

CUPLOR INDUCTIV MIMO PENTRU SISTEME WIRELESS DE MARE PUTERE

Andrei MARINESCU¹, Tiberiu TUDORACHE² și Adrian VINTILĂ³

¹ASTR România, ²Universitatea POLITEHNICA din București, ³ICMET
ancor2005@gmail.com ¹, tiberiu.tudorache@upb.ro², adrian_vintila@icmet.ro³

Abstract. Transmitter component of high power inductive wireless transmission systems for electric busses and trucks should be embedded in the road to ensure a free circulation of vehicles and to ensure a good mechanical resistance of the pavement, in the charging region, similar to the rest of the road. In such application, ferrites cannot be envisaged as magnetic flux concentrators due to their fragility. An adequate solution to replace the ferrites consists in using magnetic concrete as magnetic field concentrator for wireless inductive transmission system. This solution is analyzed in this paper and used for an MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) inductive wireless power system based on Double-D structure coils, for a transferred power of 125 kW, corresponding to the standard project SAE J2954-2, sufficient for an electric bus for 50 persons. The Finite Element analysis carried out in the paper has the objective of determining the useful and parasitic magnetic coupling parameters of the proposed inductive power transfer system.

1. INTRODUCERE

În prezent automobilele electrice sau hibride (AE sau AEH) fac parte din peisajul urban cotidian, aceste vehicule permițând reducerea treptată a emisiilor poluante de CO₂ impusă la nivel global [1]. Încărcarea (reîncărcarea) bateriilor acestor vehicule se realizează, în prezent, aproape exclusiv prin conducție (plug-in). Odată cu dezvoltarea AE autonome, a revenit în actualitate încărcarea automată fără contact (Wireless), soluție aplicabilă atât în cazul vehiculelor ușoare cât și în cazul celor grele (în special pentru autobuzele urbane dar și pentru vehiculele comerciale). Implementarea soluției de transfer de putere wireless (wireless power transfer - WPT) la vehicule grele necesită puteri de încărcare mult mai mari, în special în cazul sistemelor de încărcare WPT rapidă/ultrarapidă [2].

În cazul autobuzelor electrice există două abordări privind creșterea distanței de deplasare: baterii cu capacitate mare pentru acoperirea întregii durate de funcționare zilnice și încărcare nocturnă în depou, respectiv baterii cu capacitate mică încărcate wireless pe traseu sau la capete de linie [3], metodă preferată în special pentru autobuzele Diesel convertite în autobuze electrice.

Pentru a evita apariția unor obstacole în circulație, componenta emițător a cuplorului inductiv trebuie integrată în pavajul realizat din beton sau asfalt, cu aceeași rezistență mecanică ca și restul șoselei. Materialul feritic folosit în mod obișnuit pentru îmbunătățirea transferului inductiv de energie la frecvențe de ordinul zecilor de kHz este inacceptabil, întrucât este fragil mecanic. Două soluții tehnice există în acest scop: fie adoptarea unui sistem electromagnetic de concentrare a câmpului magnetic fără ferite, fie înlocuirea feritelor cu Beton Magnetic (BM).

În lucrarea de față se analizează condițiile necesare pentru realizarea unui echipament complet de încărcare WPT în varianta de transfer de energie în câmp apropiat cu cuploare inductive multi-bobină în primar și secundar. Acestea au denumirea generică MIMO (multi input-multi output), singura soluție capabilă să asigure transferul unor puteri de cel puțin zece ori mai mari decât varianta clasică a cuplorului cu câte o singură bobină în primar și secundar SISO (single input-single output).

Funcționarea sistemului MIMO în cazul WPT, spre deosebire de aplicarea sa în sistemele de transmitere a informației în câmp îndepărtat multi-frecvență este afectată de cuplajele parazite dintre bobinele acestuia care trebuie minimizate în condițiile unei distanțe

reduce între componente. Determinarea acestor cuplaje este efectuată în lucrare prin Metoda Elementelor Finite (MEF) pentru cazul unui sistem format din două cuploare inductive identificat în lucrare sub forma 2x2 MIMO după stabilirea tipului de bobine utilizate și a condițiilor de montaj în pavaj și sub vehicul.

2. ÎNLOCUIREA FERITELOR DIN CONSTRUCȚIA CUPLOARELOR INDUCTIVE

Cuploarele inductive clasice realizate ca transformatoare de medie frecvență în aer folosesc ferite drept concentrator de câmp magnetic [4]. Concentratoarele de flux magnetic permit atât concentrarea fluxului magnetic generat de bobinele T_x (de tip emițător) în zona activă din interiorul cuplorului destinată transferului de putere cât și creșterea inductivităților proprii ale bobinelor T_x și R_x (de tip receptor) în vederea creșterii cuplajului mutual dintre acestea care conduce la creșterea randamentului de transfer.

În cazul în care emițătorul (T_x) este înglobat în pavaj, fragilitatea feritelor împiedică realizarea unui sistem eficient și fiabil de transmisie wireless a energiei electrice către receptorul (R_x) montat sub șasiul vehiculului electric. Soluția analizată în lucrare constă în înlocuirea feritei cu un material similar betonului convențional, dar cu proprietăți magnetice bazată pe ideea inițială descrisă în [5-7]. Acesta este un așa numit Beton Magnetic (BM) care înlocuiește agregatele uzuale (pietriș, nisip, etc.) prin agregate cu proprietăți magnetice (ferite, oxizi de fier, materiale amorfe sau nanocristaline) [8-11] obținute din materiale recuperate. În [11] s-a determinat permeabilitatea magnetică relativă pe mostre toroidale cu dimensiuni specifice conform [12] prin compararea cu permeabilitatea de referință, cunoscută, a unui tor cu aceleași dimensiuni din același material astfel că inductivitatea proprie L este elementul de comparație.

Relația de calcul pentru conversie este următoarea:

$$\mu_{BM} = \mu_{ref}(L_{BM}/L_{ref}) \quad (1)$$

În funcție de cantitatea de material magnetic din beton se pot obține permeabilități magnetice relative cuprinse între 20 și 60 în ambele cazuri. Rezultatele privind factorul de cuplaj magnetic sunt similare pentru ferite și materiale nanocristaline/amorfe, ultimele fiind mai scumpe, dar cantitățile folosite fiind mai mici. Datorită prețului ridicat al plăcilor de ferită, concentratorul de flux poate fi o placă compactă sau fâșii de material dispuse radial la bobinele planare circulare [13]. Influența relativ redusă a valorii lui μ_r al materialului magnetic asupra inductivității L este specifică unor cuploare inductive și este efectul reluctanței mari a fluxului magnetic în aer. O analiză a circuitului magnetic echivalent al cuplorului inductiv demonstrează acest rezultat. Rezultatele obținute anterior indică faptul că BM poate fi transformat într-un material cu largă utilizare practică în WPT.

3. SISTEMUL WPT MIMO

În continuare se analizează un sistem inductiv pentru o putere transferată de 125 kW corespunzătoare unei clase de puteri conform proiectului de standard SAE J2954-2 [14], suficientă pentru un autobuz electric de 8 m lungime pentru 50 pasageri. Deși există mai multe chestiuni de stabilit printre care tranziția de la frecvențe de lucru joase (21 – 38) kHz la frecvență unică de 85 kHz folosită în SAE J2954-1, acest proiect reprezintă un mare pas înainte pentru realizarea sistemelor de încărcare WPT rapide sau ultra rapide de uz general care să poată concura cu sistemele Plug-In [15].

Dacă la puteri transferate mici și medii se folosesc cuploare inductive de tip SISO (Single Input-Single Output) adică transmisie de la un transmițător (T_x) către un singur receptor (R_x), în cazul puterilor mari (peste 50 kW) trebuie utilizată o structură modulară alcătuită din mai multe module T_x și R_x identice, care formează un sistem MIMO. Întrucât componentele unui sistem MIMO sunt apropiate unele de altele, iau naștere cuplaje încrucișate (parazite) între cuploare care conduc la influențe reciproce, nedorite, atât între cuploare cât și între componentele acestora. Cauza principală este legată de faptul că în acest caz frecvențele și/sau fazele tensiunilor de ieșire ale invertoarelor de alimentare a sistemului au mici diferențe legate de variații ale parametrilor componentelor utilizate. Urmarea este modificarea impedanței de intrare și a frecvenței de rezonanță a sistemului, pierderi suplimentare, funcționarea în regim ZVS (comutare la trecerea prin zero a tensiunii pentru reducerea pierderilor) și un randament de transfer mai mic. Aceste dezavantaje pot fi evitate prin alimentarea cuploarelor componente cu frecvențe mult diferite așa cum se arată în [16].

În această lucrare se analizează un sistem 2x2 MIMO format din două invertoare independente, identice care alimentează separat bobinele T_{x1} și T_{x2} ale cuploarelor spre deosebire de sistemul descris în [17], unde cele două invertoare identice sunt conectate în paralel la ieșire. Schema completă a sistemului WPT este prezentată în Fig. 1 [3].

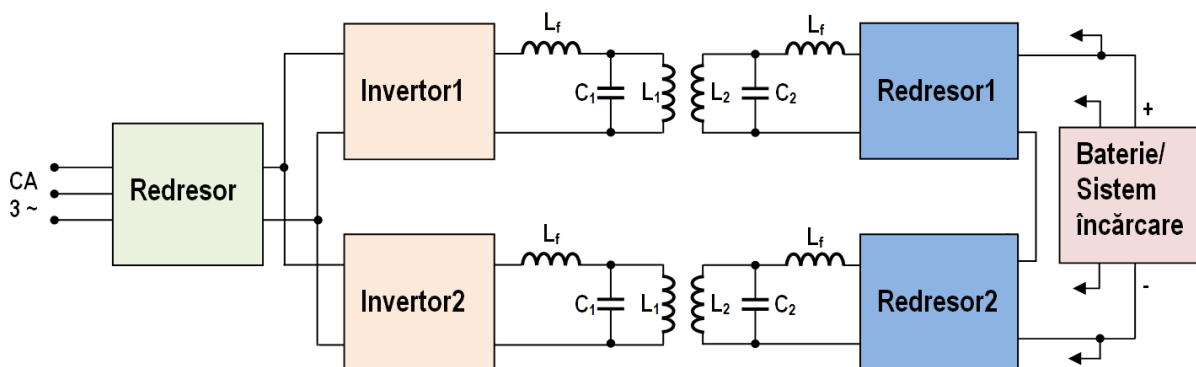


Fig. 1. Schema sistemului complet WPT 2x2 MIMO, 125 kW, 85 kHz [3].

Alimentarea se face dintr-o rețea trifazată de medie tensiune printr-un transformator 20/0.4 kV urmat de sistem de corecție a factorului de putere și de un redresor. Cele două invertoare de 62.5 kW în punte completă sunt comandate de câte un microcontroller (nereprezentat) pentru aceeași frecvență teoretică de 85 kHz. Se utilizează topologia LCL (bobină/condensator/bobină) atât în primar cât și în secundar. În secundar cele două redresoare sunt conectate în serie astfel că nu apar curenți de circulație ca la montarea acestora în paralel. Bateria de încărcat și sistemul său de management transmit informații despre curenți și tensiuni și despre starea de încărcare (SOC) la fiecare microcontroller primar prin WiFi (indicație prin săgeți în Fig. 1).

Sistemul 2x2 MIMO este un sistem hibrid în sensul că fiecare cuplor are câte o bobină T_x de tip Dublu-D (două bobine dreptunghiulare de forma literei D) integrată în pavaj, care folosește BM, iar energia se transmite inductiv la cele două secundare R_x , de tip Dublu-D, clasice pe ferită, așezate sub șasiul autobuzului, dispuse pe axa longitudinală a vehiculului (Fig. 2 și 3).

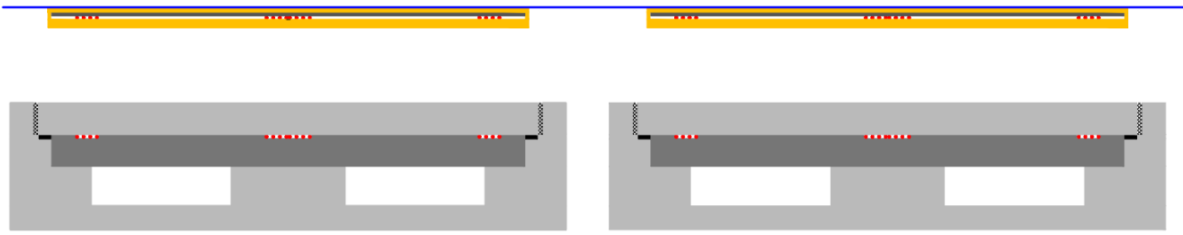


Fig. 2. Amplasarea schematică (la aceeași scară) a sistemului 2x2 MIMO. Se folosesc casete de beton convențional îngropate în pavaj, distanța între plăcile de BM fiind 160 mm pentru T_x ; montaj clasic pe plăci de ferită pentru R_x ; distanța între T_x și R_x este variabilă între 150 și 300 mm.

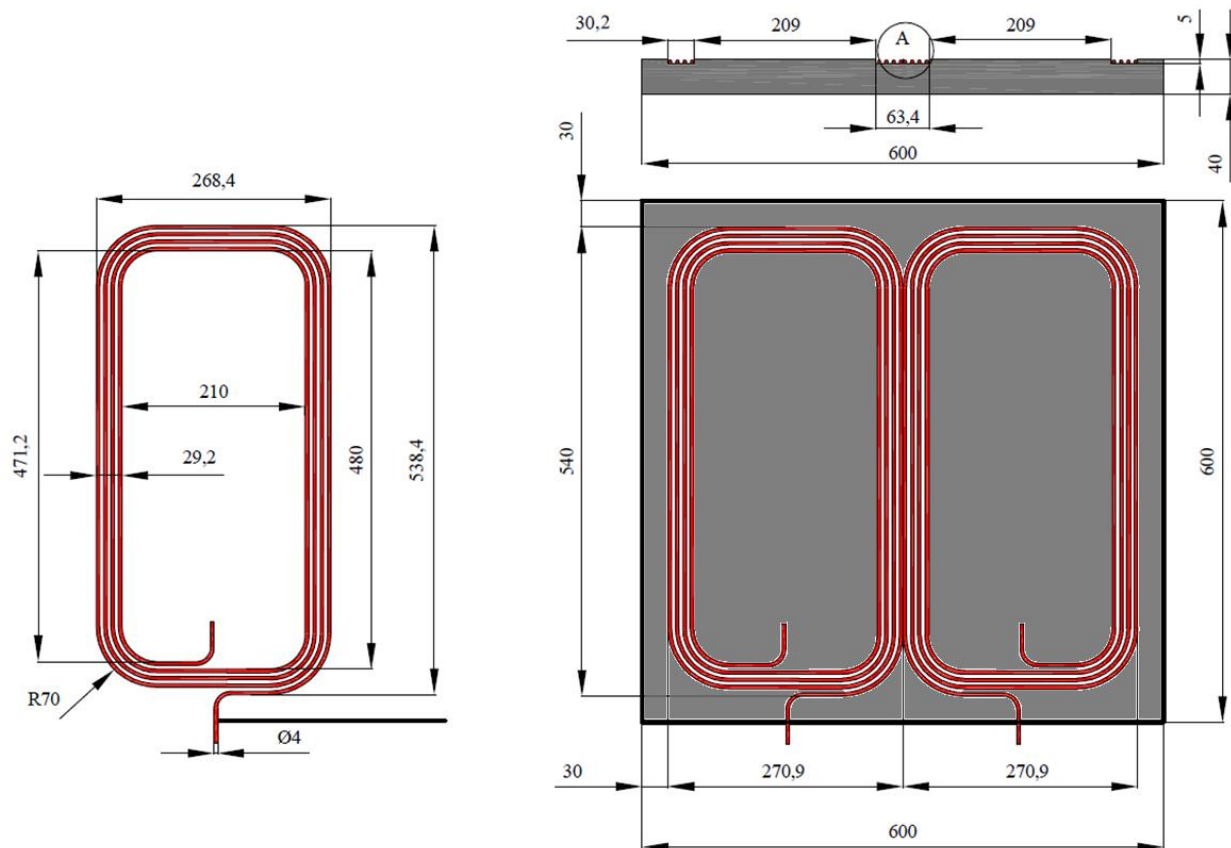


Fig. 3. Modulul T_x de tip Dublu-D amplasat pe beton magnetic.

Pentru exemplificare, în Fig. 4 este dată schema electrică echivalentă a sistemului pentru cazul topologiei Serie-Serie cu evidențierea diferitelor cuplaje magnetice.

În afară de cuplajele utile k_{11} și k_{22} , există patru cuplaje parazite dintre care k_{T12} și k_{R12} sunt cele mai importante. Toate aceste cuplaje urmează să fie determinate ulterior printr-o analiză de tip EF după stabilirea tipului de bobine și a distanțelor de amplasare fizică în pavaj a celor două module primare T_{x1} și T_{x2} .

Deoarece la autobuze garda la sol a caroseriei depășește 200 mm s-a ales pentru cuplorul T_x - R_x sistemul de bobine Dublu-D cu flux magnetic orizontal la care se obține cel mai mare factor de cuplaj k pentru aceleași dimensiuni și distanța de transfer z între T_x și R_x în comparație cu bobinele circulare [18-19].

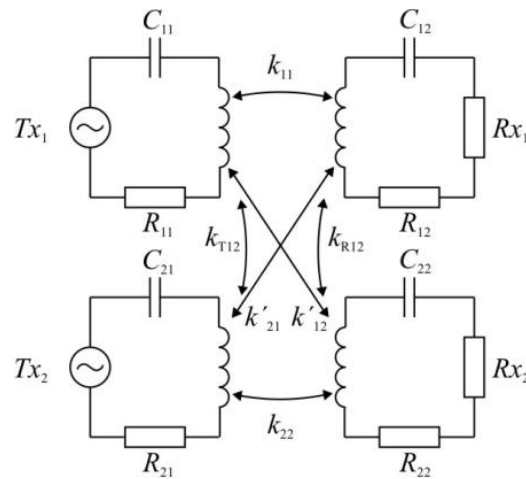


Fig. 4. Cuplaje utile și parazite la sistemul inductiv 2x2 MIMO.

4. MODELELE NUMERICE UTILIZATE ÎN STUDIULUI CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC AL SISTEMULUI INDUCTIV MIMO

Cuplorul inductiv analizat în lucrare este alcătuit din două perechi de module de tip Dublu-D (dimensiunile sunt indicate în Fig. 3), iar calculele au la bază MEF în aproximare 2D plan-paralelă, utilizând pachetul de programe de calcul de câmp Flux ® [20]. Pachetul de programe Flux este recunoscut pentru flexibilitatea și precizia ridicată de calcul în abordarea problemelor de câmp electromagnetic 2D și 3D. Efectele de capăt specifice structurii electromagnetice analizate în lucrare sunt neglijate prin aproximarea 2D considerată. Dimensiunile bobinelor T_x și R_x sunt identice, iar miezurile de ferită utilizate au grosimea de 5 mm.

Studiul numeric este realizat în regim cvasi-staționar anelectric (inductiv) armonic al câmpului electromagnetic, formularea utilizată fiind exprimată în potențial magnetic vector \mathbf{A} prin ecuația [20]:

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

unde \mathbf{J}_s reprezintă densitatea curenților sursă, σ este conductivitatea electrică a regiunilor conductoare, $\omega = 2\pi f$ este pulsația câmpului electric, $f = 85$ kHz este frecvența de lucru.

Domeniul de calcul 2D pentru un singur modul de tip Dublu-D, Fig. 5a, este delimitat de o regiune specială de tip Infinite Box dedicată modelării condițiilor pe frontieră la problemele cu frontieră deschisă, Fig. 5a. Rețeaua de discretizare asociată domeniului de calcul este indicată în Fig. 5b, iar în Fig. 5c este arătată rețeaua de discretizare pentru studiul a două module de tip Dublu-D (2x2 MIMO).

Modelele de circuit asociate modelelor de câmp sunt prezentate în Fig. 6, alimentarea circuitelor fiind efectuată de la surse de curent.

Studiul efectuat reprezintă o etapă preliminară de analiză a cuplurului inductiv al sistemului de încărcare wireless cu putere transferată de 125 kW, furnizarea altor detalii tehnice ale sistemului fiind prematură.

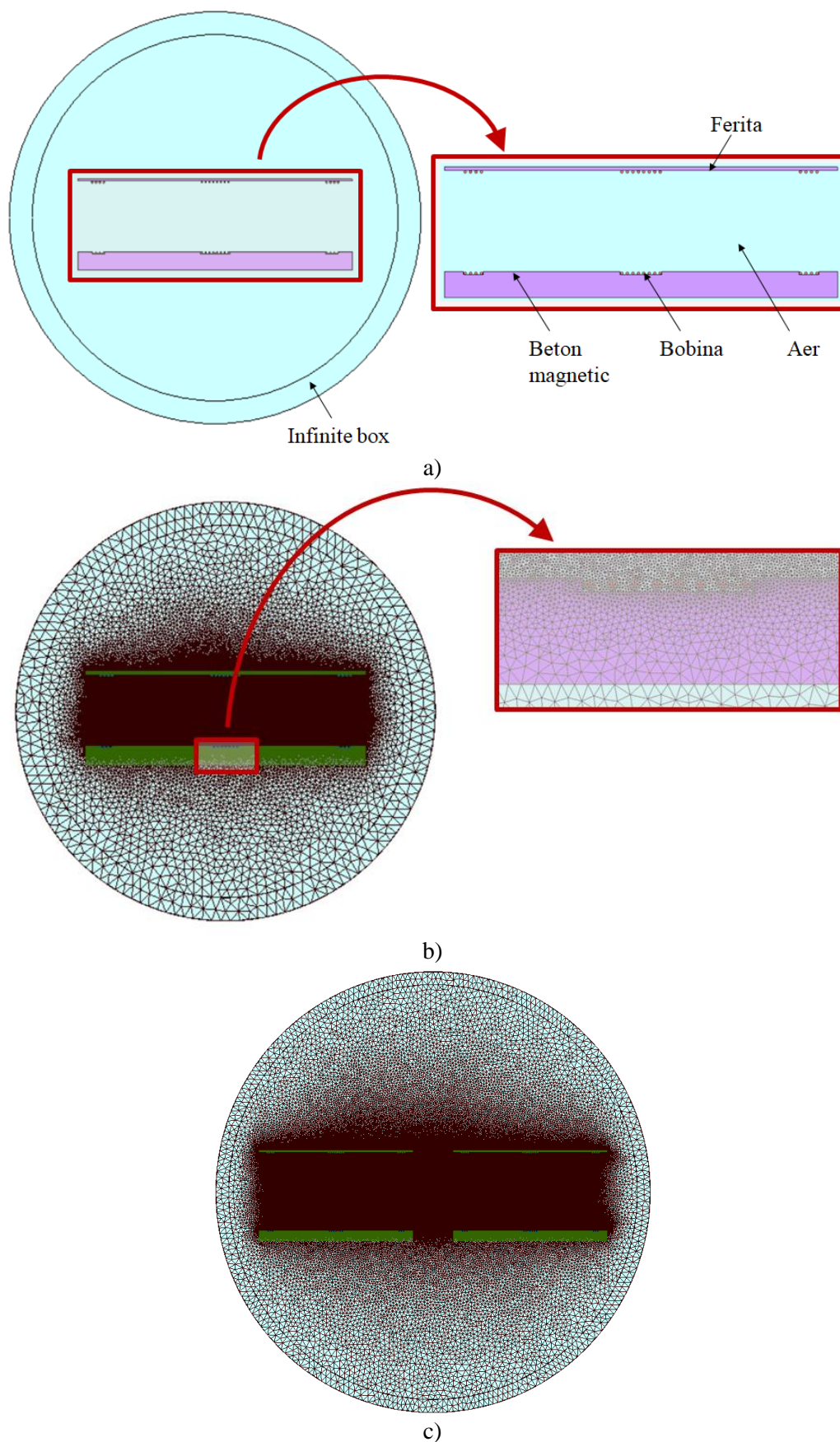


Fig. 2. Domeniul de calcul 2D al câmpului electromagnetic și rețeaua de discretizare asociată; a) domeniul de calcul; b) rețeaua de discretizare; c) rețeaua de discretizare pentru 2x2 MIMO.

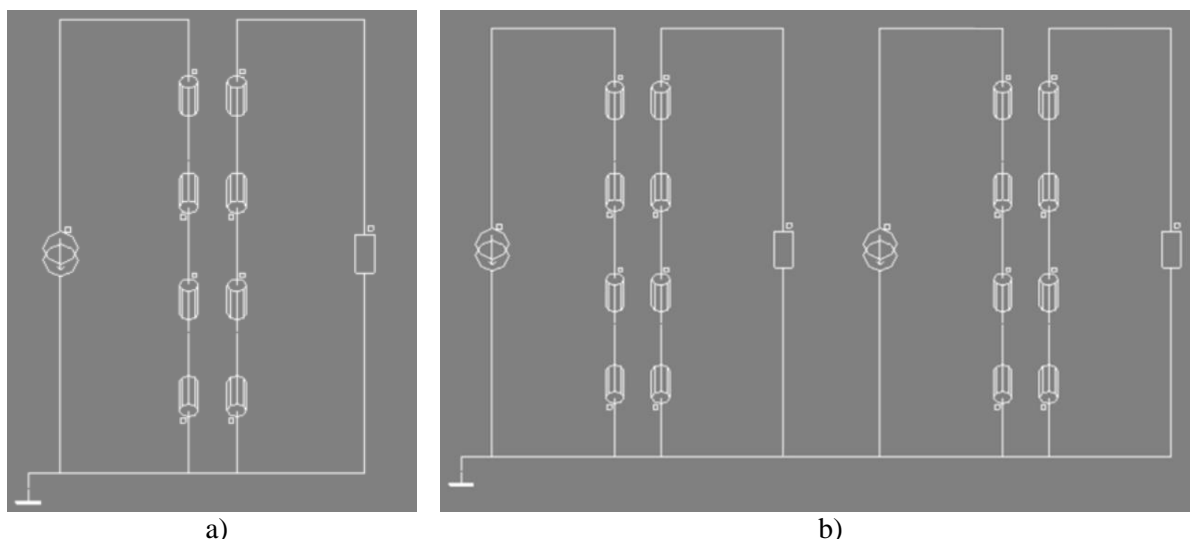


Fig. 6. Modele de circuit asociate modelelor de câmp; a) 1x2 MIMO; b) 2x2 MIMO.

5. REZULTATE NUMERICE

În urma rezolvării problemei de câmp electromagnetic 2D pentru diferite distanțe dintre T_x și R_x , în configurațiile 1x2 MIMO ȘI 2x2 MIMO, s-au obținut rezultatele numerice prezentate în Fig. 7 - 12.

În Fig. 7 sunt prezentate liniile de câmp și harta inducției magnetice pentru 1x2 MIMO, când se alimentează doar bobinele T_x , iar în Fig. 8 sunt prezentate liniile de câmp pentru 2x2 MIMO.

În Fig. 9 - 12 sunt prezentate variațiile diferiților factori de cuplaj funcție de distanța dintre bobinele T_x și R_x .

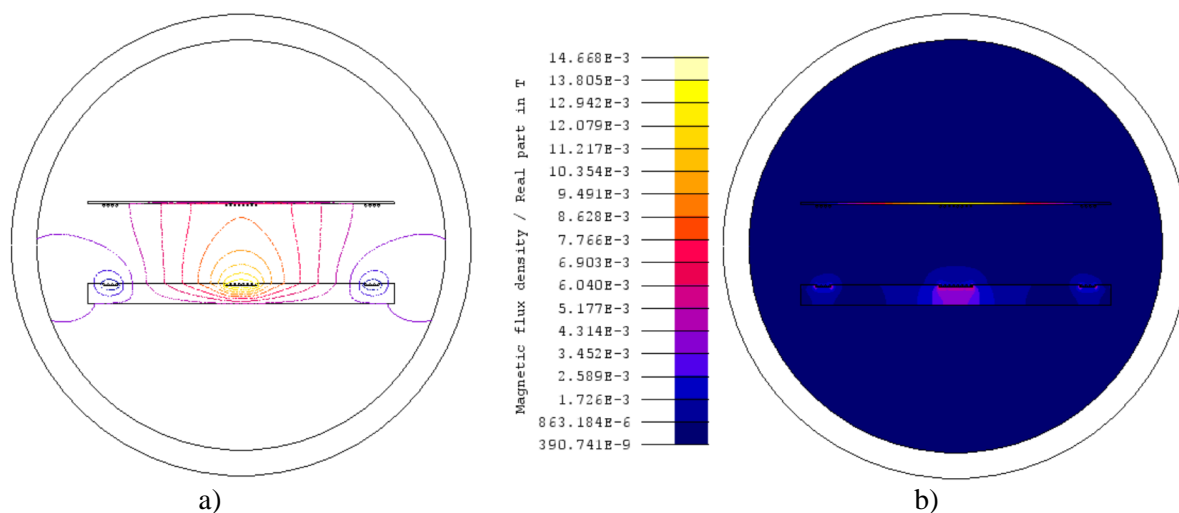


Fig. 7. Liniile de câmp magnetic și harta inducției magnetice obținute în urma rezolvării problemei de câmp electromagnetic asociată 1x2 MIMO, atunci când se alimentează bobina T_x .

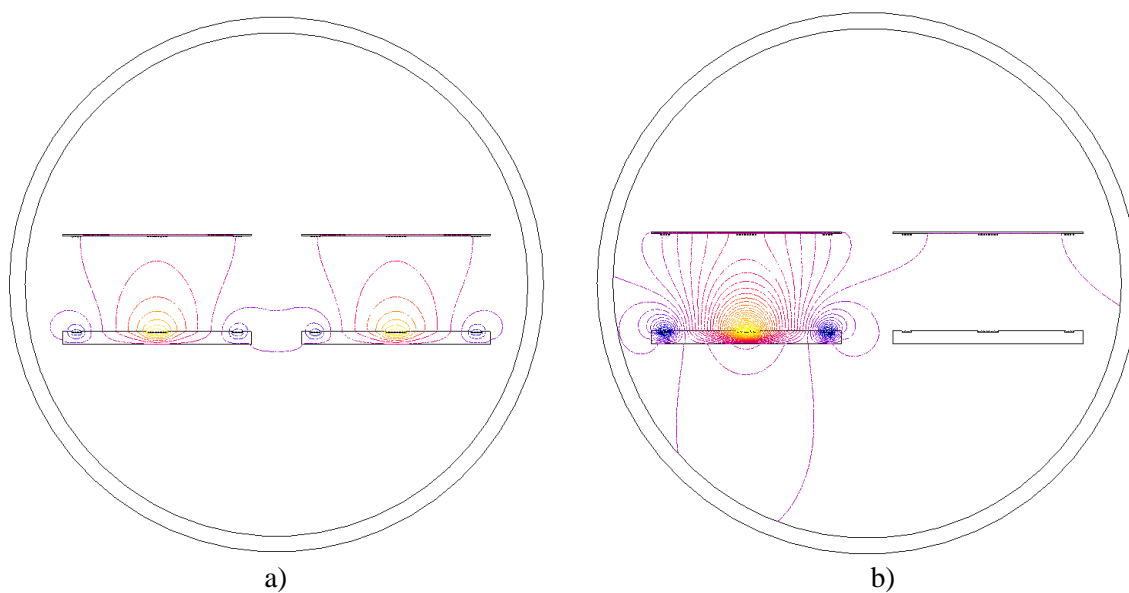


Fig. 8. Liniile de câmp magnetic asociată 2x2 MIMO; a) se alimentează ambele bobine T_x ; b) se alimentează o singură bobină T_x .

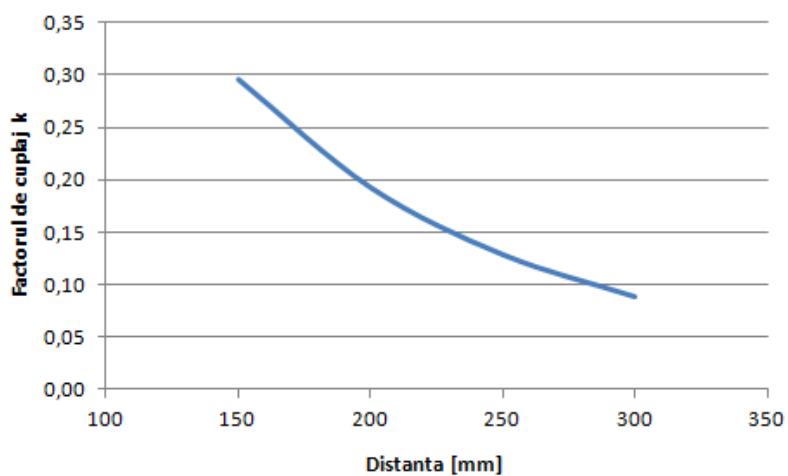


Fig. 9. Factorul de cuplaj magnetic util k_{11} și k_{22} funcție de distanța dintre T_x și R_x .

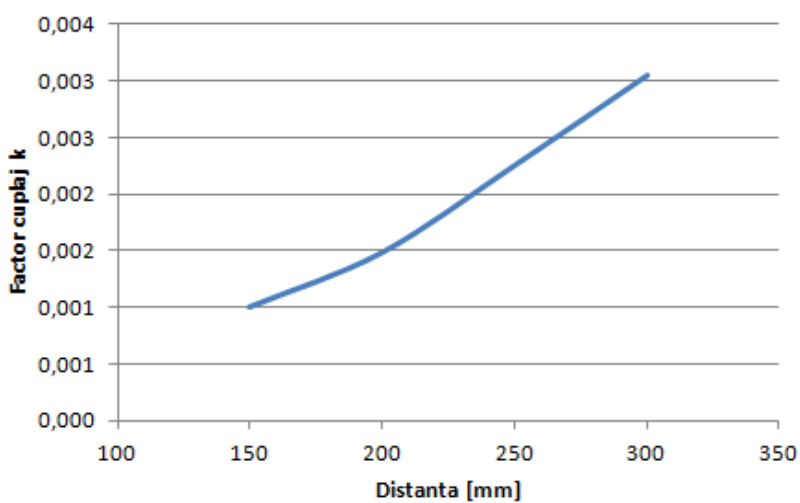


Fig. 10. Factorul de cuplaj magnetic parazit k_{T12} între bobinele T_{x1} și T_{x2} funcție de distanță.

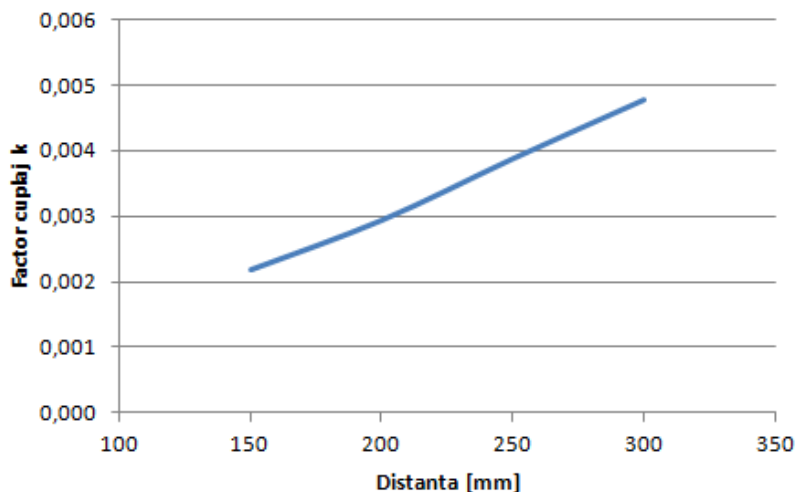


Fig. 11. Factorul de cuplaj magnetic parazit k_{R12} între bobinele R_{x1} și R_{x2} pe ferită funcție de distanță.

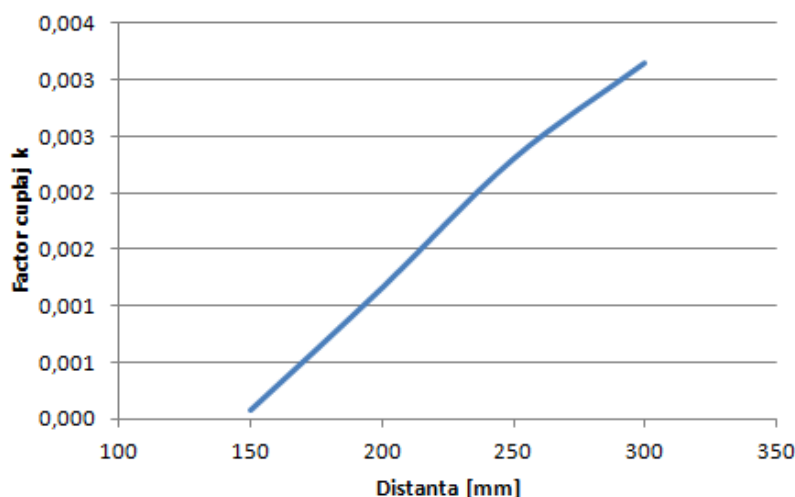


Fig. 12. Factorul de cuplaj magnetic parazit k'_{12} și k'_{21} între bobinele R_{x1} și T_{x2} funcție de distanță.

Rezultatele numerice din Fig. 9 indică faptul că factorul de cuplaj util este unul ridicat și scade cu distanța dintre bobinele T_x și R_x .

Din analiza rezultatelor din Fig. 10 - 12 se observă că factorii cuplajelor magnetice parazite sunt foarte reduse, de peste 30 de ori mai mici decât factorul de cuplaj util, ceea ce arată că pentru configurația propusă nu vor exista influențe negative în funcționare.

6. CONCLUZII

Lucrarea se referă la un sistem 2x2 MIMO cu bobine planare Dublu-D echipat cu concentratoare de flux magnetic din BM pentru T_x și ferite standard pentru R_x .

Metoda MIMO pentru WPT de mare putere are avantajul că permite folosirea unor sisteme identice, unice, optimizate și evaluate experimental, cu puteri rezonabile în care se folosesc componente standard cu costuri reduse.

Betonul magnetic permite înlocuirea feritelor casante și integrarea eficientă a bobinelor de tip T_x în pavaj.

Analiza numerică de tip EF a permis determinarea unor mărimi specifice precum: distribuția liniilor câmpului magnetic în domeniul de calcul, harta inducției magnetice în regiunea cuplorului inductiv, dar și factorii de cuplaj magnetic utili și paraziți care determină aplicabilitatea sistemului MIMO.

Pentru distanțele folosite între module, cuplajele parazite sunt foarte mici, sub 3 % față de cuplajele utile, nefiind necesare măsuri suplimentare de ecranare a modulelor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] N. Golovanov, A. Marinescu, *Electromobility and Climate Change*, Proceeding of MPS (Modern Power Systems), 2019 Cluj Napoca, DOI: 10.1109/MPS.2019.8759786.
- [2] N. Golovanov, A. Marinescu, S. Coatu, *Power Supply of Fast Charging Stations for Electric Vehicles (Alimentarea cu Energie Electrică a Stațiilor de Încărcare Rapidă a Vehiculelor Electrice)*, 8 pag, A XVI Conferinta Anuala “Zilele ASTR 2021”.
- [3] E. Tudor, A. Marinescu, R. Prejbeanu, A. Vintila, T. Tudorache, D. G. Marinescu, D. O. Neagu, I. Vasile, I. C. Sburlan, *Electric Bus Platform for Urban Mobility*, Paper 028, COFRET Conference, 14 – 15 October 2021, Bucharest.
- [4] G. A. Covic and J. T. Boys, *Inductive power transfer*, Proc. of the IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, June 2013.
- [5] H. H. Bache and K. L. Eriksen, *Magnetic cement-bound bodies*, Patent, Sep. 28, 1994, EP0557368B1.
- [6] Hogan AB, *Inductit C-80 Powder cores ideal for inductor applications*, November 2013.
- [7] M. Esguerra and R. Lucke, *Application and production of a magnetic product*, Patent, Feb. 24, 2004, US6696638B2.
- [8] M. Tiemann, M. Clemens, B. Schmuelling, *Comparison of Conventional and Magnetizable Concrete Core Designs in Wireless Power Transfer for Electric Vehicles*, IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), November 15 - 19, 2020, Seoul, Korea.
- [9] R. Tavakoli et al., *Magnetizable concrete composite materials for load-embedded wireless power transfer pads*, 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 4041-4048.
- [10] C. Carretero, I. Lope and J. Acero, *Magnetizable Concrete Flux Concentrators for Wireless Inductive Power Transfer Applications*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 3, pp. 2696-2706, Sept. 2020.
- [11] A. Marinescu, T. Tudorache, I. Dumbrava, A. Vintila, *A Comparative Assessment of Magnetic Concrete versus Ferrite for a High Power Inductive Coupler*, MPS Conference, Cluj-Napoca2021, June 2021
- [12] IEC Std 60404-6 "Magnetic materials – Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 200 kHz by the use of ring specimens", Edition 3.0: 05-2018.
- [13] A. Marinescu, I. Dumbravă, *Using VNA for IPT Coupling Factor Measurement*, 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, 25-28 Sept.2016.
- [14] SAE J2954-2, *Wireless Power Transfer & Alignment for Heavy Duty Applications, Task Force Project*, 2020.
- [15] M. Masquelier, *SAE J2954-2 paper 07, Bus and Truck Working Council*, EPRI, 2020
- [16] Z. Pantic, K. Lee, and S. Lukic, *Multifrequency Inductive Power Transfer*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 11, pp. 5995 - 6005, 2014.
- [17] R. Prejbeanu, A. Marinescu, D. O. Neagu and A. Radu, *Optimizing parallel connection of Medium Frequency inverters for EV Wireless Charging*, EV 2019 (Electric Vehicles International Conference & Show), Bucharest, 3-4 october 2019
- [18] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C.-Y. Huang, *Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems*, IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 60, no. 1, pp. 318–328, 2013
- [19] K. Knaisch, M. Springmann, and P. Gratzfeld, *Comparison of coil topologies for inductive power transfer under the influence of ferrite and aluminum*, in 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), IEEE, april 2016.
- [20] ***Cedrat: “User guide Flux® 11”, 2015.