

CONSTRUCȚII ACTUALE ȘI DE PERSPECTIVĂ ALE MAȘINILOR ELECTRICE (CONVERTOARELOR ELECTROMECHANICE)

Ilie NUCA, Andrei MEDEIȘA

Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat: Scopul acestei lucrări constă în familiarizarea cu construcțiile actuale și de perspectivă, dar și cu unele tendințe recente ale mașinilor electrice de conversie a energiilor electromecanice. Politicile actuale energetice și de mediu impun dezvoltarea continuă chiar și a mașinilor electrice clasice pentru a majora eficiența energetică globală cu considerarea, inclusive a consumului de energie a mașinii la utilizator. Standardele IEC impun clase de motoare asincrone cu eficiența energetică majorată sau alimentate obligatoriu prin convertoare statice electronice. În scopul eficientizării energetice, dar și satisfacerea cerințelor tot mai sofisticate ale acționărilor moderne, se dezvoltă vertiginos mașinile cu magneți permanenți, mașinile cu numărul de faze majorat ($m > 3$), mașinile cu reactanță variabilă MRV și cele de curent continuu fără perii (BLDC).

Cuvinte cheie: Convertor electromecanic, convertor static, acționare electrică, generator electric, magneți permanenți, PMSM, BLDC, SRM.

1. Introducere

Mașina electrică se definește ca un convertor electromecanic care servește pentru conversia energiei mecanice în cea electrică (regim generator electric) și a energiei electrice în cea mecanică (regim motor electric). Cu toate că deja au trecut aproape 200 de ani de la inventarea primei mașini electrice, rolul lor devine tot mai important, iar aria de utilizare este în extensiune. Importanța mașinilor electrice la ziua de astăzi este dovedită prin două cifre simple: pe plan mondial generatoarele electrice produc cca 98% din tot volumul de energie electrică, iar motoarele electrice consumă această energie în proporție de 60-70 la sută pentru a pune în mișcare tot felul de echipamente, mașini de lucru și linii tehnologice.

Progresul tehnico - științific și politicile actuale globale și-au pus amprentă atât asupra topologiilor constructive, cât și asupra sistemelor de control ale mașinilor electrice în scopul eficientizării conversiei energiilor. Structurile moderne de generatoare electrice sunt condiționate în primul rând de necesitatea utilizării surselor regenerabile de energie (energia mecanică a apei și vânt), caracterizate prin viteze mici. Construcțiile noi ale motoarelor electrice sunt cauzate de mai mulți factori tehnici (sursa de alimentare, asocierea cu convertoarele statice de putere, gama largă de variere a puterii de la nano până la mega wați și a turațiilor de la unități până la sute de mii, integrarea mai bună cu mașina de lucru etc.) și economico-ecologici (pierderi de putere micșorate, eficiența energetică majorată). Conversia eficientă a energiilor electromecanice impune dezvoltarea unor construcții noi asociate cu convertoare electronice de putere, inclusiv și a mașinilor electrice clasice.

Scopul prezentei lucrări constă în formularea concentrată a tendințelor actuale de dezvoltare a structurilor constructive ale mașinilor electrice în contextul progresului tehnico-științific și a politicilor globale.

1. Istoria și clasificarea mașinilor electrice

Istoria inventării și dezvoltării mașinilor electrice [1,2] este foarte captivă și necesară de știut. În anul 1831 fizicianul englez Michael Faraday a descoperit fenomenul inducției electromagnetice. Pe baza acestui fenomen, constructorul francez Antoine-Hippolyte Pixii a realizat în anul 1832 prima mașină magneto-electrică, fiind vorba de un generator de curent continuu cu magneți permanenți. În 1833 germanul Heinrich Lenz a formulat legea de reciprocitate a fenomenelor magneto-electrice și electro-magnetice, care permite reversibilitatea generatorului cu motorul electric. Motorul de curent continuu a fost inventat în 1873 de Zénobe Gramme. În 1838 electrotehnicianul Jacobi a utilizat motorul electric de curent continuu la acționarea unei bărci. Cele mai valoroase invenții ale inginerului și cercetătorului Nikola Tesla se referă la curentul alternativ (1882) și motorul (asincron) de inducție (1887), care au pus bazele ingineriei electrice moderne. Mașina sincronă cu trei faze a fost propusă în 1887 de către Friedrich Haselwander. Inventatorul rus Mihail Dolivo - Dobrovolski construiește generatorul trifazat în anul 1888, motorul asincron cu rotorul în scurtcircuit și transformatorul trifazat în 1890, iar în 1891 - prima linie trifazată de înaltă tensiune.

Marea majoritatea a mașinilor electrice sunt mașini electrice rotative și au la baza funcționării lor fenomenul de inducție electromagnetice. Aceste mașini sunt realizate din două părți principale: statorul și rotorul. După rolul distinct pe care îl au în procesele de producere a tensiunilor electromotoare, una din armături este numită inductor, iar cealaltă indus. Inductorul este armatură care produce câmpul magnetic inductor numit și câmp magnetic de

excitație. Indusul este armătura în care este indusă tensiunea electromotoare utilă sau sistemul polifazat de tensiunii electromotoare utile.

Diversitatea extrem de mare a mașinilor electrice poate fi grupă în dependența de prezența periilor/contactului mecanic, genului curentului de alimentare, turația rotorului, principiul de funcționare, prezența bobinelor sau înfășurărilor etc. (fig.1).

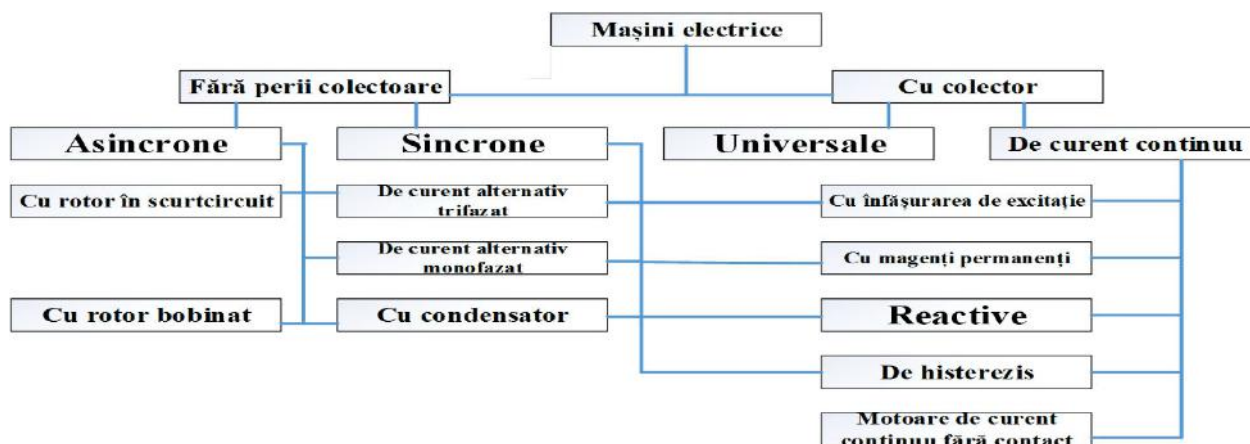


Fig.1 Clasificarea mașinilor electrice

2. Mașini asincrone

Datorită simplității constructive și fiabilității înalte mașina asincronă cu rotorul în colivie are o pondere în creștere de utilizare de cca 80 în acționările electrice moderne. Din altă parte mașina asincronă cu rotorul bobinat poate fi reglată foarte ușor reglată prin rotor (prin excitație) cu un convertor de cca 10-15% din puterea mașinii, ceea ce îi asigură o utilizare largă ca generator în turbinele eoliene sau hidraulice sau în acționările la viteze relativ mici.

Datorită ponderii mari de utilizare [3], construcțiile actuale ale motoarelor asincrone de uz general sunt axate pe minimalizarea pierderilor de putere proprii și asigurarea globală a eficienței energetice în cadrul mașinilor de lucru pentru întreaga perioadă de viață. Într-adevăr, dacă costurile de procurare și de întreținere pe durata exploatării constituie nu mai mult de 5% fiecare, iar restul 90% fiind consumul de energie al motorului, abordarea modernă este una largă cu considerarea intereselor utilizatorului și globală cu reducerea consumurilor de energie, posibilitatea reducerii energiei electrice generate și a emisiilor de gaze la centralele electrice. Standardul IEC/EN 60034-30 [4], dar și directiva UE nr.2005/32/CE, (tab.1) specifică clasele de eficiență energetică ale motoarelor asincrone cu 2,4 și 6 poli, 3 faze, 50 sau 60 Hz, tensiune până la 1000V, puterea nominală între 0,75-325kW. Motoarele cu eficiența energetică majorată pot avea gabarite și masa materialelor active majorate, colivie rotorică din cupru, raport diametru/lungime mai mic, materiale active și izolante performante, grosimea tolei de oțel sub 0,15 mm. Micșorarea pierderilor magnetice în miezul feromagnetic și celor electrice în înfășurări aduce la majorarea considerabilă a randamentului motorului (fig.2), care în final conduce la reducerea esențială a consumului de energie pe durata exploatării mașinilor de lucru sau a proceselor tehnologic.

Tabelul 1. Clase de eficiență energetică ME

Notăție	Clasa de eficiență energetică	Directiva UE nr.2005/32/CE (utilizare)
IE1	Eficiență standard	Până la 15 iunie 2011
IE2	Eficiență majorată	Din 16 iunie 2011
IE3	Eficiență Premium	Din 1 ianuarie 2015, sau IE2 cu CSF
IE4	Super Premium	Rezervată pentru viitor

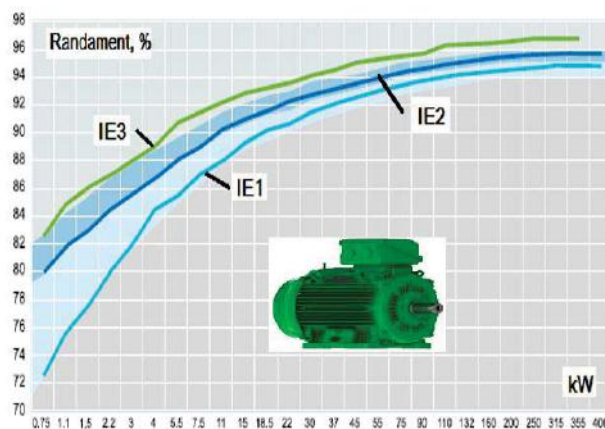


Fig.2. Eficiența energetică a MA

Utilizarea mașinilor asincrone cu numărul de faze majorat [4], adică $m > 3$, asigură sporirea fiabilității sistemelor de propulsie, majorarea cuplurilor de pornire și maxim cu cca 15-30% , reducerea esențială a vibrațiilor și zgomotului (fig.3)



Fig.3. Vedere generală a MA cu 6 faze

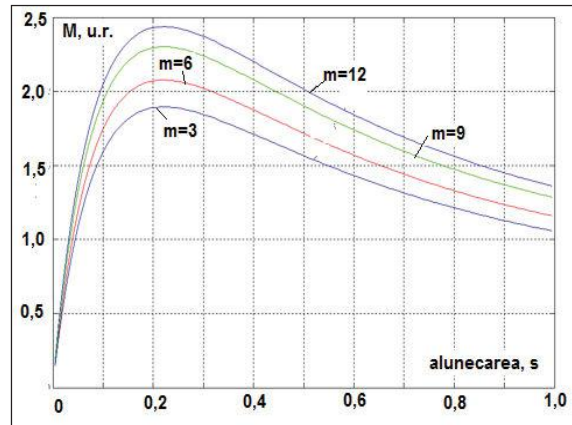


Fig.4. Caracteristicile mecanice ale MA cu $m=3,6,9,12$

Actualmente, reglarea (sau în sens mai larg – controlul) mașinilor asincrone se bazează pe metodele controlului vectorial: FOC (Flux Orientat de Control - cu orientare după flux sau câmp) și DTC (Direct Torque Control – controlul direct al cuplului). Controlul vectorial este realizat din analogia modelului matematic bifazat al MA cu motorul de cc compensat. Într-un caz particular [5], schema structurală (fig.5) va conține două circuite independente de reglare în cc pentru fluxul de control rotoric Ψ_r , cu regulatorul respectiv $R\Psi_r$ și cuplul electromagnetic al motorului M_e cu regulatorul Rm_e . Curentul statoric reactiv isx^* de ieșire corespunde fluxului de control Ψ_r , iar curentul statoric activ isy^* - mărimii mecanice (cuplului m_e sau vitezei rotorului ω_r). În baza curenților calculați isx^* , isy^* și poziției fluxului ρ_r , controlerul FOC generează semnalele necesare PWM pentru drivelele inverterului care alimentează înfășurarea statorică a motorului asincron AM. Modelul bifazat al motorului joacă rolul unui observator de stare, care în baza curenților is și tensiunilor us măsurate ale statorului și vitezei rotorului ω_r , furnizează valorile reale ale poziției ρ_r și curentului de magnetizare i_{mr} corespunzătoare fluxului Ψ_r , cât și a cuplului electromagnetic m_e (în caz de necesitate și vitezei rotorului). În consecință, permanent este menținută perpendicularitatea dintre fluxul de control și curentul statoric activ (principiul ”orientării după câmp”), cea ce asigură valoarea maximă a cuplului electromagnetic (analogic MCC). Controlul vectorial permite de a îmbunătăți caracteristica mecanică a motorului asincron și a regla viteza motorului foarte fin până la zeci de mii de turații.

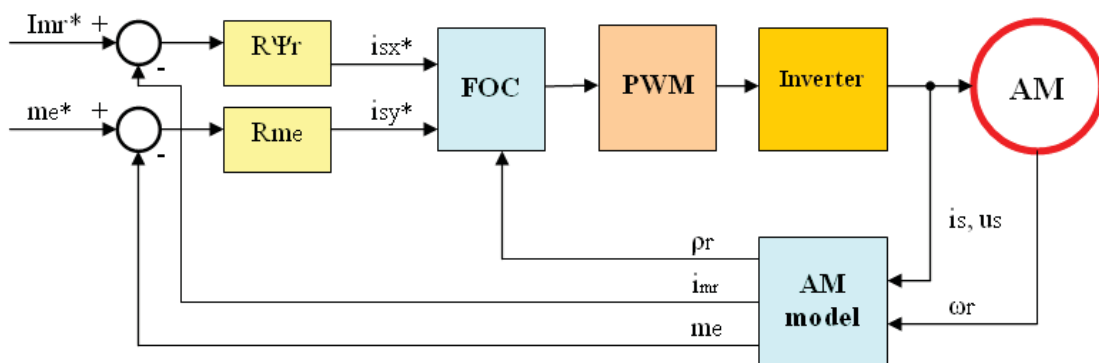


Fig.5. Structura sistemului de control vectorial al MA

3. Mașini sincrone

Mașina sincronă clasică este formată din stator cu înfășurare trifazată sau bifazată, alimentată în curent alternativ, și rotor cu înfășurarea de excitație, alimentată în curent continuu prin intermediul sistemului inele/perii. Această construcție este utilizată pentru generarea energiei electrice în calitate de turbogenerator la viteza de

3000 rpm (centrale termice/atomice) sau hidrogenerator la viteze de câteva sute turații cu puterea până la 200-1000 MW.

Construcțiile moderne ale mașinilor sincrone de putere mică și medie (sub 1000 kW) sunt dezvoltate în baza topologiilor cu magneți permanenți (MSMP sau din engleză PMSM - Permanent Magnet Synchronous Machine). Politicile de mediu și lipsa surselor de carburanți proprii, impun utilizarea energiei regenerabile a vântului și apelor, unde preponderent se utilizează generatoarele sincrone cu magneți permanenți, construcții inversate, număr majorat de poli și viteze mici. Din altă parte MSMP în regim motor se utilizează în sistemele de tracțiune (lipsa contactului mecanic - fiabilitate mare) ale electromobilelor și transportului electric public (troleibuz, tramvai, metrou), dar și în acționările industriale (ascensoare, pompe, compresoare etc.). Comparativ cu motorul asincron, MSMP nu are pierderi induse în rotor, iar factorul de putere este aproape de unitate. În fig.6 și fig.7 sunt prezentate generatorul eolian (construcție inversată, număr poli) [7] și motorul sincron [8] cu magneți permanenți elaborate în cadrul Departamentului Inginerie Electrică UTM.



Fig.6. Statorul generatorului sincron cu MP



Fig.7. Pompă centrifugală cu MSMP

Ca și în cazul MA, control modern al mașinilor sincrone se bazează pe metodele FOC și DTC [3].

4. Mașini de curent continuu

Cu toate, că aria de utilizare a MCC este descreștere, rolul este încă foarte important, dovadă fiind și ultimele realizări ale marilor producători, de exemplu, Siemens [9,10]. Motoare de curent continuu moderne pot fi asociate cu convertoarele statice, au structura modulară, confecționate din materiale electrotehnice performante, tole de oțel laminate, densitate de putere mare, eficiența majorată, sisteme de comutație îmbunătățite etc. MCC sunt utilizate pentru toate domeniile industriale (fig.8), cât și pentru propulsia electrică (electromobile, transport public, nave maritime) (fig.9). Utilizarea lor este direct legată și de dezvoltarea sistemelor HVDC de înaltă tensiune. În cazul funcționării cu sarcină variabilă, în regimuri de pornire/frânare sau necesitatea reglării fine MCC vor fi alimentate prin convertoare statice de cc.



Fig.8. MCC industriale [9].



Fig.9. MCC de tracțiune integrate cu convertoare [10].

5.ertorul

Dezvoltarea vertiginoasă a electronicii de putere și celei de control digitale a contribuit la dezvoltarea unor construcții speciale de mașini electrice, care pot funcționa doar fiind alimentate prin convertoare electronice de putere. Aceasta se referă în primul rând la mașinile cu reluctanță variabilă și la motoarele de curent continuu fără perii.

Mașina cu reluctanță variabilă MRV (în engleză: SRM – switched reluctance motor) cu poli aparenti pe stator și rotor, înfășurare pe stator este extrem de simplă în confecționare și exploatare [3]. Spre deosebire de alte tipuri cu câmp învârtitor, mașina reluctanță se bazează pe principiul de funcționare a electromagnetului, când la alimentarea unei bobine rotorul tinde să ocupe poziția cu reluctanță minimă dintre poli statorici și rotorici. Sistemul de control este dotat cu senzori de poziție, pentru a realiza succesiunea de alimentare a bobinelor statorului în funcție de poziția rotorului.

Pe lângă fiabilitatea înaltă și mentenanță simplă, motoarelor MRV au caracteristica mecanică hiperbolică și se recomandă utilizarea în tracțiunea vehiculelor. Un alt avantaj prețios îl constituie eficiența energetică înaltă și practic constantă [11,12] a motorului MRV (fig.11) la varierea largă a vitezei (și sarcinii). Datorită lipsei pierderilor de putere în rotor randamentul MRV în depășește pe al motorului asincron.

Dezavantajele MRV sunt cauzate natura proceselor: vibrații și zgomot majorat, costuri ridicate (sistem de control cu senzori de poziție a rotorului).



Fig.10. Construcția motorului reluctanță MRV

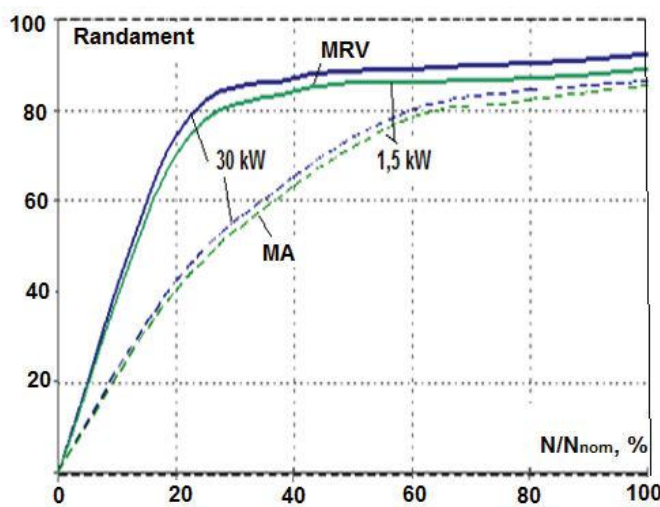


Fig.11. Eficiența motoarelor MRV și MA

Motorul de curent continuu fără perii [11,13] cu abrevierea internațională BLDC (BrushLess DC motor) constructiv este asemănătoare MSMP, dar diferă prin modul de control și alimentare cu tensiuni de formă trapezoidală (la MSMP – cu tensiuni sinusoidale). Pe stator (fig.12) este amplasată înfășurarea trifazată, care se alimentează de la convertorul static (inverter). Impulsurile de alimentare sunt gestionate de sistemul de control cu microprocesor în funcție de poziția rotorului, determinată cu ajutorul senzorilor Hall (fig.13).



Fig.12. Construcția motorului BLDC

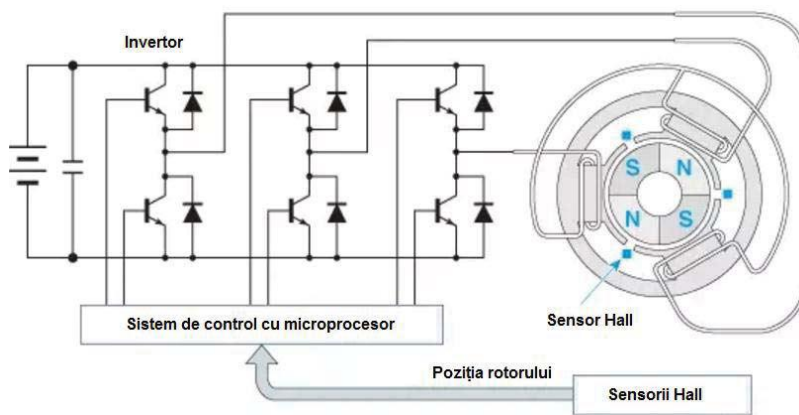


Fig.13. Sistemul de control BLDC cu microprocesor și inverter

Sistemul de control împreună cu convertorul de acționare cu motoare BLDC reprezintă una din cele mai performante soluții pentru o gamă largă de aplicații

din diferite domenii (tehnica de calcul și periferice, electrocasnice, mecatronică, robotică, automotive, aviație etc). Astăzi se produc servomotoare BLDC cu puterea de cca 300 kW, ceea ce simplifică esențial elaborarea și implementarea sistemelor de acționare și automatizare ale proceselor tehnologice.

Un criteriu de clasificare al mașinilor electrice este direcția fluxului. Mașinile cilindrice examinate mai sus au fost cu flux radial. În dependență de topologia mașinii de lucru, într-un caz sau altul pot fi utilizate motoare sau generatoare electrice cu flux axial și cu flux transversal [3]. Pentru acționărilor cu mișcări de translație corespunzătoare vor fi motoarele electrice liniare.

6. Concluzii

Convertorul electromecanic (mașina electrică) este generatorul absolut de energie electrică, care mai apoi în proporție de 60-70 la sută este utilizată de motoarele electrice pentru a pune în mișcare mașinile de lucru din toate sferile activității umane. Dezvoltarea industriei de producere a mașinilor electrice, cât și utilizarea lor rațională ar trebui să fie un domeniu prioritar pentru guvernul oricărui țări.

Pentru reducerea volumului de producere și a consumului de energie electrică este necesară, în conformitate cu politicile actuale europene, de a fabrica și a utiliza doar motoare electrice cu clasa de eficiență energetică majorată (IE2) sau premium (IE3). Aici s-ar recomanda ajustarea Planului de acțiuni al Programului național de eficiență energetică cu măsuri de stimulare a utilizării motoarelor electrice cu clasele de eficiență energetică IE2 și IE3, cât și a sistemelor de acționări reglabile cu convertoare statice de curent continuu sau alternativ.

Dezvoltarea construcțiilor noi de mașini electrice, inclusiv integrarea cu convertoare statice, este imperativă pentru reducerea consumurilor de energie electrică și ridicarea performanțelor tehnice ale mașinilor de lucru și proceselor tehnologice automatizate.

Bibliografie

1. Electric motor. https://en.wikipedia.org/wiki/electric_motor
2. T.Ambros. *Mașini electrice: Vol. I.- Ch.:Universitas, 1992. ISBN 5-362-00896-X.*
3. I. Boldea, S.A. Nasar. *Electric Drives: CRC Press, Florida, 3d edition, 2016*
4. IEC 60034-30-1:2014. Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). <https://webstore.iec.ch/publication/136>
5. I.Rîmbu, V.Mihalache, A.Rîncău, A.Motroi, V.Eșanu, I.Nuca. *Development of vector control system for trolleybus asynchronous motor (TAM).* Proceedings of the 7th International Conference of Electromechanical and Power Systems. SIELMEN'2009, Iași, Proceedings, V.2, pp.109-112.
6. I.Nuca P.Todos, A.Jalbă. *Mathematical modeling of the asynchronous motors for underwater vehicle drives.* Proceedings of the 10th International Conference on Electromechanical and Power Systems. SIELMEN 2015, Chișinău, p.292-296, ISBN 978-606-567-284-0, Editura ALMA Craiova, România
7. Ion Bostan, Adrian Gheorghe, Valeriu Dulgheru, Ion Sobor, Viorel Bostan, Anatolie Sochirean. *Resilient Energy Systems. Renewables: Wind, Solar, Hydro.* Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2013 – 507 p. ISSN 1566-0443
8. T.Ambros, I.Nuca, M.Burduniuc, I.Isac *Development and Fabrication of Permanent Magnet Synchronous Machines based on Refurbished Materials,* A 18-a Conferință Națională de Acționări Electrice CNAE 2016, 13-14 octombrie 2016, Cluj-Napoca, România
9. <http://www.industry.siemens.com/drives/global/en/motor/dc-motor/pages/default.aspx>
10. *Siemens Integrates Electric Car Motor/Inverter Into Single Unit.* <http://insideevs.com/siemens-integrates-electric-car-motorinverter-single-unit/>.
11. T. J. E. Miller. *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives.* - Oxford University Press, USA, 1989
12. A. Dragomir, I. Nuca. *Pierderile și randamentul motorului cu reluctanță variabilă.* Conferința Tehnico-Stiintifică a colaboratorilor, doctoranzilor și Studentilor UTM. Chișinău, 2009. vol.1. pp.333-337
13. Duane Hanselman. *Brushless Permanent Magnet Motor Design.* - Magna physics publishing, 2d edit, 2006.