

INTEGRAREA REZULTATELOR CERCETĂRII ÎN PRODUCEREA MOTORULUI SINCRON PENTRU AUTOBUZE ELECTRICE

Emil TUDOR¹, Mariana ARSENE², Iulian BERCA³, Alexandru-Ionel CONSTANTIN¹,
Constantin DUMITRU¹, Mihaiță-Alexandru ILIE²

¹ Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Ingineria Electrică ICPE-CA, București,

² UMEB Electromotoren, București, România,

³ Joule Motors, Netherlands

emil.tudor@icpe-ca.ro¹

Rezumat. Producătorul istoric de mașini electrice de tracțiune pentru tramvaie și troleibuze, societatea comercială inovatoare UMEB, a inițiat un proiect comun cu Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Ingineria Electrică ICPE-CA, pentru a proiecta și a realiza o linie nouă de mașini electrice care să realizeze dezideratele de putere, cuplu de pornire, gamă de turații și de temperaturi de funcționare. În urma solicitărilor primite de UMEB din partea integratorilor de vehicule pentru transportul de persoane a apărut necesitatea producerii unui motor electric caracterizat de o densitate mare de cuplu și cu o gamă largă de turații de funcționare. Echipa de dezvoltare a selectat soluția tehnică de motor sincron cu magneți permanenți și răcit cu lichid, a realizat tema de proiectare, dimensionarea motorului, validarea prin simulare numerică a proiectului, proiectarea componentelor motorului, execuția acestora, montajul motorului prototip și testarea acestuia. Motorul prototip TN-EB 21 rezultat este prezentat pe parcursul acestui proces inovativ de dezvoltare.

1. INTRODUCERE

Misiunea UMEB este de a fabrica motoare speciale, destinate tracțiunii urbane:

- Motoarele de curent continuu pentru tracțiune urbana: metrou, troleibuze tramvaie. De la inaugurare și până în anii 2000 trenurile de metrou din București au fost puse în mișcare de motoarele de curent continuu produse la UMEB. Troleibuzele și tramvaiele din principalele orașe ale țării erau și ele acționate de motoare de curent continuu produse de UMEB. În prezent, motoarele de curent continuu pentru troleibuze și tramvaie sunt înlocuite cu motoare asincrone produse și ele, în bună parte de UMEB;

- Motoare asincrone și sincrone, trifazate, alimentate de la convertizoare de frecvență pentru tracțiune urbană: autobuze electrice, troleibuze și tramvaie.

Motoarele electrice pentru tracțiunea urbană și feroviară au fost o preocupare îndelungată în UMEB. Pentru tramvaiele din București, la UMEB a fost conceput un motor într-o concepție complet diferită de motoarele produse până atunci la această uzină. Soluția concepută s-a dovedit a fi fiabilă, motoarele tip TN71 (cum au fost denumite motoarele UMEB pentru tramvaiele articulate fabricate în România) rămânând în fabricație și exploatare o perioadă ce depășește 40 de ani. Puterea nominală a acestor motoare este de 120 kW, iar cea maximă pe care o dezvoltă în exploatarea tramvaiului este de 240 kW.

Producția de motoare de tracțiune pentru troleibuze a început în anul 1959, iar motoarele au fost proiectate constructiv și tehnologic la UMEB. Motoarele de curent continuu, cu denumirea de TN59 dezvoltau la arbore o putere de 74 kW fiind alimentate la tensiune de 750 V. Producția acestor motoare performante și fiabile a durat mai bine de 20 de ani. Pentru troleibuzele articulate, UMEB a conceput și fabricat motoarele TN73. Acestea dezvoltau puterea de 134 kW la o turație de până la 3000 rot/min. Tot pentru acționarea troleibuzelor UMEB a asimilat și fabricat motoarele TN96 care sunt capabile să dezvolte la arbore puteri de 150 kW, alimentate de la variatoare de tensiune continuă (chopere) cu tensiunea de maxim 900 V.

Anul 1975 este marcat de începutul realizării metroului bucureștean; pentru acționarea ramelor de metrou la UMEB au fost asimilate și produse motoare de curent continuu cu putere de 215 kW, alimentate cu tensiunea de 750 V (maxim 900 V). Fabricația motoarelor a continuat neîntrerupt până în anul 1995.

De câțiva ani, în locul motoarelor de curent continuu, în tehnica vehiculelor urbane se folosesc pentru tracțiunea acestora motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit.

UMEB a asimilat câteva tipuri de asemenea motoare destinate acționării tramvaielor și troleibuzelor:

- TN-A 08 – cu puterea de 160 kW, la turația de 1500 rpm, motor destinat tracțiunii troleibuzelor solo;
- TN-A 10 - cu puterea de 240 kW, la turația de 1500 rpm, 500 V Y, motor trifazat de curent alternativ cu alimentare de la rețeaua de contact prin intermediul unui convertizor de frecvență, destinat tracțiunii tramvaielor V3A, care circulă pe 6 tramvaie în București pe linia 1 încă din 2012;
- TN-A 14 - cu puterea de 200 kW, la turația de 1500 rpm, 400 VY motor trifazat de curent alternativ cu alimentare de la rețeaua de contact prin intermediul unui convertizor de frecvență, destinat tracțiunii tramvaielor GT4, care funcționează pe 30 de tramvaie Autentic în Timișoara încă din 2015;

Motoarele menționate includ în execuția lor atât materiale cât și tehnologii noi, inovative, sunt incluse în circuite de acționare electrică cu invertoare care măresc manevrabilitatea și performanțele tehnice ale vehiculelor utilizate în tracțiunea urbană.

Strategia firmei pe termen lung este axată pe producerea de motoare destinate: tramvaielor, troleibuzelor, autobuzelor electrice, mediilor cu pericol de explozie pentru toate tipurile de protecție “antiex” prevăzute în reglementările europene și internaționale, precum și de grupuri electrogene într-o gama sortimentală foarte diversificată.

Odată cu introducerea vehiculelor de transport în comun alimentate din baterii și din pile de Hidrogen, cererea de mașini electrice sincrone a crescut exponențial. Alegerea mașinilor sincrone, în particular a celor cu magneți permanenți a fost dictată de cerința de a reduce masele și de a folosi metode de răcire mai eficiente, cum este răcirea cu lichid.

UMEB, în parteneriat cu Institutul Național de Cercetare-Proiectare pentru Ingineria Electrică ICPE-CA a implementat proiectul subsidiar POC-D6/2020 cu titlul: ”Transfer de cunoștințe privind realizarea de motoare sincrone cu magneți permanenți și răcite cu lichid destinate tracțiunii electrice”, care a avut ca obiective principale realizarea unui prototip de motor și a unui stand de testare dedicat acestuia. În prezenta lucrare facem o trecere în revistă a activităților desfășurate în vederea dezvoltării la UMEB a motorului sincron pentru autobuzele electrice.

2. IDENTIFICAREA SOLUȚIEI TEHNICE

Prezentarea curentă reliefează etapele parcurse în dezvoltarea mașinii electrice de tracțiune destinată echipării autobuzelor electrice alimentate de la baterii, inclusiv cele echipate cu pilă de combustie pentru Hidrogen.

2.1 Analiza diferitelor soluții tehnice

Alegerea mașinilor sincrone, în particular a celor cu magneți permanenți a fost dictată de cerința de a reduce masele și de a folosi metode de răcire mai eficiente, cum este răcirea cu lichid.

Soluția consacrată de motor asincron prezintă avantajele unui rotor relativ simplu, dar care are pierderi importante, pierderi care pot fi greu evacuate, aceste motoare fiind răcite cu aer ventilație forțată cu ventilator propriu al motorului sau cu ventilator extern. Acest mod de răcire expune motorul la pătrunderea apei, a agenților corozivi exteriori, îl expune la fenomene de îngheț și generează defecțiuni relativ dese generate de străpungerea izolației înfășurărilor statorice.

Soluția alternativă o reprezintă motorul sincron cu magneți permanenți amplasați pe rotor. Acest tip de motor nu poate fi răcit cu aer, deoarece particulele metalice magnetizate vor fi

atrase de rotor și vor afecta funcționalitatea acestuia. Deoarece pierderile localizate la nivelul rotorului sunt reduse, acest motor se pretează la răcirea cu lichid realizată la nivelul carcasei (statorului) [1-23].

Principalele avantaje ale motoarelor sincrone sunt:

- densitate mare de cuplu;
- randament ridicat.

Cel mai important dezavantaj este cel al costurilor mari de realizare, dar acestea sunt acoperite de economia de energie datorată eficienței energetice ridicate.

2.2 Alegerea consultanților externi

Pentru completarea echipei de dezvoltare, au fost cooptați specialiști de la:

- Comitetul Electrotehnic Român, privind reglementările în vigoare privind domeniul mașinilor electrice sincrone;
- Joule Motors, privind metode de proiectare ale mașinilor sincrone cu magneți permanenți.

3. STABILIREA SOLUȚIEI TEHNICE

Soluția tehnică a fost aleasă de echipa lărgită, în urma unor analize amănunțite orientate spre proiectarea unui motor fiabil, performant, la costuri abordabile și folosind materiale de uz general.

3.1 Alegerea soluției tehnice generale

Principalele date de proiectare (de pornire) ale mașinii sincrone sunt:

- Cuplul maxim;
- Tensiunea de alimentare;
- Turația nominală;
- Turația maximă.

3.2 Dimensionarea cuplului maxim

Cuplul motor necesar este utilizat la urcarea unui vehicul maxim încărcat pe o pantă maximă, date care sunt, de obicei, particularizate pentru o anumită localitate sau zonă. Uzual, constructorii de vehicule proiectează autobuzele pentru cazurile cele mai uzuale, iar pentru orașele cu pante mari reduc sarcina utilă. Pentru un autobuz electric solo, cuplul maxim al motorului trebuie să fie mai mare de 1000 Nm, în cazul folosirii unui reductor de turație cu raport de circa 10:1.

3.3. Dimensionarea turației nominale și a turației maxime

Turația nominală este definită acea turație până la care motorul electric poate livra cuplul nominal. Turația maximă este acea turație la care poate ajunge motorul în timpul funcționării, fiind o cerință a utilizatorului final. Pentru alegerea turației maxime se ține cont de faptul că, la motorul sincron cu magneți permanenți, funcționarea la turații superioare turației nominale este posibilă prin realizarea unui reglaj suplimentar numit și ”slăbire de câmp”, procedeu care creează un câmp magnetic opus celui al magneților din rotor. Deoarece un câmp magnetic puternic poate produce demagnetizarea acestor magneți, se recomandă limitarea gradului de slăbire de câmp la circa 50%, fapt care se realizează dacă turația nominală este aproximativ 75% din turația maximă.

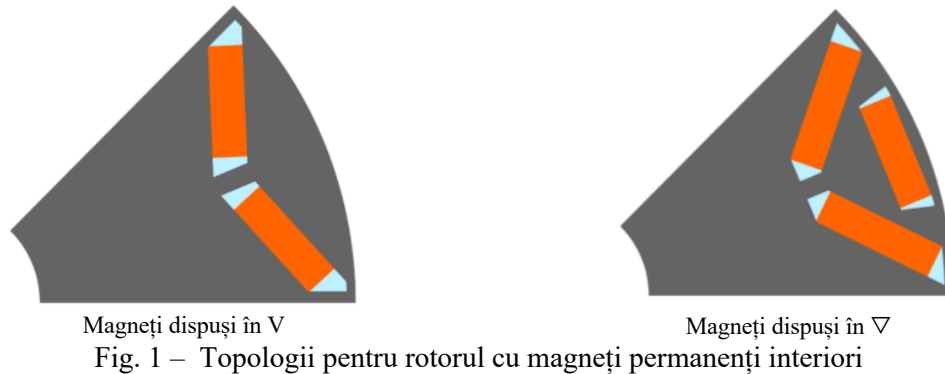
Pentru motorul solicitat, turația maximă este 4000 rpm, iar turația nominală este 3000 rpm.

3.4 Dimensionarea circuitului electromagnetic

Pentru a calcula circuitul electromagnetic, a fost echivalat motorul nostru cu un motor de 200 kW și am realizat simularea funcționării, plecând de la proiectul de motor de 130 kW.

3.5 Alegerea magneților permanenți și dispunerea acestora

Pentru realizarea rotorului cu magneți permanenți au fost analizate mai multe soluții tehnice (Fig. 1), fiind aleasă cea soluție care a condus la motorul cel mai dens și anume motorul cu magneții dispuși în forma literei ∇ .



Această soluție tehnică permite creșterea performanțelor tehnice cu circa 12%, menținând o lungime și un diametru convenabile pentru motor.

3.6 Simularea funcționării

Pentru simularea funcționării a fost folosit programul FluxMotor de la Altair Hyperworks [24], una dintre reprezentările grafice rezultate este cea din Fig. 2.

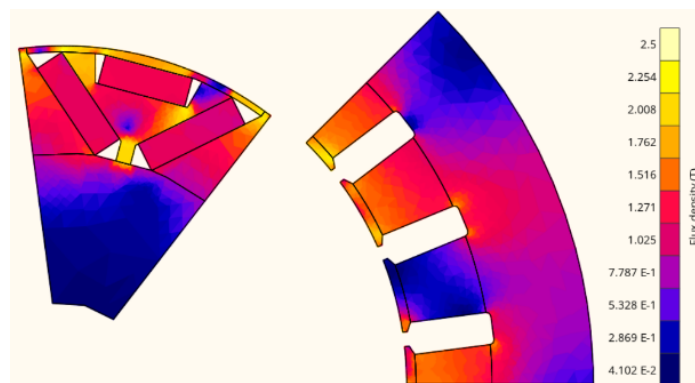


Fig. 2 – Simularea fluxului electromagnetic la putere și la turație nominale

Valorile maxime ale inducției sunt 2,4T, iar valoarea medie este de 1,11T, valori calculate pentru condiții de funcționare nominale.

4 PROIECTAREA MOTORULUI

Motorul a fost proiectat integral (Fig. 3 și Fig. 4), apoi au fost căutate soluții de realizare a pieselor componente pentru realizarea prototipului în industria orizontală românească.

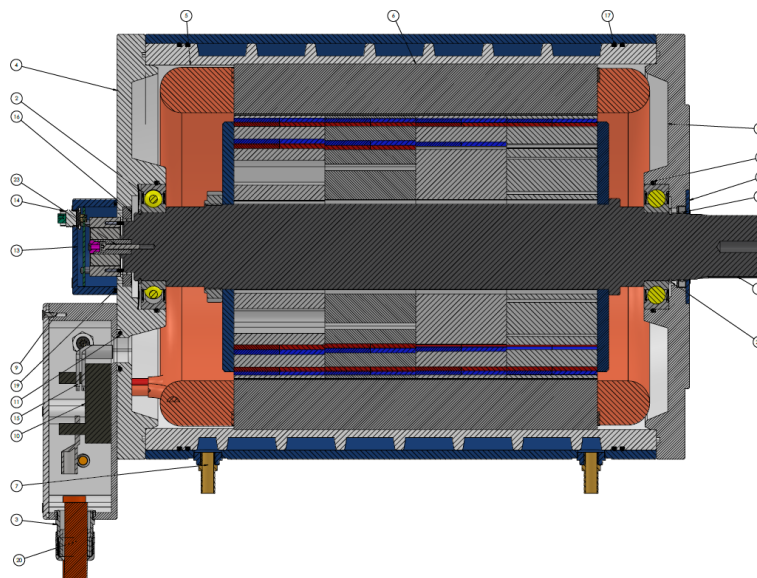


Fig. 3 – Secțiune transversală prin Motorul Sincron TN-EB 21

Motorul este prevăzut cu ax canelat la capătul destinat cuplării la sarcină și cu un traductor de turație atașat de capătul liber. Cutia de borne este plasată pe scut.

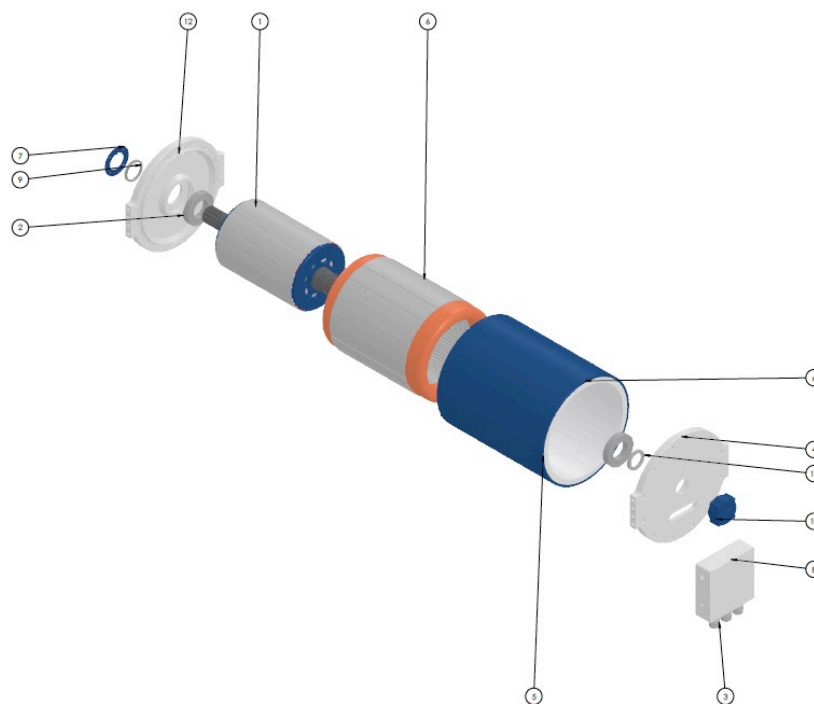


Fig. 4 – Vedere expandată a Motorului Sincron cu Magneți Permanenți

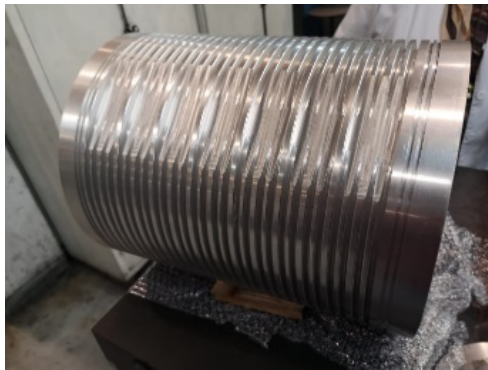
Legendă:

- 1 - rotor subansamblu;
- 2 - rulmenți;
- 3 - presetupă cabluri de alimentare;
- 4 - scut spate;
- 5 - carcasă subansamblu;
- 6 - stator bobinat subansamblu;
- 7 - flanșă frontală rulment;
- 8 - cutie conexiuni subansamblu;

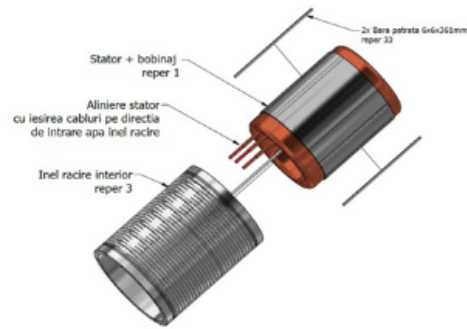
- 9 - simering;
- 10 - encoder;
- 11 - simering;
- 12 - scut față.

4.1 Soluția tehnică de stator

Statorul este similar unui stator de mașină asincronă trifazată, cu mențiunea că, pentru a avea răcirea cu lichid, a fost prevăzută o carcasă dublă prin care circulă lichidul de răcire.



Labirint răcire stator

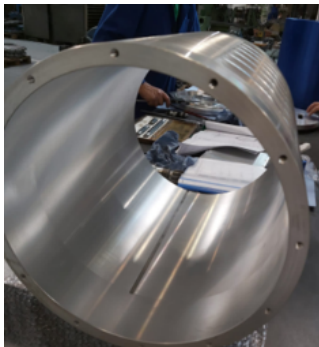


Asamblare stator în carcasă

Fig. 5 – Forma cilindrului interior de răcire

4.2 Sistemul de răcire stator

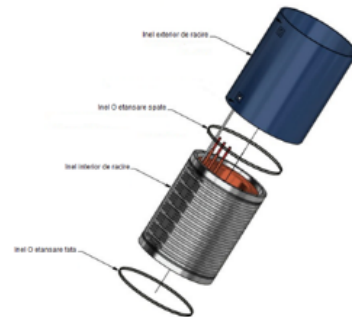
Lichidul de răcire circulă prin labirint și preia căldura de la stator. Etanșarea este realizată cu garnituri. Lichidul de răcire este format din amestec de glicol și apă în procente de 50%.



Labirint



Carcasă exterioră



Ansamblu stator

Fig. 6 – Sistemul de răcire cu lichid al statorului

4.3 Soluția tehnică de rotor cu magneți permanenți

Rotorul este divizat în "felii" care sunt amplasate decalate între ele pentru a reduce efectul de cuplu de agățare specific motoarelor sincrone. Montarea rotorului a reprezentat un efort tehnologic ce a condus la realizarea mai multor scule ajutătoare pentru manevrarea pieselor magnetizate.



Asamblare rotor



Strângere pachete rotor

Fig. 7 – Asamblare rotor cu magneți permanenți

În Fig. 7 sunt surprinse montarea prin presare a unei "felii" rotorice și rigidizarea longitudinală a felii rotorice.

5 PERFORMANȚELE MOTORULUI PENTRU AUTOBUZUL ELECTRIC

Motorul astfel obținut este prezentat în Fig. 8, are codul TN-EB 21 și are următoarele date de catalog.

Tabel 1 Date de catalog ale motorului TN-EB 21

Putere nominală	P_n	200 kW
Tensiune nominală	U_n	440 Vrms
Conexiune		Y
Curent nominal	I_n	265 Arms
Număr de perechi de poli	p	4
Turație nominală	n_n	3000 rpm
Turație maximă	n_{max}	4000 rpm
Cuplu nominal	M_n	541 Nm
Cuplu maxim de pornire	M_p	1050 Nm
Cuplu maxim motor	M_{max}	1550 Nm
Putere maximă	P_{max}	350 kW
Grad de izolare		IP65
Masă		203 kg

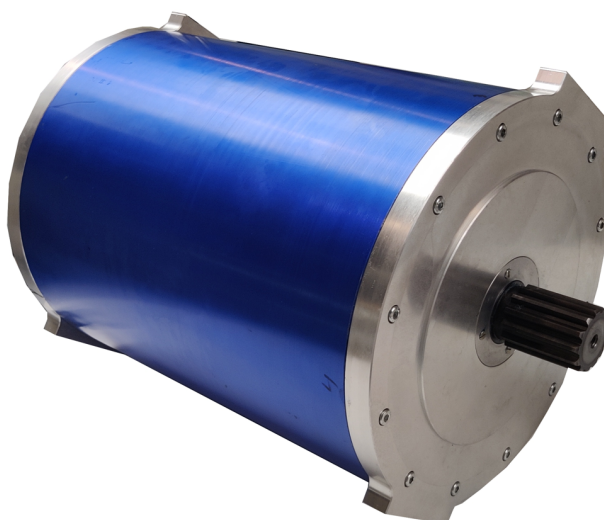


Fig. 8 – Motorul TN-EB 21

Motorul prototip realizat este încercat pe un stand special, regenerativ. Motorul este încărcat folosind un motor asincron de 250kW (Fig. 9). Curba de funcționare în regim de generator (Fig. 10) și formele de undă ale tensiunii electromotoare caracterizează motorul prototip realizat [25-27].

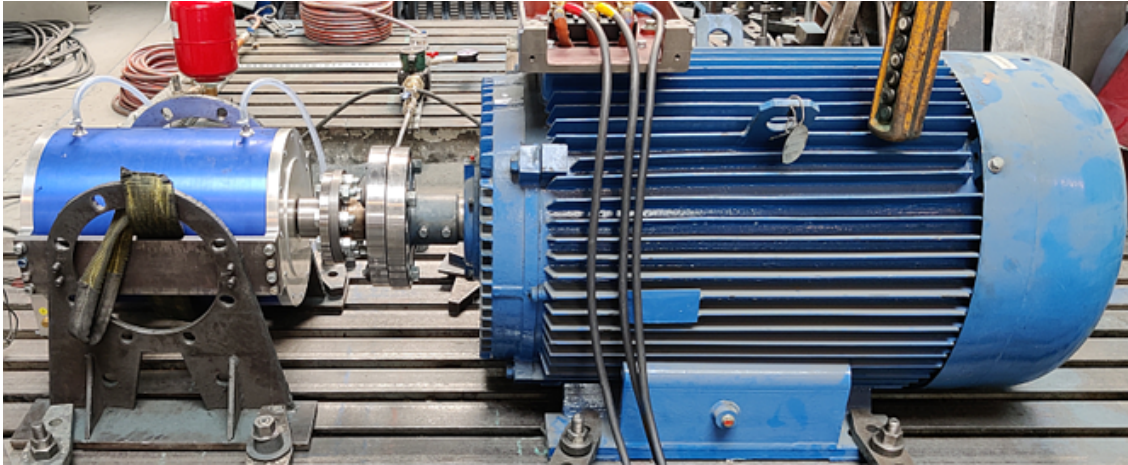


Fig. 9 – Motor sincron încărcat cu un motor asincron

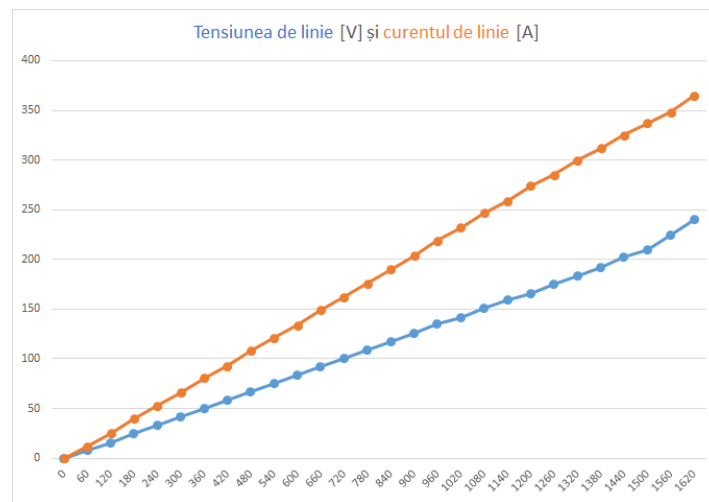


Fig. 10 Caracteristica generatorului sincron cu sarcină rezistivă

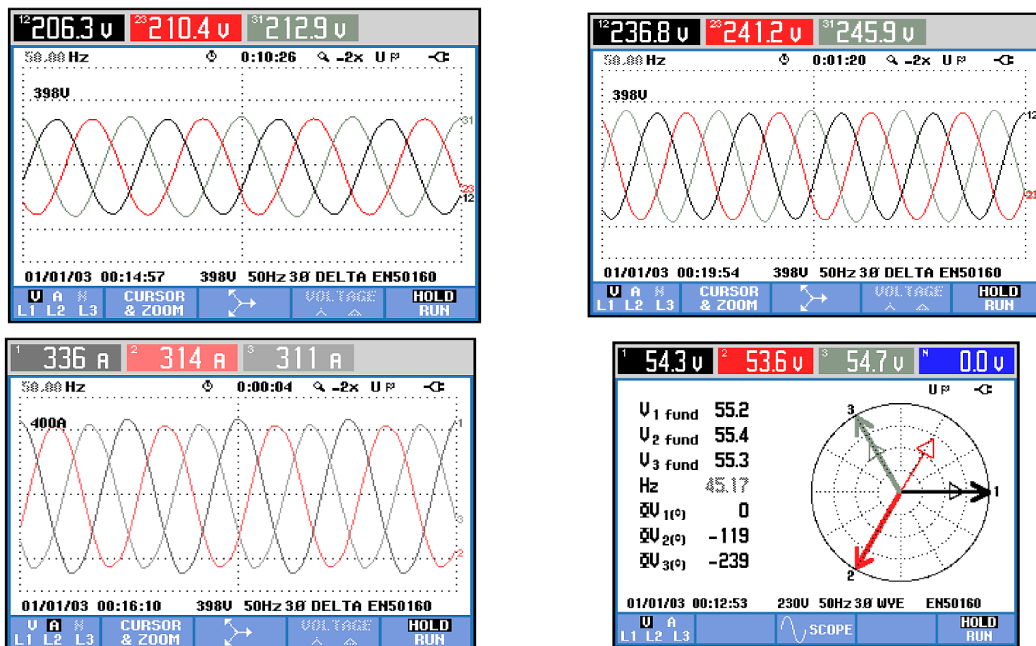


Fig. 11 – Oscilोगrame ale tensiunii [V], curentului [A] și ale fazării generatorului în sarcină

Motorul realizat este foarte stabil, prezintă o formă de undă a tensiunii generate foarte aproape de sinusoidă, fapt care îi asigură compatibilitatea cu marea majoritate a convertizoarelor electronice de alimentare.

6 CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE.

UMEB dorește să testeze acest prototip, însoțit de un convertizor electronic (invertor) care este prevăzut cu funcțiile de optimizare a cuplului de ieșire după principiul MTPA (cuplu maxim per amper), prin montarea lui pe un autobuz electric și testarea lui în condiții reale de exploatare. Semnalele din piață sunt încurajatoare, existând contact permanent cu potențialii clienți, atât din Europa, cât și din afara ei.

FINANȚARE

Această activitate a fost susținută financiar de Ministerul Fondurilor Europene, în cadrul Programului științific: Programul Operațional Competitivitate, Axa prioritară 1, Acțiunea 1.2.3 Parteneriate de transfer de cunoștințe, Proiect: Transfer de cunoștințe către companiile private din domeniul energetic pe baza experienței științifice a ICPE-CA -TRANSENERG, nr. P_40_432/105567432/105567, Contract nr.126-D6/2020.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'18, ediția 2022.

BIBLIOGRAFIE

1. M.J. Soleimani Keshayeh*, S. Asghar Gholamian,,*Optimum Design of a three - phase permanent magnet synchronous motor for industrial applications*, International Journal of Applied Operational Research, **2**, 4, pp. 67-86, 2013
2. *** <https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/> Permanent magnet synchronous motor
3. Phuong Thi Luu, Ji-Young Lee, Ji-Heon Lee, Byung-Chul Woo, *Design and analysis of a permanent magnet synchronous motor considering axial asymmetric position of rotor to stator*, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 7–10; pp. 37–40, Jeju-do, South Korea, July 2018.
4. Dr. A. Sheela, M. Atshaya Mohan, *Design of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle application using finite element analysis* International Journal Of Scientific & Technology Research, **9**, 3, March 2020,
5. M. Obata, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Inoue, *Characteristics of PMASynRM with ferrite magnets for EV/HEV applications*, the 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012.
6. G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo, *Performance comparison between surface-mounted and interior PM Motor drives for electric vehicle application*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **59**, 2.
7. Sekerák Peter, Hrabovcová Valéria, Rafajdus Pavol, Kalamen Lukáš, Onufer Matúš, *Effect of permanent magnet rotor design on PMSM properties*, Transactions on electrical engineering, **1**, 3, 2012.
8. Ye Zhen-Nan, Luo Wei-Dong Zhang Wen-Ming, Feng Zhi-Xiang - *Simulative analysis of traction motor cooling system based on CFD* -, School of Mechanical Engineering University of Science and Technology China, 2011.
9. A. Semon, L. Melcescu, *Optimizarea numerică a inductorului unui motor sincron de tracțiune cu magneți permanenți interiori*, Simpozionul de mașini electrice SME', Octombrie 2015;
10. Yannis L. Karnavas, Ioannis D. Chasiotis, Emmanouil L. Peponakis, *Cooling system design and thermal analysis of an electric vehicle's in-wheel PMSM*, XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), September 2016.
11. C. Mademlis, N. Margaritis, J. Xypteras, *Magnetic and thermal performance of a synchronous motor under loss minimization control*, IEEE Trans. on Energy Conversion, **15**, 2, pp. 135- 142, July 2000.
12. Liu Qinghua, *Analysis, design and control of permanent magnet synchronous motors for wide-speed operation*, A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Electrical Engineering National University of Singapore, 2005
13. Phuong Thi Luu, Ji-Young Lee, Ji-Heon Lee, Byung-Chul Woo, *Design and analysis of a permanent magnet synchronous Motor considering Axial asymmetric position of rotor to stator*, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); pp. 37–40, Jeju-do, South Korea, July 2018.

14. Dr.A.Sheela, M.Atshaya Mohan, *Design of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle application using finite element analysis*, International Journal Of Scientific & Technology Research , **9**, 3, March 2020,
15. Gan Zhang, Wenfei Yu, Wei Hua, Ruiwu Cao, Hongbo Qiu, Aili Guo, *The design and optimization of an interior, permanent magnet synchronous machine applied in an electric traction vehicle requiring a low torque ripple*, Appl. Sci., **9**, 3634; 2019.
16. Caifei Wang, Jianxin Shen, Patrick Chi-Kwong Luk, Weizhong Fei, Mengjia Jin, *Design issues of an IPM motor for EPS*, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, **31**, 1, pp. 71 – 87, 2011.
17. M. Obata, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Inoue, *Characteristics of PMA SynRM with ferrite magnets for EV/HEV applications*, the 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012.
18. G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo, *Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **59**, 2.
19. SEKERÁK Peter, HRABOVCOVÁ Valéria, RAFAJDUS Pavol, KALAMEN Lukáš, ONUFER Matúš , *Effect of permanent magnet rotor design on PMSM properties*, Transactions on Electrical Engineering, **1**, 2012.
20. C. Mademlis, N. Margaris, J. Xypteras, *Magnetic and thermal performance of a synchronous motor under loss minimization control*, IEEE Trans. on Energy Conversion, **15**, 2, pp. 135- 142, , July 2000.
21. V. Navrapescu, D. Anghel, M. Gudumac, M. Popescu, *Actionari electrice de curent continuu - Elemente de Proiectare*, ICPE, 2001.
22. ***IEC 60034-1:2017: Electrical machines: Rating and performance.
23. ***Altair FluxMotor 2020.1 Documentation, <https://www.altair.com/fluxmotor/>
24. C.A. Pîrlea, *Stand metrologic inteligent pentru determinarea automată a parametrilor funcționali ai motoarelor electrice asincrone*, Facultatea de Inginerie Electrica, Universitatea Politehnica București, 2021.
25. X. Liu, D. Liang, J. Du, Y. Yu, X. Yang, *A torque measuring method based on encoder for permanent magnet synchronous machine*, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1510-1514, 2014.
26. M. Enache, A. Campeanu, S. Enache, I. Vlad, *Testing stand for low - power electrical machines*, International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) ,pp. 1-6, 2017