

## MICROMAȘINI ELECTRICE SINCRONE ÎN CONSTRUCȚIE „DUBLU EXCITATĂ” DEZVOLTATE LA INCDIE ICPE-CA

Cristinel ILIE<sup>1</sup>, Nicolae TĂNASE<sup>1</sup>, Gheorghe-Mihai MIHĂIESCU<sup>1</sup>, Ionel CHIRIȚĂ<sup>1</sup>,  
Mihai GUȚU<sup>1</sup>, Marius POPA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ICPE-CA (Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică)  
cristinel.ilie@icpe-ca.ro, nicolae.tanase@icpe-ca.ro, mihai.mihaiescu@icpe-ca.ro,  
ionel.chirita@icpe-ca.ro, mihai.gutu@icpe-ca.ro, marius.popa@icpe-ca.ro

**Rezumat.** Lucrarea prezintă modul în care a fost dezvoltat un generator electric într-o variantă originală, cu dublă excitație. În principal s-a urmărit realizarea unui generator electric de putere cât mai mare, corelat cu o masă cât mai mică, pentru un volum dat, destinat aplicațiilor specifice în domeniul UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Modelul experimental al mașini electrice dezvoltate este realizat din pachet de tole de cilindric în formă inelară pe care sunt realizate bobine toroidale. Se diferențiază de mașinile clasice prin aceea ca statorul are ambele laturi ale bobinelor (care îmbracă atât suprafața exterioară a cilindrului stator, cât și suprafața sa interioară) active atât la nivelul întrefierului exterior, cât și a celui interior, în câmpul magnetic heteropolar generat de inductorul exterior și respectiv de inductorul interior, solidare pe un rotor dublu, realizat cu magneți permanenți. Tensiunile electromotoare produse în bobine datorită interacției cu magneții permanenți din interior cât și cu cei din exterior se adună, mărind astfel puterea specifică a mașini electrice.

În lucrare se prezintă o dezvoltare specifică de mașină electrică cu această construcție, în variantă sincronă monofazată, cu excitație prin magneți permanenți, ca microgenerator cu aplicații în domeniul aerospațial. Pe lângă elementele teoretice și de calcul, datorită structurii constructive neconvenționale și cerințelor specifice aplicației, se fac referiri cu privire la materialele recomandate și la elementele de tehnologie. Astfel, pentru reducerea masei, acolo unde nu a fost nevoie de piese realizate din materiale feromagnetice, s-a preferat un material sintetic izolant modern „KETRON 1000 PEEK” cu rezistență mecanică superioară și greutate specifică relativ mică față de metale. În ceea ce privește materialele utilizate pentru jugurile de închidere a circuitului magnetic la nivelul inductorului și indusului, la modelul experimental inițial aceste armături au fost realizate din materiale feromagnetice convenționale: pentru inductor OL37 masiv (inelele exterior și interior care sunt echipate cu magneți permanenți), iar pentru indus tabla de Fe-Si grosime 0,2 mm (pachet inelar). Pentru modelul optimizat, în dorința de a minimiza secțiunile transversale ale armăturilor (greutate de ansamblu mai mică), dar cu prețul unor solicitări magnetice crescute, am optat pentru un material feromagnetic modern, cu caracteristici magnetice superioare, Hipermendur (Hiperco 50), atât masiv pentru inductor, cât și tole cu grosime de 0,2 mm pentru indus.

### 1. INTRODUCERE. ASPECTE GENERALE PRIVIND CONSTRUCȚIA MAȘINILOR ELECTRICE „DUBLU EXCITATE”

Platformele aeriene fără pilot la bord (UAV), respectiv a sistemelor complexe (UAS) ce cuprind flota UAV și sistemele de comandă-control-comunicare, inclusiv partea de deservire operațională de la sol, marchează pe plan mondial realizări impresionante, cu aplicații militare și civile de deosebită importanță [1].

Mașinile electrice pentru UAV-uri apar în două situații:

- *cu rol de motoare electrice* pentru acționarea sistemelor de propulsie;
- *cu rol de generatoare electrice* antrenate de motorul termic al platformei UAV de tip hibrid (deplasare cu motor termic și sustentație la punct fix cu motoare electrice), destinat alimentării electrice și reîncărcării în zbor a bateriei de acumulatori.

Motoarele electrice pentru propulsia UAV-urilor sunt de curent continuu în două variante:

- *cu comutație mecanică* prin intermediul sistemului perii-colector [2];
- *cu comutație statică*, fără perii, [3-5].

Prin prezența colectorului mecanic și a contactului alunecător la perii, motoarele cu colector prezintă dezavantaje legate de durata de viață, randament, chiar și robustețe (gama de turație

redușă, întreținere periodică), însă sunt relativ ieftine, au costuri reduse de construcție și nu necesită controler pentru turații fixe. În domeniul dronelor se utilizează în general pentru aplicații neprofesionale (jucării).

Motorul fără perii cu comutație statică, cu durată de viață ridicată (peste 1000 de ore), este mai economic, nu necesită mentenanță, nu este necesară schimbarea periilor (pentru că nu există), sunt eficiente la turații ridicate, însă funcționalitatea este asigurată de controler, iar performanțele, respectiv caracteristicile tehnice sunt definite pentru ansamblul motor-controler (controler dedicat sau configurat după parametrii motorului).

O categorie specială de motoare cu eficiență și densitate de putere ridicate, cu flux axial, cu întrefier redus sunt cele care utilizează magneți permanenți în aranjamente speciale tip cilindru Halbach [6].

În ce privește generatoarele electrice pentru platforme hibride firmele furnizoare oferă practic aceeași variantă constructivă ca la motoare fără perii, cu magneți permanenți pe inductor (rotor) și electromagneți pe indus (stator), mașina electrică fiind folosită însă ca generator sincron trifazat cu ieșirea pe un bloc redresor comandat [7].

În urma analizei specificațiilor mașinilor electrice existente pe piață, s-a apreciat ca fiind oportună dezvoltarea unui generator electric într-o variantă originală [8].

În portofoliul brevetelor de invenție al INC DIE ICPE-CA se situează brevetul de invenție nr. 125881/2011 cu titlul „Mașină electrică dublu excitată” [8]. Pe baza acestuia s-au realizat lucrări, cea mai nouă având succes în cadrul conferinței internaționale ATEE 2019 [9].

Soluția constructivă are în vedere, în principal, următoarele (Fig. 1):

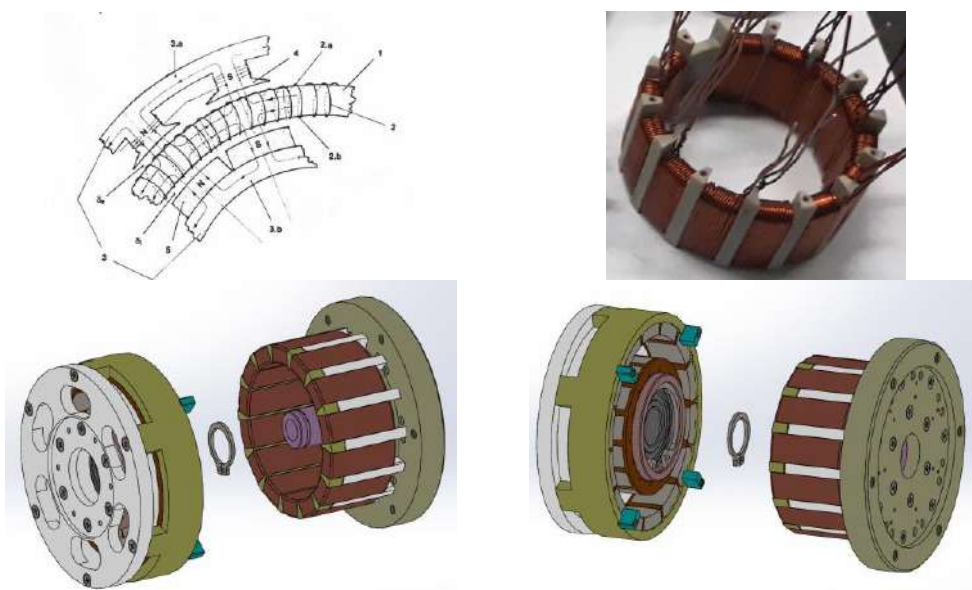


Fig.1. Soluții de principiu și constructive pentru mașină electrică cu „dublă excitație”.

Armătura indus se prezintă sub forma unui tor, format din tole inelare, iar înfășurarea indusului este toroidală cu bobine în inel pe jugul cilindric din tole.

Armătura inductor este dublă, formată din două juguri feromagnetice cilindrice care flanchează concentric la exterior și la interior indusul. Jugurile susțin același număr de perechi de poli magnetici în aranjament heteropolar, spre interior la jugul exterior și spre exterior la jugul interior. Cele două juguri sunt interconsolidate prin intermediul unei flanșe laterale.

Poli magnetici sunt amplasați față în față cu polarități de sens opus și delimitează în raport cu jugul indusului două întrefieruri, exterior și interior, astfel că circuitele de închidere a fluxului magnetic sunt independente la nivelul acestora, Fig. 2.

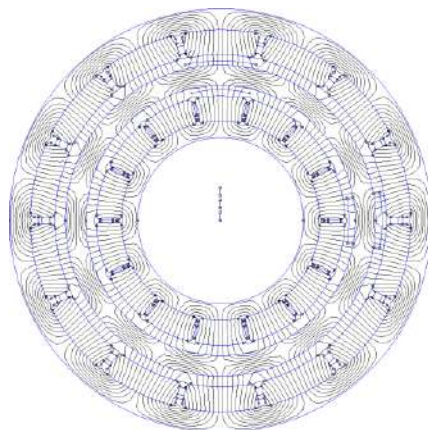


Fig.2. Structura liniilor de câmp magnetic (magneți permanenți pe ambele juguri).

Construcția se pretează la un număr relativ mare de perechi de poli, precum și la un sistem de excitație mixt prin echiparea celor două juguri inductor, unul cu magneți permanenți și celălalt cu electromagneți (pentru reglarea parțială a nivelului de excitație).

Înfășurarea indusului, toroidal-spiralată prezintă conductoare – laturi de bobină „*de dus*” la nivelul întrefierului exterior și respectiv „*de întors*” la nivelul întrefierului interior, care, coroborat cu structura câmpului magnetic heteropolar, devin, la rotirea inductorului, sediu de tensiuni electromotoare înseriate pentru fiecare bobină.

Armătura feromagnetică toroidală a indusului din tole poate avea fețele laterale active netede cu înfășurarea amplasată la suprafață sau cu creștături pentru laturile active ale bobinelor. În faza actuală, s-a preferat prima variantă pentru a elimina total cuplurile parazite de agățare magnetică.

În varianta monofazată numărul de bobine ale indusului este egal cu numărul de poli, iar în varianta trifazată este multiplicat cu trei.

Din punct de vedere al structurii mecanice, soluția agreată de colectivul ICPE-CA, prezintă unele particularități (Fig. 1): indusul stator (cu jugul exterior și respectiv interior) este fixat pe un scut de susținere laterală, care este rigidizat cu o osie centrală pe care este amplasat rulmentul unic al mașinii (rulment cu două rânduri de bile). Cămașa exterioară a rulmentului susține rotorul cu inductor dublu (mașina nu are arbore central). Scuturile laterale sunt prevăzute cu orificii pentru circulația aerului ambiant ca agent de răcire a indusului cu bobinaj.

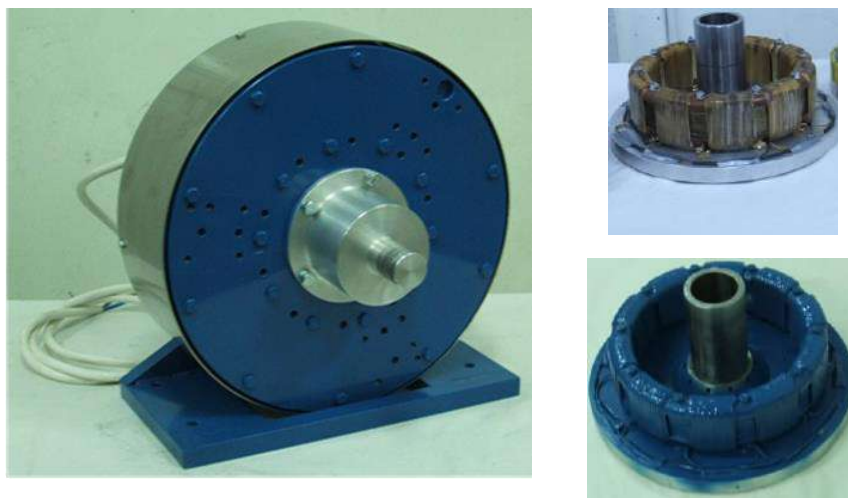


Fig.3. Model experimental de mașină sincronă „*dublu excitată*” de 1 kW.

Este de menționat realizarea anterioară în cadrul ICPE-CA a unui model experimental de mașină sincronă „*dublu excitată*”, testată ca generator pentru conversia mecano-electrică la o putere de 1 kW (variantă monofazată), respectiv 1,2 kW (variantă trifazată), la turația de referință de 600 rot/min. (Fig. 3).

## 2. ELEMENTE TEORETICE ȘI DE CALCUL. STUDIU DE CAZ.

Particularitățile constructive ale mașinii electrice sincrone dublu excitate, descrise anterior, determină elemente specifice din punct de vedere fenomenologic și al predeterminării prin calcul a principalelor caracteristici.

Astfel prezența celor două întrefieruri la care distribuția câmpului magnetic de excitație se face pe circuite magnetice distincte cu magneți și juguri separate, situate la raze diferite, determină, la nivelul acestor întrefieruri, valori diferite ale inducției  $B_{\delta}$ , a pasului polar  $\tau$ , a coeficientului de acoperire polară  $\alpha_i$ , precum și curbe diferite de variație a inducției pe pasul polar. Pe de altă parte, bobinele indusului au laturile „*de dus*” la nivelul unuia din întrefieruri, iar cele „*de întors*” la nivelul celuilalt. Coroborând acestea, tensiunile electromotoare în conductoarele laturilor „*de dus*” și respectiv „*de întors*” ale unei bobine evoluează concomitent în timp și spațiu însă cu valoare și formă de variație diferită. Conductoarele unei laturi de bobină, amplasate alăturat pe generatoarea jugului cilindric, se succed în câmp la unghi determinat de diametrul lor și raza de amplasare, astfel încât tensiunile electromotoare induse sunt defazate corespunzător și însumarea lor prin înseriere, la nivelul bobinei, se face fazorial - nu algebric.

Pentru ilustrare se prezintă studiul de caz a microgeneratorului dezvoltat pentru aplicații aerospațiale în varianta monofazată.

Calcululele electromagnetice și condițiile dimensionale restrictive specifice aplicației au condus la structura și dimensiunile prezentate în Fig. 4, în secțiune transversală și axială.

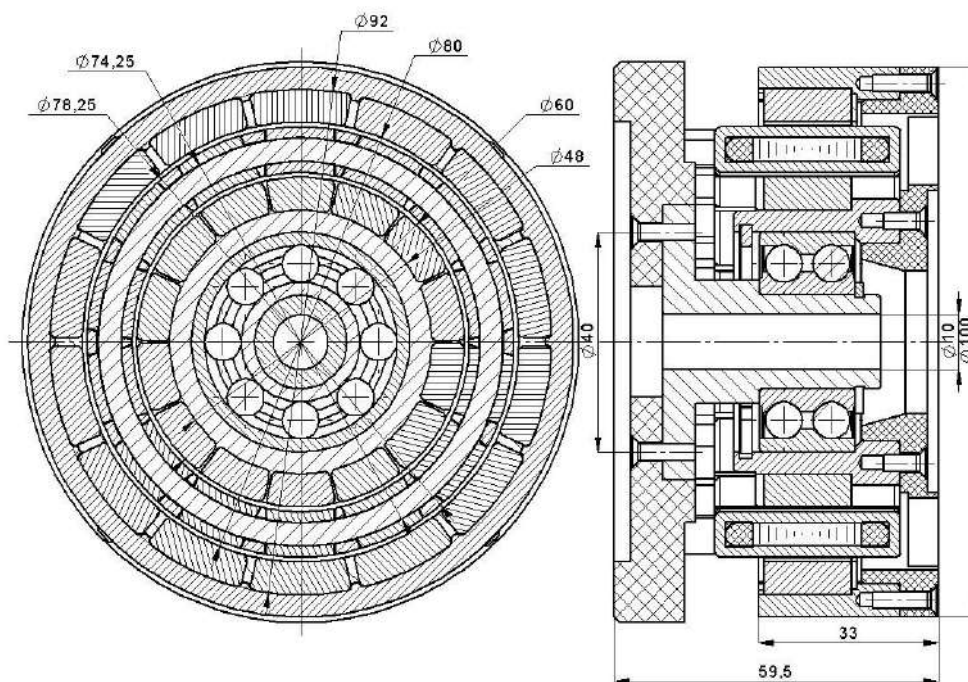


Fig.4. Secțiune transversală și axială microgenerator cu „*dublă excitație*”.

Forma și dimensiunile magneților permanenți sunt prezentate în Fig. 5.

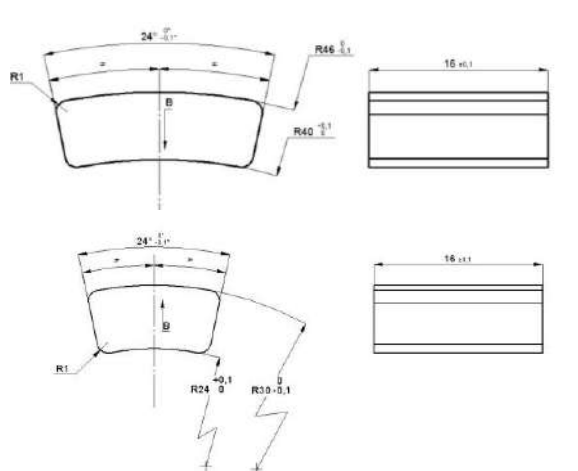


Fig.5. Magneți permanenți.

Materialul magneților permanenți, pe bază de pământuri rare, este: NdFeB-N40-SH, acoperit cu NiCuNi, avînd energie maximă de 302-326 kJ/m<sup>3</sup> și inducție de saturație 1,27 T. Structura câmpului magnetic de excitație (număr de perechi de poli p = 7) obținută cu ajutorul programului de calcul FEM și variația inducției magnetice pe pas polar la nivelul mediu al celor două întrefieruri sunt prezentate în Fig. 6.

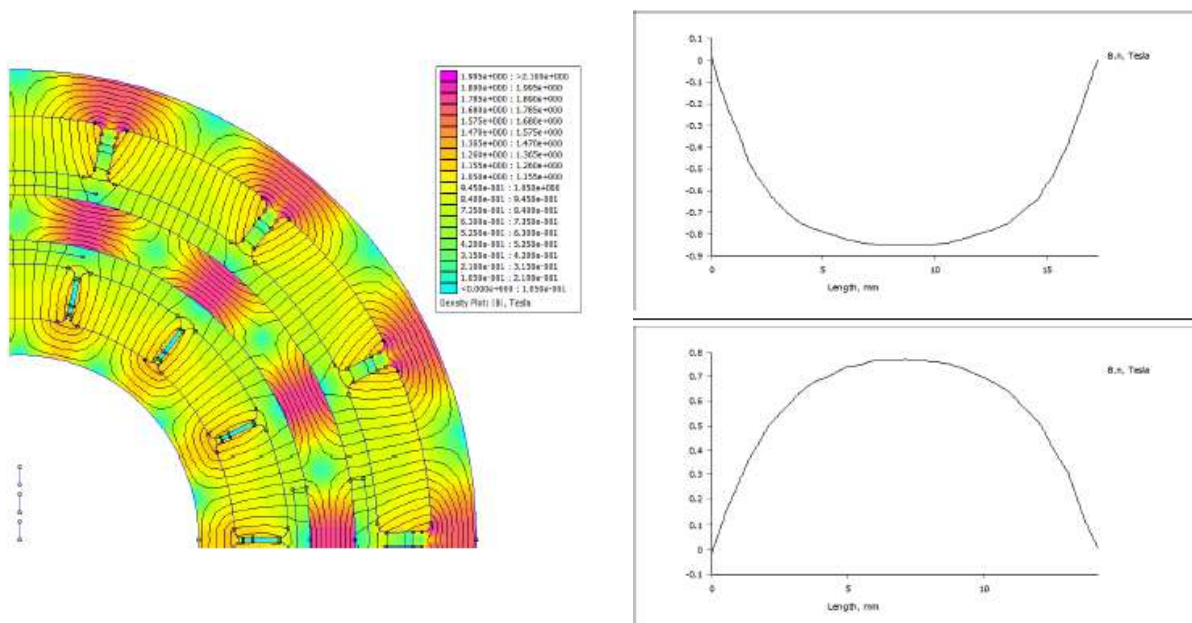


Fig.6. Structura câmpului cu codul culorilor și curbele inducției în întrefieruri.

Calculând prin integrare aria delimitată de curbele inducției, respectiv fluxul pe unitatea de lungime axială și raportând la inducție maximă pe perimetrul pasului polar s-au determinat coeficienții de acoperire polară  $\alpha_i$ :  $\alpha_{i \text{ ext}} = 0,78$  la  $B_{\delta \text{ max ext}} = 0,84$  T și  $\alpha_{i \text{ int}} = 0,74$  la  $B_{\delta \text{ max int}} = 0,775$  T.

Bobinele indusului toroidal sunt inelare, în număr de  $2p$ , respectiv  $2 \times 7 = 14$  în cazul studiului de față. Fiecare bobină conține două straturi a câte 12 conductoare pe strat ( $n_{\text{str}}=2$ ,  $n_{\text{cstr}}=12$ ,  $n_{\text{cb}}=24$ ) din sârmă CuEm cu diametrul  $d_c = 0,85$  mm.



Așa cum s-a arătat mai sus, dispunerea alăturată a conductoarelor pe generatoarea jugului toroidal determină adunarea fazorială a tensiunilor electromotoare induse în inductoarele din laturile active la nivelul celor două întrefieruri, ceea ce determină luarea în considerație a doi coeficienți de repartizare a conductoarelor (corespunzător laturilor active din cele două întrefieruri) atunci când se calculează tensiunea electromotoare rezultantă la capetele unei bobine. Pentru conductoarele și geometria prezentate anterior, au rezultat  $k_{rep\ ext} = 0,86$  la nivelul întrefierului exterior și  $k_{rep\ ext} = 0,80$  la nivelul întrefierului interior.

Pornind de la relația tensiunii electromotoare instantanee la extremitățile unui conductor  $u_{e\ cond} = v \times B_{\delta} \times l$  ( $v$  – viteza tangențială,  $l$  - lungimea activă axială, egală cu a magnetilor permanenți) și ținând seama de acoperirea polară (coeficienții  $\alpha_i$ ), inducția maximă (de palier) în întrefieruri, precum și de repartizarea conductoarelor (coeficienții  $k_{rep}$ ), s-a calculat valoarea eficace a tensiunii electromotoare la extremitățile unei bobine (la 2500 rot/min), pentru armonica fundamentală:  $u_{e\ ef\ bob1} = 4,0$  V.

Pentru un montaj serie-paralel a bobinelor (câte 7 bobine în serie la două căi de curent în paralel, tensiunea electromotoare la bornele mașinii este  $u_{e\ ef\ b1} = 7 \times 4 = 28$  V.

Pentru geometria și dimensiunile descrise, luând în considerare capetele de bobină dreptunghiulare (în jurul jugului din tole toroidal), s-a calculat pentru rezistența internă a indusului (bobine conectate serie-paralel) o valoare de  $R_i = 0,21$   $\Omega$ .

Admițând, datorită construcției deschise a mașinii și a măsurilor constructive de autoventilare precum și utilizării în mediul ambient cu temperaturi scăzute (la altitudine), valori ridicate ale densității de curent în conductoare (de ordinul a 10 A/mm<sup>2</sup>), generatorul este utilizabil la conversia mecano-electrică până la o putere utilă de 300 W (în regim intermitent) la circa 26 V tensiune la borne.

### 3. REALIZARE MODEL ȘI EXPERIMENTĂRI.

Modelul experimental de microgenerator electric sincron cu dublă excitație a fost executat conform documentației de execuție folosind prelucrări de strunjite, rectificare și frezare pe mașini unelte cu comandă numerică de înaltă precizie după cum urmează: Centru de prelucrare de înaltă precizie în cinci axe - KERN Micro, Centru de prelucrare cu comandă numerică în trei axe - TOPPER TMV-400, Mașină de prelucrare prin electroeroziune cu fir - Smart Dem - KNUTH și Centru de prelucrare pentru strunjit și frezat în 5 axe - Multus B200 II C750. Unele piese componente ale microgeneratorului cu „dublă excitație” sunt prezentate în Fig. 7.

Pentru testarea generatorului s-a conceput și realizat o infrastructură formată dintr-un suport de fixare a statorului și un arbore suplimentar de ieșire prins pe flanșa rotorului. Testarea modelului experimental de microgenerator a cuprins experimentări la funcționarea în gol și în sarcină. Testarea s-a efectuat cu generatorul montat în infrastructura suport menționată și antrenat cu un motor electric de curent continuu cu rotor disc de putere 1000 W la turația de 3000 rot/min, Fig. 8. În urma măsurătorilor efectuate s-a obținut o tensiune de mers în gol de 26 V la 2500 rot/min, cu căile de curent conectate în paralel.

Mașina electrică a fost testată în sarcină în regim de generator, debitând la bornele statorului pe o sarcină rezistivă. Motorul de curent continuu a fost comandat de un variator de tensiune. Antrenarea generatorului s-a efectuat prin intermediul unui cuplaj elastic și al unui traductor de moment mecanic. Cuplul (momentul) la arbore  $M$  [Nm], definit ca fiind cuplul mecanic atunci când generatorul este antrenat de către motorul de acționare al standului, s-a determinat cu ajutorul traductorului de cuplu model T4WA-S3. Traductorul este de fabricație Hottinger BM și are următoarele caracteristici: cuplu maxim 200 Nm, clasa de precizie 0,1.



Fig.7. Piese componente ale microgeneratorului cu „dublă excitație” [9].

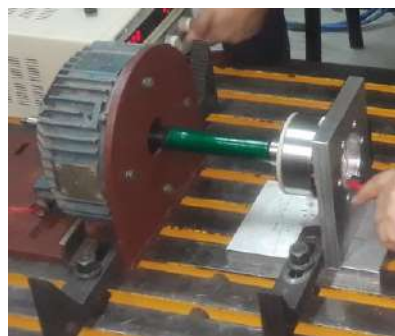


Fig.8. Aranjamentul de testare a microgeneratorului cu „dublă excitație”[9].

Pentru încărcarea generatorului în sarcină, s-au folosit rezistențe bobinate de putere cu valoarea de  $2 \Omega$  și puterea de 1 kW, configurându-se diverse valori de sarcini rezistive, între 2 și  $20 \Omega$ . În urma prelucrării rezultatelor s-au trasat principalele caracteristici ale generatorului în varianta conexiune paralel a celor două căi de curent. S-a dovedit mai avantajoasă (putere utilă vs. densitate de curent @ 2500 rot/min).

În timpul experimentărilor în gol și sarcină s-au măsurat valorile eficiente ale tensiunii la borne și curentului debitat (în contextul întregului conținut de armonici). De asemenea s-a măsurat puterea activă debitată.

Măsurătorile, la turația de referință 2500 rot/min, au evidențiat o tensiune la borne de mers în gol de 26 V.

În Fig. 9 se prezintă graficul puterii utile debitate în funcție de curentul debitat pe rezistența de sarcină (sarcină rezistivă la turația de 2500 rot/min).

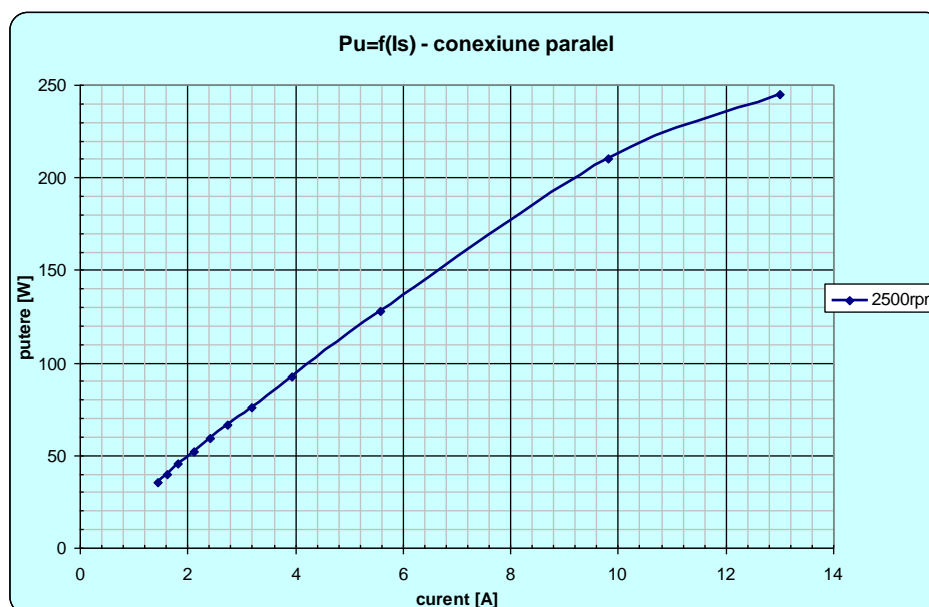


Fig.9. Puterea utilă funcție de curentul debitat pe rezistența de sarcină microgenerator cu „dublă excitație”.

Se poate aprecia o putere debitată în regim continuu (la 2500 rot/min) de circa 230 W iar în regim intermitent (cu forțarea densității de curent) până la circa 250 W.

#### 4. CONCLUZII

Lucrarea prezentată se referă la rezultatele colectivului de autori din ICPE-CA în concepția, proiectarea, realizarea și experimentarea unui microgenerator electric pentru aplicații în domeniul spațial tip UAV. Modelul mașinii electrice dezvoltate este realizat într-o variantă originală, cu „*dublă excitație*”, pentru care ICPE-CA deține brevet de invenție. Modelul este conceput ca generator sincron monofazat. Experimentările au evidențiat funcționalitatea până la puterea maximă de 250 W obținută la turația de 2500 rot/min.

#### MULȚUMIRI

Mulțumim Ministerul Cercetării și Inovării (MCI), care a făcut posibilă această cercetare finanțând contractul 1SOL / 2017, cu titlul „*Platforme UAV (vehicule aeriene fără pilot) cu capacități dedicate și infrastructură suport, pentru aplicații în misiuni de securitate națională*”. Mulțumim, de asemenea, Institutului Național de Cercetări Aeronautice „Elie Carafoli” - INCAS, care a condus această cercetare și Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA din București, în ale cărui laboratoare a fost dezvoltat microgeneratorul electric.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1]. \*\*\* Specificatii sistem UAS / MAI, „Elie Carafoli”-INCAS, UPB-Campus, ACTTM, ICPECA, UTI Grup, Avioane Craiova.
- [2]. \*\*\* [usaquadcopters.com](http://usaquadcopters.com).
- [3]. \*\*\* <https://fu-rc.com/collections/motor/products/aokfly-r-vector-2306-brushless-motors>.
- [4]. \*\*\* <https://www.nicemotorhk.com/>.
- [5]. \*\*\* <https://www.kdedirect.com/>.
- [6]. \*\*\* <http://www.launchpnt.com/>.
- [7]. \*\*\* <http://www.sullivanuv.com/>.
- [8]. Kappel W., Gavrilă H., Mihaiescu G.M., Nicolaie S., Ionita V., Marin D., Macamete E, Brevet de invenție „Mașină electrică dublu excitată”, nr.125881/2011.
- [9]. C. ILIE, M. MIHAIESCU, I. CHIRITA, M. GUTU, M. POPA and N. TANASE, "Synchronous Electric Generator With Double Excitation," 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724866.
- [10]. \*\*\* <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- [11]. Constantin Bala, Masini Electrice, Editura didactica si pedagogica, Bucuresti, 1979.
- [12]. V. Fireșteanu, Analiza în Element Finit în Studiul Mașinilor Electrice, Ed. Printech, 2010.