

## MAȘINĂ SINCRONĂ PENTRU VEHICULE ELECTRICE ECHIPATĂ CU ÎNFĂȘURARE DE EXCITAȚIE ALIMENTATĂ PRIN TRANSFORMATOR ROTATIV

Tiberiu TUDORACHE<sup>1</sup> și Andrei MARINESCU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitatea POLITEHNICA Bucuresti,

<sup>2</sup>ASTR Filiala Craiova,

tiberiu.tudorache@upb.ro, ancor2005@gmail.com

**Rezumat.** Majoritatea acționărilor folosite în prezent la Vehiculele Electrice (VE) folosesc motoare asincrone sau motoare sincrone cu magneți permanenți. Mașinile sincrone clasice excitate electric, deși oferă o eficiență ridicată într-un domeniu larg de viteze de rotație au fost evitate deseori datorită transmiterii curentului de excitație prin inele colectoare și perii care au durată de viață limitată, rezistență de contact variabilă, generează perturbații electromagnetice și poluare cu particule conductoare. În ultimul timp, costul ridicat al magneților permanenți performanți și dependența de un furnizor unic a readus în actualitate utilizarea motorului sincron clasic în varianta sa practic fără întreținere, realizată prin transmiterea fără contact a curentului de excitație. În lucrare se analizează utilizarea în acest scop a unui Transformator Rotativ (TR) cu circuit magnetic realizat din ferite standard. Se identifică și se studiază prin Metoda Elementului Finit (MEF) parametrii TR, o parte a rezultatelor fiind verificate experimental.

### 1. INTRODUCERE

Vehiculele Electrice (VE) și Hibrice (VH) reprezintă alternative mai ecologice la vehiculele clasice, echipate cu motoare cu ardere internă, poluante. Lucrul mecanic necesar propulsiei electrice a unui VE sau VH este asigurat în general de motoare asincrone sau sincrone [1].

Una dintre marile preocupări ale producătorilor de VE și VH constă în identificarea de soluții pentru reducerea costurilor de fabricație și mentenanță a motoarelor electrice utilizate. În acest sens se depun eforturi pentru dezvoltarea de tehnologii de tipul “fără mentenanță” (“maintenance free”) care aplicate motoarelor electrice au favorizat utilizarea motoarelor asincrone (MA) și motoarelor sincrone excitate cu magneți permanenți (MSMP).

MA au randament ridicat la turații mari și cupluri mici, iar MSMP au caracteristici optime la turații mici și cupluri mari [1], caracteristici care pot fi parțial optimizate prin sistemul electronic de management al VE pentru a se apropia de caracteristica optimă de tracțiune a unui VE din Fig. 1. Forma acestei caracteristici se explică prin necesitatea de a dezvolta un cuplu mare și constant la turații joase (până la aproximativ 2800 rpm) pentru obținerea unor accelerații mari la pornirea de pe loc, urmat la turații mai mari (până la aproape 14000 rpm) de un cuplu care scade la putere constantă.

MSMP are caracteristica cea mai apropiată de cea ideală, cu excepția faptului că excitația constantă nu permite menținerea constantă a puterii la turații mari. Un impediment important al utilizării pe scară largă a MSMP la VE și VH este reprezentat și de incertitudinile privind stabilitatea prețului și disponibilitatea aprovizionării cu magneți permanenți performanți realizați din pământuri rare, întrucât China deține în acest domeniu un monopol de circa 95% [2].

Aceste elemente justifică pe deplin numeroasele studii efectuate în ultimii ani în vederea dezvoltării de soluții pentru reducerea sau chiar eliminarea magneților permanenți din construcția mașinilor sincrone [3-5]. Una dintre soluțiile naturale constă în revenirea la motoarele sincrone clasice cu excitație electromagnetică (MSEE), aceste mașini fiind capabile să asigure cu ușurință caracteristica ideală pentru VE din Fig. 1, prin slăbirea câmpului

magnetic de excitație la turații mari. În plus, aceste mașini permit reducerea pierderilor în fier și în Cu în înfășurarea de excitație la sarcini parțiale, prezintă un sistem de reglaj mai simplu și mai robust decât MSMP și permit posibilitatea de dezexcitare rapidă în caz de avarie etc. [6-9]. Pentru o utilizare cu succes a MSEE la propulsia VE ar fi însă necesară eliminarea sistemului de inele și perii care nu asigură o funcționare fără întreținere.

În această lucrare se analizează un sistem de alimentare fără contact a înfășurării de excitație a unui MSEE bazat pe un Transformator Rotativ (TR) performant, realizat cu componente standard din ferită care funcționează la frecvența de 100 kHz. Analiza efectuată utilizează Metoda Elementelor Finite (MEF) și are ca scop determinarea prin calcul numeric a unor mărimi specifice TR precum: distribuția spațială a inducției magnetice, inductivitățile proprii, utile și de dispersie, variația tensiunilor primare și secundare, randamentul în funcție de lungimea întrefierului etc.

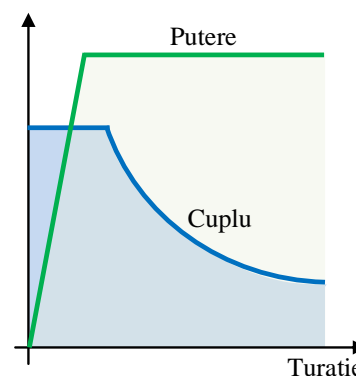


Fig. 1. Caracteristicile teoretice putere - turație, cuplu - turație la un VE.

## 2. UTILIZAREA TRANSFORMATORULUI ROTATIV LA MSEE PENTRU VE

Transformatorul rotativ (TR) este un transformator special folosit de obicei pentru transmiterea unor semnale între dispozitive în rotație relativă unul față de altul. Acestea au fost utilizate inițial în senzorică (de ex la traductoarele de moment de torsiune instalate în sistemele de acționare electrică) pentru transmiterea datelor când sistemele de inele și perii de construcție specială nu mai ofereau rezultate sigure, în special la turații mari.

În ultimii ani, odată cu dezvoltarea electronicii de putere s-a extins utilizarea TR pentru transmiterea fără contact a unor puteri însemnate de ordinul zecilor de kW în diferite aplicații industriale [10-13].

TR este de fapt un cuplor inductiv format din două înfășurări concentrate, una fixă și alta mobilă, incluse în circuite magnetice cu simetrie de rotație. Transferul de putere se face prin câmpul magnetic produs de înfășurarea fixă (transmițătorul-Tx). Pentru îmbunătățirea cuplajului magnetic și a transferului de putere către înfășurarea în mișcare de rotație (receptorul-Rx) la care se conectează sarcina, se folosesc atât circuite magnetice realizate din ferită cu întrefier minim necesar pentru siguranță mecanică, dar și frecvențe de transmisie ridicate între 20 și 100 kHz [14]. MSEE pot beneficia de transmiterea fără contact a curentului de excitație și eliminarea sistemului de inele și perii în combinație cu un sistem de conversie AC-DC.

În Fig. 2 se prezintă varianta de aplicare a TR la un MSEE analizată în această lucrare pentru aplicare la VE. TR este montat în spațiul utilizat anterior pentru sistemul de inele și perii. Se folosesc ferite de tip oală ("pot core") cu un întrefier ales pe baza analizei FEM prezentată în continuare în vederea reducerii inductivității de scăpări. Valoarea acestuia se consideră că nu poate fi mai mică de 2 mm pentru a ține seama de deplasarea axială a rotorului MS în timpul funcționării. Această deplasare axială trebuie evitată prin măsuri constructive în sine cunoscute (de ex. rulmenți dubli). Deplasarea radială este redusă prin montarea părții în rotație pe un cap de arbore cât mai scurt.

Fixarea feritelor pe arborele mașinii ca și piesele de centrare ale unui miez magnetic față de celălalt se realizează prin piese din material izolant care au și rolul de a evita influența pieselor metalice masive din jur, asupra proprietăților magnetice ale feritelor care funcționează la frecvență ridicată. În aceste condiții, ipotezele luate în calcul sunt: întrefier constant și posibilitatea de a face analiza cuplorului inductiv în regim static, având ca sarcină numai rezistența ohmică a înfășurării de excitație (în realitate sarcina este un circuit R-L, caz care va fi studiat ulterior pentru regimul real de funcționare dinamică al MS in VE).

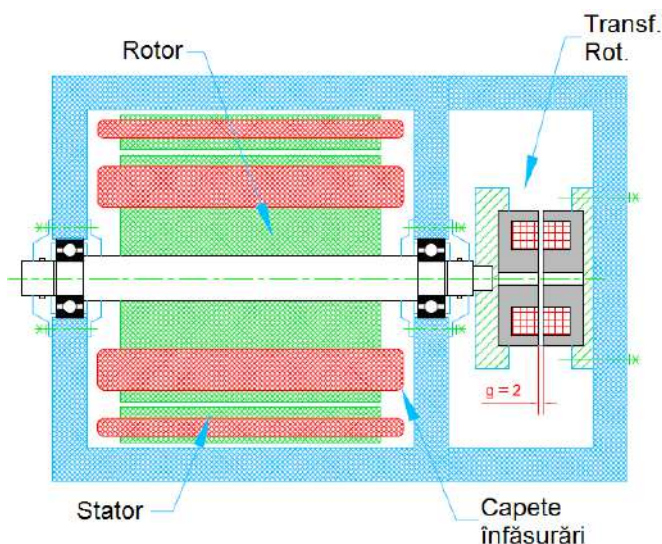


Fig. 2. Secțiune printr-un MSEE cu TR.

### 3. SCHEMA BLOC A SISTEMULUI DE EXCITAȚIE CU TR

În Fig. 3 se prezintă schema bloc a aplicației utilizate pentru folosirea TR la MSEE destinate VE și VH. Alimentarea TR se face de la bateria VE prin intermediul unui inverter de tensiune clasic cu tranzistoare IGBT, transformat în inverter de curent prin montarea în serie a unei inductivități L. Această structură poate fi aplicată cu succes deoarece TR are întrefier constant și capacitatea de rezonanță C montată în paralel în secundar reflectă în primar o impedanță constantă. Tensiunea secundară este redresată prin Rd și transmisă înfășurării de excitație Ex prin intermediul unui bloc complex de reglare/adaptare Re. Acest bloc se bazează pe un convertor Buck/Boost clasic însoțit de circuite care asigură posibilitatea de inversare a sensului curentului de excitație. Atât inverterul de curent cât și blocul Re sunt comandate de regulatorul Reg, parte a sistemului principal de reglaj al VE. Prin comenzile transmise se asigură atât reglarea rapidă a curentului de excitație în toate regimurile de mers cât și dezexcitarea rapidă în caz de avarie.

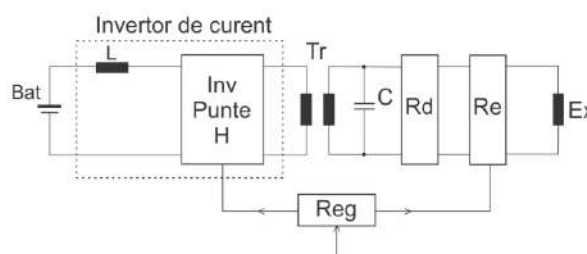


Fig. 3 Schema bloc a sistemului de excitație pentru un MSEE.

### 4. DATE PRINCIPALE ALE TR

TR studiat în lucrare este alcătuit din două miezuri magnetice identice de tip oală, realizate din ferită de tip P4125, pe fiecare fiind dispusă câte o bobină cu 20 de spire realizată din conductor de tip litz wire cu dimensiuni 1x1,8 mm format din 160 fire cu diametrul de 0,1 mm, așa cum rezultă din Fig.4.

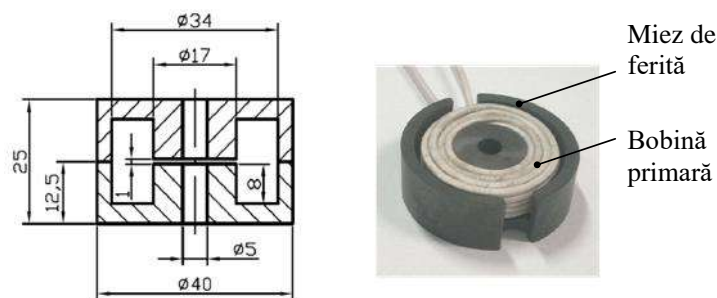


Fig. 4. TR pentru alimentarea excitației mașinilor sincrone; a) date geometrice în mm pentru un miez din ferită de tip P 4125; b) miez din ferită cu bobină din litz wire cu 20 spire realizat practic (primar).

## 5. MODELUL NUMERIC UTILIZAT ÎN STUDIULUI TR

Analiza TR a avut la bază Metoda Elementelor Finite (MEF) în aproximare 2D axi-simetrică, cu ajutorul pachetului de programe de calcul de câmp Flux ® [15].

Întrucât miezurile TR sunt realizate din ferite, pierderile datorate curenților induși prin mișcare de rotație vor fi neglijabile. Prin urmare analiza TR va fi efectuată în regim cvasi-staționar magnetic armonic al câmpului electromagnetic, formularea utilizată fiind exprimată în potențial magnetic vector complex  $\underline{A}$  [15]:

$$\text{rot} [(1/\mu) \cdot \text{rot} \underline{A}] = \underline{J}_s - j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \underline{A} \quad (1)$$

unde  $\underline{J}_s$  reprezintă densitatea curenților sursă,  $\omega$  este pulsația câmpului electromagnetic,  $\sigma$  este conductivitatea electrică a regiunilor de tip conductor masiv.

Dacă se neglijează anumite detalii constructive, configurația geometrică și electromagnetică a TR studiat prezintă simetrie axială. Prin urmare domeniul de calcul 2D al problemei de câmp electromagnetic asociată TR va fi reprezentat de o secțiune axială prin geometria completă a dispozitivului, Fig. 5.

Domeniul de calcul 2D este delimitat de axa de simetrie verticală, respectiv de o regiune specială numită *Infinite box*, de forma unei semi-coroane circulare, utilizată pentru modelarea condițiilor la infinit în cazul problemelor de calcul de câmp electromagnetic cu frontieră deschisă [15].

Pentru rezolvarea ecuației (1) la mers în gol, respectiv la funcționare în sarcină este necesară cuplarea modelului de câmp cu un model de circuit, Fig. 6.

Modelul de circuit este alcătuit dintr-o bobină primară ( $B_1$ ) alimentată de la o sursă de curent alternativ ( $I_1$ ) și o bobină secundară ( $B_2$ ), identică cu cea primară care este conectată la un rezistor de sarcină  $R_s$ . În secundar, pentru funcționare optimă la rezonanță, se adaugă și un condensator  $C$  de compensare paralel. Valoarea efectivă a curentului prin bobina primară este  $I_1 = 5 \text{ A}$ , iar rezistența electrică de sarcină este  $R_s = 200 \Omega$ .

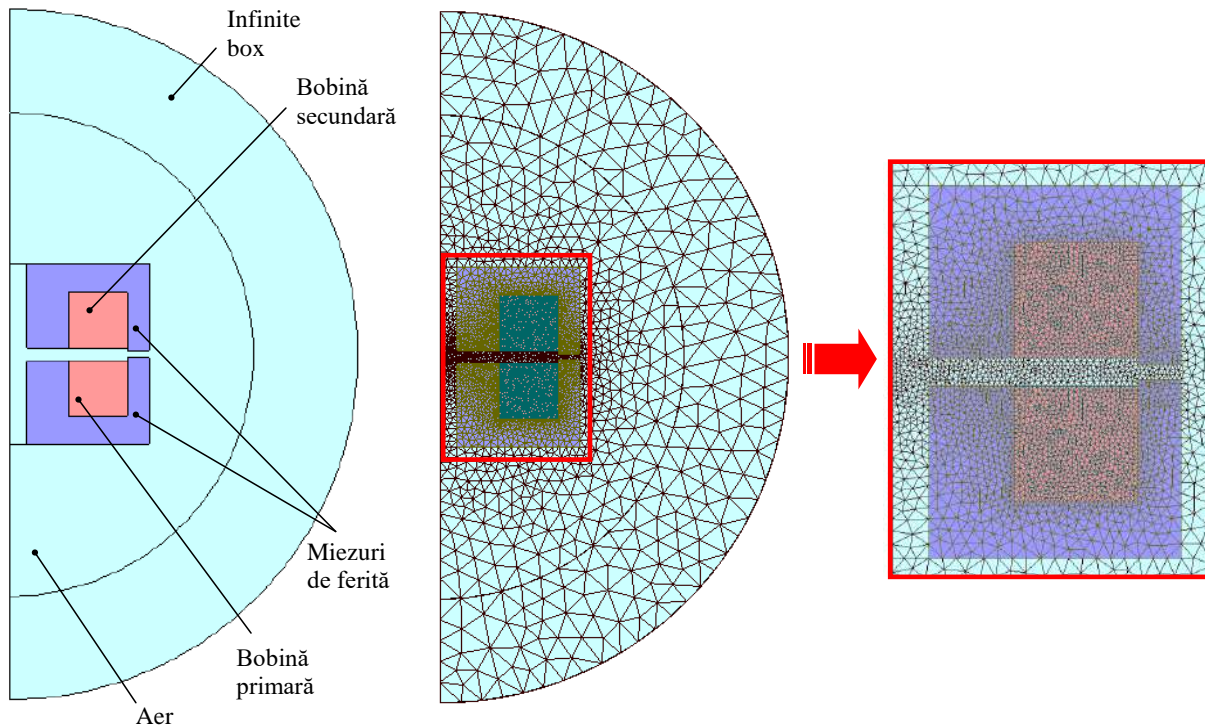


Fig. 5. Domeniul de calcul 2D al câmpului electromagnetic și rețeaua de discretizare.

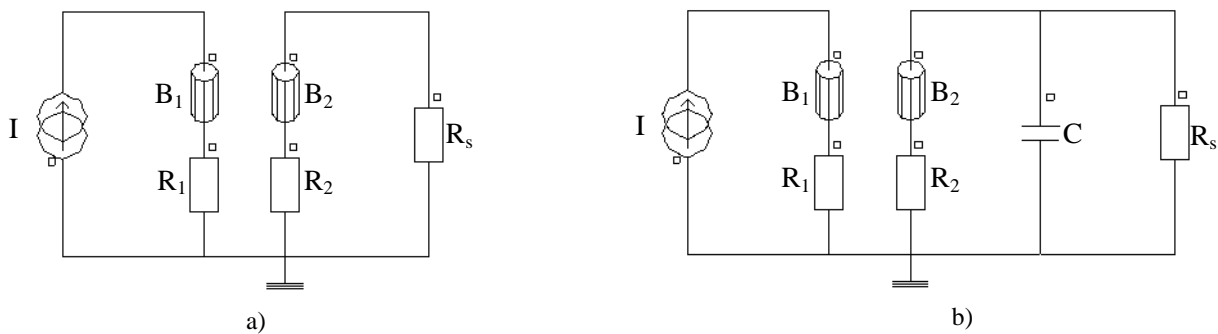


Fig. 6. Modele de circuit asociate TR; I - sursă de curent;  $B_1/B_2$  - bobine primară/secundară;  $R_1/R_2$  rezistențe înfășurare primară/secundară;  $R_s$  - rezistor de sarcină; C condensator de compensare; a) circuit pentru modelarea funcționării în gol; b) circuit pentru modelarea funcționării în sarcină.

## 6. REZULTATE NUMERICE

În urma rezolvării problemei de calcul de câmp electromagnetic 2D la funcționarea în gol respectiv în sarcină a TR, pentru diferite valori ale lungimii întrefierului, s-au obținut rezultatele numerice prezentate în Fig. 7 - 14.

În Fig. 7 și 8 sunt prezentate liniile câmpului magnetic, respectiv hărțile inducției magnetice la funcționare în gol și în sarcină, pentru lungimi ale întrefierului  $g = 1 \text{ mm}$  și  $g = 5 \text{ mm}$ .

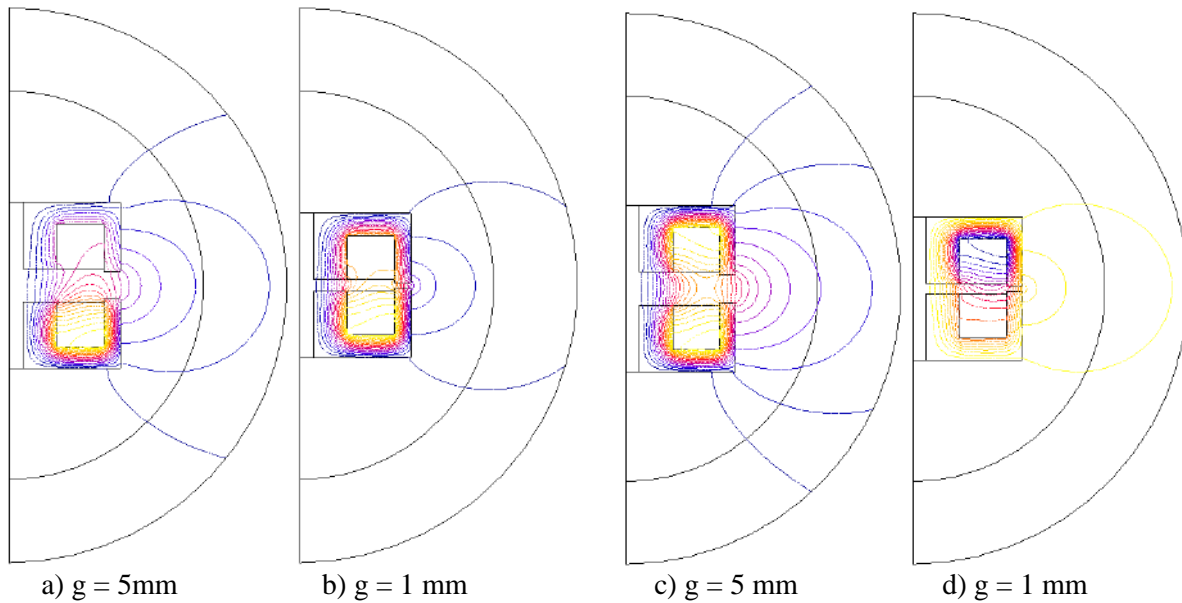


Fig. 7. Liniile câmpului magnetic la funcționarea TR în gol (a, b) și în sarcină (c, d) pentru lungimi ale întrefierului  $g = 5\text{ mm}$  și  $g = 1\text{ mm}$ .

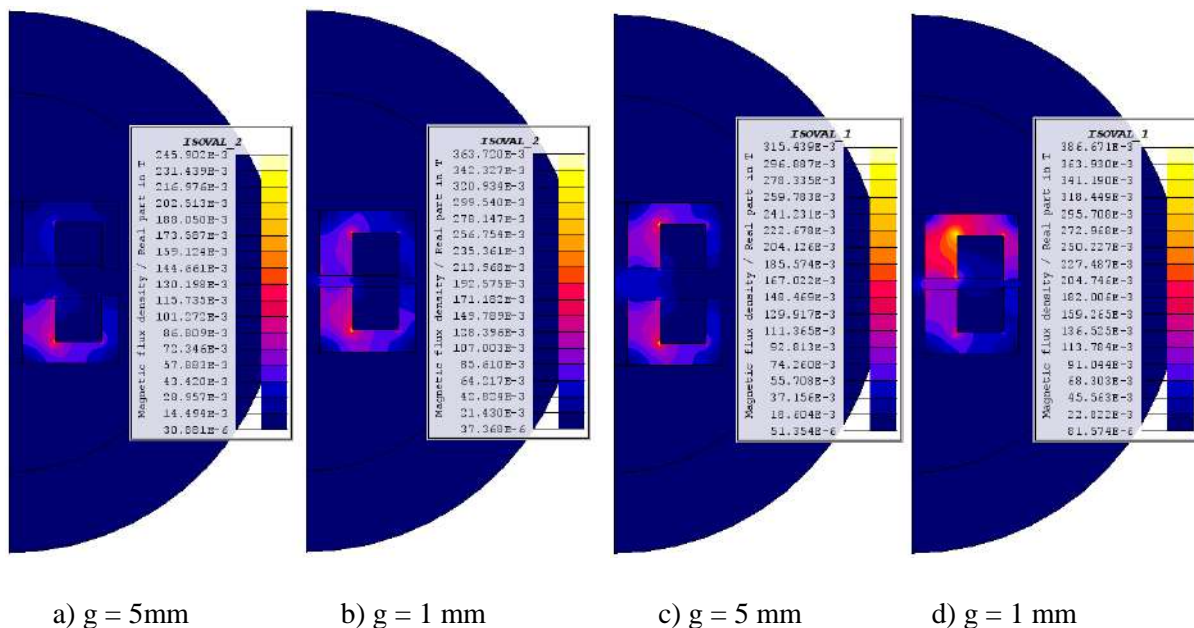


Fig. 8. Harta inducției magnetice (în Tesla [T]) la funcționarea TR în gol (a, b) și în sarcină (c, d) pentru lungimi ale întrefierului  $g = 5\text{ mm}$  și  $g = 1\text{ mm}$ .

Se observă că atât la funcționare în gol, cât și în sarcină, valorile maximă și medie ale inducției magnetice în miezul magnetic cresc odată cu scăderea lungimii întrefierului  $g$ . În Fig. 9 - 11 sunt prezentate variațiile tensiunilor primară, secundară, respectiv a factorului de cuplaj [17] cu lungimea întrefierului  $g$ .

Se observă de asemenea că odată cu creșterea lungimii întrefierului scade atât factorul de cuplaj cât și tensiunile din primar și secundar, Fig. 9 și 10. Lungimea întrefierului influențează totodată și valorile inductivităților, Fig. 11. Astfel, pe măsură ce crește întrefierul, crește inductivitatea de dispersie, respectiv scade inductivitatea proprie și cea utilă a bobinelor.

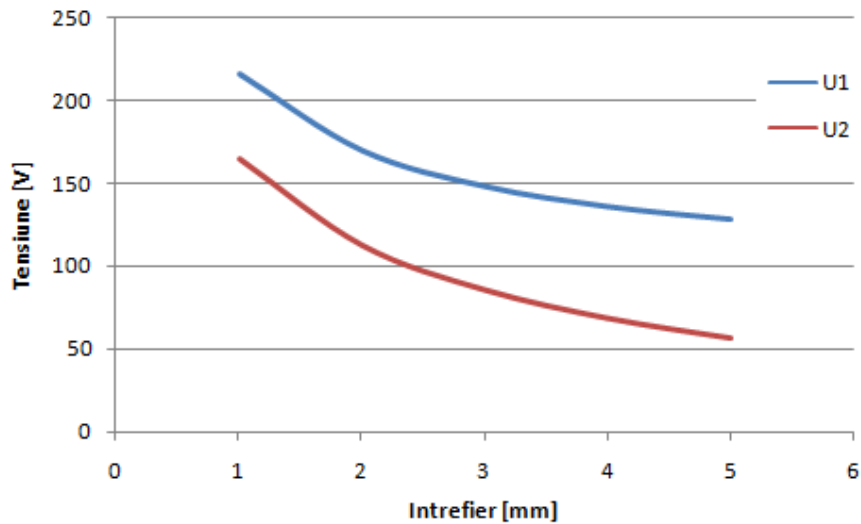


Fig. 9. Variația tensiunilor din primar  $U_1$  și secundar  $U_2$  funcție de lungimea întrefierului.

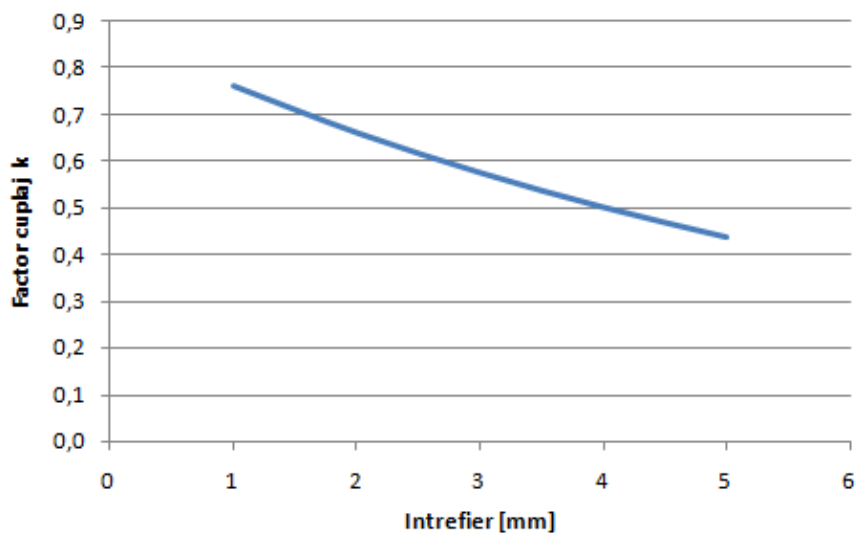


Fig. 10. Variația factorului de cuplaj  $k$  funcție de lungimea întrefierului.

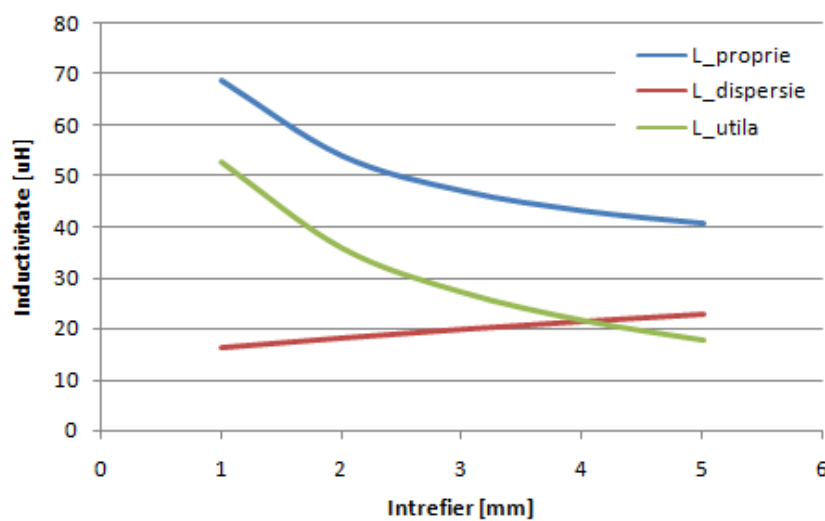


Fig. 11. Variația inductivităților proprii, utile și de dispersie funcție de lungimea întrefierului.

Pentru a optimiza randamentul transferului energetic între primarul și secundarul TR se adaugă în circuitul secundar un condensator pentru compensare C, conectat în paralel cu rezistorul de sarcină. Pentru frecvența de lucru de  $f = 100$  kHz valoarea capacității C se poate estima cu relația

$$C = 1/\omega^2L \quad (2)$$

unde  $\omega = 2\pi f$  este pulsația sursei de alimentare  $I_1$ .

Calculul au indicat valoarea capacității de compensare  $C = 30,4$  nF pentru o lungime a întrefierului  $g = 2$  mm. Deoarece inductivitățile bobinelor depind de lungimea întrefierului, valoarea frecvenței de rezonanță va depinde, de asemenea, de distanța dintre miezurile feromagnetice. Astfel, s-a efectuat o serie de simulări pentru diferite valori ale întrefierului și ale frecvenței de lucru care a permis calculul puterii utile, a puterii absorbite de TR, respectiv a randamentului TR, Fig. 12 - 14.

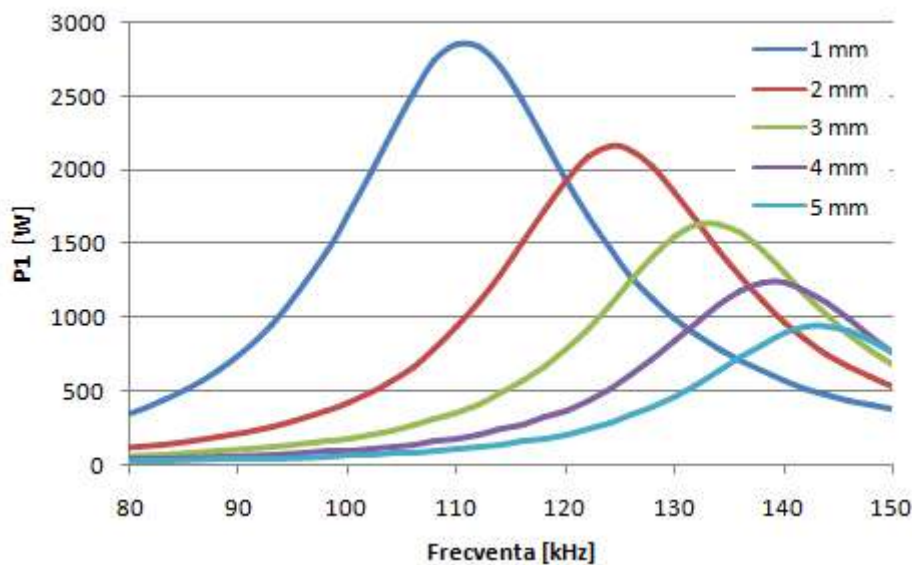


Fig. 12. Variația puterii absorbite de TR funcție de frecvență și de lungimea întrefierului.

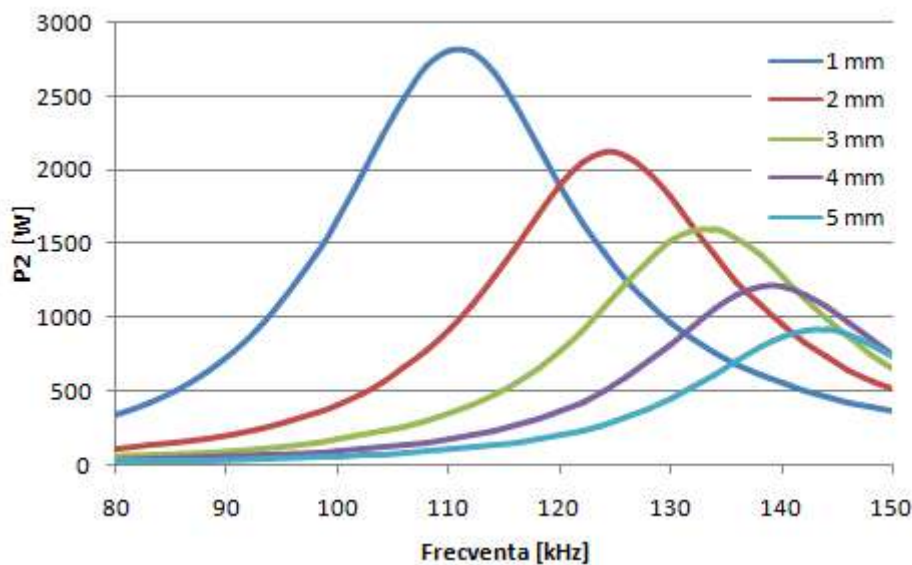


Fig. 13. Variația puterii utile a TR funcție de frecvență și de lungimea întrefierului.



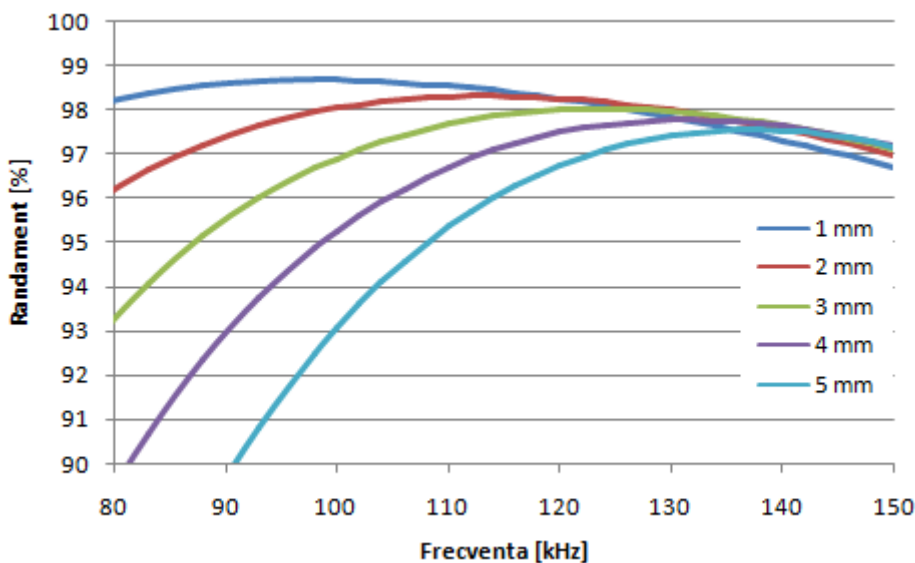


Fig. 14. Variația randamentului TR funcție de frecvență și de lungimea întrefierului.

Rezultatele din Fig. 12 - 14 confirmă faptul că pentru o valoare a capacității condensatorului de compensare  $C = 30,4$  nF și pentru o lungime dată a întrefierului  $g$  există o anumită frecvență de lucru pentru care TR funcționează la rezonanță, iar randamentul său este maxim. Prin urmare valoarea frecvenței de funcționare trebuie aleasă în funcție de lungimea întrefierului pentru care se proiectează TR.

## 7. VALIDĂRI EXPERIMENTALE

### 7.1. Identificarea parametrilor TR in CC si CA

Toate măsurătorile prezentate în continuare au fost realizate cu un analizor vectorial de rețea (VNA), componentă de bază a Laboratorului de Sisteme Wireless de la ICMET [16]. Rezistențele în CA la 100 kHz, ale înfășurărilor realizate din litz wire, au o creștere însemnată față de cele în CC (situate între 25 și 26 mΩ în aer), așa cum rezultă din Tabelul 1. Explicația constă în efectul extern creat de bobinajul concentrat și de prezența miezului feritic în imediata apropiere a bobinelor. Inductivitățile proprii cresc și ele în prezența miezului magnetic dar această creștere este dictată de caracteristicile de material și sunt constante în fiecare caz în parte, în tot domeniul frecvențelor până la 100 kHz.

Tabel 1. Date principale ale TR la frecvența de 100 kHz

Bobină în aer		Bobină cu miez de ferită separat		Bobină cu miez de ferită situată la $g = 2$ mm de altă bobină cu miez de ferită (TR)	
$R_{AC}$ [mΩ]	L [μH]	$R_{AC}$ [mΩ]	L [μH]	$R_{AC}$ [mΩ]	L [μH]
42 - 46	8 - 9	109 - 111	33 - 35	140 - 146	61(Tx) - 64(Rx)

În Fig. 15 se prezintă caracteristica de frecvență a TR (amplitudine și fază) pentru sistemul de excitație folosit în această lucrare, sub forma raportului între tensiunea secundară  $U_2$  și curentul primar  $I_1$  când rezistența de sarcină a TR este o rezistență de 50 Ω.

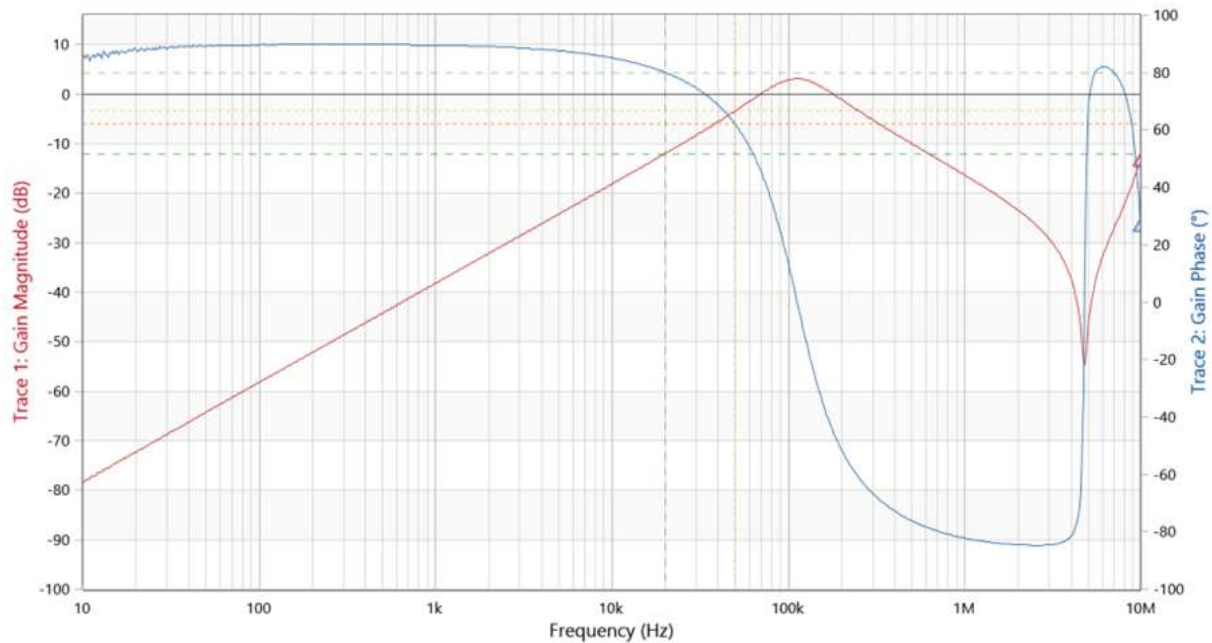


Fig. 15. Caracteristica de frecvență  $U_2/I_1$  în domeniul 10 Hz – 10 MHz

Se poate observa că rezonanța are loc la 112 kHz în loc de 100 kHz, datorită abaterii valorii nominale a condensatorului de rezonanță paralel  $C = 30,4$  nF.

## 7.2. Comparație cu MEF

În Fig. 16 - 18 sunt prezentate comparativ rezultate obținute prin simulare numerică, respectiv pe cale experimentală. În Fig. 16 și Fig. 17 se prezintă variația cu lungimea întrefierului a factorului de cuplaj (eroare relativă de maxim 7,98%) și a inductivității proprii a bobinelor cu miez de ferită, situate față în față (eroare relativă de circa 13,4%), iar în Fig. 18 se prezintă randamentul TR funcție de frecvența de lucru, cu evidențierea frecvenței de rezonanță (eroare relativă sub 1%). Se observă o bună concordanță între seturile de rezultate analizate.

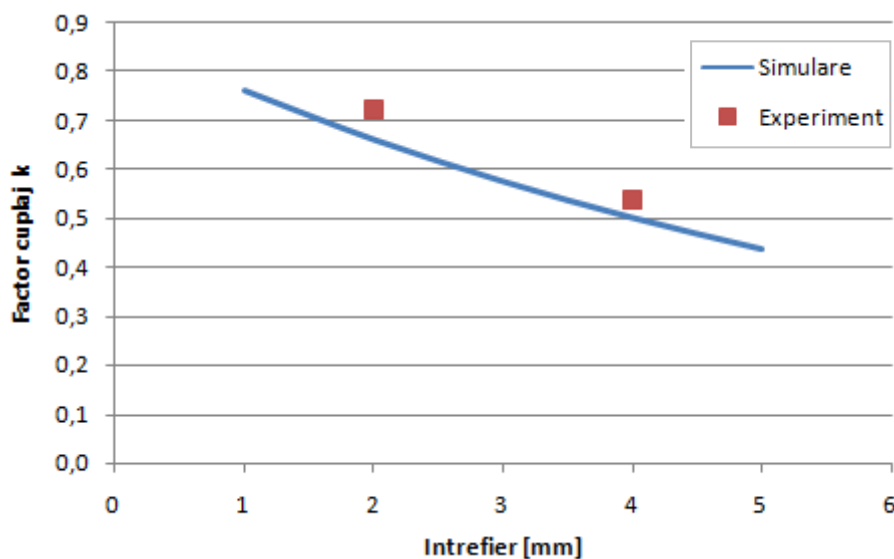


Fig. 16. Variația factorului de cuplaj  $k$  funcție de lungimea întrefierului. Validare experimentală.

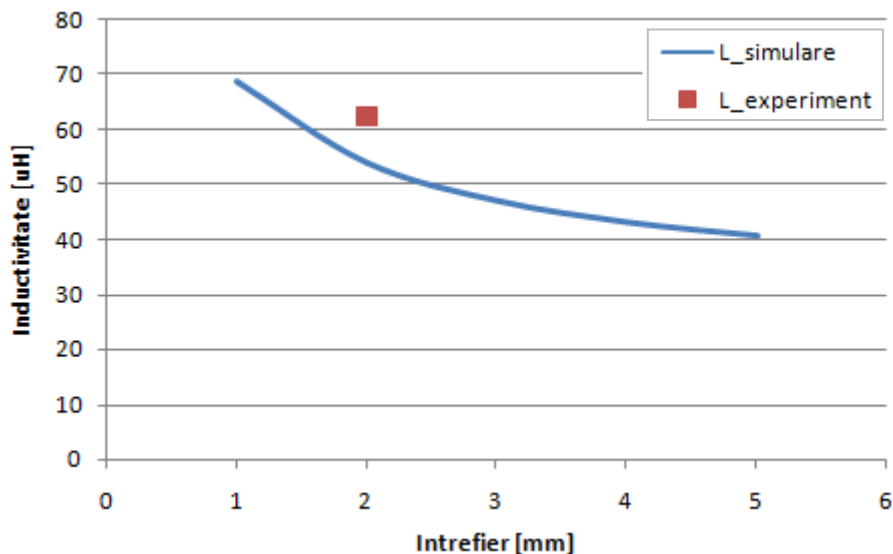


Fig. 17. Variația inductivității proprii funcție de lungimea întrefierului. Validare experimentală

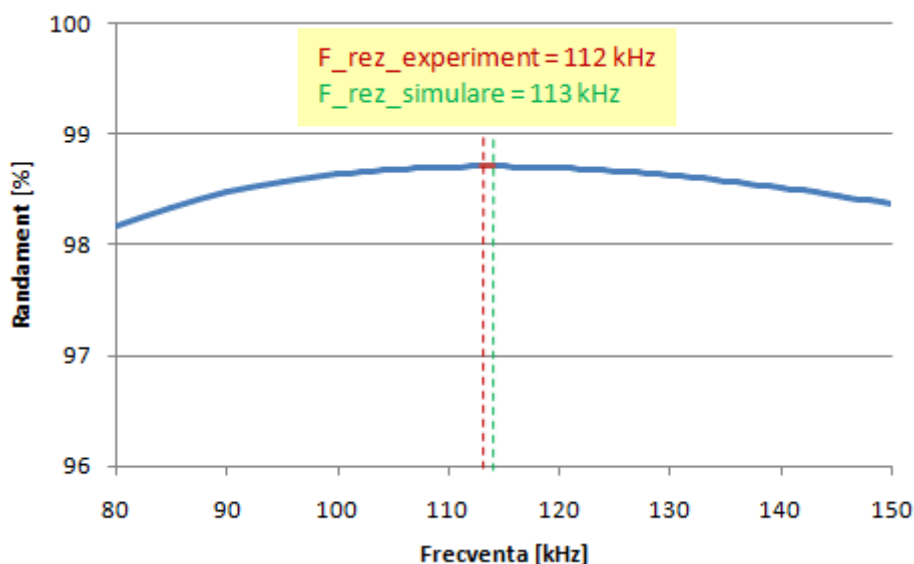


Fig. 18. Variația randamentului funcție de frecvența de lucru. Validarea experimentală a frecvenței de rezonanță ( $F_{rez\_simulare}/F_{rez\_experiment}$ ).

## 7. CONCLUZII

În lucrarea de față se prezintă studiul unui Transformator Rotativ (TR) cu miezuri de ferită standard destinat alimentării înfășurării de excitație a Mașinilor Sincrone cu Excitație Electromagnetică (MSEE) utilizate la VE și VH. Analiza numerică efectuată prin MEF a avut ca scop estimarea performanțelor transformatorului, atât la mers în gol, cât și la funcționare în sarcină, pentru o frecvență de lucru de 100 kHz.

S-au determinat prin calcul numeric mărimi specifice TR în funcție de lungimea întrefierului: distribuția spațială a inducției magnetice, inductivitățile proprii, utile și de dispersie, tensiunile primare și secundare, puterile utile și absorbite, randamentul conversiei, valoarea capacității condensatorului de compensare, frecvența de rezonanță etc.

O parte a rezultatelor numerice au fost validate prin măsurători experimentale, concordanța dintre seturile de rezultate fiind bună.

Pe baza rezultatelor obținute în lucrare se intenționează realizarea practică a unui model funcțional de MSEE cu TR, respectiv testarea experimentală a acestuia împreună cu regulatorul electronic de excitație.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] E. Illiano, Die Stromerregte Synchronmaschine als hocheffizienter Traktionsmotor in Elektrofahrzeugen, *ATZ elektronik*, vol. 8, pp. 44-48, Apr. 2013.
- [2] China warns its rare earth reserves are declining, <https://www.bbc.com/news/business-18516461>
- [3] I. Boldea, L. N. Tutelea, Leila Parsa, D. Dorrell, Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 10, pp. 5696-5711, October 2014.
- [4] A.El-Refaie, T. Raminosa, P. Reddy, S. Galioto, D. Pan1, K.Grace, J. Alexander, K.-K. Huh, Comparison of traction motors that reduce or eliminate rare-earth materials, *IET Electr. Syst. Transp.* Vol. 7, No. 3, pp. 207-214, 2017.
- [5] D. Fodorean, A. Djerdir, I. A. Viorel, and A. Miraoui, “A Double Excited Synchronous Machine for Direct Drive Application - Design and Prototype Tests”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 656-665, 2007.
- [6] D. G. Dorrell, Are Wound-Rotor SM Suitable for Use in High Efficiency Torque-Dense Automotive Drives?, *IECON Conference*, pp.4880-4885, 2012.
- [7] J. de Santiago, H. Bernhoff, B. Ekergård, S. Eriksson, S. Ferhatovic, R.Waters, M. Leijon, Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol. 61, No. 2, 475-484, February 2012.
- [8] A.Campeanu, R. Munteanu, V. Iancu, Dynamic Stability of Permanent Magnet Synchronous Machine versus Synchronous Machine with Electromagnetic Excitation, *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg.* Vol. 63, 2, pp. 145–150, Bucharest, 2018.
- [9] O. Johann, J. Mueller, Die fremderregte Synchron Maschine-potentiale in der Elektromotoren Entwicklung, *ATZ elektronik*, vol. 8, No. 4, pp. 286-289, 2013.
- [10] D. H. Koo, Do Hyun Kang I. Vadan, Contactless Power Supply for High Speed Rotating Rotor, in *Proc. of KIEE Spring Annual Conference*, Jeju, Korea, pp. B20-B24, April 19-21, 2001.
- [11] R. Trevisan, Alessandra Costanzo, A 1-kW Contactless Energy Transfer System Based on a Rotary Transformer for Sealing Rollers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, no. 11, pp. 6837-6345, Nov. 2014.
- [12] K. D. Papastergiou, D. E. Macpherson, An airborne radar power supply with contactless transfer of energy-Part I: Rotating transformer, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 5, pp. 2874–2884, Oct. 2007.
- [13] X. Wang, A. Wang .X. Wang, Simulation and Optimization of Contactless Power Transfer System for Rotary Ultrasonic Machining, *MATEC Conf.*, pp. 1-4, 2016, DOI: 10.1051/mateconf/20166.
- [14] A. Marinescu, I. Dumbrava, Coupling Factor of Planar Power Coils Used in Contactless Power Transfer, *The IXth International Symposium On Advanced Topics In Electrical Engineering*, Bucharest, May, 7-9, 2015.
- [15] \*\*\*Cedrat: “User guide Flux® 11”, 2015.
- [16] A. Marinescu, I. Dumbrava, I. Patru, A Research and Testing Laboratory for Contactless Power Transfer Systems, *The XIth International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, Bucharest, March 28-30, 2019.
- [17] I.G. Sîrbu, A. Marinescu, L. Mandache, On Electric Vehicle Wireless Chargers with Tight Coupling, *The Xth International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, Bucharest, March 23-25, 2017.

## SYNCHRONOUS MACHINE FOR ELECTRIC VEHICLES EQUIPPED WITH FIELD WINDING SUPPLIED BY ROTARY TRANSFORMER

Tiberiu TUDORACHE<sup>1</sup> and Andrei MARINESCU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University POLITEHNICA of Bucharest,

<sup>2</sup>ASTR - Craiova Section,

tiberiu.tudorache@upb.ro, ancor2005@gmail.com

**Abstract.** Most part of electric drives currently used for Electric Vehicles (EV) are equipped with induction motors or permanent magnet synchronous motors. Though classical synchronous machines with field winding, offer a high efficiency in a wide range of rotational speeds, they have often been avoided due to the transmission of the excitation current through the collector rings and brushes which have a limited lifetime, variable contact resistance, generate electromagnetic disturbances and pollution with conductive particles. Lately, the high cost of high-performance permanent magnets and the dependence on a single supplier has now made the use of the classic synchronous motor in its practically maintenance-free version, achieved through the non-contact transmission of the excitation current. The paper analyzes the use for this purpose of a Rotary Transformer (RT) with magnetic circuit made from standard ferrites. The RT parameters are identified and studied by the Finite Element Method (MEF), part of the results being verified experimentally.