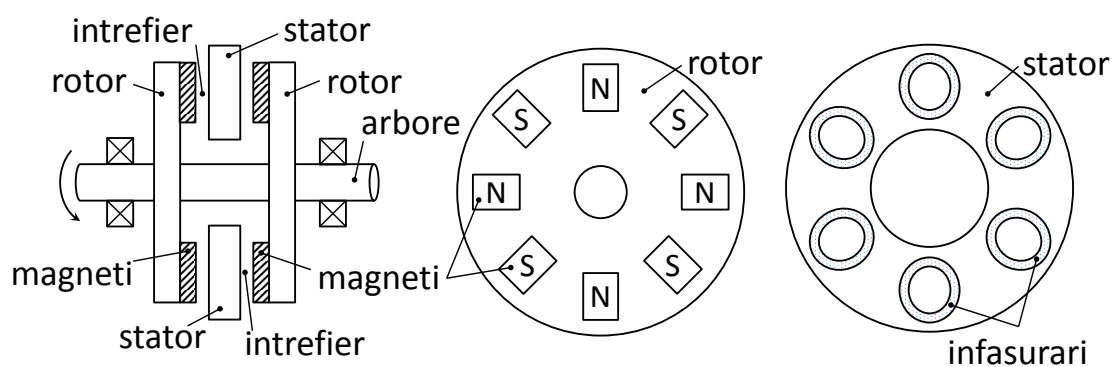


Fig. 1A

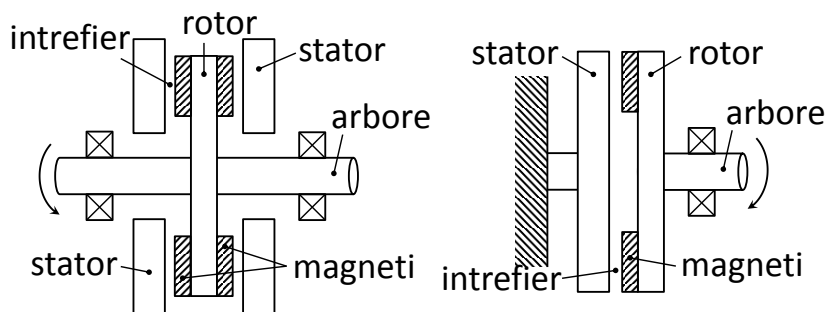


Fig. 1B

Fig. 1C

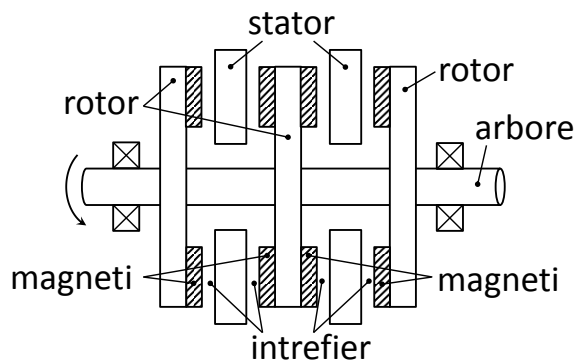


Fig. 1D

Figura 1. Motorul axial: parti componente si forme constructive

Figura 1 prezinta diferitele parti componente ale unei masini cu flux axial si cu magneti permanenti, precum si diferite tipuri de constructie ale masinii. **Figura 1A** prezinta configuratia clasica a masinii cu flux axial comportand un stator invecinat de-o parte si de cealalta de doua rotoare. Pe de alta parte, **Figura 1B** ilustreaza o masina cu un singur rotor invecinat de-o parte si de cealalta cu doua statoare. Masinile axiale nu sunt insa limitate la aceste combinatii ci permit mai multe variante constructive, intre care varianta cu un stator si un rotor, ilustrata in **Figura 1C**, sau cu un numar mai mare de statoare/rotoare ilustrata in **Figura 1D**. In cazul proiectului de fata, s-a optat pentru varianta clasica cu un stator si doua rotoare, la care insa s-a adus o modificare la nivelul constructiei rotorului in vederea concentrarii fluxului magnetic.

2. Masina electrica cu flux axial cu concentratie de flux magnetic

Avand in vedere amplasarea circumferentiala alternanta a magnetilor permanenti pe suprafata discului rotor, in cazul masinilor cu flux axial conventionale, fluxul magnetic din intrefier este limitat la fluxul impus direct de magnetii permanenti. Astfel, in vederea obtinerii unei densitati mari de flux magnetic in intrefier, e necesara folosirea magnetilor permanenti tari ca Samarium-Cobalt (SmCo) sau NdFeB. Din pacate, evolutia recenta a preturilor magnetilor permanenti din metale rare a facut ca acestia sa fie substantial mai costisitori decat magnetii permanenti mai slabi de tipul feritelor. Feritele insa au o remanenta magnetica mica. Astfel, pentru obtinerea unei puteri echivalente, masinile cu flux-axial pe baza de ferite necesita cresterea diametrului masinii fapt care conduce la cresterea masei si al volumului masinii si implicit al costului datorita materialului suplimentar.

In cautarea unei solutii la aceste probleme, s-a propus o structura noua la nivel de rotor, asa cum e ilustrat in **Figura 2**, in care magnetii permanenti **24** nu mai sunt montati pe suprafata discului rotor, ci sunt incastrati radial in interiorul rotorului, fiind intercalati de polii magnetici **22**. Magnetii sunt montati avand in vedere o magnetizare circumferentiala alternanta de tipul NS – SN – NS pentru fiecare din cele doua rotoare. Rolul acestei dispuneri e acela de a concentra fluxul magnetic in polii magnetici, cu urmatoarele avantaje fata de varianta conventionala:

- Densitatea fluxului in polii magnetici e mai mare decat cea din magnetii permanenti, astfel putand fi folositi magneti mai ieftini cu remanenta magnetica mai mica;

- Pentru cresterea densitatii fluxului magnetic la nivelul intrefierului, se poate avea in vedere si lungimea axiala a masinii, nu doar cea radiala;
- In cazul in care se folosesc magneti din metale rare, masina poate fi construita intr-un volum redus si masa mai mica;
- Permite o fixare mai buna a magnetilor permanenti.

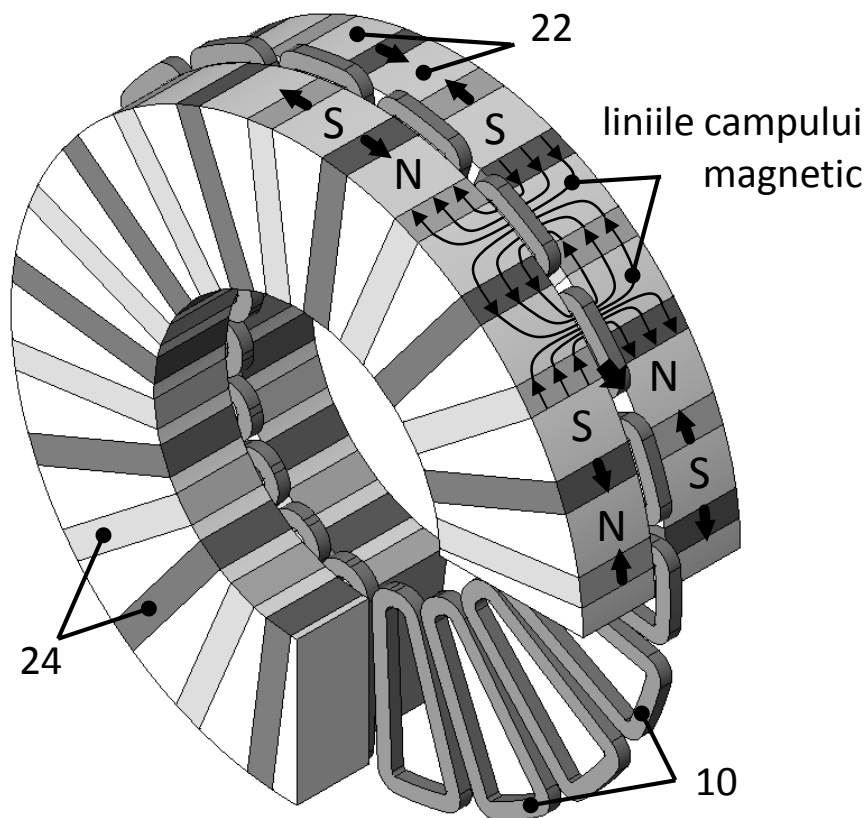


Figura 2. Masina cu flux axial si concentratie de flux magnetic

Astfel, masina axiala cu concentratie de flux, inlatura o limitare a masinilor axiale conventionale, unde fluxul magnetic la nivelul intrefierului e limitat la cel impus in mod direct de magnetii permanenti, si propune o pozitionare mai buna a magnetilor permanenti in rotor permitand obtinerea unei densitati mari a fluxului magnetic in intrefier chiar in cazul utilizarii unor magneti permanenti cu proprietati magnetice mai slabe.

Figura 3 prezinta varianta explodata a masinii propuse, in vederea ilustrarii diferitelor parti componente. Astfel, masina are un stator si doua rotoare ca parti active din punct de vedere electric, si diferite parti mecanice.

2.1. Constructia statorului masinii axiale cu concentratie de flux

Statorul, plasat intre cele doua rotoare, este compus din mai multe infasurari **10** montate pe un suport statoric exterior **12** si un suport interior **14**. Suportul exterior **12** este fixat intre doua semicarcase **34** care sustin arborele masinii prin intermediul unor rulmenti **38**. Suportul statoric exterior **12** este prevazut cu un mai multe spatii pentru amplasarea infasurarilor **10**.

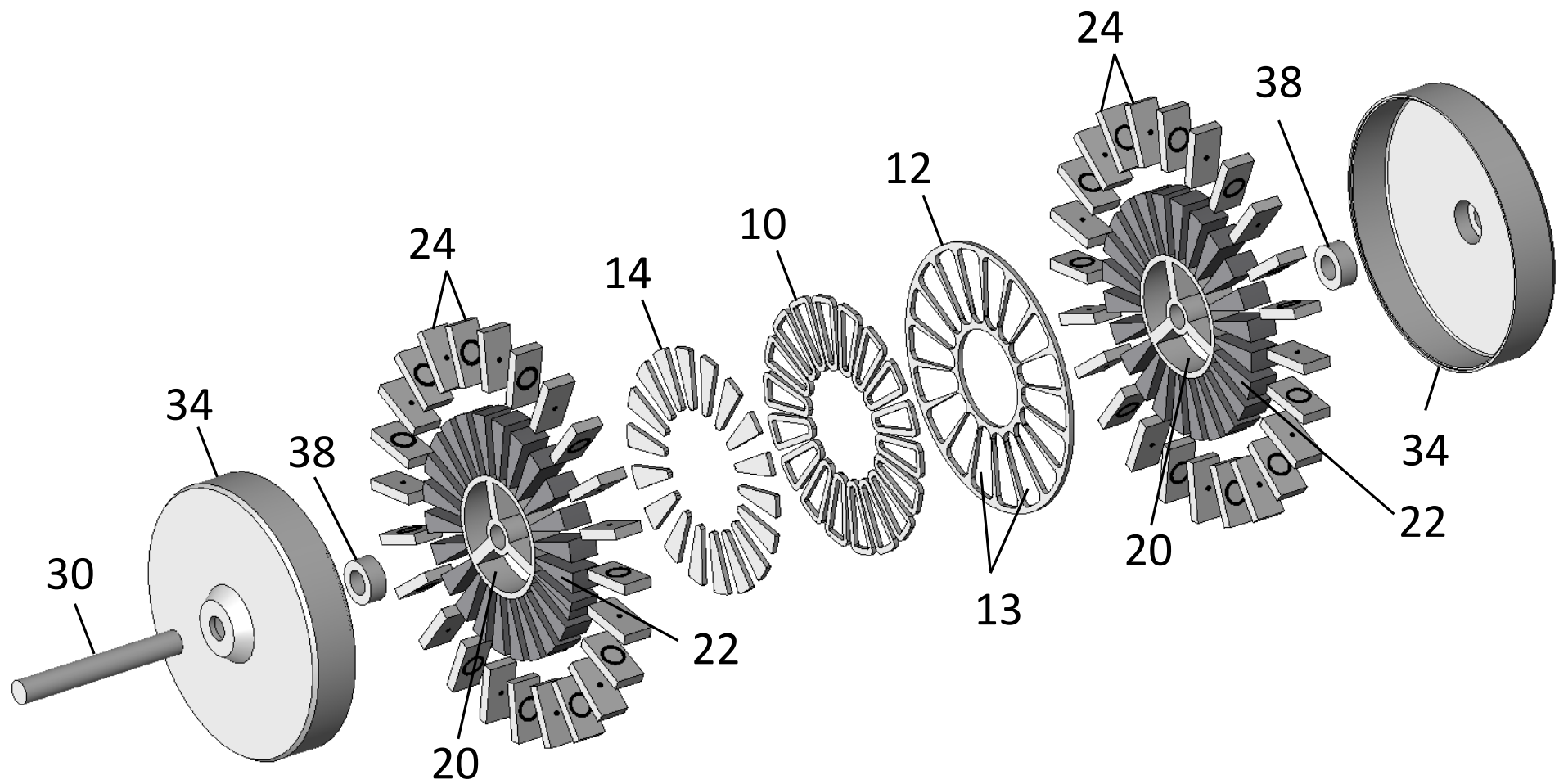


Figura 3. Vedere izometrica explodata a masinii axiale cu concentratie de flux magnetic

Infasurarea **10** este realizata din conductori izolati din material conductor (cupru, aluminiu). Sectiunea axiala a infasurarilor este trapezoidala, corespunzand suprafetei trapezoidale ale polilor magnetici pe partea intrefierului (**Figura 2**). In cazul in care se foloseste o forma diferita pentru polii magnetici **22**, forma sectiunii axiale a infasurarilor **10** se va adapta la acestia si invers.

Suportul exterior al statorului **12** inconjoara partea exterioara a infasurarilor fiind realizat prin turnare din material nemagnetic (rasina) cu scopul de a fixa infasurarile intre cele doua rotoare.

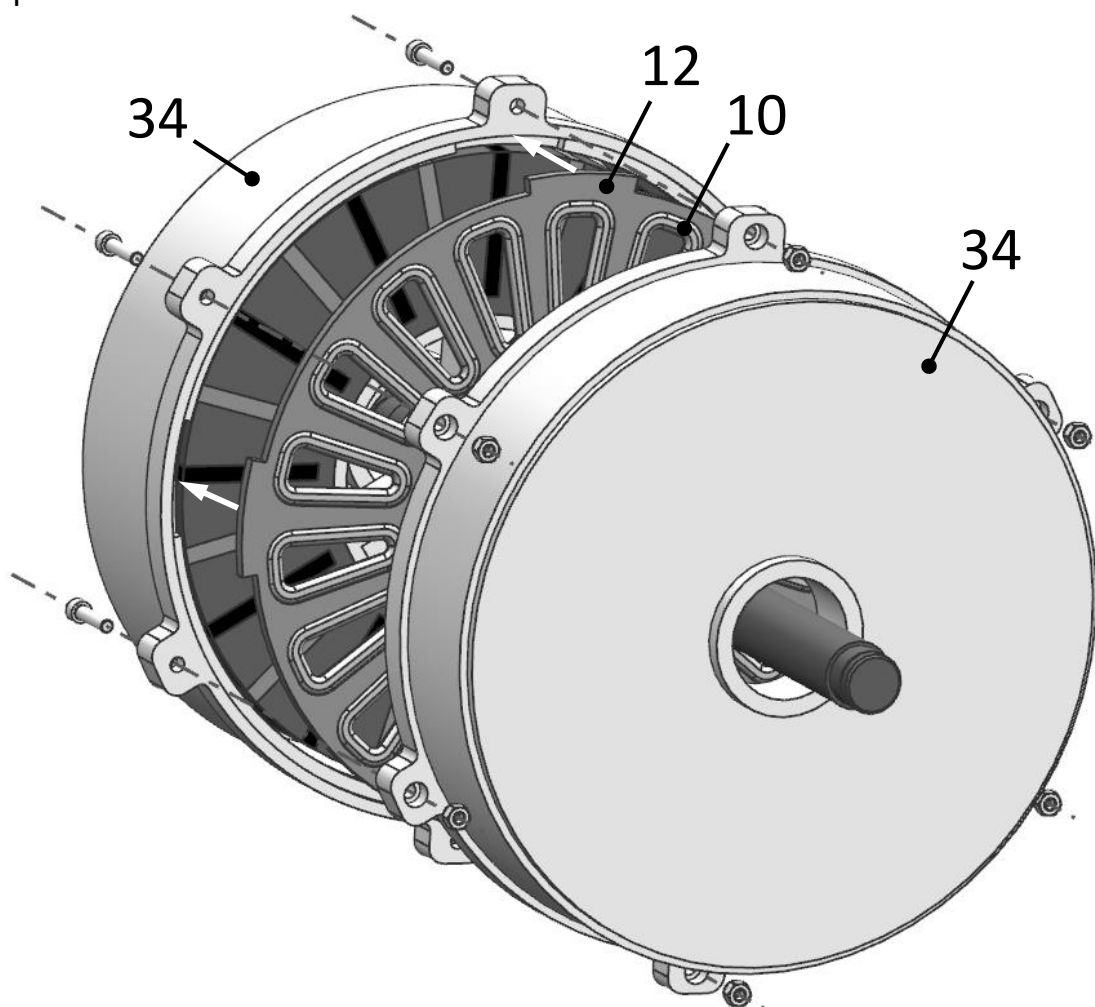


Figura 4. Fixarea statorului prin intermediul a doua semicarcase, vedere izometrica

Intr-un exemplu de constructie al masinii, prezentat in **Figura 4** si **Figura 5**, suportul exterior **12** al infasurarilor **10** este fixat intre cele doua semicarcase **34**. Avantajele acestei constructii consta in faptul ca montarea statorului e realizata fara alte elemente suplimentare de fixare, iar distanta fata de fiecare din cele doua rotoare este mentinuta constanta. Statorul este prevazut cu dinti, astfel incat, prin introducerea acestora in locasurile create cu acest scop, pe suprafata de prindere a semicarcasei, statorul se asigura impotriva rotirii.

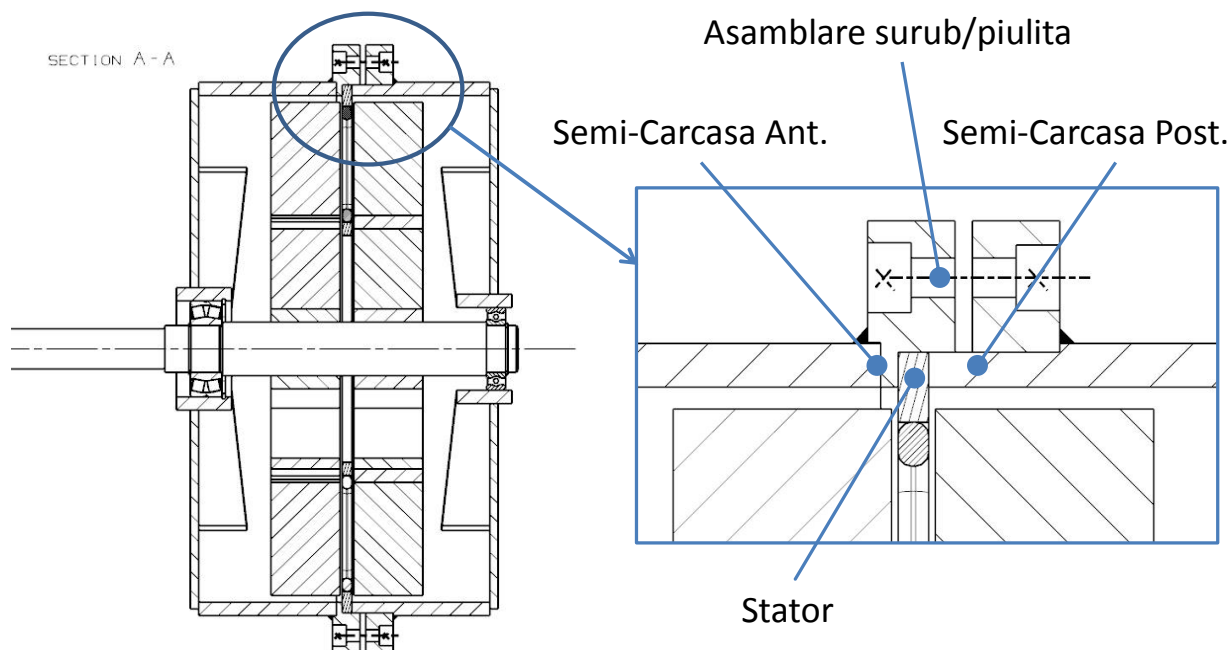


Figura 5. Fixarea statorului prin intermediul semicarcaselor. Vedere in sectiune.

Suportul statoric interior **14** poate fi realizat din material nemagnetic, si neconducator (plastic sau rasina) pentru a contribui mai departe la fixarea infasurarilor, sau poate fi realizat din material cu proprietati magnetice (tole din otel electrotehnic, materiale magnetice compozite). In cazul utilizarii materialelor magnetice, fluxul magnetic produs de magneti este concentrat si directionat prin interiorul infasurarilor. In cazul utilizarii materialelor nemagnetice, suportul statoric interior **14** poate forma un corp comun cu suportul exterior **12** inconjurand astfel complet infasurarile pentru o mai buna fixare. In acest caz, atat suportul intern cat si cel extern sunt realizate din acelasi material, putand fi format din rasina, prin turnare intr-o matrita dedicata. Intr-o a treia varianta, suportul statoric interior poate lipsi, lasand gol spatiul interior al infasurarilor.

2.1. Constructia rotoarelor masinii axiale cu concentratie de flux

Rotoarele masinii axiale cu concentratie de flux magnetic sunt formate din suportul rotor **20**, pe care se monteaza polii magnetici **22** si magnetii permanenti **24**. Cele doua rotoare astfel constituite sunt aliniate unul fata de celalalt si montate pe arborele **30**. Suportul rotor **20** poate avea orice forma constructiva si poate fi constituit din orice material care rezista la fortele la care va fi supus. Pentru simplitatea constructiei si robustetea masinii, suportul rotor si polii magnetici pot forma o singura piesa turnata. Optional, suportul

rotoric poate fi construit dintr-un material nemagnetic in vederea reducerii fluxului magnetic de scapari.

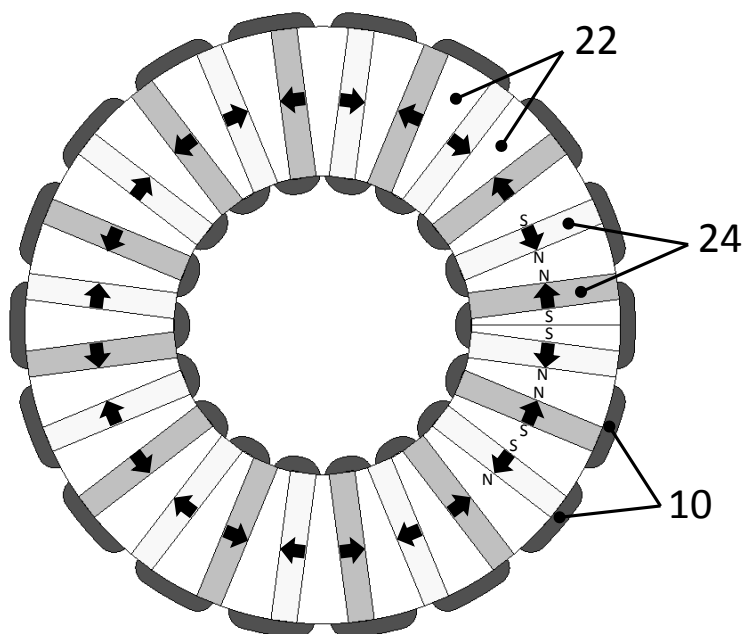


Figura 6. Magnetizarea circumferentiala alternanta de tip NS – SN – NS

Magnetii permanenți **24** sunt montati radial pe suportul rotorului și sunt intercalati cu polii magnetici **22**. La montarea magnetilor se are în vedere realizarea unei magnetizări circumferentiale alternante, într-un aranjament NS – SN – NS pentru fiecare disc rotor, în vederea concentrării fluxului magnetic în polii magnetici dintre magneti, așa cum este ilustrat în **Figura 6**. În același timp, pentru a avea o mașină funcțională, cele două rotoare sunt aliniate unul față de celălalt așa încât fiecare magnet având o magnetizare circumferentială de tip NS, de pe unul din rotoare, să corespundă unui magnet cu magnetizare circumferentială de tip SN pe celălalt rotor, și invers. În această dispunere, liniile fluxului magnetic se închid între polii magnetici **22** a celor două rotoare așa cum este ilustrat în **Figura 2**.

Magnetii **24** pot fi fixați între polii magnetici de către forțele magnetice de atracție, prin lipire de polii magnetici și de suportul rotorului, și/sau prin soluții de fixare mecanice.

Deși **Figura 3** ilustrează magneti cu formă rectangulară paralelipedică, ei pot avea orice formă adecvată. În consecință, polii magnetici **22** plasați între magneti vor avea formă spațiului dintre doi magneti adiacenți. Astfel, în vederea îmbunătățirii caracteristicilor mașinii, diferite soluții optionale pot fi considerate:

- În vederea scăderii cantității de material utilizat și a diminuării fluxului de scapări, polii magnetici **22c** pot fi decupați pe partea exterioară a rotorului, așa cum este ilustrat în **Figura 7**.

- In vederea protejarii magnetilor de valorile ridicate ale campului magnetic ce pot aparea in intrefier se poate reduce adancimea magnetilor pe partea dinspre intrefier fapt care duce la indepartarea magnetului de campul din intrefier. In cazul ilustrat in **Figura 8** dimensiunea magnetului este inferioara dimensiunii polilor magnetici cu distanta **e**.
- In vederea maximizarii densitatii fluxului magnetic, magnetii pot lua forma unei prizme trapezoidale cu baza in planul axial asa cum e ilustrat in **Figura 9**. Astfel, cantitatea de magnet permanent instalat pe masina este mai mare, iar fluxul magnetic generat de magneti este directionat catre intrefier.

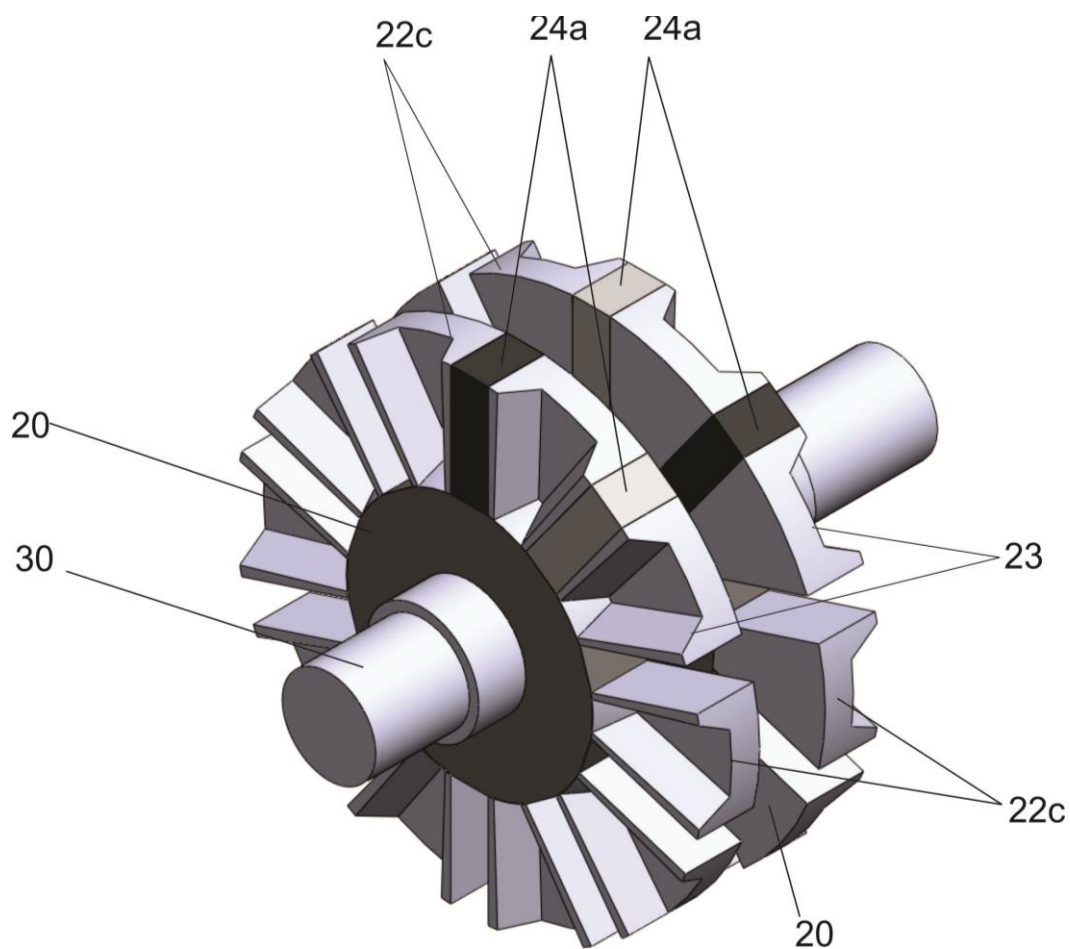


Figura 7. Rotoare cu poli magnetici decupati

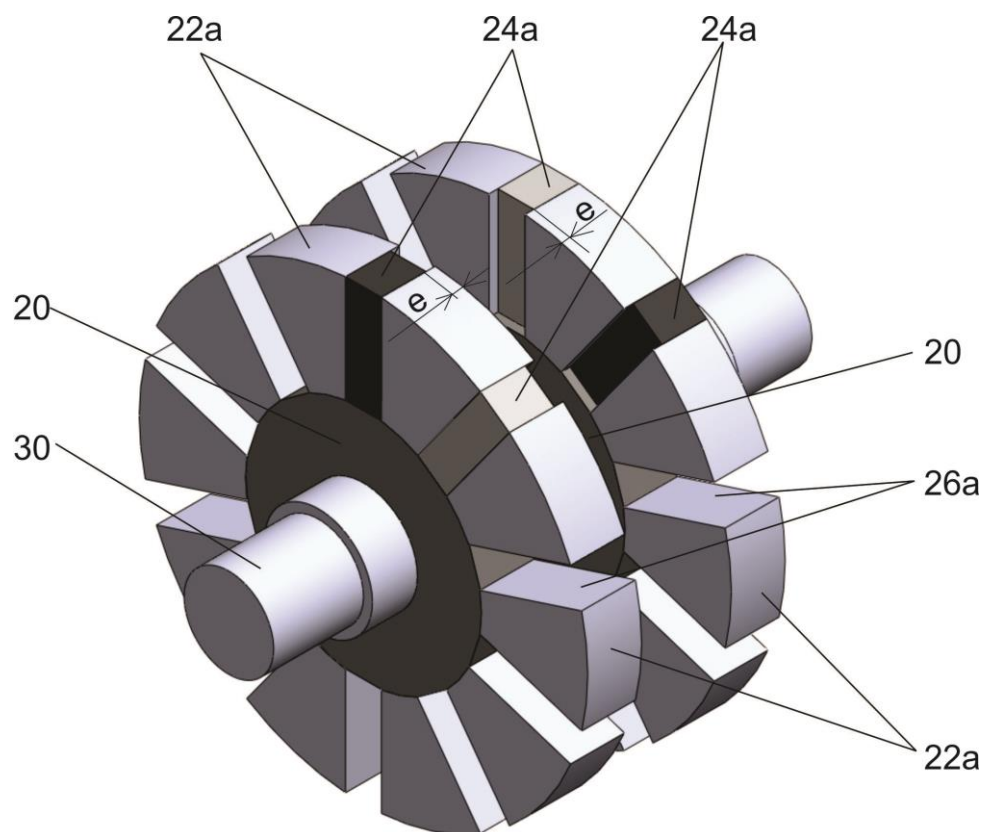


Figura 8. Rotoare cu magneti retrasi

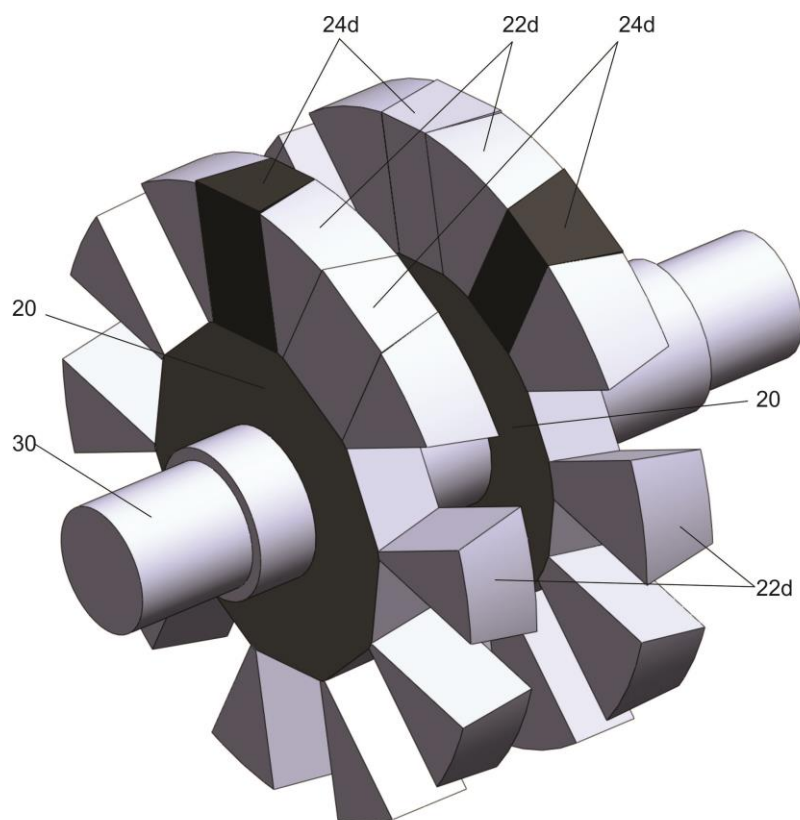


Figura 9. Rotoare cu magneti trapezoidali

In cazuri mai speciale, cand instalarea masinii este dificila sau unele parti ale statorului sau a rotorului trebuiesc inlocuite in caz de defectiune,

statorul sau rotorul pot fi realizate printr-o constructie segmentata din doua sau mai multe segmente (**Figura 10 – Figura 12**). Intr-o astfel de constructie, fiecare din polii magnetici **22e** sunt fixati independent pe suportul rotoric **20** prin intermediul unui sistem de montare mecanic **40**. Astfel, suportul rotoric **20** e prevazut cu canale trapezoidale **20a**, cu canale rectangulare **20b** si cu un decupaj suplimentar **20c** (**Figura 10**). Sistemul de montare **40** (**Figura 11**) contine o parte retractabila **42** cu o gaura filetata, o piesa de impanare **44** si un surub **46**. Partile **42** si **44** sunt montate in canalele **20b** cu partile tesite **42a** si **44a** spre exterior si cu suprafetele **42b** si **44b** spre interior. Decupajul suplimentar **20c** a fost prevazut pentru blocarea partii **42** in protuberanta **42c**. Fiecare pol magnetic **22e** e montat in canalul trapezoidal **20a**. Blocarea polilor magnetici este realizata prin strangerea in canalele trapezoidale datorata fortelor care apar pe suprafetele **b**, respectiv **42a** si **44a**. Forta de strangere apare prin actionarea surubului **46** sub a carui actiune piesa retractabila **42** este apropiata de piesa de impanare **44**. Alinierea axiala a polilor magnetici **22e** (**Figura 12**) este realizata folosind protuberanta **42d** a partii retractabile **42**, care intra in canalul **c** al polului magnetic **22e**.

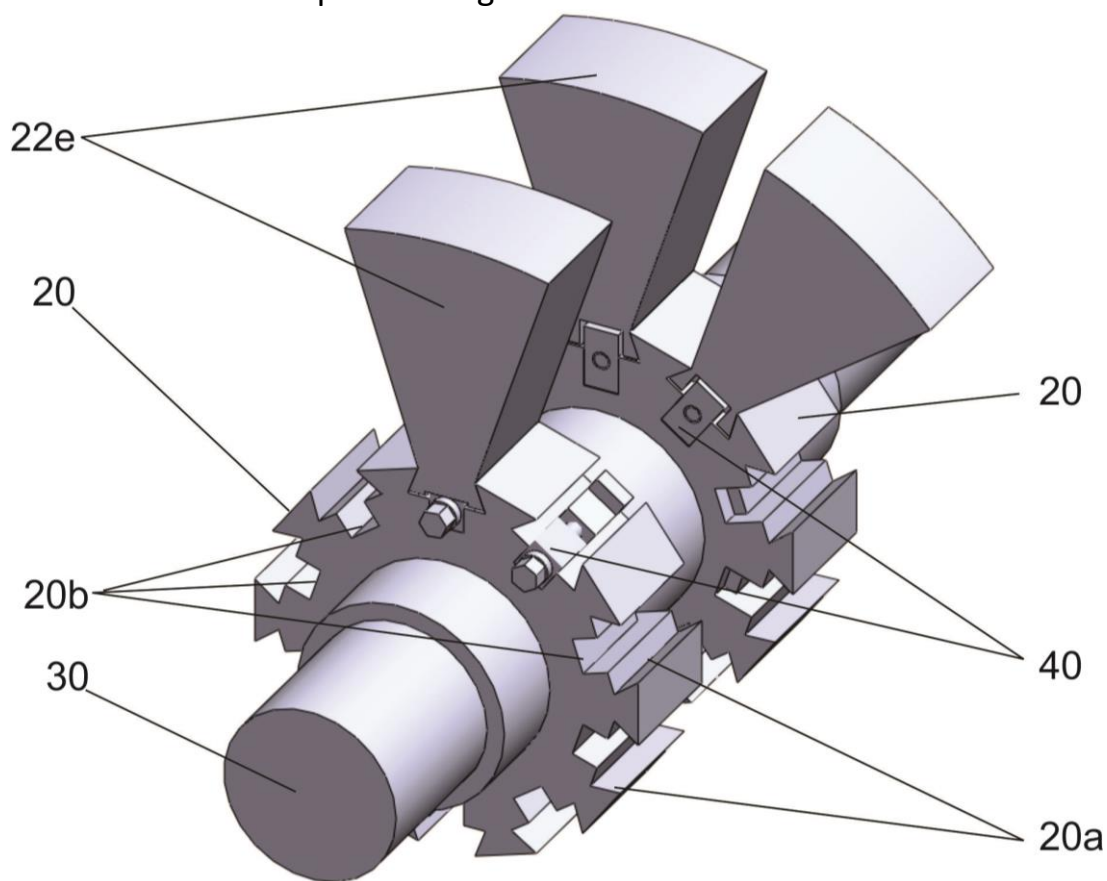


Figura 10. Exemplu de constructie segmentata a rotorului

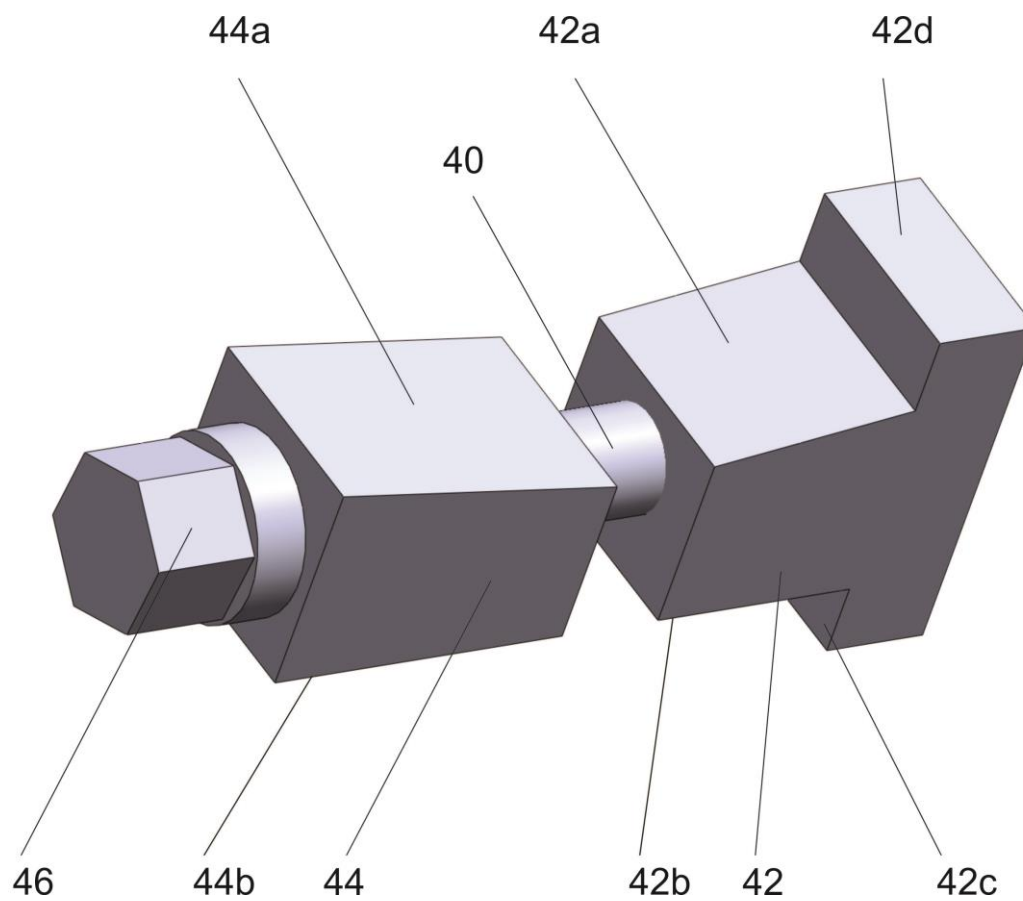


Figura 11. Element de fixare a polului in constructia segmentata

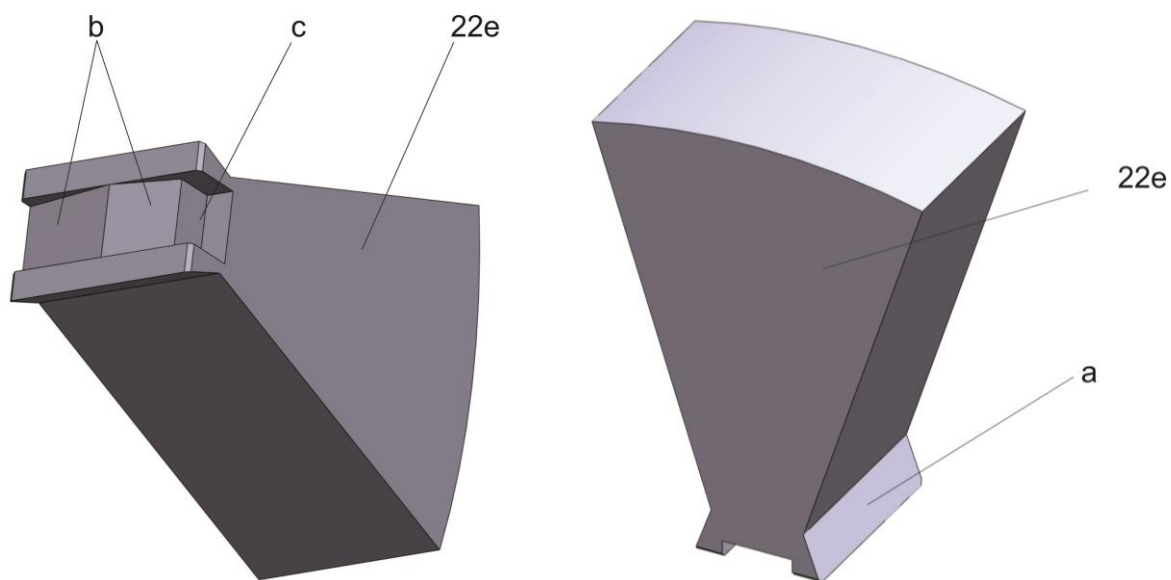


Figura 12. Polul magnetic in constructia segmentata

3. Rezultatele simulării numerice a mașinii axiale cu concentrație de flux

În vederea validării configurației propuse, mașina a fost modelată numeric folosind programul JMAG atât în configurația completă, cât și într-o configurație redusă folosindu-se simetria mașinii în vederea diminuării timpului de calcul. În cele ce urmează vor fi prezentate rezultatele simulărilor obținute cu modelul simetric redus al mașinii, model prezentat în **Figura 13** printr-o vedere izometrică. Caracteristicile mașinii sunt prezentate în **Tabelul 1**.

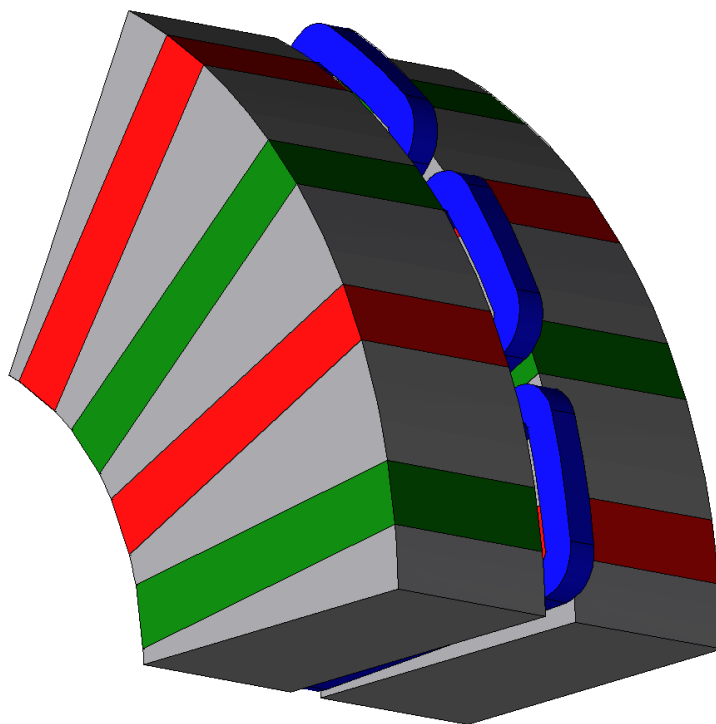


Figura 13. Vedere izometrică a mașinii

Tabelul 1. Caracteristicile mașinii axiale cu concentrație de flux

	Valoare	Unitate
Viteza impusă	450	rotatii/minut
Sarcina rezistivă pe fiecare fază	50 (I) / 200 (II)	Ω
Numărul de spire pe bobina	100	/
Rezistența bobinajului pe fază	3.6	Ω
Magneți permanenți de ferită	0.4	Tesla
Diametru interior al rotorului	200	mm
Diametru exterior al rotorului	400	mm
Numărul de bobine al statorului	18	/
Numărul de magneți al unui rotor	24	/
Latimea rotorului	50	mm
Latimea statorului	8	mm
Dimensiune întrefier	2x1	mm

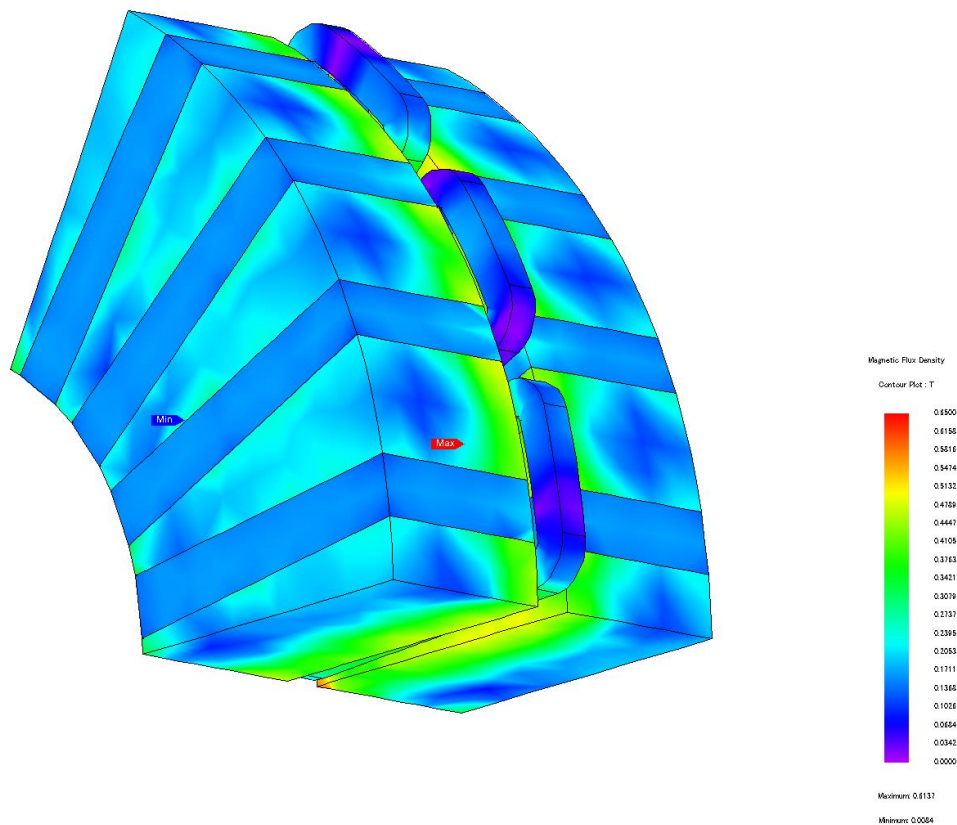


Figura 14. Densitatea campului magnetic

Rezultatele primei simulări (sarcina rezistivă de 50Ω) sunt prezentate în Fig. 14-20. **Figura 14** permite vizualizarea densității câmpului magnetic din mașina cu flux axial. La o viteză de rotație de 450rpm (**Figura 19**) și o sarcină rezistivă impusă de 50Ω pe fază, mașina debitează o putere activă de aproximativ 2530 W. Puterea calculată de programul JMAG este prezentată în **Figura 17**. Tensiunea pe fază este prezentată în **Figura 15**, iar curentul în **Figura 16**. Cuplul electromagnetic corespunzător sarcinii impuse se ridică la o valoare de aproximativ 54 Nm (**Figura 20**).

Având în vedere că pierderile Joule-Lenz, reprezentate în **Figura 18** constituie cea mai mare parte a pierderilor în cazul acestei mașini, plecând de la valoarea lor și de la valoarea puterii electrice debitate se poate determina randamentul mașinii (fără a considera pierderile mecanice) astfel:

$$\text{Randament} = \frac{\text{puterea electrică}}{\text{puterea mecanică}} \cdot 100 = \frac{\text{puterea electrică}}{(\text{puterea electrică} + \text{pierderile Joule-Lenz})} \cdot 100 = \frac{2530}{(2530 + 180)} \cdot 100 = 93.3\%.$$

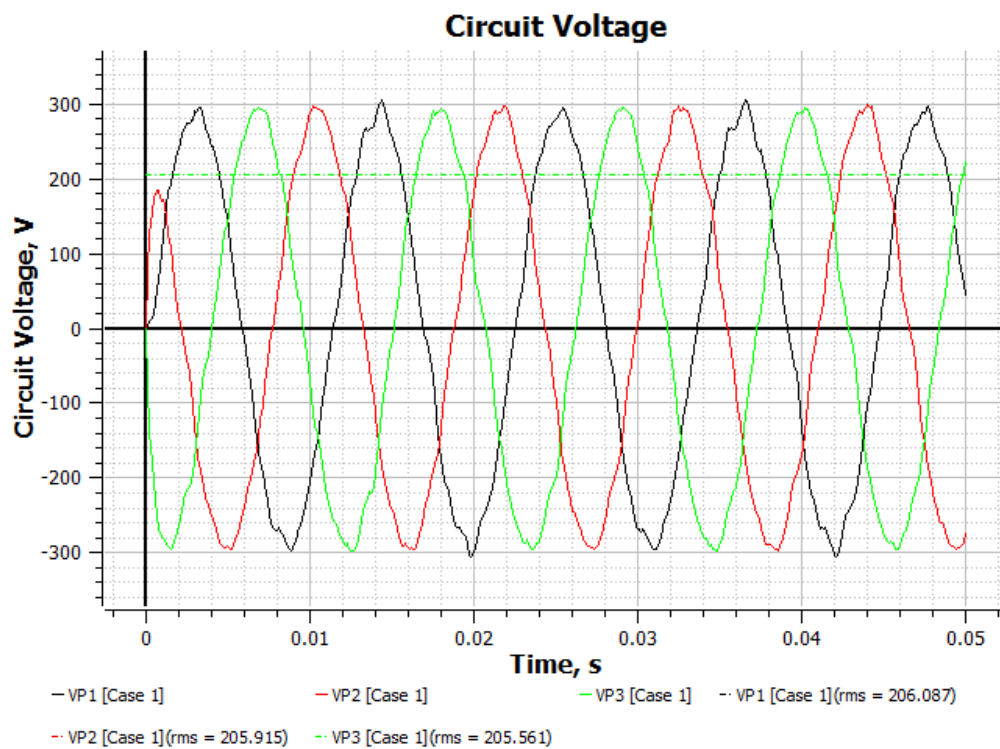


Figura 15. Tensiunea pe faza

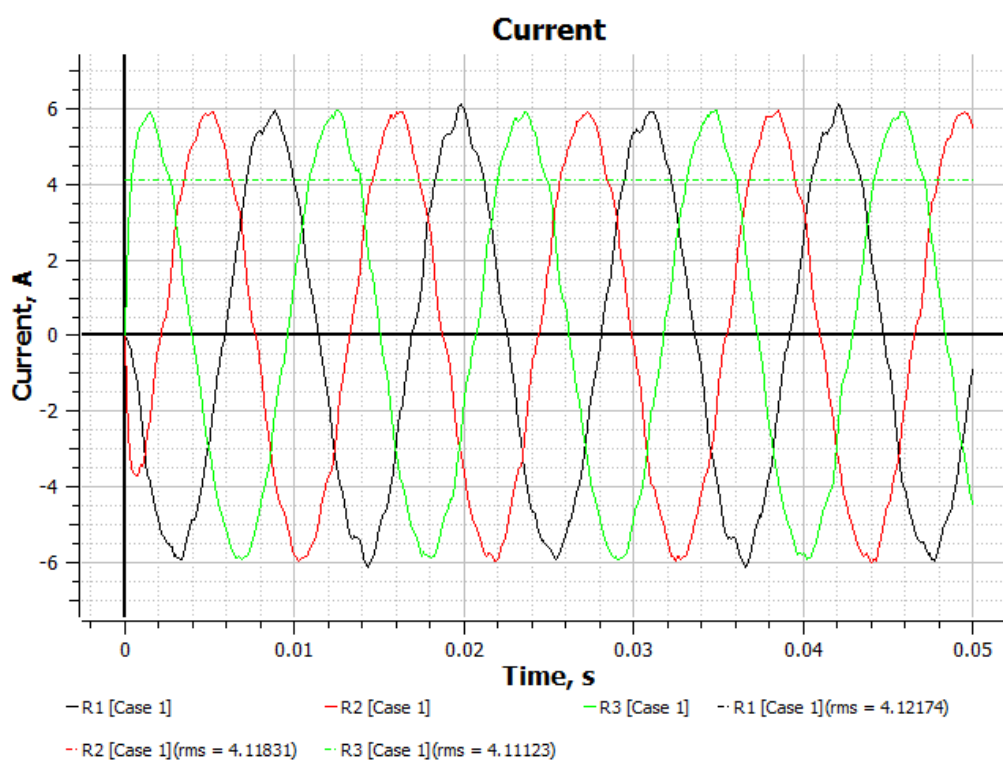


Figura 16. Curentul de sarcina

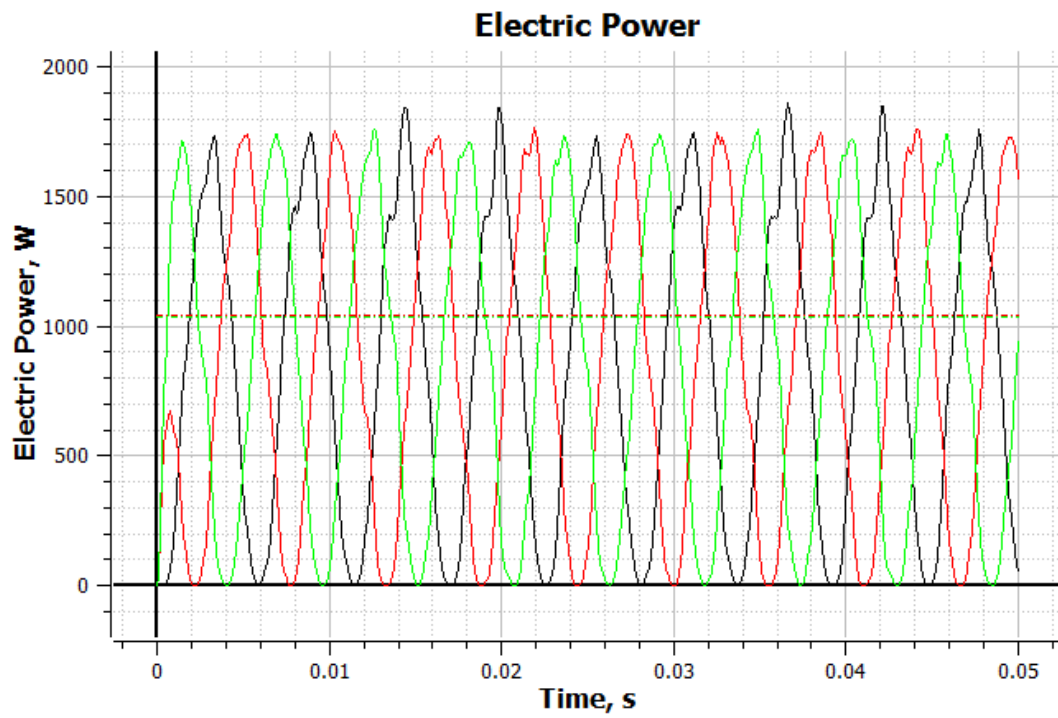


Figura 17. Puterea electrica pe fiecare faza

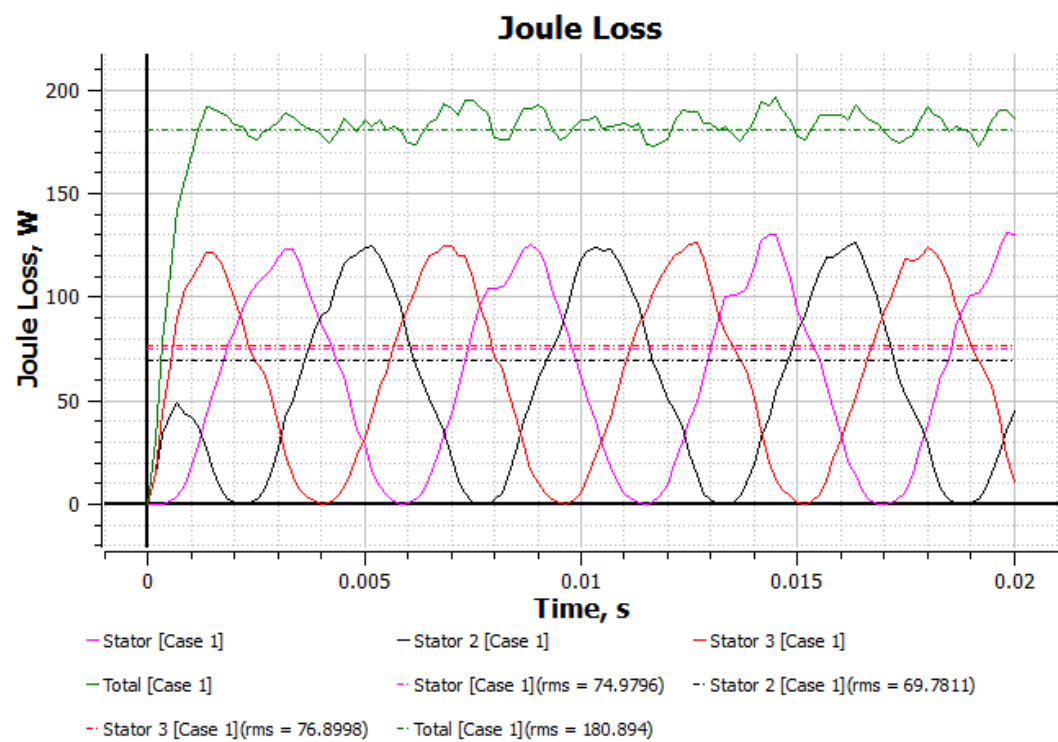


Figura 18. Pierderi Joule

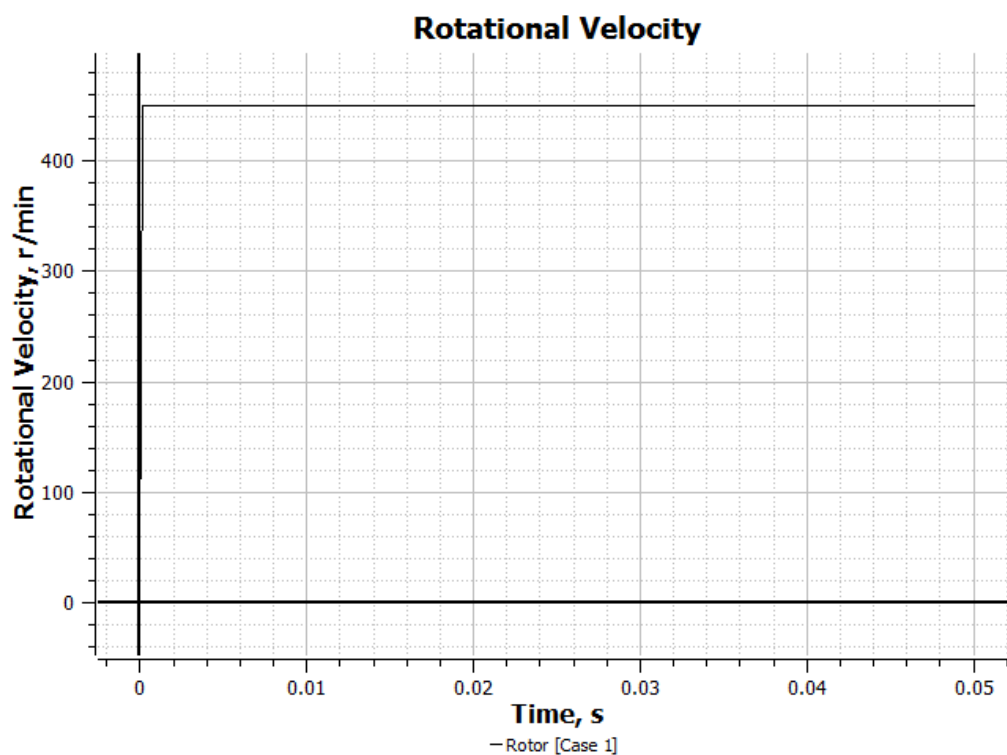


Figura 19. Viteza de rotatie a rotoarelor

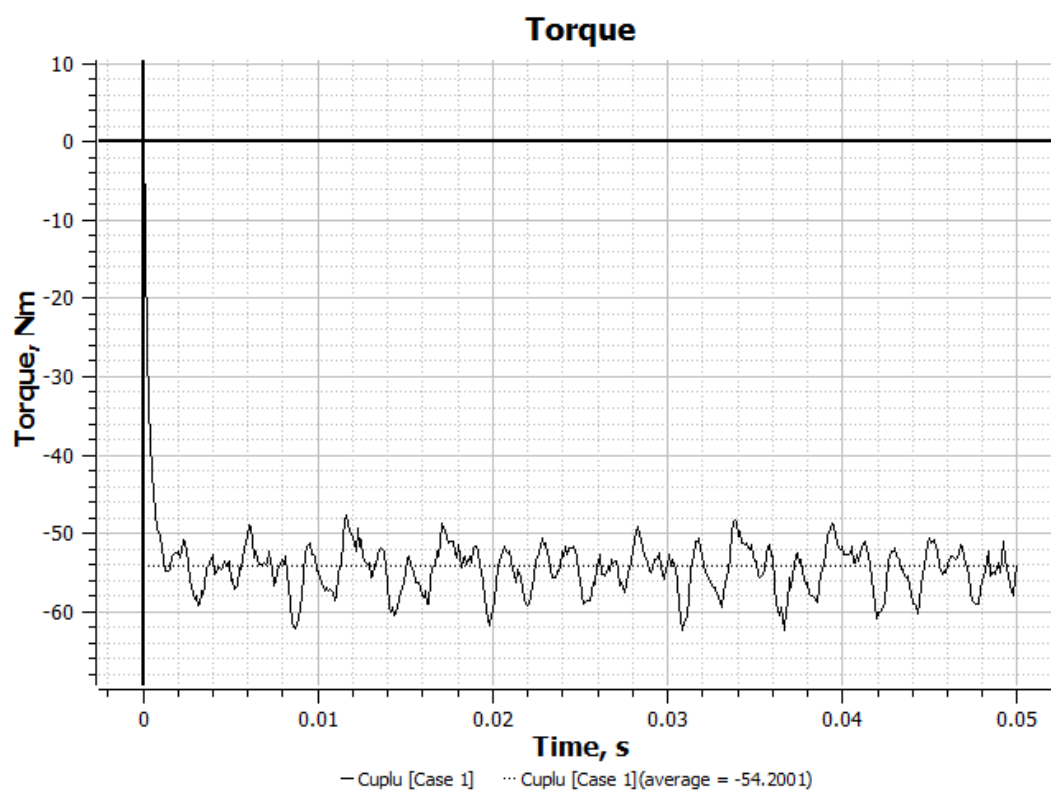


Figura 20. Cuplul electromagnetic

Rezultatele celei de-a doua simulări (sarcina rezistivă de $200\ \Omega$) sunt prezentate în Fig. 21-25. La aceeași viteză de rotație de 450rpm (Figura 19) și o sarcină rezistivă impusă de $200\ \Omega$ pe fază, mașina debitează o putere activă de aproximativ 720 W (Fig. 23). Tensiunea pe fază este prezentată în Figura 21, iar curentul în Figura 22. Cuplul electromagnetic corespunzător sarcinii impuse se ridică la o valoare de aproximativ 12 Nm (Figura 25).

Randamentul calculat în acest caz (fără a considera pierderile mecanice) este de 98 %.

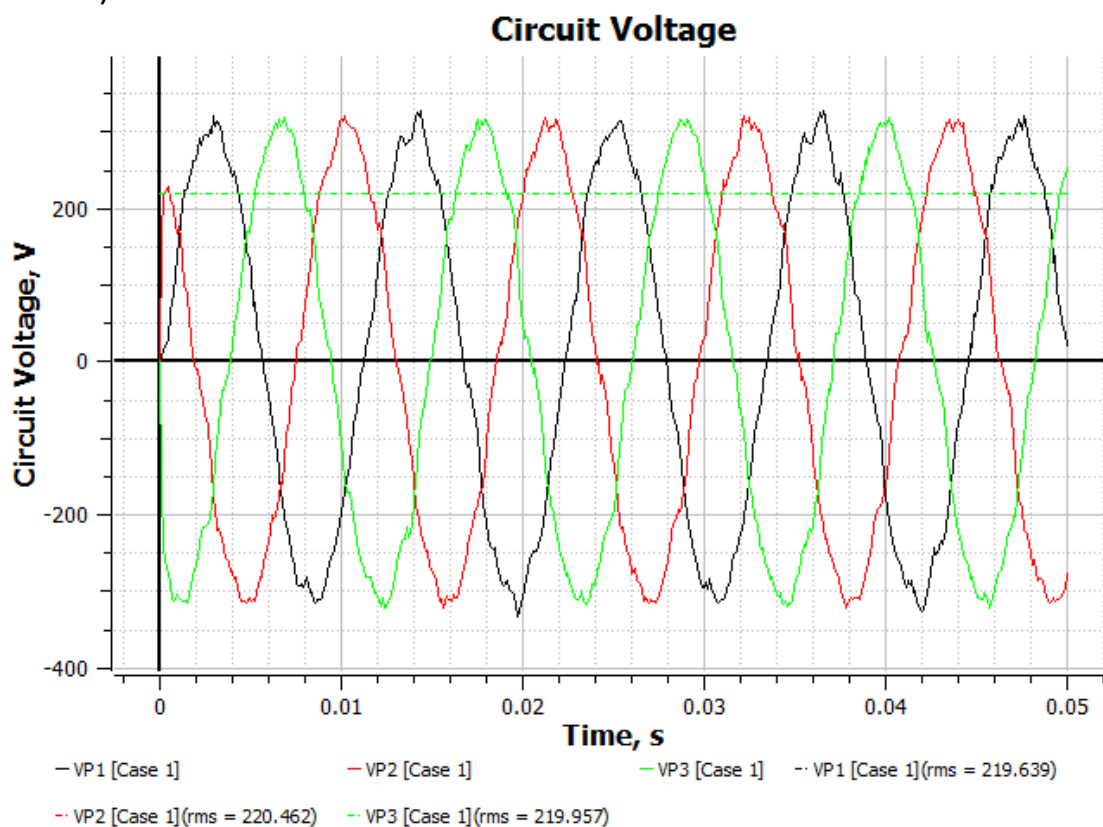


Figura 21. Tensiunea pe fază

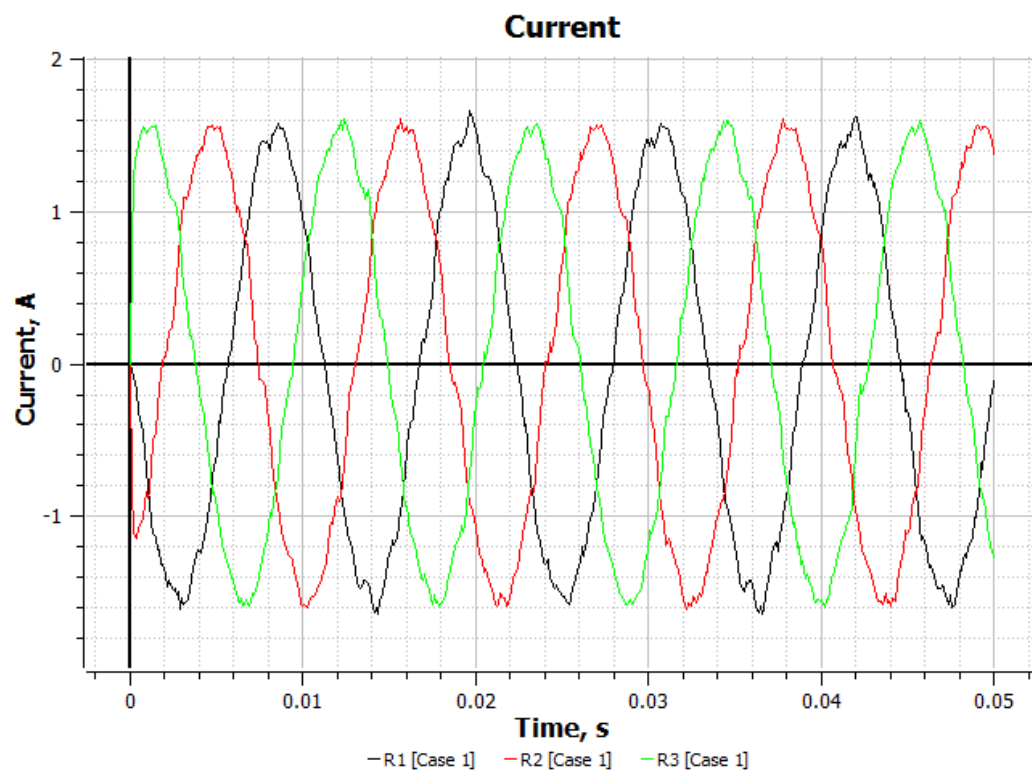


Figura 22. Curentul de sarcina

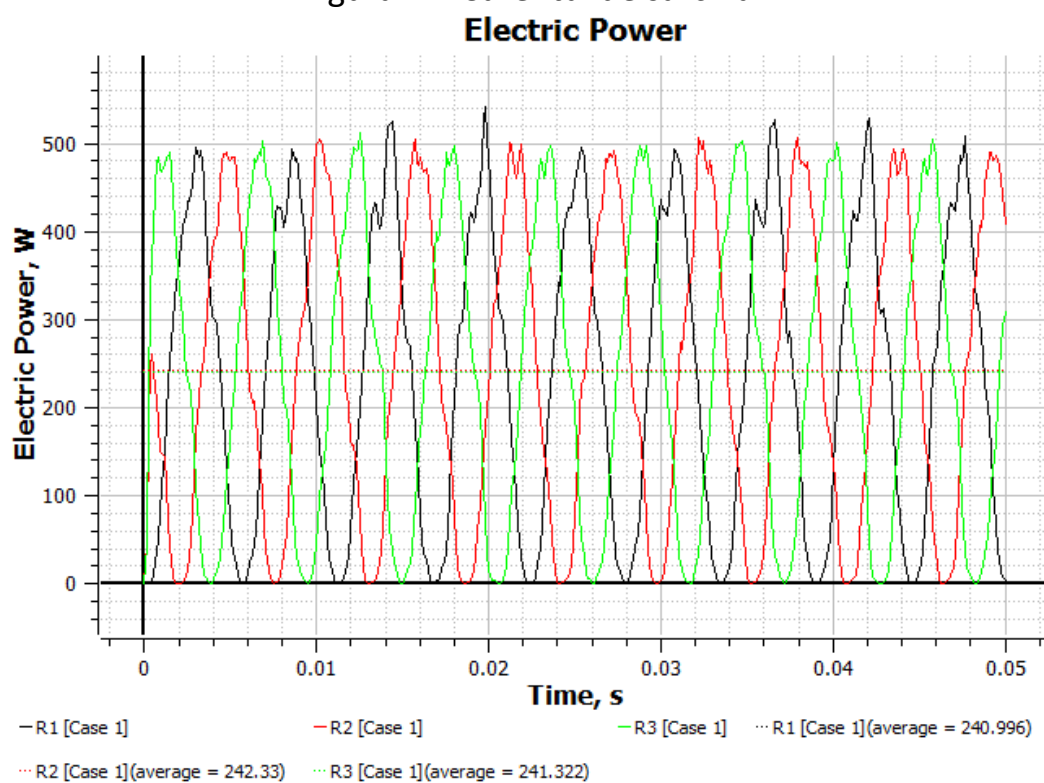


Figura 23. Puterea electrica pe fiecare faza

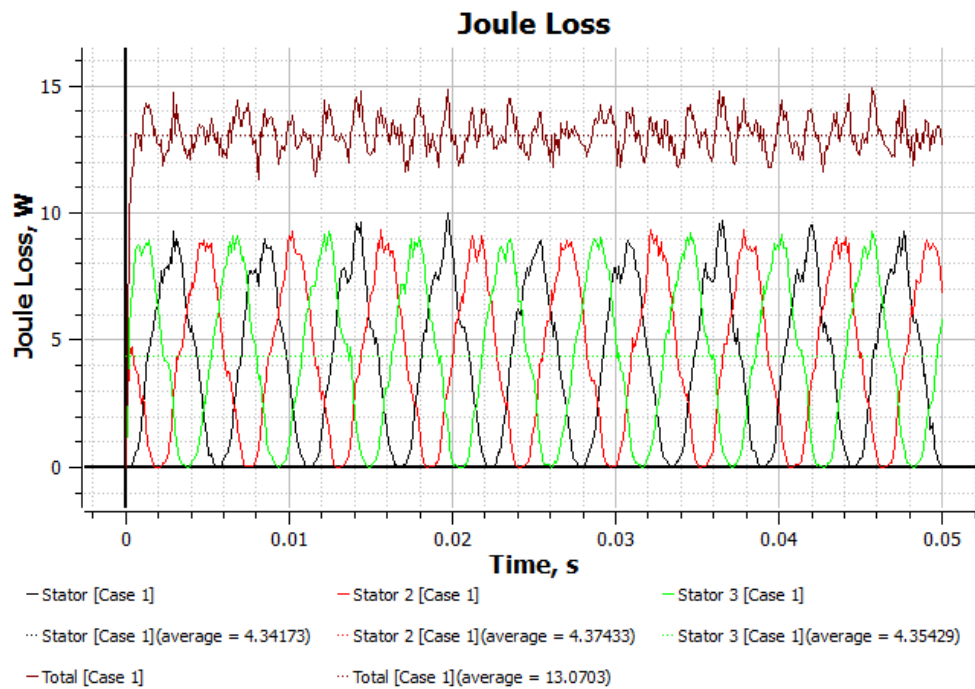


Figura 24. Pierderi Joule

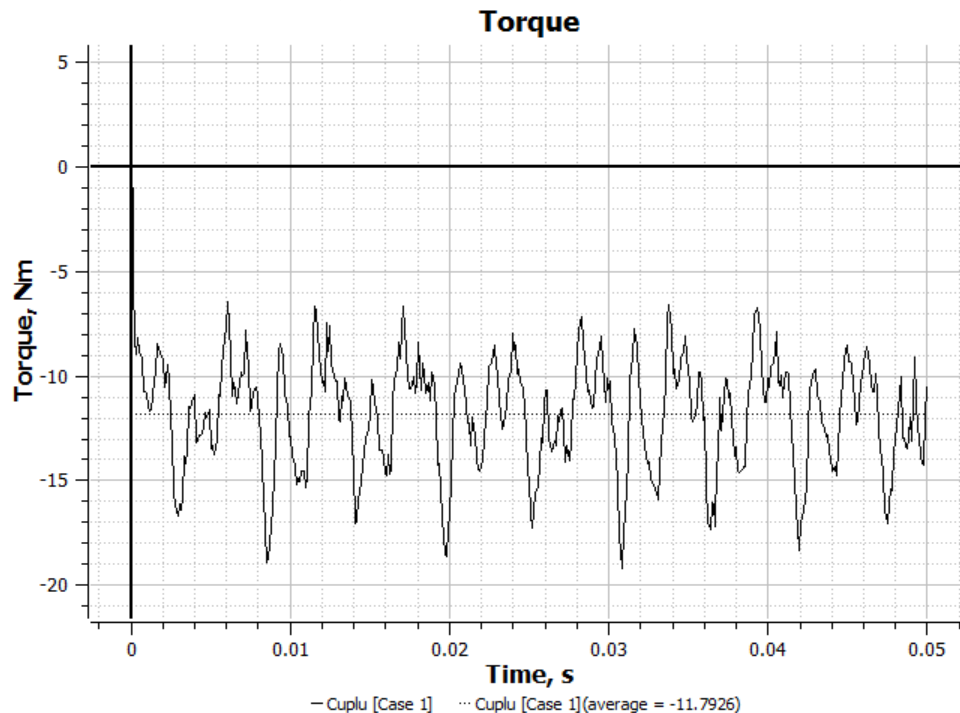


Figura 25. Cuplul electromagnetic

4. Concluzii

O noua tipologie de masina electrica a fost propusa. Pentru protejarea drepturilor de proprietate industriala a fost depusa o cerere de brevet la European Patent Organization. Rezultatele simularilor indica o eficienta ridicata de conversie a energiei pe toata plaja de funcționare. In perspectiva se va viza optimizarea masinii pentru a obtine o structura dimensionala mai compacta si se va realiza un prototip pentru validarea experimentală a masinii.