



RAPORT FINAL

PENTRU PROIECTUL PCCA NR. 29 / 2012

**‘Innovative wind energy conversion micro-system
with direct-driven electric microaerogenerator for residential uses’
(‘Microsistem inovativ de conversie a energiei eoliene
pentru aplicații rezidențiale utilizând microaerogenerator electric
cu acționare directă – INNOWECS 2012 – 2016)**

**Coordonator CO – Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (UTC-N)
Partener P1 – SC BMEnergy SRL**

**Prof.dr.ing. Mircea M. RĂDULESCU
Director de proiect, CO – UTC-N**

**Dr.ing. Ștefan BREBAN
Resp. proiect P1 – SC BMEnergy SRL**

- Decembrie 2016 -

RAPORT FINAL

PENTRU PROIECTUL PCCA NR. 29 / 2012

În conformitate cu obiectivele și activitățile de cercetare corespunzătoare **etapei 1– 2012 a proiectului PCCA 'INNOWECS'**, echipa de cercetare a coordonatorului CO – UTC-N și a partenerului P1 – BMEnergy la proiect a realizat (i) studiul analitic al literaturii tehnice de specialitate, la zi, (ii) definirea caietului de sarcini și (iii) identificarea de soluții tehnice inovative, pentru componentele esențiale ale unei microcentrale eoliene, reprezentate de : microturbina de vânt și structura de pale a acesteia, microaerogeneratorul electric cu magneți permanenți, cuplat direct la turbină și convertoarele electronice de putere, de mașină, respectiv de rețea.

În această etapă de identificare de soluții tehnice inovative s-au propus (i) pentru *microturbina de vânt*, de 3kW, la viteze ale vântului de 2 - 10 m/s, carcasă din tabla de aluminiu, rigidizată cu o structură de rezistență din profile extrudate de aluminiu, dar și dintr-o structură bazată pe materiale compozite-fibră de sticlă (cu avantajele greutății specifice reduse, rezistenței mecanice foarte bune, diversității mari a formelor); rotorul turbinei din aliaj mediu dur de aluminiu cu magneziu (EN AW-5754 ALMg3), rezistent la coroziune; palele turbinei de vânt din materiale compozite, pe baza de fibra de sticla, (cu avantajele greutății reduse și rezistenței la coroziune și la oboseală; (ii) pentru *micro-aerogeneratorul electric*, generator sincron cu magneti permanenți (de tip discoidal), cu flux axial, în topologie bilaterală, cu două rotoare și un stator-sandviș interior (cu avantajele inerției reduse, eliminării forței magnetice axiale de atracție stator-rotor și creșterii densității de putere a generatorului și acomodării unui număr mare de poli, necesar funcționării aerogeneratorului la viteze joase de vânt ; (iii) pentru *convertorul electronic de mașină*, redresor cu diode, urmat de un convertor c.c.- c.c. de tip survoltor, controlat în vederea extragerii puterii maxime din sistemul aerogenerator-turbină, respectiv pentru *convertorul electronic de rețea*, invertor PWM de tensiune, în punte trifazată sau monofazată, controlat pentru sincronizare cu rețeaua electroenergetică și distribuția puterii electrice; (iv) pentru *metoda de control MPPT* al sistemului microturbina de vânt – microaerogenerator sincron cu magneți permanenți, metodă de tip '*perturbă și observă*', prin care se realizează în timp real o monitorizare a puterii debitate, respectiv se perturbă microsistemul eolian, la intervale date de timp, pentru a observa eventuala modificare a punctului de maxim al puterii extrase din vânt și debitate de microaerogenerator.

În conformitate cu obiectivele și activitățile de cercetare corespunzătoare etapei 2– 2013 a proiectului PCCA ‘INNOWECS’, echipa de cercetare a coordonatorului CO – UTC-N și a partenerului P1 – BMEnergy la proiect a realizat modelarea, simularea și optimizarea componentelor esențiale ale unei microcentrale eoliene, reprezentate de *microturbina de vânt și structura de pale a acesteia și microaerogeneratorul electric cu magneți permanenți, cuplat direct la turbină.*

Modelarea, simularea și optimizarea turbinei eoliene cu ax orizontal și trei pale s-a efectuat în mediul informatic Ansys – Fluent, iar grila de calcul a fost creată în programul NUMECA-Hexpress. Au fost studiate două geometrii, dintre care a fost reținută cea având raza palei de 1,5 m și diametrul de referință al microgeneratorului electric de 0,5 m. Simulările au fost rulate pentru un raport al vitezelor la vârful palei (TSR) de 7, o viteză de referință de 10 m/s, rezultând un coeficient de putere $C_p = 0,4107$.

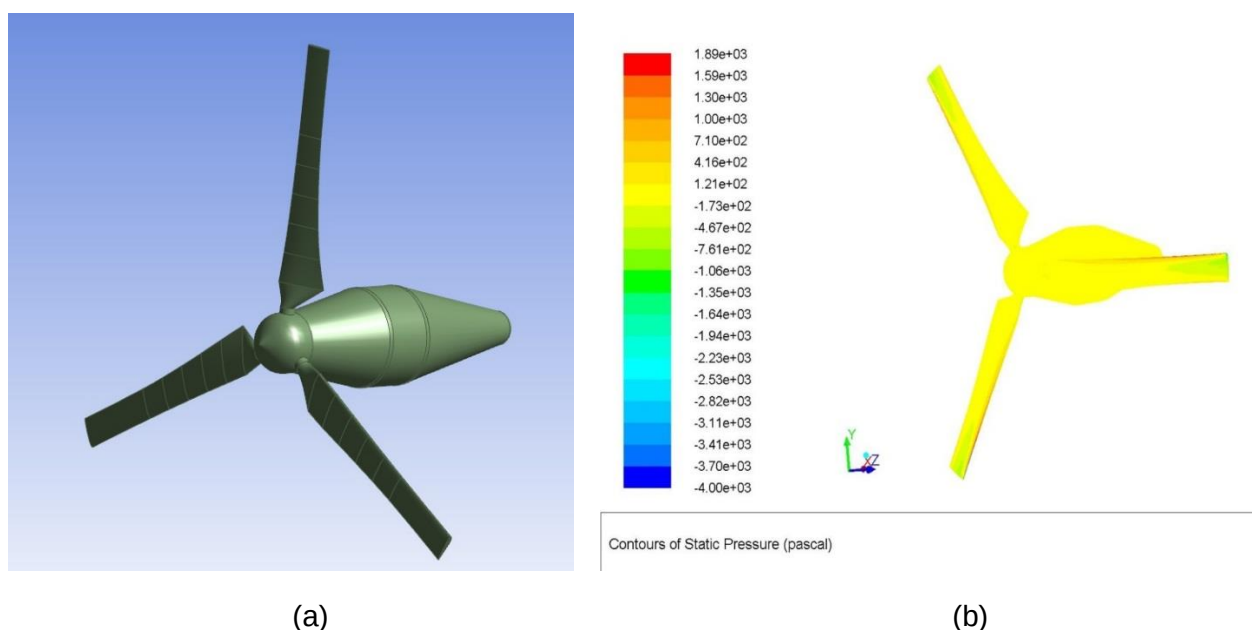


Fig. 1. Rezultate de simulare și optimizare pentru microturbina eoliană cu ax orizontal și trei pale; (a) geometria CAD; (b) distribuția presiunii superficiale ($V = 10\text{m/s}$, $\text{TSR} = 7$).

Pe baza studiilor numerice efectuate, s-a adoptat modelul turbinei cu trei pale și ax orizontal, de tip “towered – upwind”, care permite atingerea unor parametri aerodinamici ridicați, coeficientul de putere rezultat în urma simulărilor ajungând la valori apropiate de 0,43, la viteze ale vântului de 10 m/s.

În Fig.2, este prezentată, în vedere explozivă, structura microturbinei eoliene, pe subansambluri mecanice: 1. ansamblu rotor; 2. coroana conului rotorului; 3. carenaj anterior; 4. microgenerator electric discoidal; 5. sistem de prindere; 6. coada (carenaj posterior); 7. pilon de susținere; 8. conul rotorului.

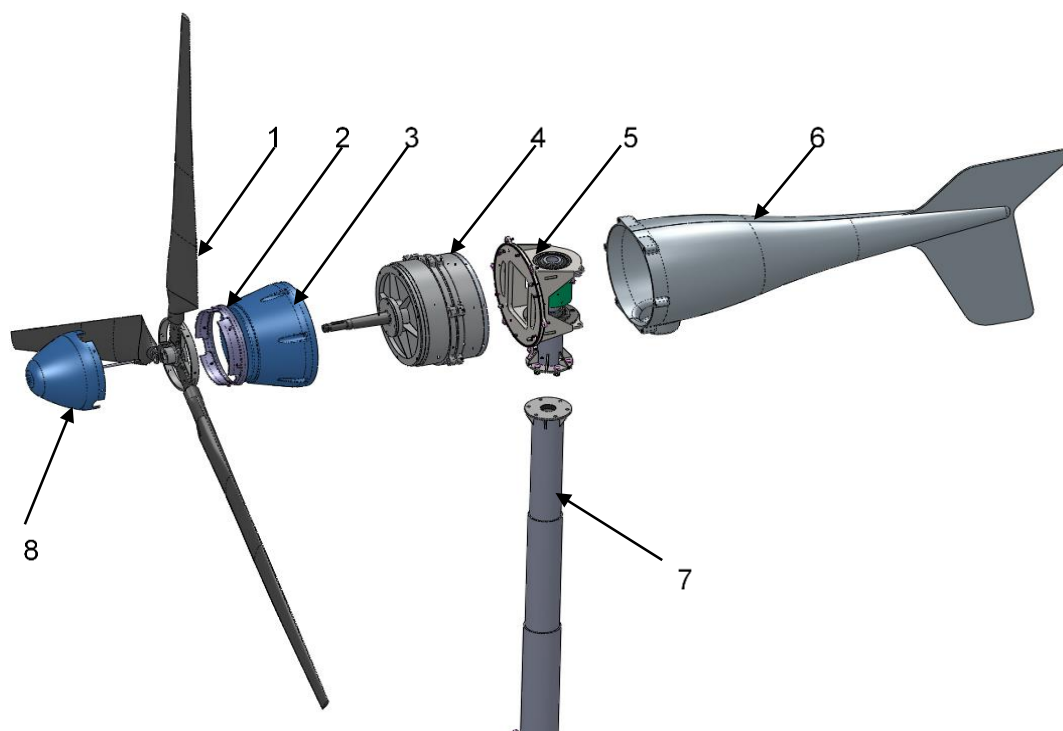


Fig. 2. Vedere explozivă a microturbinei eoliene cu trei pale și ax orizontal, cu evidențierea subansamblurilor componente.

Modelarea, simularea și optimizarea microaerogeneratorului electric cu magneți permanenți, format dintr-un stator și două rotoare, a avut în vedere o structură inovativă la nivelul rotoarelor, în care magneții de ferită 24, cu magnetizare circumferențială alternantă NS–SN–NS, sunt încastrați radial și intercalați de polii feromagnetici 22, rolul acestei dispunerii fiind concentrarea fluxului magnetic în polii magnetici dintre magneții de ferită (Fig.3).

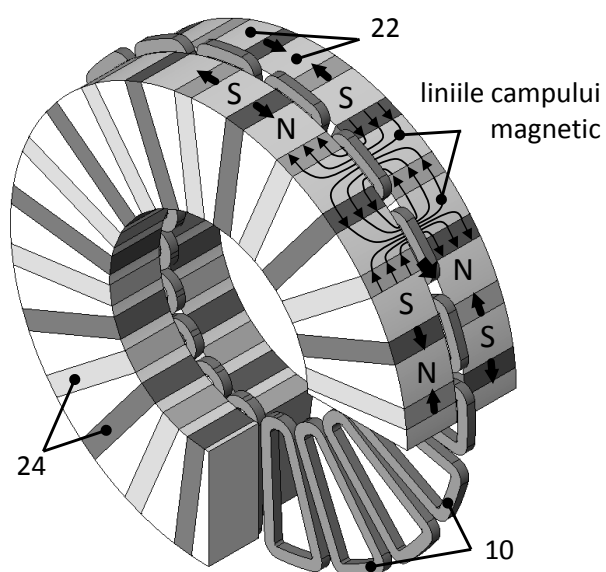


Fig. 3. Topologia inovativă de microaerogenerator electric cu flux magnetic axial, magneți de ferită și concentrare de flux.

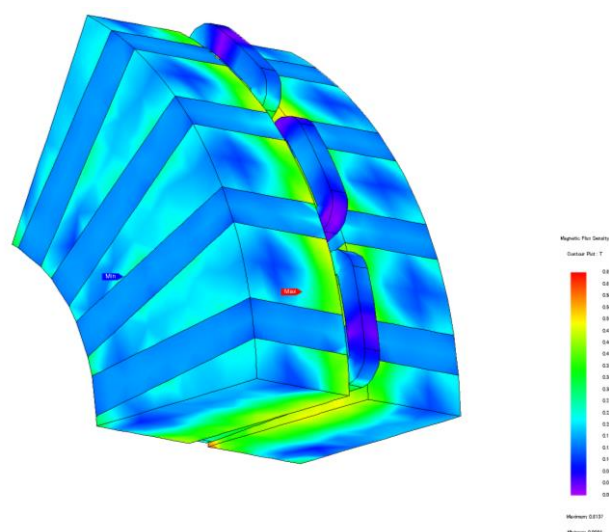


Fig. 4. Distribuția inducției magnetice în structura microaerogeneratorului electric cu flux magnetic axial, magneți de ferită și concentrare de flux.

Statorul fără fier, plasat între cele două rotoare, posedă înfășurare plană trifazată cu bobine 10 de secțiune trapezoidală, corespunzând polilor magnetici de o parte și de alta a întrefierului (Fig.3). Suportul statoric exterior este fixat între două semicarcase, care susțin arborele rotorului prin intermediul unor rulmenți.

Topologia inovativă de microaerogenerator a fost modelată și optimizată cu ajutorul analizei numerice de câmp magnetic, utilizând pachetul informatic JMAG Designer (Fig.4). Prin simulări numerice, s-a obținut pentru microaerogeneratorul propus, o putere activă de aproximativ 2530 W, debitată în sarcină electrică rezistivă de 50 Ω / fază, la o turație rotorică de 450 rpm.

Propunerea structurii inovative de microaerogenerator electric cu flux magnetic axial, magneți de ferită și concentrare de flux a fost validată prin **lucrarea publicată** [1], inclusă în baza de date IEEE Xplore și beneficiind, până în prezent, de 6 citări în articole indexate în baze de date internaționale recunoscute (IEEE Xplore, SCOPUS).

Pentru protejarea drepturilor de proprietate industrială asupra acestui microaerogenerator electric a fost depusă **o cerere de brevet la 'European Patent Organization'**, ale cărei revendicări au fost (parțial) acceptate în 2016.

În conformitate cu obiectivele și activitățile de cercetare corespunzătoare **etapei 3 – 2014 a proiectului PCCA 'INNOWECS'**, echipa de cercetare a coordonatorului CO – UTC-N și a partenerului P1 – BMEnergy la proiect a realizat (i) optimizarea componentelor esențiale ale unei microcentrale eoliene, reprezentate de : microturbina de vânt, microaerogeneratorul electric cuplat direct la arborele turbinei și convertoarele electronice de putere, de mașină, respectiv de rețea; (ii) executarea prototipului ansamblului format din microturbina eoliană cu structura de pale și accesoriile acesteia și din microaerogenerator cu magneți permanenți și flux axial cu acționare directă; (iii) dezvoltarea standului de încercare și realizarea de teste experimentale pentru prototipul optimizat de microcentrală eoliană de uz rezidențial cu componentele aferente.

Pentru optimizarea și realizarea ansamblului microturbina eoliană – microaerogenerator electric, subansamblul rotor-poli s-a adoptat în tehnologie prin turnare bimetal, cu execuția polilor din oțel (OT500) prin turnare și tratare termică, poziționarea acestora în forma de turnare (pe șablon din lemn) și turnarea rotorului din aliaj de aluminiu (AlSi10Mg) (Fig.5).

Pentru realizarea subansamblului semicarcasei prototipului de microaerogenerator (Fig.6), s-a adoptat tehnologia turnării manuale în amestec din nisip, materialul din care s-a turnat carcasa fiind un aliaj de aluminiu de tip AlSi10.

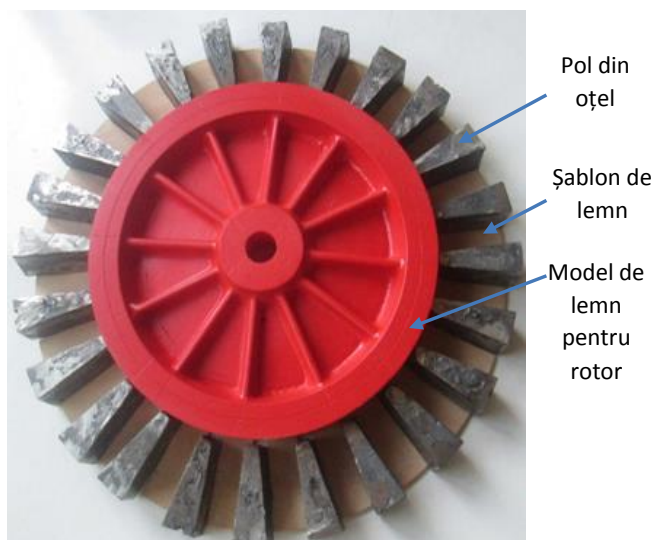


Fig. 5. Structura optimizată a subansamblului rotor-poli pentru reducerea fluxului magnetic de dispersie dintre poli.



Fig. 6. Corp semicarcasă prototip de microaerogenerator.

Palele pentru prototipul de microturbină eoliană au fost realizate din materiale compozite incluzând fibră de sticlă și fibră de carbon. Forma optimizată a palei, rezultată din analiza numerică utilizând metoda elementelor finite, a fost preluată în SolidWorks, unde a fost generat modelul geometric al semi-matrițelor.

După finalizarea optimizării sale dimensionale, prototipul de microaerogenerator electric cu magneți de ferită și flux magnetic axial a fost realizat cu polii magnetici rotorici din oțel și cu înfășurarea statorică (din 18 bobine plane din cupru cu câte 120 spire fiecare) consolidată în rășină poliuretanică și cu inel exterior de aluminiu (Fig.7).

Rotoarele prototipului de microaerogenerator electric optimizat și construit includ pe lângă polii magnetici din oțel sau fontă, magneți din ferită și un suport neferomagnetic din



Fig. 7. Stator cu înfășurare trifazată al prototipului de microaerogenerator electric cu magneți de ferită și flux magnetic axial.

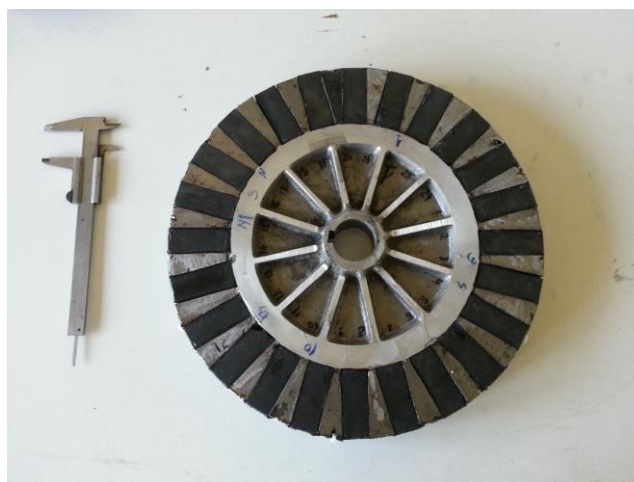


Fig. 8. Rotor cu magneți de ferită magnetizați circumferențial al prototipului de microaerogenerator electric.

aluminiu (turnat) pe care sunt fixați prin lipire (magneții) și prin turnare (polii magnetici) (Fig.8). Suportul din aluminiu are și rolul de a permite fixarea rotorului pe arborele microaerogeneratorului.

Fig.9 redă imaginea standului de încercări din Laboratorul de cercetare 'Mașini electrice speciale și tracțiune electrică ușoară – SEMLET' al Universității Tehnice din Cluj-Napoca, care a fost dezvoltat pentru testarea componentelor esențiale ale prototipului de microcentrală eoliană de uz rezidențial, reprezentate de : microturbina de vânt (emulată pe stand printr-un motor de c.c., controlat în turație), prototipul de microaerogenerator electric cuplat direct la arborele turbinei și convertoarele electronice de putere, de generator, respectiv de rețea.

În cadrul subsansamblului electronic de putere al microcentralei eoliene, s-a propus o topologie care integrează un convertor c.c. – c.c. de cost redus pentru extragerea energiei maxime de la microturbina eoliană. Un sistem de căutare a punctului maxim de putere (MPPT) modifică referința curentului de intrare, astfel încât punctul de operare de pe caracteristica putere-tensiune să producă putere maximă. Partea inovativă a sistemului propus este folosirea unui regulator de PFC (UC3854) pentru controlul MPPT și a fost dezvoltată în lucrarea [4] din cadrul proiectului.

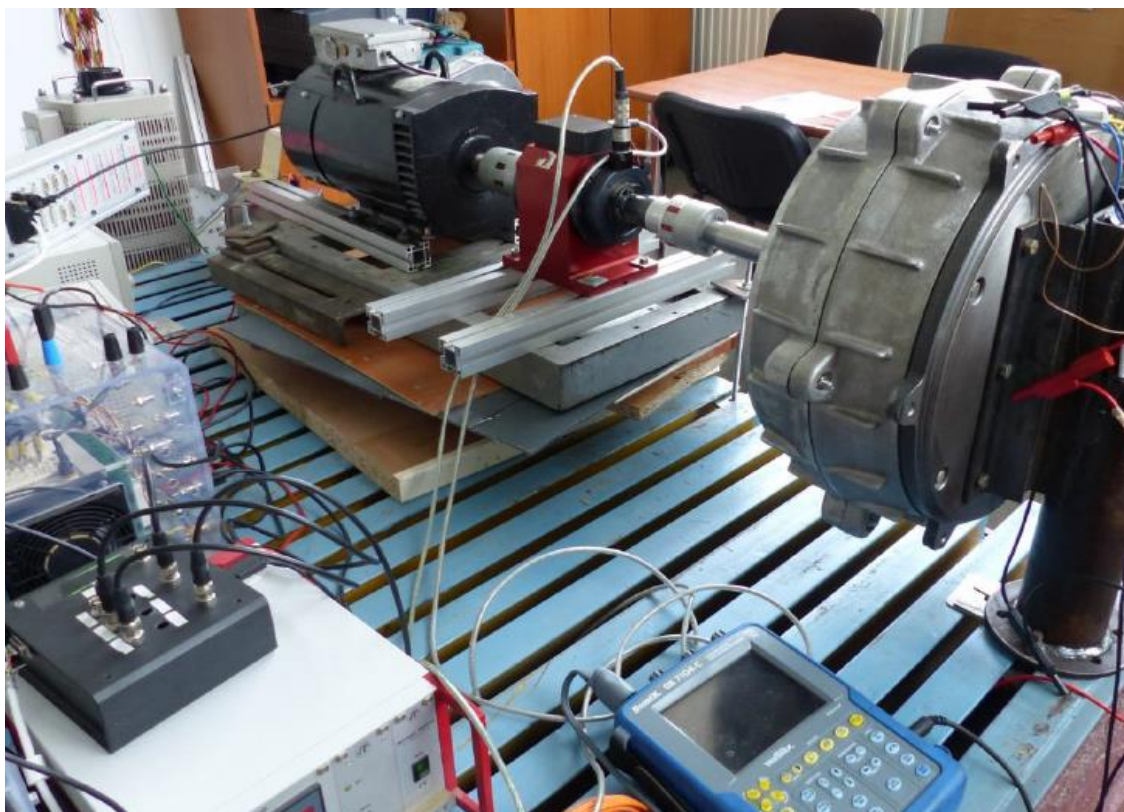


Fig. 9. Standul experimental de laborator dezvoltat pentru testarea componentelor esențiale ale prototipului de microcentrală eoliană.

Cercetarea științifică din etapa 3 – 2014 a proiectului s-a concretizat în **lucrările publicate [2] – [4]**, incluse în baza de date IEEE Xplore și beneficiind, până în prezent, de 2 citări în articol indexat ISI, respectiv în baza de date IEEE Xplore.

În conformitate cu obiectivele și activitățile de cercetare corespunzătoare **etapei 4 – 2015 a proiectului PCCA ‘INNOWECS’**, echipa de cercetare a coordonatorului CO – UTC-N și a partenerului P1 – BMEnergy la proiect a realizat (i) dezvoltarea unei topologii de microaerogenerator electric cu performanțe mai ridicate și cost de fabricație mai scăzut; (ii) dezvoltarea și testarea experimentală a microcentralei eoliene de uz rezidențial cu componentele aferente.

În scopul limitării puterii, prin scoaterea rotorului turbinei din direcția acțiunii vântului, s-a propus de către partenerul la proiect P1 - SC BMEnergy un nou tip de dispozitiv electromecanic, care a fost simulat de echipa coordonatorului UTC-N al proiectului. Dispozitivul constituie un mecanism de protecție cu acționare electromecanică (recomandat pentru turbinele eoliene cu putere mai mică de 30 kW), destinat scoaterii din vânt, în situația când viteza vântului depășește limita de siguranță. În Fig. 10, se prezintă ansamblul mecanismului de scoatere din vânt pe verticală, alcătuit din: 1) ansamblu suport-bobină; 2) placă superioară; 3) placă inferioară; 4) rulment; 5) ansamblu ax-magnet; 6) rulment; 7) arc de torsiune; 8) bucă fixare arc; 9) ansamblu braț acționare; 10) știft blocare; 11) ansamblu bucă blocare; 12) inel Seeger; 13) șurub cu cap înecat; 16) știft filetat; 17) știft fixare arc.

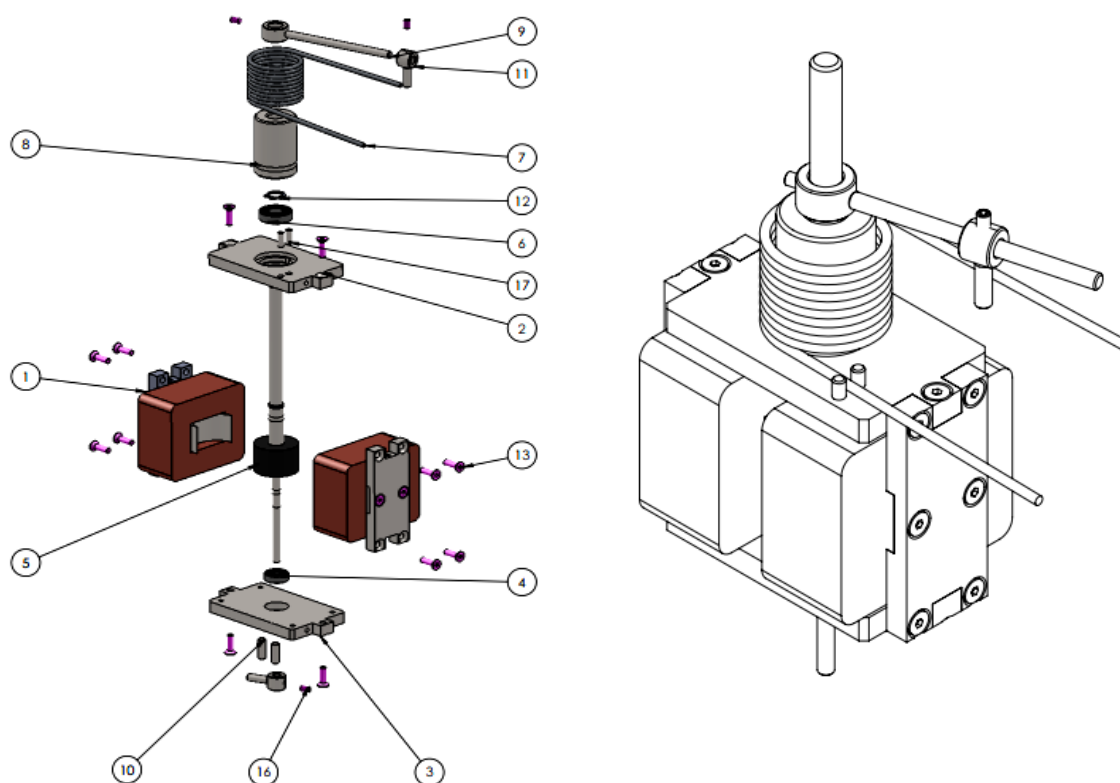


Fig. 10. Ansamblul mecanismului (dispozitivului electromecanic) de scoatere din vânt.

În scopul dezvoltării și testării experimentale a microcentralei eoliene de uz rezidențial cu componentele aferente, s-a realizat standul experimental de laborator, care pe lângă microaerogeneratorul electric, conține emulatorul de turbină (motorul de curent continuu), traductorul de viteză și cel de moment de cuplu de forțe electromagnetice (Fig.11). Au fost utilizate două programe pentru testare: MATLAB/SIMULINK modelează sistemul utilizând diagrame-bloc de comandă, iar dSPACE înregistrează modificările survenite asupra variabilelor în timp real, ce realizează controlul microaerogeneratorului.

Pentru testarea și analiza performanțelor aerogeneratorului în timp real s-a utilizat o platformă de simulare de tip *Hardware-in-the-Loop* (HIL) cu un sistem de control cu putere de calcul mare și posibilități multiple de interfațare realizate cu placa dSPACE DS1104. Software-ul asociat plăcii este *ControlDesk*, un mediu ce asigură toate facilitățile de gestiune a resurselor hardware, achiziție de date și realizarea de interfețe grafice pentru utilizator.

Modelul de simulare a fost completat cu o strategie MPPT de extragere a maximumului de putere din vânt, realizată prin controlul convertorului electronic (redresorului) de mașină (aerogenerator) prin două regulatoare PI de curent electric al aerogeneratorului și un al treilea regulator PI cu buclă *anti-windup* pentru viteza turbinei eoliene. Un control analog a fost implementat pentru convertorul electronic (invertorul) de rețea, prin două regulatoare PI de curent electric al aerogeneratorului și un al treilea regulator PI al tensiunii electrice din circuitul intermediar de c.c.

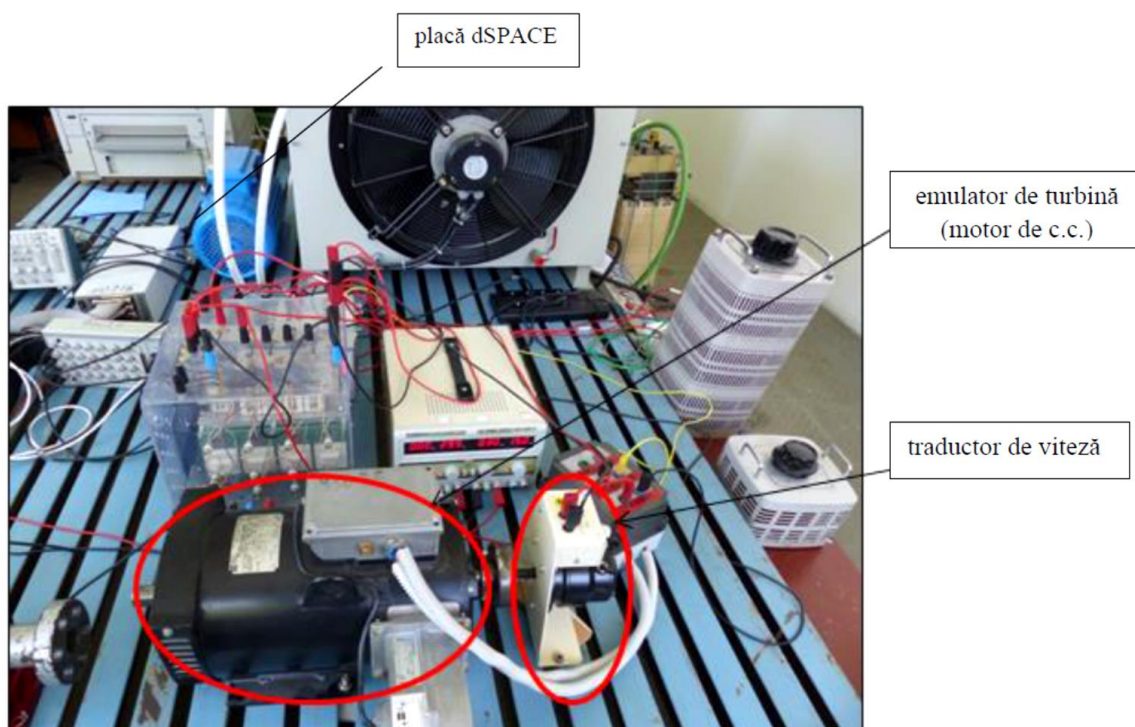


Fig. 11. Componente hardware ale standului de testare experimentală a microcentralei eoliene bazate pe prototipul de microaerogenerator sincron cu magneți de ferită și flux magnetic axial.

Formele de undă ale intensității curentului electric debitat de microaerogenerator și tensiunii electrice furnizate, precum și momentul cuplului de forțe electromagnetice au fost înregistrate cu ajutorul unui osciloscop digital METRIX, al unui traductor de moment de cuplu de forțe și al unui sistem de achiziții de date, constând din placă dSPACE și un calculator, au fost, apoi, prelucrate în mediul MATLAB/Simulink, iar în final, au fost comparate cu simulările realizate în mediul de calcul numeric de câmp magnetic JMAG Designer.

Cercetarea științifică din etapa 4 – 2015 a proiectului s-a concretizat în **lucrările publicate [5] – [7]**, incluse în baza de date IEEE Xplore și beneficiind, până în prezent, de 2 citări în articole indexate în baze de date internaționale recunoscute (IEEE Xplore, SCOPUS).

Pentru protejarea drepturilor de proprietate industrială asupra dispozitivului electro-mecanic de scoatere din vânt, **o cerere de brevet a fost înregistrată la OSIM.**

În conformitate cu obiectivele și activitățile de cercetare corespunzătoare **etapei 5 – 2016 a proiectului PCCA ‘INNOWECS’**, echipa de cercetare a coordonatorului CO – UTC-N și a partenerului P1 – BMEnergy la proiect a realizat (i) dezvoltarea subansamblurilor microcentralei eoliene de concepție modulară și de puteri diferite; (ii) testarea experimentală a microcentralei eoliene de concepție modulară și de puteri diferite.

În cadrul acestei etape a proiectului au fost realizate studii specifice de îmbunătățire a performanțelor microcentralei eoliene, dar și de reproiectare în vederea optimizării și reducerii costurilor componentelor esențiale ale microcentralei eoliene. Astfel, pe baza unor modele CAD, s-au efectuat ajustări dimensionale și de formă ale conului rotorului, ale carenei posterioare, precum și ale derivei cozii, atât din motive aerodinamice, cât și din motive de încărcare suplimentară a mecanismului de rotire a derivei. Noua soluție constructivă a microturbinei eoliene este prezentată în Fig.12.

O alternativă topologică cu flux magnetic radial a fost propusă și proiectată optimal pentru microaerogeneratorul sincron cu magneți de ferită, având ca părți constructive esențiale (Fig.13): semicarcasele (1) și (2), axul rotoric (3), statorul exterior (4), rotorul interior (5), rulmenții (6) și (11), inelele Seeger (7) și (8), penele paralele (9), inelul distanțier (10), șaiba de rulment (12) și piulița de rulment (13), garnitura (14), tiranții (15), capacele (16) și (17), semeringul (18), piulițele (19) și șuruburile de fixare (20).

Pentru creșterea eficienței energetice, s-a efectuat optimizarea micro-aerogeneratorului utilizând o funcție multi-obiectiv și algoritmi genetici. Au fost investigate

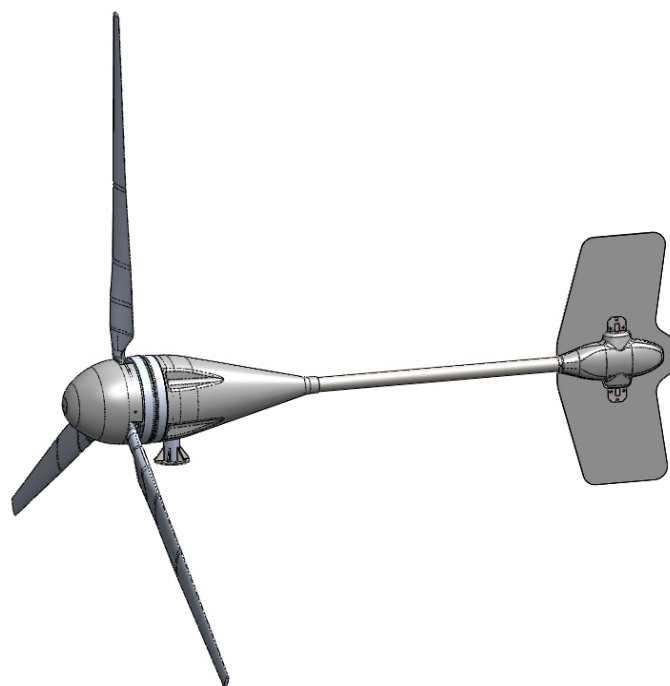


Fig. 12. Vedere izometrică a microturbinei eoliene cu ax orizontal în construcție modulară ameliorată.

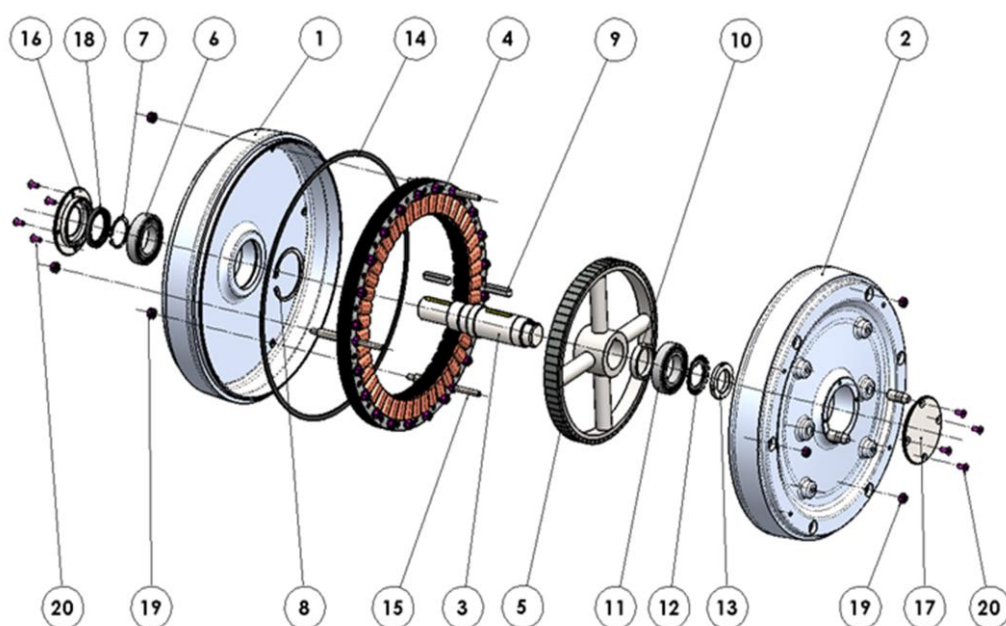


Fig. 2 Generator electric cu flux radial - Vedere explodată.

Fig. 13. Vedere explozivă a microaerogeneratorului cu magneți de ferită și flux magnetic radial, în construcție modulară ameliorată.

profilele de viteză a vântului (histogramele) utilizate în proiectarea optimă a microsistemelor eoliene, precum și tehnicile de reducere, atât a timpului de simulare a acestor histograme, cât și a supraabundenței de date conținute în ele. A fost abordat calculul pierderilor globale ale microcentralei eoliene, utilizând o metodă originală

baricentrică de simplificare a histogramelor de vânt, validată prin simulări dinamice pentru cicluri de funcționare cu variație de lungă durată a vitezei vântului.

Optimizarea proiectării microsistemului eolian bazat pe microaerogenerator cu magneți permanenți și flux magnetic radial, s-a efectuat pentru un ciclu de funcționare cu variație de lungă durată a vitezei vântului, prin utilizarea unui model semi-analitic de simulare, dezvoltat în mediul MATLAB/ Simulink și asociat metodei originale baricentrice și algoritmului genetic (Fig.14).

Cercetarea științifică din etapa 5 – 2016 a proiectului s-a concretizat în **lucrările publicate [8] – [10]**, din care 2 sunt deja incluse în baza de date IEEE Xplore.

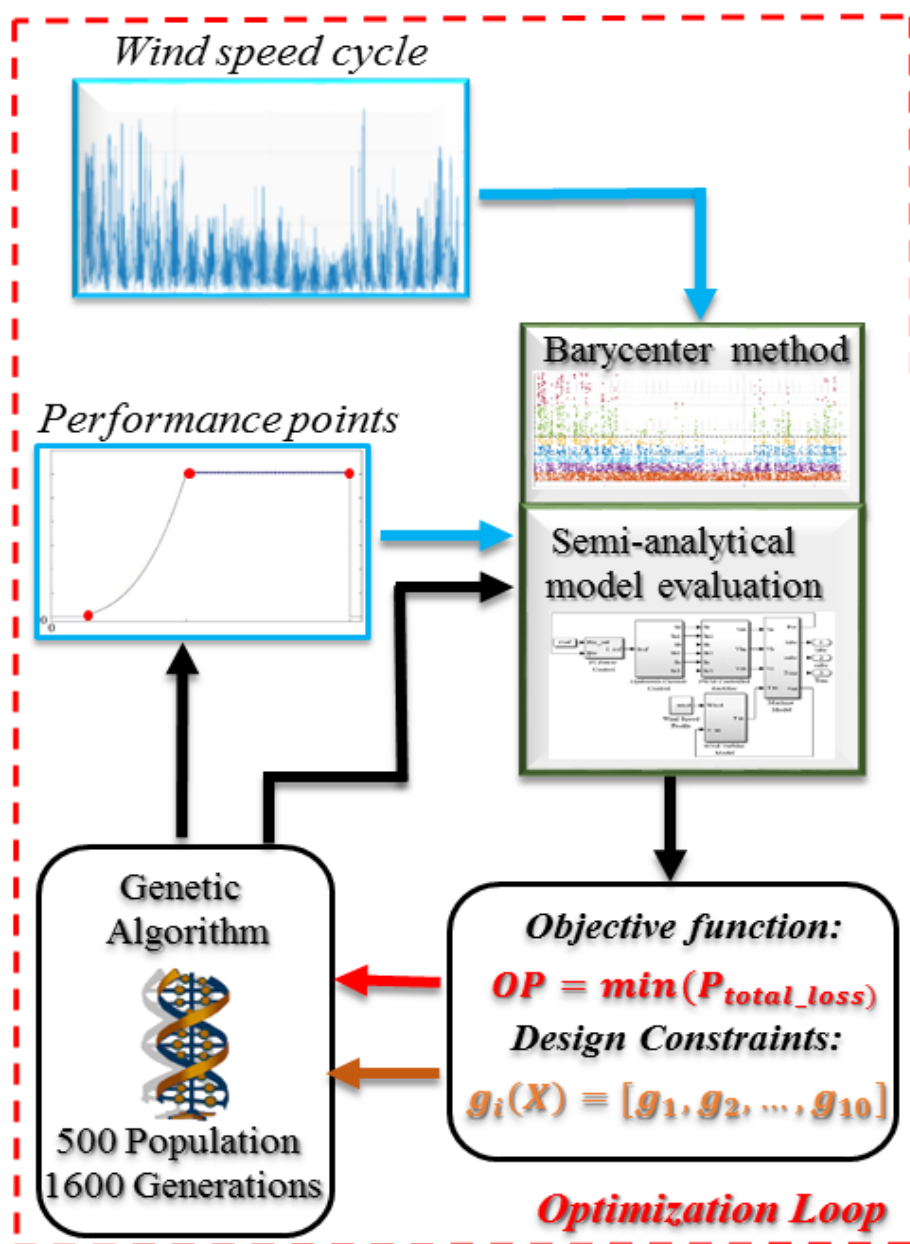


Fig. 14. Reprezentarea schematică a procesului de optimizare a microcentralei eoliene bazate pe microaerogenerator cu magneți permanenți și flux radial utilizând model semi-analitic de simulare și metoda baricentrică de prelucrare a histogramei de vânt pentru cicluri de funcționare cu variație de lungă durată a vitezei vântului.

Lista lucrărilor științifice publicate în cadrul proiectului

- [1] A.A. Pop, F. Jurca, C. Oprea, M. Chirca, S. Breban, M.M. Radulescu, Axial-flux vs. radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application, *Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications – EPE'13 ECCE Europe* (Lille, France, 3-5 September 2013) (included in *IEEE Xplore database*).
- [2] M. Chirca, S. Breban, C.A. Oprea, M.M. Radulescu, Analysis of innovative design variations for double-sided coreless-stator axial-flux permanent-magnet generators in micro-wind power applications, *Proc. 21st IEEE International Conference on Electrical Machines – ICEM 2014*, Berlin, Germany, pp. 385-389 (included in *IEEE Xplore database*).
- [3] M. Chirca, S. Breban, C. Oprea, M.M. Radulescu, Design analysis of a novel double-sided axial-flux permanent-magnet generator for micro-wind power applications, *Proc. 14th IEEE International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment – OPTIM 2014*, Braşov, Romania, pp. 472-476 (included in *IEEE Xplore database*).
- [4] S. Daraban, D. Petreus, C. Orian, Control topology for high-efficiency small-scale wind energy conversion systems”, *Proc. 14th IEEE International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment – OPTIM 2014*, Braşov, Romania, pp. 1070-1077 (included in *IEEE Xplore database*).
- [5] M. Chirca, S. Breban, C.A. Oprea, M.M. Radulescu, Comparative design analysis of ferrite-permanent-magnet micro-wind turbine generators, *Proc. 2015 International ACEMP – OPTIM – ELECTROMOTION Joint Conference*, 2-4 September 2015, Side, Turkey, 6 pp. (included in *IEEE Xplore database*).
- [6] M. Ruba, M.M. Radulescu, Analysis of a grid-connected wind energy conversion system based on complex simulation program, *Proc. 10th IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies – EVER 2015*, 29 March – 2 April 2015, Monte-Carlo, Monaco, 6 pp. (included in *IEEE Xplore database*).
- [7] Andreea Adriana Laczko (Zaharia), V. Zaharia, M.M. Radulescu, S. Brisset, Modeling and simulation of a brushless DC permanent-magnet generator-based wind energy conversion system, *Proc. 10th IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies – EVER 2015*, 29 March – 2 April 2015, Monte-Carlo, Monaco, 7 pp. (included in *IEEE Xplore database*).
- [8] M.M. Radulescu, S. Breban, M. Chirca, Novel topologies of low-speed axial-flux permanent-magnet micro-wind generators, *Lucrările Conferinței Naționale de Acțiunări Electrice – CNAE 2016*, Octombrie 2016, Cluj-Napoca, Romania, CD-ROM, 4 pp., 2016.
- [9] Andreea Adriana Laczko (Zaharia), S. Brisset, M.M. Radulescu, Modeling approaches to brushless DC permanent-magnet generator for use in micro-wind turbine applications, *Proc. International Conference on Electrical Machines – ICEM 2016*, September 2016, Lausanne, Switzerland, pp. 447-453, 2016 (included in *IEEE Xplore database*).
- [10] M. Chirca, C. Oprea, P.-D. Teodosescu, S. Breban, Optimal design of a radial flux spoke-type interior rotor permanent magnet generator for micro-wind turbine applications, *Proc. International Conference on Applied and Theoretical Electricity – ICATE 2016*, October 2016, Craiova, Romania, 5 pp. (included in *IEEE Xplore database*).