

PROGRAM PNII - PARTENERIATE

COD PROIECT: PN-II-PT-PCCA-2013-4-1743

NR. CONTRACT FINANȚARE: 41/2014

TITLU PROIECT: *Turbină eoliană hibridă cu ax vertical*

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC (RST)

ETAPA DE EXECUȚIE NR. II/2015

TITLU ETAPĂ: *Proiectarea parțială a modelelor experimentale ale GEH și ale sistemului de gestiune a energiei*

CUPRINS

1. OBIECTIVUL GENERAL AL PROIECTULUI.....	3
2. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE.....	3
3. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE.....	3
4. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ	4
5. REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL ETAPEI CURENTE	15
6. CONCLUZII.....	15
7. BIBLIOGRAFIE	15

1. OBIECTIVUL GENERAL AL PROIECTULUI

Obiectivul general al proiectului este reprezentat de studiul, proiectarea, realizarea experimentală, testarea și monitorizarea unui model experimental de Generator Eolian Hibrid (GEH) echipat cu sistem de gestiune a energiei electrice și termice, destinat turbinelor eoliene hibride cu ax vertical, puterea totală utilă a generatorului, electrică și termică, luată în calcul fiind de 3 kW.

2. OBIECTIVELE ETAPEI DE EXECUȚIE

Obiectivele specifice *Etapei II de execuție* a proiectului HYWINDT sunt următoarele:

- proiectarea și optimizarea constructiv-funcțională parțială a modelului experimental al GEH;
- proiectarea parțială a sistemului de gestiune a energiei;
- diseminarea rezultatelor de cercetare la conferințe-simpozioane de specialitate cu vizibilitate internațională, respectiv în reviste indexate ISI Thomson.

3. REZUMATUL ETAPEI DE EXECUȚIE

A doua etapă de execuție a proiectului HYWINDT a vizat proiectarea parțială și optimizarea modelelor experimentale ale GEH și ale sistemului de gestiune a energiei, respectiv diseminarea rezultatelor de cercetare prin publicare de lucrări științifice la manifestări științifice, respectiv în reviste de specialitate.

Activitatea II.1. Proiectarea și optimizarea constructiv-funcțională a modelului experimental al GEH - Partea I. Pornind de la soluțiile analizate în etapa anterioară a proiectului, cercetările efectuate au avut ca obiectiv dimensionarea preliminară a componentelor principale ale GEH (generatorul electric cu magneți permanenți, respectiv sistemul de încălzire inductiv).

Activitatea II.2. Proiectarea sistemului de gestiune a energiei - Partea I. O atenție particulară a fost acordată definirii soluției tehnice aferente sistemului de gestiune a energiei electrice și termice produse de GEH. În cadrul cercetărilor efectuate s-a analizat structura sistemului de gestiune a energiei care va fi implementată ulterior pe standul experimental destinat analizei și monitorizării sistemului dezvoltat în cadrul proiectului.

Activitatea II.3. Diseminarea rezultatelor prin participare la manifestări tehnico-științifice și publicare de articole de specialitate. Cercetările efectuate s-au concretizat prin elaborarea unui număr de 7 lucrări/articole științifice (5 dintre lucrări publicate la conferințe/simpozioane internaționale, 1 articol publicat în revistă indexată ISI, iar 1 articol acceptat pentru publicare la o revistă indexată ISI). Un al 8-lea articol se afla în curs de finalizare urmând a fi diseminat în anul 2016. Lucrările științifice au fost prezentate la următoarele conferințe/simpozioane internaționale:

- *17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland,*
- *The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2015, Bucharest, Romania,*
- *World Renewable Energy Congress, WREC 2015, University Politehnica of Bucharest, Romania.*

Cele 2 articole științifice au fost elaborate și trimise spre publicare la revista indexată ISI ambele fiind acceptate spre publicare (unul este deja publicat, iar celălalt urmează a fi publicat în 2016):

- *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE).*

4. DESCRIEREA ȘTIINȚIFICĂ ȘI TEHNICĂ

4.1. Structura constructiv-funcțională a GEH analizat

GEH studiat în cadrul proiectului HYWINDT, spre deosebire de generatoarele electrice clasice, permite conversia energiei eoliene atât în electricitate cât și în energie termică cu un randament de conversie superior, generatorul având dimensiuni reduse de gabarit și cost scăzut.

În etapa anterioară a proiectului s-au propus mai multe soluții constructive de GEH pentru care s-au depus 3 cereri de brevet de invenție la OSIM [1-3]. Dintre aceste variante s-a selectat soluția de GEH cu flux magnetic radial și rotor interior. GEH propus este alcătuit din două părți principale, un Generator cu Magneți Permanenți (GMP) ce produce energie electrică întocmai ca un generator electric de tip sincron trifazat, respectiv un Sistem de Încălzire cu Magneți Permanenți (SIMP), ce produce energie termică, Fig. 1 [4]. Rotorul GEH este echipat cu Magneți Permanenți (MP) fiind comun celor două componente (GMP și SIMP) ale sistemului de conversie.

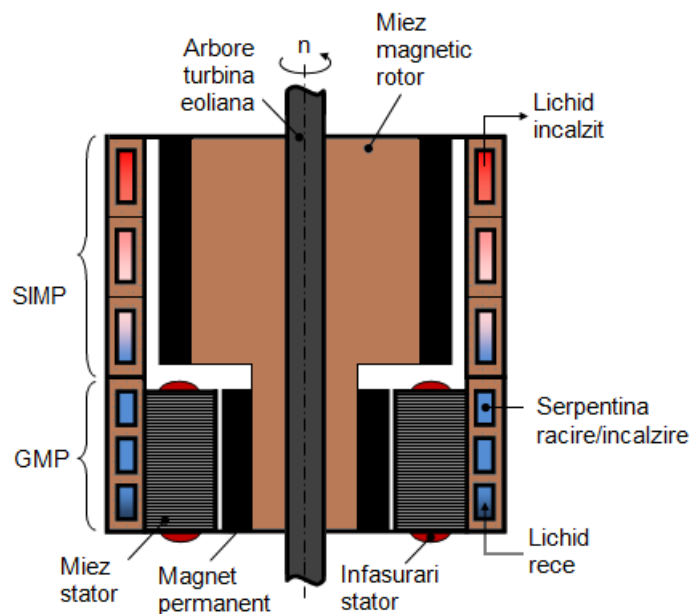


Fig. 1. Schema de principiu a GEH cu flux magnetic radial și rotor interior - secțiune axială [4].

Căldura disipată datorită pierderilor (pierderi Joule, pierderi în fier) dezvoltate în GMP este preluată în bună măsură de serpentina exterioară parcursă de lichid, acesta fiind ulterior încălzit suplimentar prin efectul Joule al curenților induși în pereții serpentinei ca urmare a câmpului magnetic învârtitor produs de MP rotorici ai SIMP. Astfel GEH permite producerea simultană de electricitate prin intermediul GMP și de căldură prin intermediul SIMP.

O imagine de ansamblu, mai detaliată a GEH aflat în poziție orizontală este prezentată în Fig. 2 unde putem distinge părțile constructive importante ale generatorului hibrid.

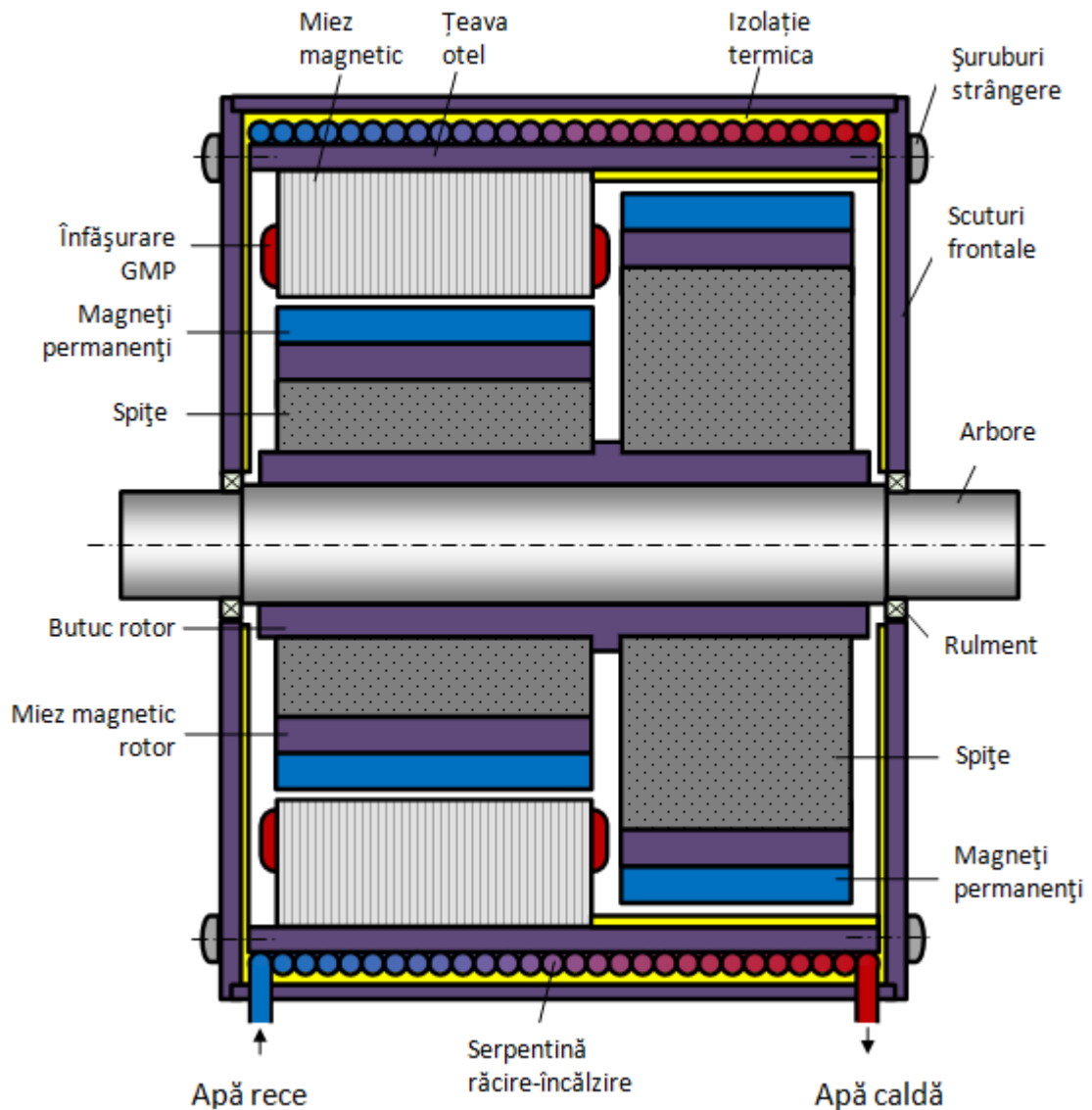


Fig. 2. Secțiune axială prin GEH (în poziție orizontală) cu evidențierea părților constructive importante.

4.2. Dimensionarea preliminară a GMP

O etapă premergătoare calculului de proiectare a GEH presupune definirea soluției de acționare a sistemului. În cazul de față sistemul eolian se consideră de tip cu acționare directă, ceea ce înseamnă că turația la nivelul arborelui principal al turbinei eoliene este aceeași cu turația GEH (egală cu turația celor două componente GMP și SIMP).

Dimensionarea preliminară a GMP a pornit de la următoarele date de proiectare:

- Puterea nominală: $S_n = 2 \text{ kVA}$,
- Turația nominală: $n_n = 180 \text{ rpm}$,
- Tensiunea nominală: $U_n = 380 \text{ V}$,
- Frecvență nominală: 57 Hz ,
- Conexiune Y.

Turația nominală a GMP a fost aleasă pe baza unor evaluări preliminare care au ținut cont de aspecte de natură mecanică specifice turbinelor eoliene cu ax vertical de mică putere.

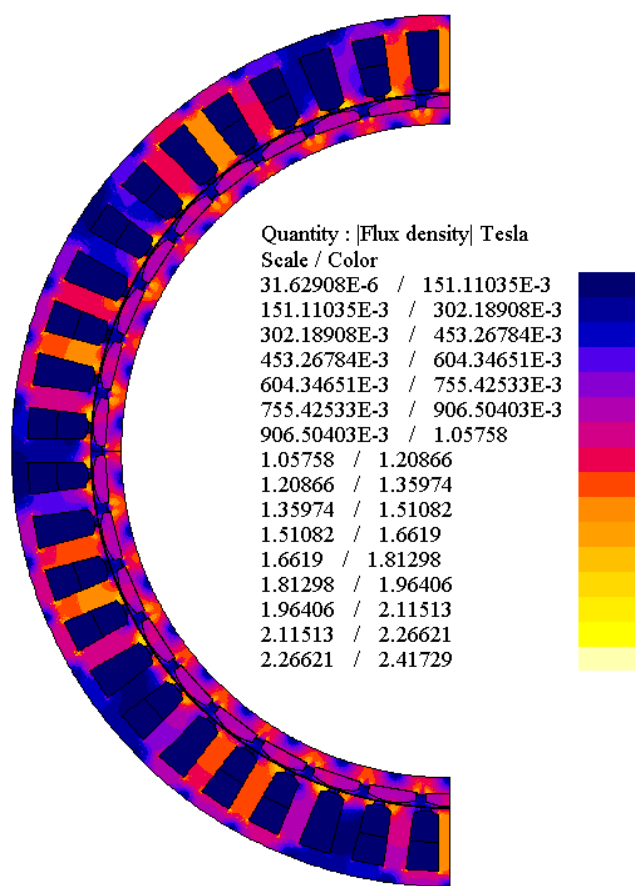
Pe baza unor calcule analitice [5], respectiv pe baza unei analize de tip element finit, utilizând pachetul de programe Flux ® s-au determinat dimensiunile principale ale GMP respectiv alte elemente de natură electrică și magnetică prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1. Caracteristici principale ale GMP

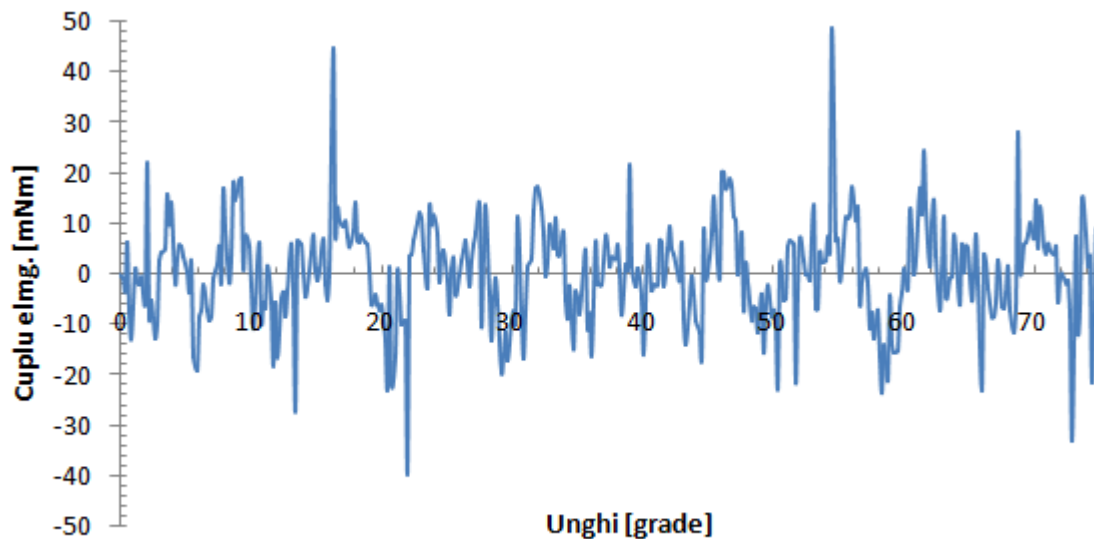
Diametru exterior stator [mm]	Diametru interior stator [mm]	Diametru interior miez stator [mm]	Lungime axială [mm]	Număr de poli rotor (magneți) 2p	Număr de creștături stator Z	Număr de spire pe fază	Număr de spire pe creștătură	Factor de înfășurare
256	210	192	150	38	48	720	42	0.905

Considerentele avute în vedere pentru determinarea soluției constructive a GMP descrisă mai sus au fost următoarele: dimensiuni de gabarit reduse, cupluri parazite minime, conținut redus de subarmonici ale tensiunii magnetice, ripluri reduse ale cuplului electromagnetic când la bornele generatorului este conectat un modul redresor. S-au analizat și alte soluții constructive de GMP, cea prezentată fiind doar una dintre acestea.

În Fig. 3 sunt prezentate rezultate obținute prin analiza numerică 2D de tip element finit a GMP la mers în gol [6]. Din studiul rezultatelor numerice se poate observa că solicitările magnetice la nivelul statorului, respectiv rotorului se încadrează în limitele recomandate, iar cuplul de agățare este foarte redus (circa 45 mNm față de cuplul nominal de circa 106 Nm, ceea ce înseamnă o valoarea a cuplului de agățare mai mică de 0,1 % din valoarea cuplului nominal).



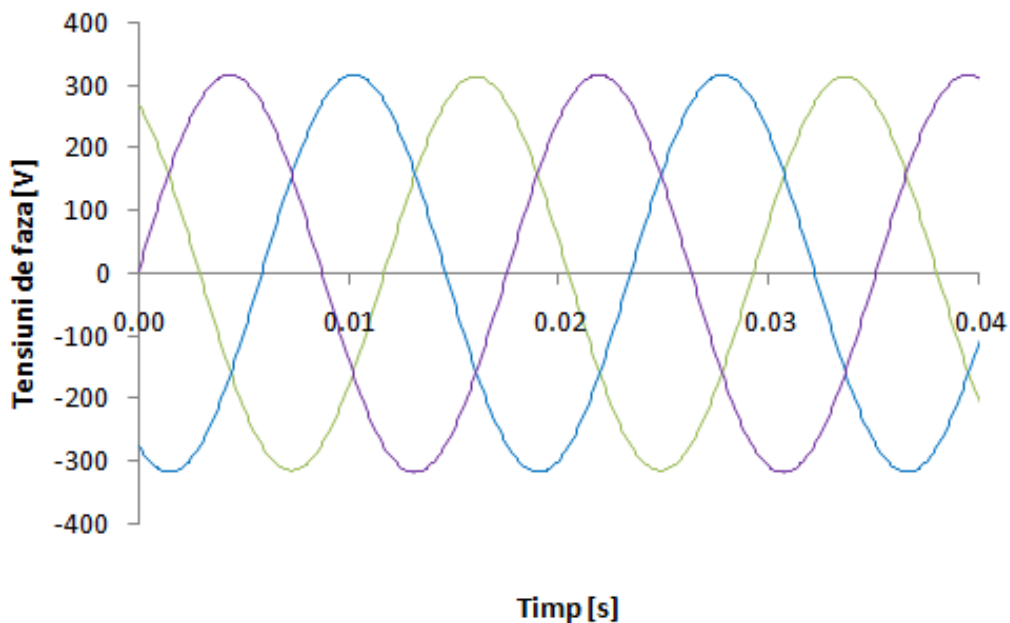
a)



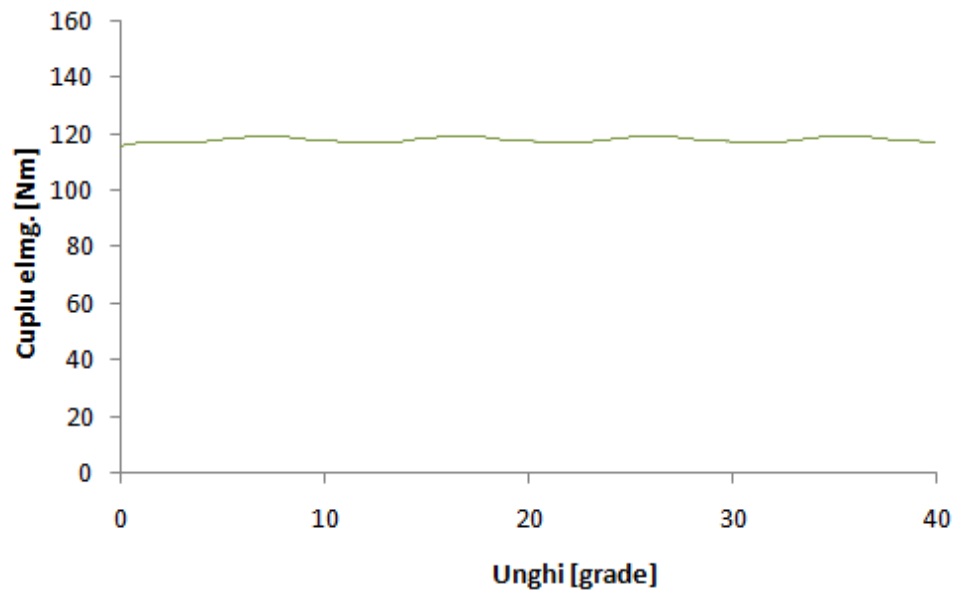
b)

Fig. 3. Rezultate numerice la mers în gol pentru GMP studiat; a) liniile de câmp magnetic și harta inducției magnetice; b) oscilațiile cuplului de agățare funcție de unghiul de poziție rotoric [6].

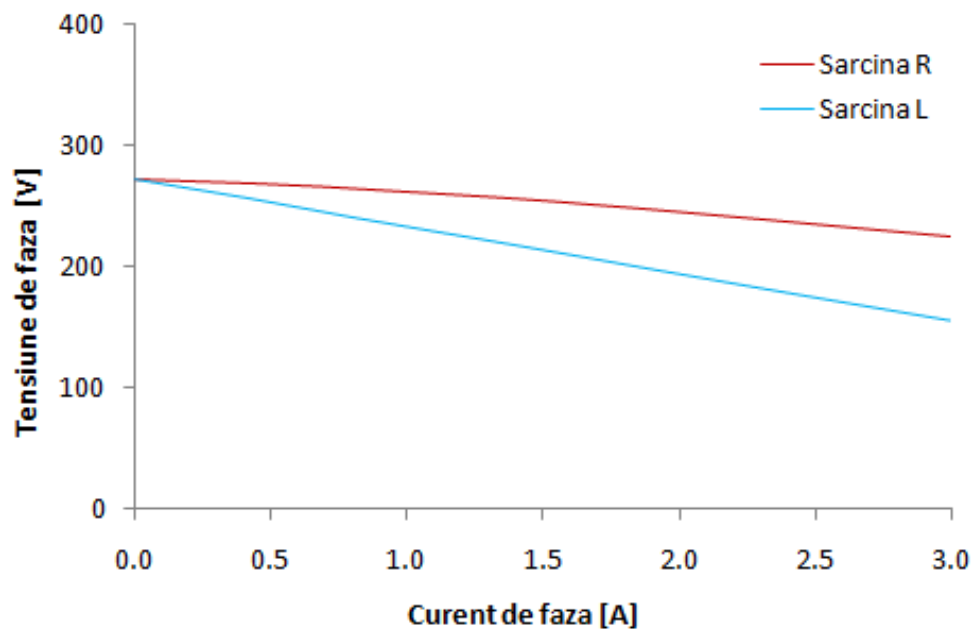
Rezultatele numerice obținute la funcționare în sarcină sunt prezentate în Fig. 4. Se observă că forma de undă a tensiunilor de fază este aproape sinusoidală, având un conținut de armonici foarte redus. Riplurile cuplului electromagnetic la funcționare în sarcină sunt de asemenea foarte reduse, amplitudinea oscilațiilor în jurul valorii medii fiind scăzută.



a)



b)



c)

Fig. 4. Rezultate numerice la funcționare în sarcină pentru GMP studiat; a) formele de undă ale tensiunilor de fază; b) variația în timp a cuplului electromagnetic; caracteristica externă [6].

4.3. Dimensionarea preliminară a SIMP

Dimensionarea preliminară a SIMP a avut la bază următoarele date de proiectare [7]:

- Putere nominală: $P_n = 1 \text{ kW}$,
- Turația nominală: $n_n = 180 \text{ rpm}$ (egală cu turația nominală a GMP),
- Randament nominal: $\eta_n = 95 \%$,
- Viteza nominală a vântului: $V_v = 12 \text{ m/s}$.

Pe baza valorilor considerate ale puterii nominale P_n și ale randamentului nominal η_n s-a calculat puterea mecanică P_{mec} a turbinei necesară pentru a asigura puterea termică utilă a sistemului $P_n = 1$ kW:

$$P_{mec} = P_n / \eta_n = 1000 / 0,95 = 1053 \text{ W} \quad (1)$$

Puterea mecanică utilă a turbinei se poate exprima prin relația generală:

$$P_{mec} = \frac{\rho A V_v^3}{2} C_p(\lambda) \quad (2)$$

unde ρ este densitatea aerului, A este aria rotorului turbinei, V_v este viteza nominală a vântului, iar C_p este coeficientul de performanță al turbinei care depinde de caracteristicile sale aerodinamice. Valoarea maximă teoretică a coeficientului C_p , determinată prin relația lui Betz, este $C_{pmax} = 0,59$.

Dimensionarea preliminară a SIMP a fost efectuată prin modelare numerică 2D în element finit utilizând pachetul de programe de calcul de câmp Flux®. O reprezentare 3D de principiu a SIMP în care sunt figurate principalele elemente constructive este prezentată în Fig. 5 [7].

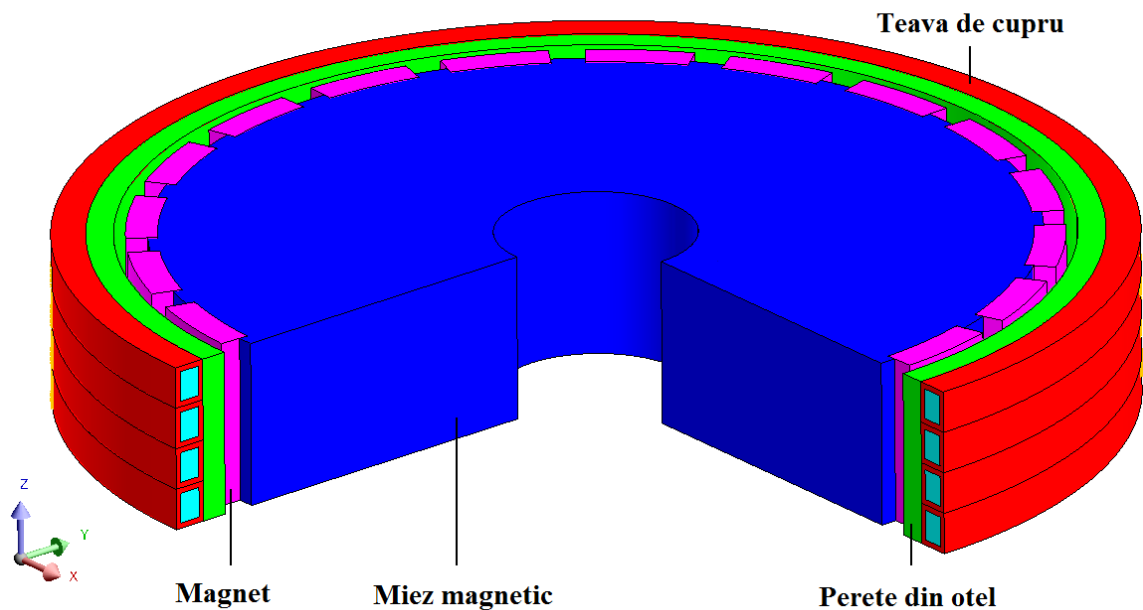


Fig. 5. Vedere 3D de ansamblu a SIMP cu evidențierea părților constructive importante [7].

Domeniul de calcul 2D al structurii de referință a SIPM considerat ($2p = 10$ poli) pentru analiza în element finit este prezentat în Fig. 6 [7].

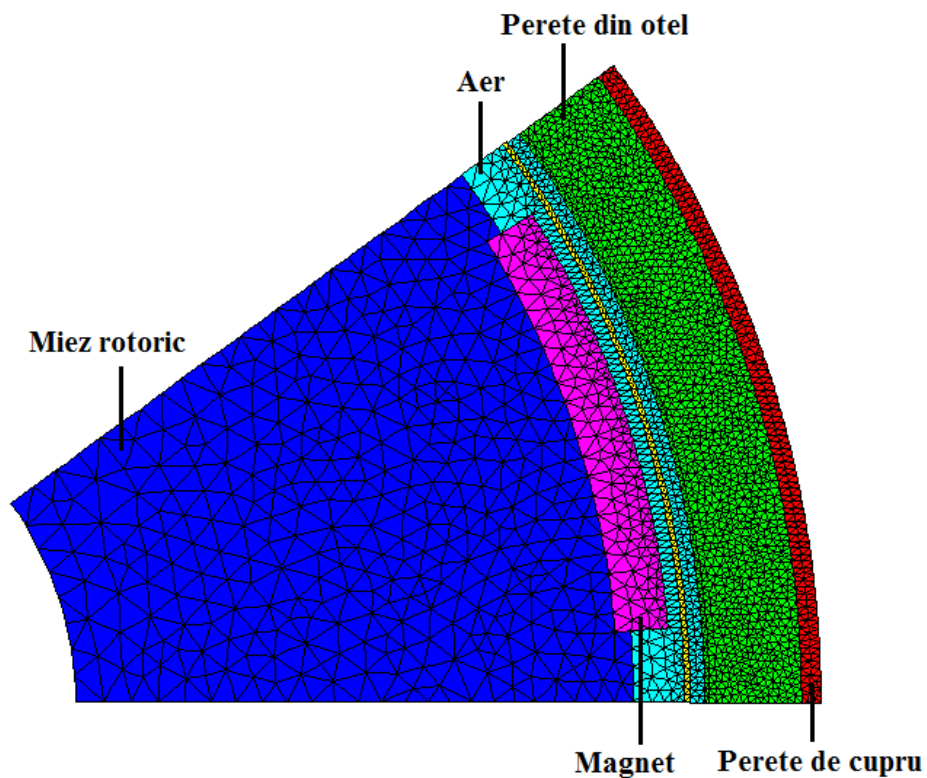


Fig. 6. Domeniul de calcul element finit 2D [7].

Calculule efectuate au vizat multiple aspecte privind optimizarea SIMP printre care: identificarea numărului optim de perechi de poli care să asigure o valoare maximă a puterii induse, aflarea volumului minim al magneților permanenți care să asigure însă cerințele tehnice impuse etc.

Prin simulări succesive pentru diferite numere de perechi de poli rotorici s-a aflat numărul optim de perechi de poli ($2p = 10$) care furnizează o valoare maximă a puterii induse, Fig. 7 [7].

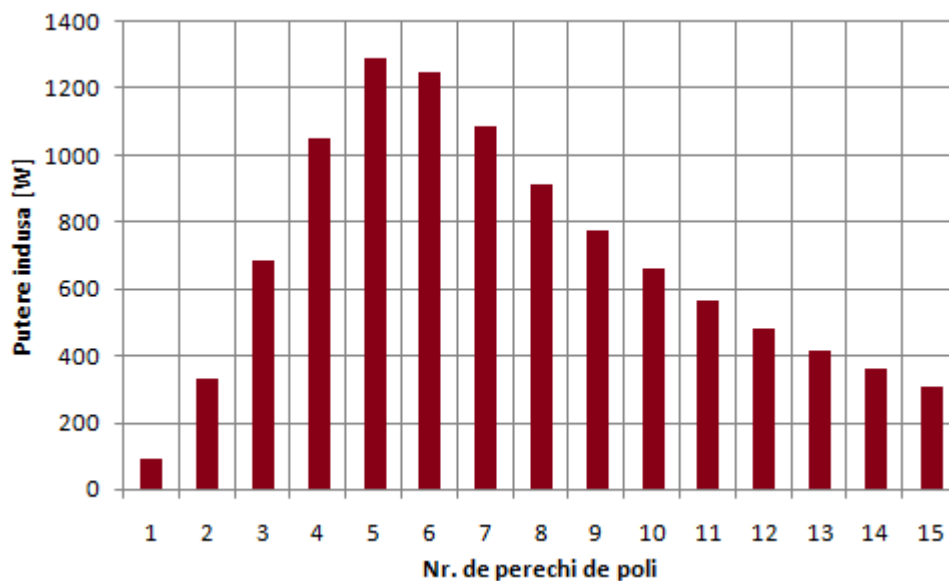


Fig. 7. Dependența puterii induse funcție de numărul de perechi de poli [7].

Structura optimă a SIMP din punct de vedere al numărului de poli determinată în urma calculelor de optimizare permite obținerea unei puteri induse impuse cu un consum minim de material (o lungime axială minimă a SIMP).

Pentru configurația SIMP cu $2p = 10$ poli s-au efectuat calcule și s-a obținut distribuția densității puterii induse în peretele din oțel masiv statoric, Fig. 8, respectiv curba puterii induse funcție de turația turbinei eolienei, Fig. 9. Se remarcă din Fig. 9 o creștere aproximativ pătratică a puterii induse cu viteza de rotație a turbinei.

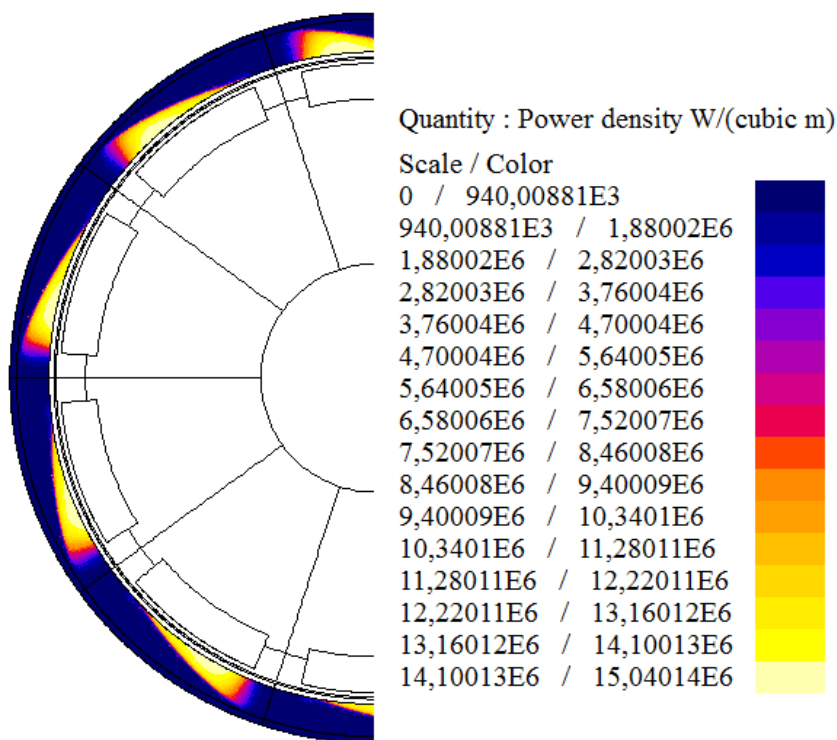


Fig. 8. Distribuția densității puterii induse în peretele din oțel [7].

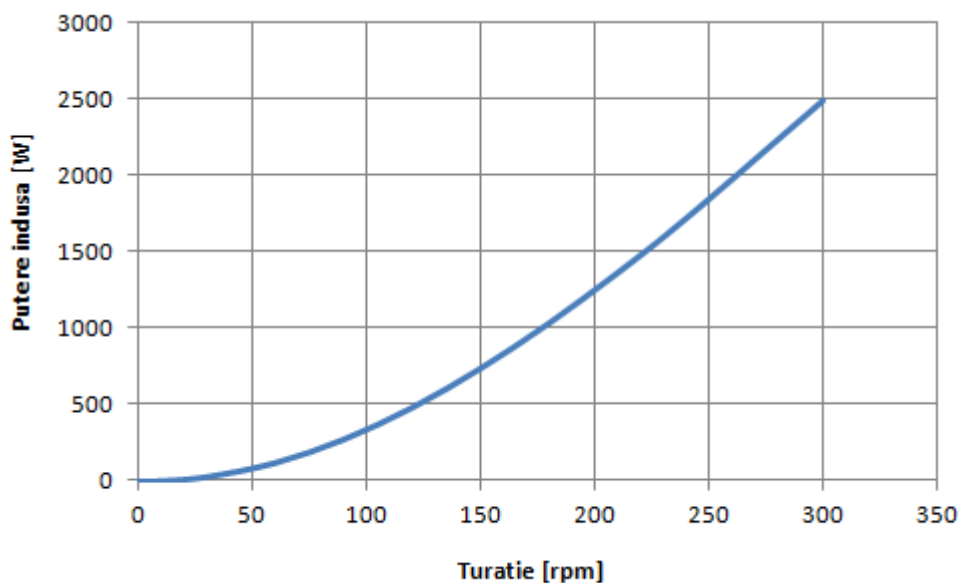


Fig. 9. Curba puterii induse funcție de turație [7].

Prin calcule numerice s-a determinat de asemenea construcția optimă a SIMP caracterizată de volum minim de magnet permanent, aceasta având următoarele date geometrice prezentate mai jos în Tabelul 2.

Tabelul 2. Caracteristici principale ale SIMP

Diametru interior perete stator [mm]	Grosime perete stator realizat din oțel magnetic masiv [mm]	Grosime perete țevă cupru [mm]	Lungime axială mașină [mm]	Numărul de poli rotor (magneți)	Distanță dintre magneți și peretele statoric [mm]	Arc magneți [grade]	Grosime magneți [mm]
200	10	2	61,5	10	3,5	13,5	5,5

Alte soluții constructive urmează a fi analizate în etapa a III-a a proiectului (ultima etapă) prevăzută în anul 2016, conform planului de realizare. În această ultimă etapă de execuție este prevăzută partea a doua de proiectare și optimizare constructiv funcțională a sistemului de conversie în cadrul căreia se va definitiva partea de proiectare a GEH prin integrarea GMP și a SIMP, respectiv se va finaliza proiectarea sistemului de gestiune a energiei. Proiectul se va încheia cu testarea experimentală și monitorizarea sistemului de conversie studiat.

4.4. Proiectarea preliminară a sistemului de gestiune a energiei produsă de GEH

Sistemul de gestiune a energiei produsă de GEH trebuie să permită controlul optim al fluxului de energie electrică livrată către rețea, respectiv al fluxului de energie termică. O schemă preliminară de principiu a sistemului de gestiune a energiei electrice și termice este prezentată în Fig. 10.

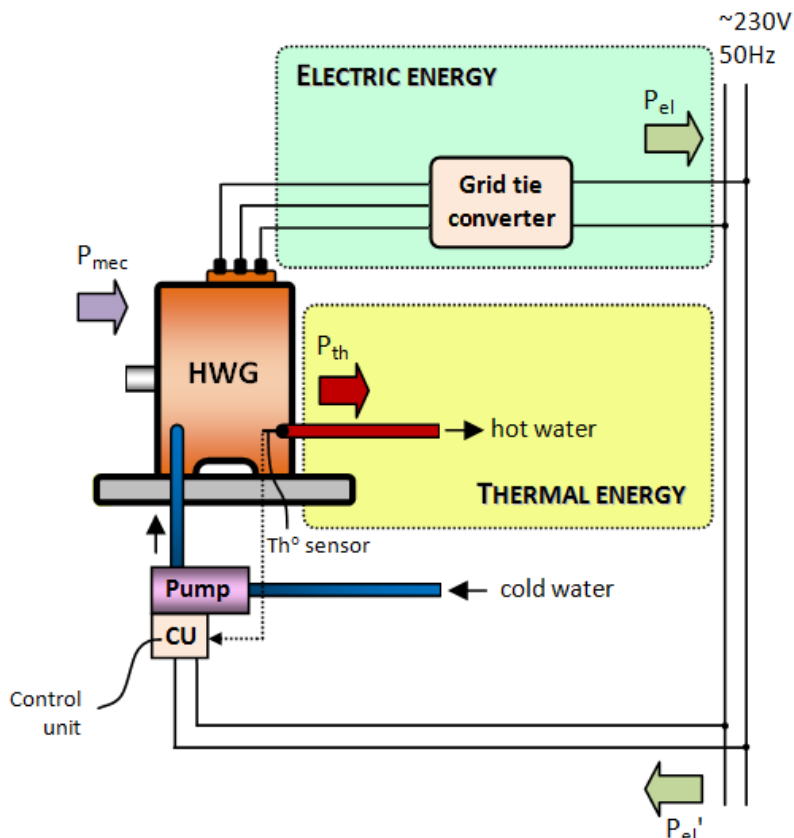


Fig. 10. Schema de principiu GEH (Hibrid Wind Generator - HWG) echipat cu sistem de gestiune a energiei electrice și termice.

Parametrii energiei electrice de curent alternativ produsă de GMP în sistem trifazat trebuie adaptați în scopul compatibilizării cu rețeaua monofazată. Prin urmare GMP va fi echipat cu un convertor special care permite sincronizarea generatorului cu rețeaua, schema sa de principiu propusă fiind prezentată în Fig. 11.

Componentele principale ale convertorului electronic considerat sunt următoarele: un redresor, o sarcină de diversiune, un chopper ridicător, un invertor pentru conectare la rețea.

Caracteristicile convertorului electronic (putere, tensiune, curent) trebuie strict corelate cu parametrii GMP.

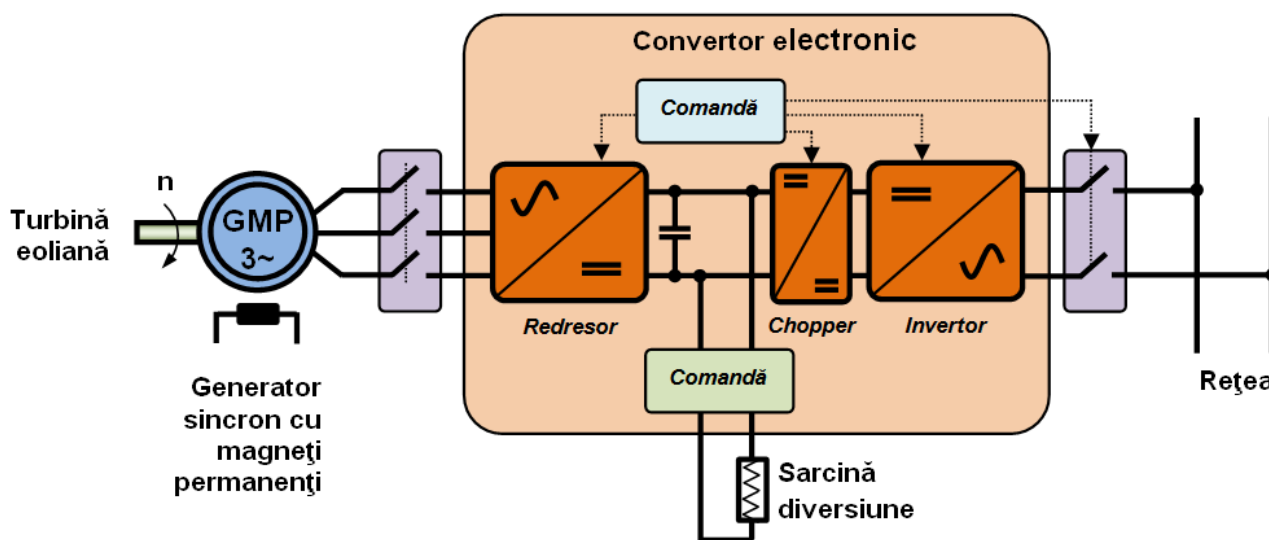


Fig. 11. Schemă de principiu a sistemului de gestiune a energiei electrice.

Energia termică a GEH rezultată prin răcirea GMP respectiv prin căldura degajată ca urmare a efectului Joule al curenților induși în pereții SIMP este preluată prin intermediul unui circuit de răcire-încălzire alcătuit dintr-o serpentină parcursă de agent termic (apă sau alt lichid).

Fluxul energiei termice este gestionat prin intermediul unui bloc electronic de comandă care analizează temperatura lichidului la ieșirea GEH (analizează semnalul primit de la un traductor de temperatură instalat la ieșirea GEH) și în funcție de valoarea acesteia crește sau scade debitul pompei care injectează agentul termic în circuit. Prin evacuarea forțată a căldurii degajate în GMP folosind agent termic lichid proiectarea acestuia poate fi realizată la valori mai mari ale solicitărilor electrice și magnetice decât la generatoarele obișnuite.

Temperatura agentului termic lichid aflat în stare fierbinte la ieșirea din GEH trebuie corelată cu debitul său și păstrată în limite acceptabile cu ajutorul blocului de comandă electronic intergrat în sistemul de gestiune a energiei a sistemului. Rolul blocului electronic de comandă este esențial întrucât o creștere exagerată a temperaturii în interiorul GEH poate afecta negativ sistemul de izolație electrică a mașinii, respectiv poate determina demagnetizarea ireversibilă a MP, elemente esențiale ce influențează durata de viață și fiabilitatea echipamentului.

Dimensionarea și proiectarea optimală a GEH, a sistemului de gestiune a energiei respectiv a tuturor elementelor constructive aferente va fi finalizată în etapa următoare a proiectului de cercetare, conform planului de realizare propus.

4.5. Diseminarea rezultatelor de cercetare obținute

O parte din rezultatele de cercetare obținute au fost diseminate prin publicarea unui număr de 6 lucrări științifice, a 7-a lucrare fiind acceptată pentru publicare la o revistă indexată ISI. Dintre cele 6 lucrări publicate, următoarele 5 au fost prezentate la conferințe/simpozioane internaționale (4 dintre cele 5 lucrări urmând a fi indexate ISI Proceedings):

[1] Floricau D. and Kreindler L.: *Generalized Multilevel Inverter Topology with Stacked Coupled Inductors*, Proceedings of the 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'15-ECCE Europe, Geneva, Switzerland,

[2] Floricau D. and Tudorache T.: *A Novel Generalization Of Boost-type Pfc Topologies With Multiple Switching Cells Connected In Series And Parallel*, Proceedings of the 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2015, Bucharest, Romania (IEEE Xplore Digital Library indexed),

[3] Tudorache T., Melcescu L. and Floricau D.: *Design And Performance Analysis Of A Permanent Magnet Synchronous Generator Equipped With AC-DC Converter*, Proceedings of the 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2015, Bucharest, Romania (IEEE Xplore Digital Library indexed),

[4] Tudorache T. and Melcescu L.: *Outer Rotor Eddy Current Heater for Wind Turbines*, Proceedings of World Renewable Energy Congress, WREC 2015, University Politehnica of Bucharest, Romania (această lucrare este aprobată spre publicare în volumul *Journal of Physics*).

[5] Predescu M.: *Economic evaluation of small wind turbines and hybrid systems for residential use*, Proceedings of World Renewable Energy Congress, WREC 2015, University Politehnica of Bucharest, Romania.

Al 6 - lea articol științific a fost publicat la revista indexată ISI *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*:

[6] Tudorache T., Melcescu L. and M. Predescu: *Analysis of a Permanent Magnet Eddy Current Heater Driven by a Wind Turbine*, *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*, Vol. 15, No. 3, pp. 53 – 58, 2015 (revistă indexată ISI).

Ultimul articol științific (al 7-lea) raportat în această etapă este acceptat pentru publicare la aceeași revistă indexată ISI *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)* urmând să apară în primul număr al revistei pe anul 2016:

[7] Floricau D., Tudorache T. and Kreindler L.: *New Boost-Type PFC MF-Vienna PWM Rectifiers with Multiplied Switching Frequency*, *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*, (revistă indexată ISI).

Un alt articol științific (al 8-lea) care se referă la modelarea și testarea experimentală a unui generator eolian de construcție specială este în curs de elaborare urmând a fi trimis spre publicare la o conferință sau la o revistă de specialitate în etapa următoare a proiectului.

5. REZULTATE OBȚINUTE ÎN CADRUL ETAPEI CURENTE

Obiectivele propuse în planul de realizare a proiectului pentru etapa curentă au fost atinse integral. În urma cercetărilor întreprinse s-au obținut rezultatele consistente, care constau în publicarea unui număr de 7 lucrări/articole științifice, dintre care 4 la conferințe/simpozioane internaționale respectiv 2 într-o revistă cotate ISI (două dintre lucrări sunt acceptate urmând a fi publicate anul viitor) Al 8-lea articol urmează a fi finalizat și trimis spre publicare la o revistă sau conferință de specialitate în etapa următoare a proiectului.

6. CONCLUZII

În cadrul *Etapei de execuție Nr. 2/2015* a proiectului HYWINDT (*Contract Nr. 41/2014*) au fost prevăzute trei activități cu caracter tehnic și științific, toate fiind realizate integral. Activitatea de cercetare efectuată în cadrul etapei curente a vizat proiectarea parțială și optimizarea constructiv-funcțională a modelului experimental al GEH, proiectarea parțială a sistemului de gestiune a energiei, respectiv diseminarea rezultatelor de cercetare.

Prima activitate (Activitate II.1.) a avut ca obiectiv proiectarea parțială și optimizarea constructiv-funcțională a părților componente ale GEH (GMP și SIMP) responsabile cu producerea energiei electrice, respectiv termice. Cercetările efectuate au permis în primul rând identificarea și dimensionarea preliminară a mai multor soluții constructive posibile de GMP una dintre ele fiind prezentată detaliat în acest raport. S-au analizat și dimensionat de asemenea soluții constructive de SIMP cu rotor interior și exterior, una dintre soluții fiind descrisă în acest document.

A doua activitate (Activitate II.2.) a urmărit proiectarea parțială a sistemului de gestiune a energiei electrice, respectiv termice produse de GEH. S-au propus scheme electrice de principiu ale sistemului anvizat care urmează a fi definitivitate în etapa următoare de execuție a proiectului.

Ultima activitate (Activitate II.3.) inclusă în cadrul acestei etape a proiectului HYWINDT conform planului de realizare a vizat diseminarea rezultatelor de cercetare prin participarea la conferințe și simpozioane de specialitate și prin publicarea de articole în reviste cotate ISI. Cercetările efectuate s-au concretizat prin elaborarea și publicarea unui număr de 7 lucrări/articole în reviste cotate ISI sau în volumele unor conferințe/simpozioane cu perspectiva indexării ISI (două dintre articole sunt acceptate urmând a fi publicate anul următor). Un al 8-lea articol este în curs de finalizare urmând a fi publicat în următoare etapă de execuție a proiectului.

7. BIBLIOGRAFIE

- [1] CBI A/00838/10.11.2014 depusă la OSIM: “Generator eolian hibrid cu flux magnetic radial și rotor exterior”.
- [2] CBI A/00839/10.11.2014 depusă la OSIM: “Generator eolian hibrid cu flux magnetic radial și rotor interior”.
- [3] CBI A/00840/10.11.2014 depusă la OSIM: “Generator eolian hibrid cu flux magnetic axial”.
- [4] Raport cercetare Etapa I / 2014, „Analiză de soluții constructive fezabile de componente pentru TEH cu ax vertical”, Proiect HYWINDT.
- [5] I. Cioc, C. Nica: *Proiectarea masinilor electrice*, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1994, Romania.
- [6] Tudorache T., Melcescu L. and Floricau D.: *Design And Performance Analysis Of A Permanent Magnet Synchronous Generator Equipped With AC-DC Converter*, Proceedings of the 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2015, Bucharest, Romania.

[7] Tudorache T., Melcescu L. and M. Predescu: *Analysis of a Permanent Magnet Eddy Current Heater Driven by a Wind Turbine*, Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE), Vol. 15, No. 3, pp. 53 – 58, 2015 (revistă indexată ISI).

Data: 02.12.2015