

ANALIZA UNOR PARAMETRI GEOMETRICI AI CUPLORULUI INDUCTIV DESTINAT SISTEMELOR WIRELESS DE MARE PUTERE

Tiberiu TUDORACHE¹, Andrei MARINESCU², Adrian VINTILĂ³

¹Universitatea POLITEHNICA din București

²ASTR România

³ICMET

tiberiu.tudorache@upb.ro¹, ancor2005@gmail.com², adrian_vintila@icmet.ro³

Rezumat. Una dintre componentele esențiale ale unui sistem de transfer de mare putere wireless pentru vehicule electrice grele este cuplorul inductiv. Eficiența sistemului de transfer de putere wireless depinde puternic de parametrii geometrici ai cuplurului inductiv, care la rândul lor au un efect important asupra parametrilor electromagnetici ai întregului sistem. Bobinele transmițătoare (Tx) și receptoare (Rx) ale cuplurului inductiv propus în această lucrare au o structură planară Double-D și sunt situate pe miezuri magnetice realizate din beton magnetic (Tx), respectiv din ferită (Rx). Studiul parametrilor cuplurului inductiv a fost realizat cu ajutorul metodei elementului finit, utilizând pachetul de programe de calcul de câmp Flux®.

1. INTRODUCERE

Tranziția de la sistemele clasice de transport urban și extraurban bazate pe motoare cu ardere internă către sisteme de transport modern bazate pe motorizări electrice, mai puțin poluante, este un proces ambițios, aflat în plină desfășurare și împărțit de toate țările dezvoltate. Conform ultimelor decizii luate la nivelul Uniunii Europene, începând cu anul 2035, vânzarea intracomunitară de vehicule ușoare și medii (automobile și autodube) cu motorizare termică ar trebui să înceteze [1]. În acest context, eforturi tot mai importante se depun de către marii actori ai acestei piețe pentru implementarea de tehnologii avansate asociate Vehiculelor Electrice (VE) ale viitorului. O importanță deosebită se acordă în acest sens dezvoltării de sisteme de încărcare eficiente a bateriilor vehiculelor electrice fie bazate pe transfer electric prin conducție (Plug-In), fie pe transfer fără contact (Wireless).

Sistemele de încărcare fără contact sunt simple și eficiente și permit încărcarea automată în timpul funcționării normale a VE indiferent de condițiile atmosferice. Astfel se dezvoltă încărcarea autobuzelor în stațiile de autobuz urbane sau în aeroporturi, a taxiurilor în stațiile de taxi, a vehiculelor comerciale în zona de încărcare și a feriboturilor în porturi. În marile orașe (Istanbul, Rio de Janeiro, Mexico City etc) unde sunt create benzi de circulație speciale pentru autobuzele urbane (Bus Rapid Transport-BRT), pe lângă o mobilitate urbană rapidă se poate asigura cu ușurință încărcarea wireless a bateriilor.

Implementarea soluției de transfer de putere wireless (Wireless Power Transfer - WPT) la vehicule grele, atât autobuze cât și camioane, necesită puteri de încărcare și distanțe de transfer mult mai mari decât la VE ușoare. Acestea sunt în curs de standardizare în noul proiect de standard SAE J2954/2 [2] care va apare sub forma de “Recommended Practice” la începutul anului viitor.

În acest context, lucrarea de față analizează influența parametrilor geometrici ai cuplurului inductiv aplicabil la autobuze asupra cuplajului magnetic pentru distanțe de transfer (≤ 400 mm) între bobinele transmițătoare Tx și receptoare Rx ale unui cuplor inductiv de mare putere (>100 kW). Prin progresele făcute în electronica de putere și în domeniul materialelor folosite în construcția cuploarelor, se poate elimina sistemul retractabil (electromecanic) de micșorare a distanței de transfer în timpul încărcării.

2. CUPLORUL INDUCTIV DE TIP D-D

Configurația geometrică de referință analizată este descrisă în detaliu în Fig.1. Ea este alcătuită din sistemul de bobine D-D [3] transmițătoare (Tx) montate în nișe practicate într-un material magnetic realizat dintr-un beton special cu proprietăți magnetice descris în [4, 5]. Sistemul de bobine D-D receptoare Rx identice cu cele transmițătoare Tx (dimensiuni și număr de spire), este amplasat pe un miez de ferită clasic la partea inferioară a VE. Varianta de cuplor Tx-Rx cu dimensiuni egale permite realizarea unui cuplaj maxim la VE urbane care au condiții de încărcare identice.

Eficiența energetică a sistemelor inductive de transfer de putere wireless depinde în mare măsură de parametrii electromagnetici ai cuplorului inductiv, care la rândul lor depind de configurația geometrică a bobinelor Tx și Rx și de distanța de transfer (D_z), dar și de alte elemente precum proprietățile de material ale materialelor magnetice folosite pentru concentrarea câmpului magnetic, de conductoarele folosite (Litz wire) etc.

Analiza parametrilor electromagnetici ai cuplorului inductiv (inductivitățile proprii, inductivitățile mutuale ale bobinelor, factorul de cuplaj etc.) este efectuată în lucrarea de față prin modelare numerică 2D bazată pe Metoda Elementului Finit, cu ajutorul pachetului de programe de calcul de câmp Flux ®.

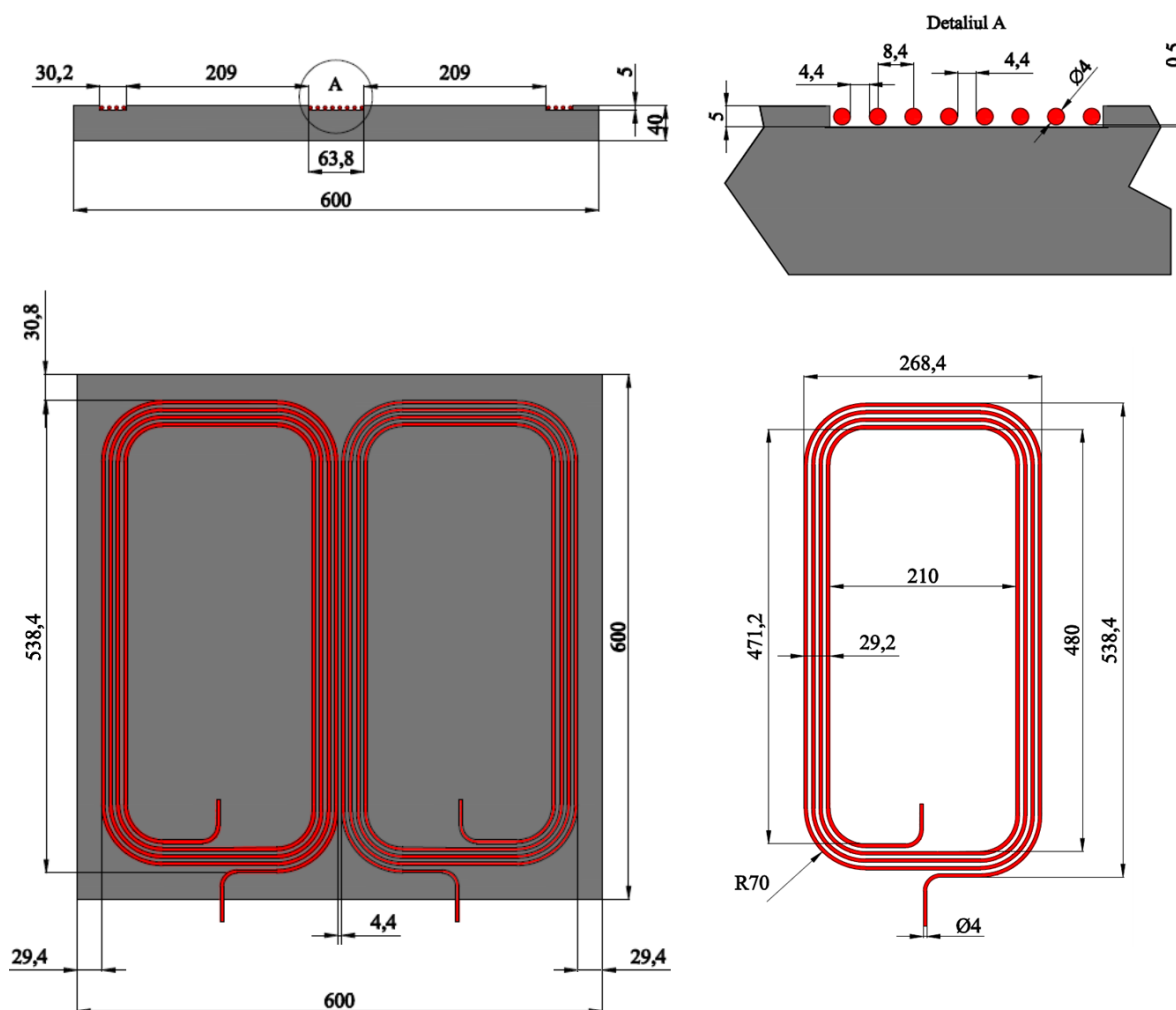


Fig. 1. – Structura geometrică de referință a cuplorului inductiv de tip Dublu-D analizat (geometria de referință).

3. MODELUL NUMERIC DE CALCUL AL CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC

Analiza numerică a cuplorului inductiv din punct de vedere electromagnetic se efectuează utilizând metoda elementului finit în aproximare 2D plan-paralelă, cu ajutorul pachetului de programe de calcul de câmp Flux ® [6], domeniul de calcul luat în considerare fiind cel prezentat în Fig. 2.

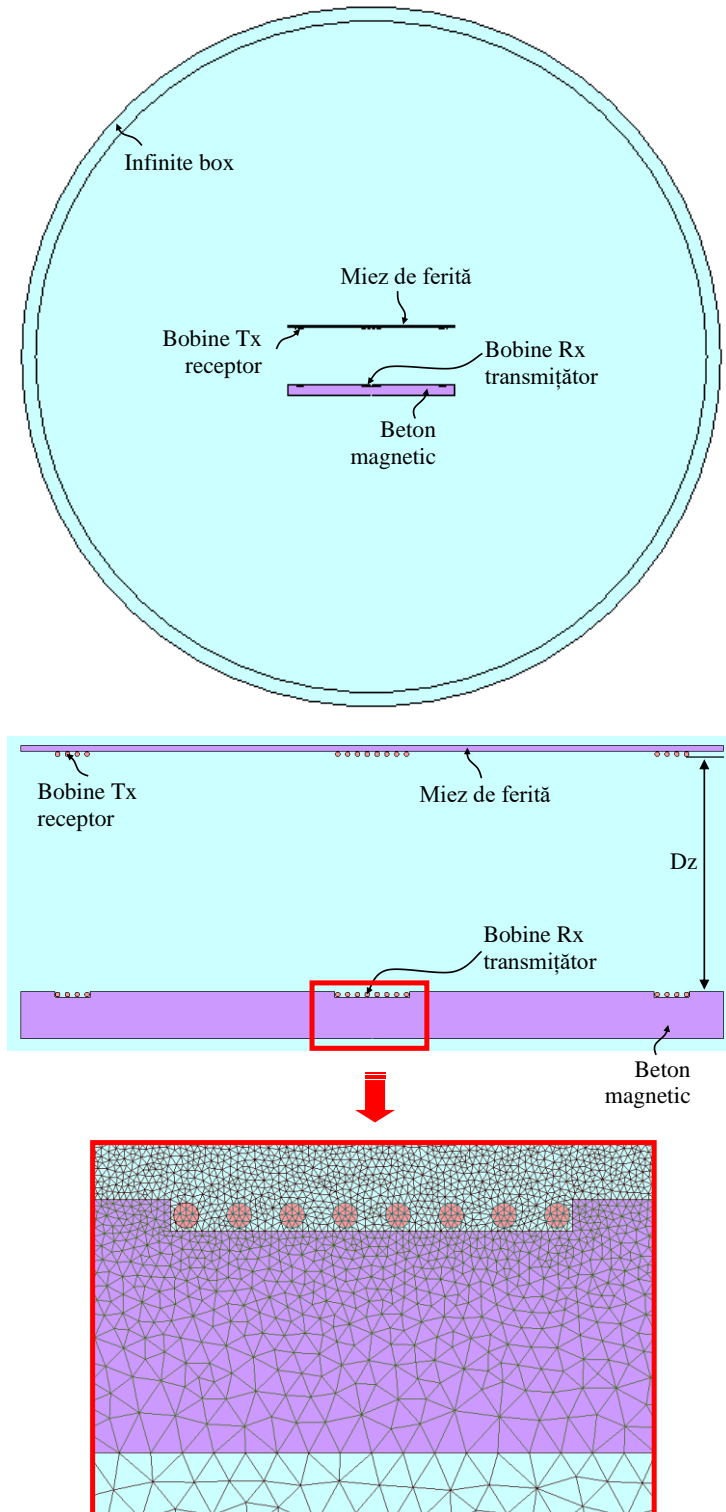


Fig.2. – Domeniul de calcul al câmpului electromagnetic și rețeaua de discretizare.

Pentru delimitarea domeniului de calcul se utilizează o regiune de tip *Infinite Box* specifică rezolvării problemelor de câmp electromagnetic cu frontieră deschisă [6]. Rețeaua de discretizare asociată domeniului de calcul este indicată, de asemenea, în Fig. 2, acesta fiind rafinată pentru creșterea preciziei de calcul. În aceeași figură se evidențiază și parametrul geometric Dz ce reprezintă distanța pe verticală dintre bobinele Tx și Rx.

Regimul câmpului electromagnetic asociat funcționării cuplorului inductiv studiat este cel cvasi-staționar magnetic armonic permanent (anelectric). Formularea utilizată în acest scop este cea exprimată în potențial magnetic vector \underline{A} , fără regiuni de tip conductor masiv (fără curenți turbionari) [6], guvernată de următoarea ecuație diferențială:

$$\text{rot} [(1/\mu) \cdot \text{rot} \underline{A}] = \underline{J}_s$$

unde \underline{J}_s reprezintă densitatea curenților sursă (în cazul de față se impune valoarea efectivă a curentului sursă pe spirală $I = 10$ A), $\omega = 2\pi f$ este pulsația câmpului electric, $f = 85$ kHz este frecvența de lucru.

Blocul de beton magnetic pe care sunt montate bobinele Tx are permeabilitatea magnetică $\mu_r = 26,6$ (determinată experimental), iar feritele folosite sunt caracterizate de $\mu_r = 2000$ și inducția magnetică al saturație $B_s = 0,5$ T.

Modelul de circuit asociat modelului de câmp este cel prezentat în Fig. 3, unde sunt evidențiate componentele: R_s – rezistența de sarcină, I – sursa de curent, respectiv laturile bobinelor Tx și Rx.

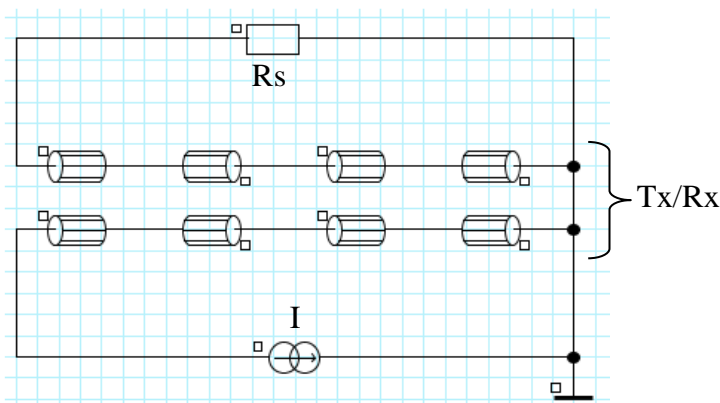


Fig. 3 – Modelul de circuit asociat modelului de câmp electromagnetic.

4. REZULTATE NUMERICE

Analiza numerică a avut ca obiectiv principal determinarea influenței unor parametri geometrici asupra mărimilor caracteristice cuplorului inductiv, precum inductivități proprii și mutuale, factorul de cuplaj magnetic etc. Parametrii avuți în vedere în acest studiu au fost: distanța în plan vertical Dz dintre bobinele Tx și Rx (Fig. 2), lățimea bobinelor Lb (Fig. 4) și distanța dintre spire în zona centrală Dsp (Fig. 10).

4.1. Influența lățimii bobinelor T_x și R_x (L_b) și a distanței dintre ele în plan vertical (D_z)

În urma rezolvării problemei de câmp electromagnetic 2D pentru diferite lățimi (L_b) ale bobinelor Tx și Rx (Fig. 4), respectiv pentru diferite distanțe Dz dintre bobine în plan vertical s-au obținut rezultatele numerice prezentate în Fig. 5 - 9.

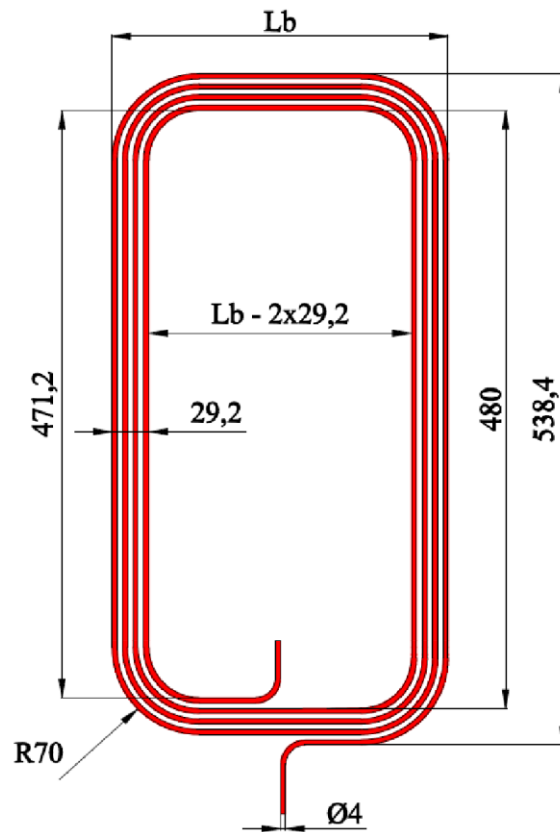
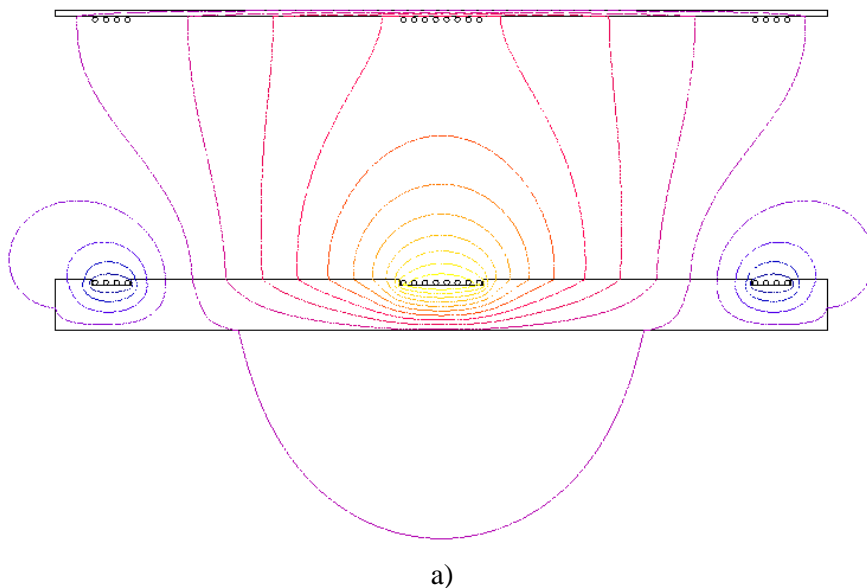


Fig. 4. – Detaliu geometric privind lăţimea bobinelor T_x şi R_x (parametru L_b), cu menţinerea constantă a lungimii.

În cadrul simulărilor numerice lăţimile L_b ale bobinelor T_x şi R_x se modifică simultan, iar odată cu acestea se modifică proporţional şi dimensiunile plăcii de ferită, respectiv a blocului de beton magnetic.

În Fig. – 5 sunt prezentate liniile de câmp şi harta inducţiei magnetice pentru geometria de referinţă din Fig. 1, respectiv pentru distanţa $D_z = 200$ mm.



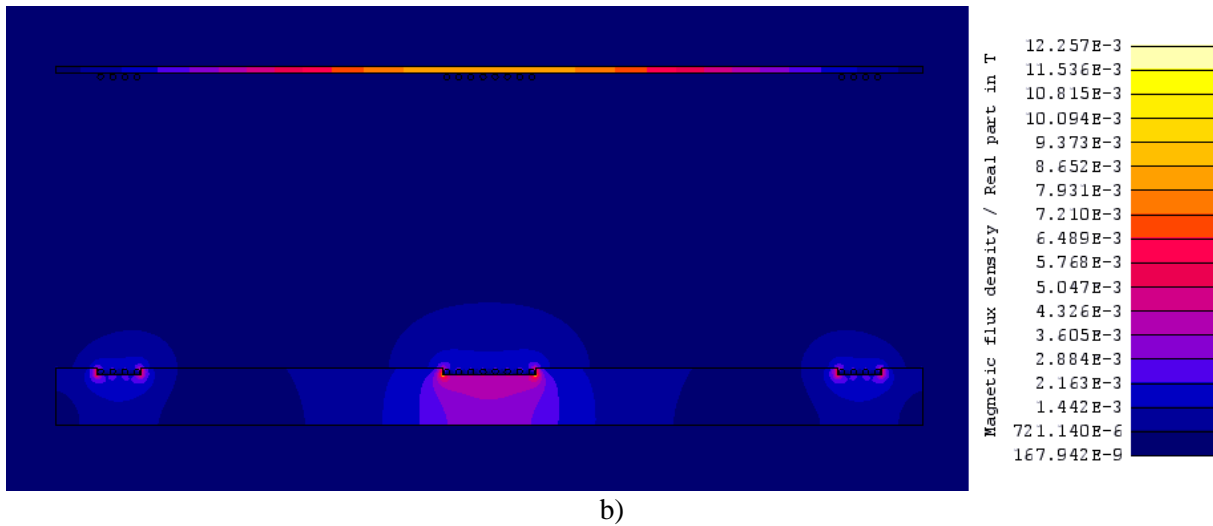


Fig. 5 – Liniile de câmp magnetic (a) și harta inducției magnetice (b) în zona cuplurului inductiv obținute în urma rezolvării problemei de câmp electromagnetic pentru geometria de referință.

În Fig. 6 – 8 sunt prezentate variațiile funcție de parametrii L_b și D_z ale inductivităților proprii ale bobinelor L_{Tx} și L_{Rx} , a inductivității mutuale M a grupului de câte 2 bobine Tx și Rx , respectiv a factorul de cuplaj magnetic k .

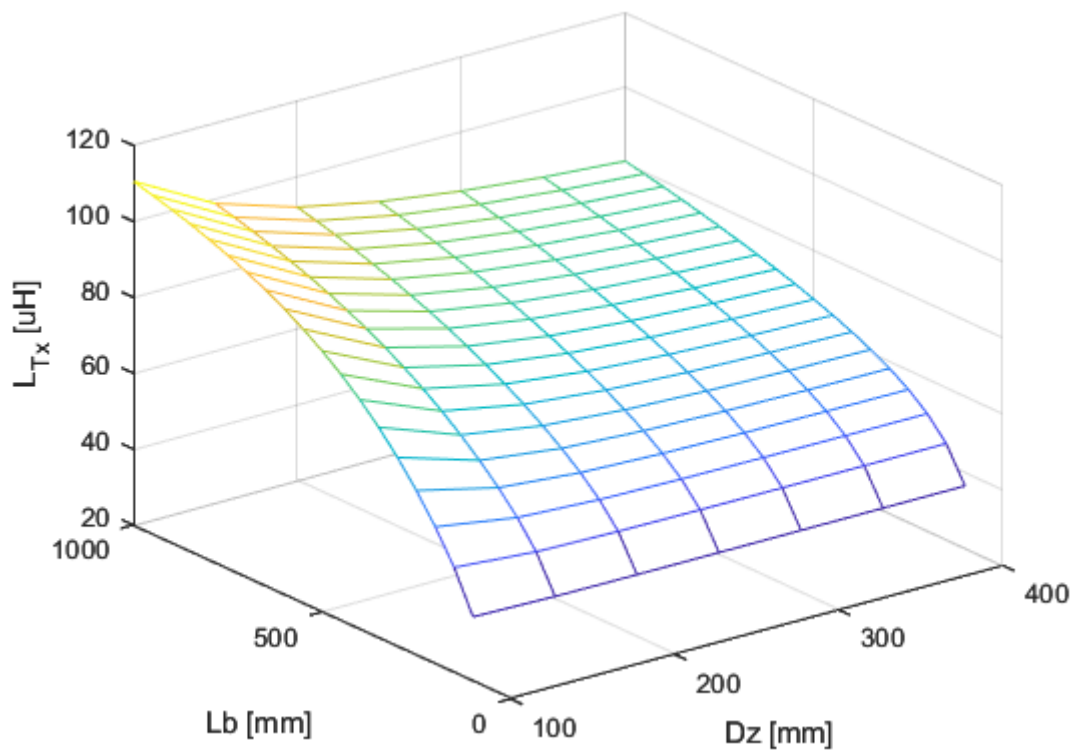


Fig. 6 – Variația inductivității L_{Tx} funcție de parametrii L_b și D_z .

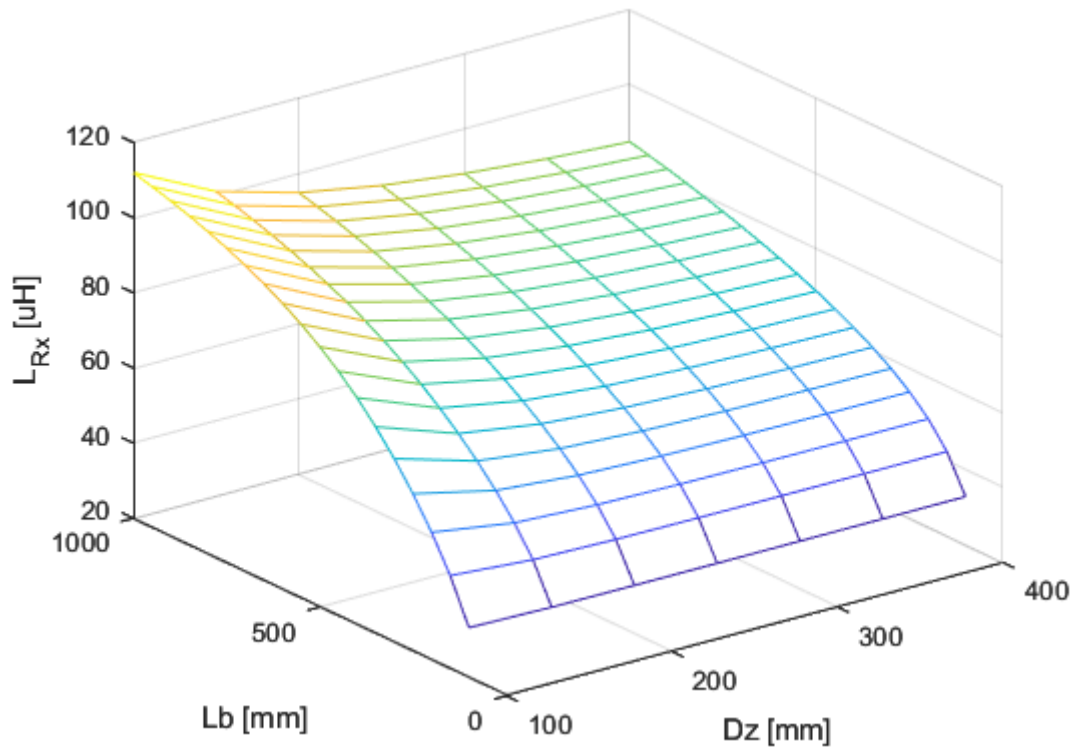


Fig. 7 – Variația inductivității L_{Rx} funcție de parametrii L_b și D_z .

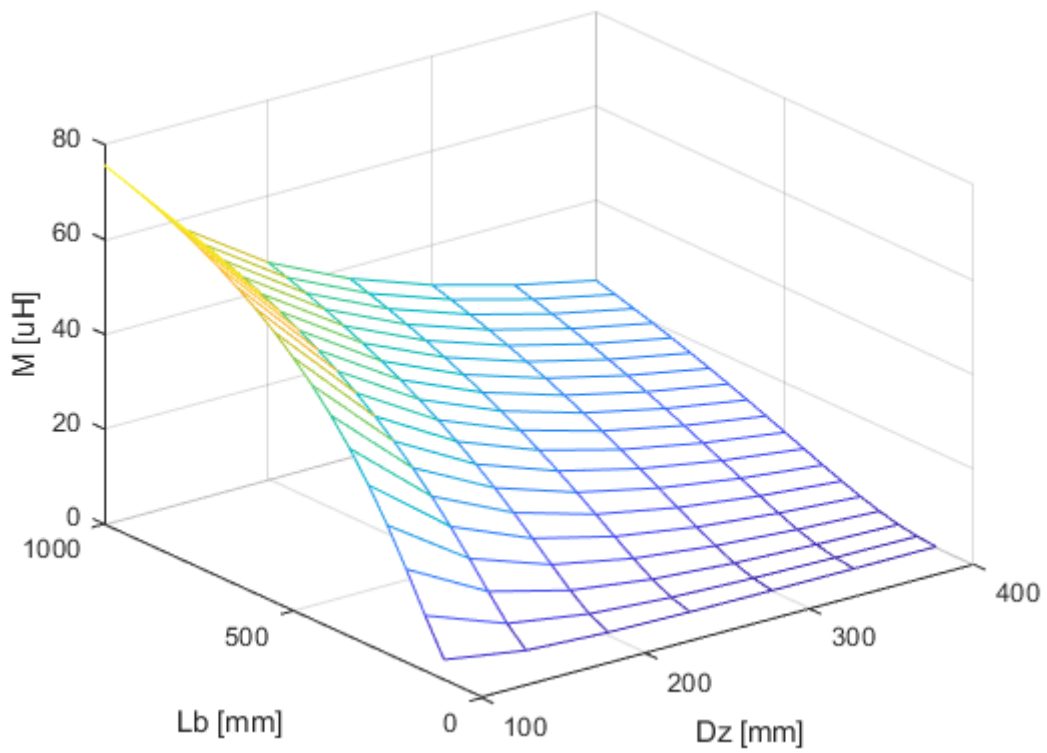


Fig. 8 – Variația inductivității mutuale M funcție de parametrii L_b și D_z .

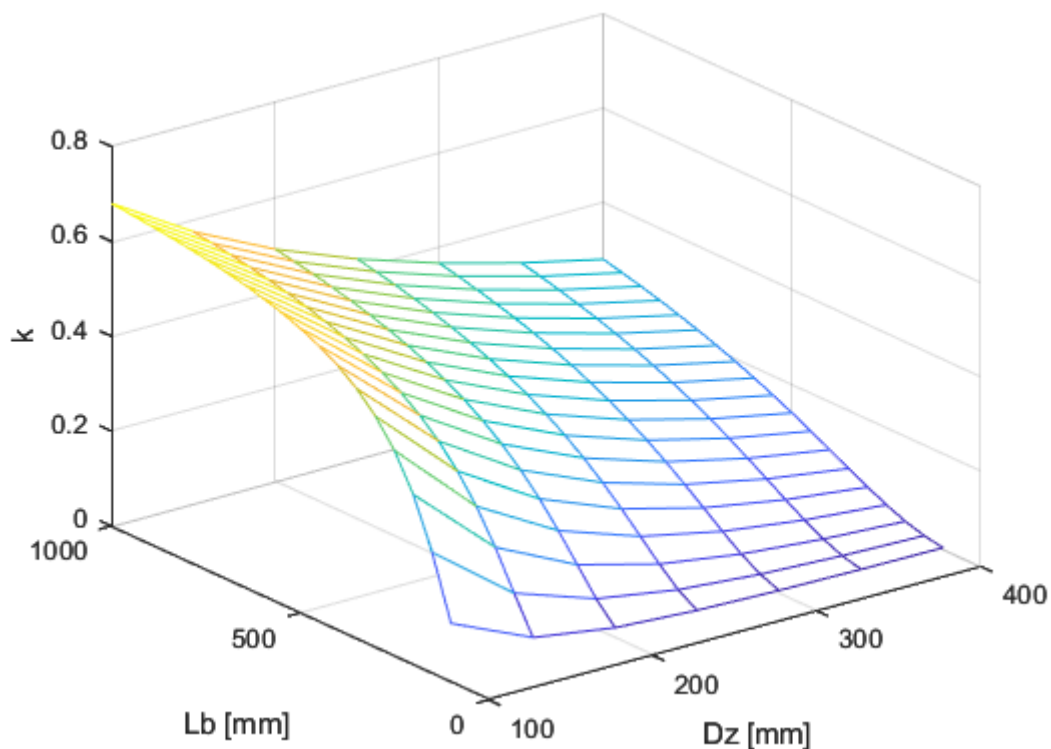


Fig. 9 – Factorul de cuplaj magnetic k funcție de parametrii L_b și D_z .

Rezultatele numerice din Fig. 6 – 9 indică faptul că lățimea bobinelor L_b influențează foarte mult mărimile caracteristice cuplorului inductiv: inductivitățile proprii, mutuale și cuplajul magnetic dintre bobine. Toate aceste mărimi cresc semnificativ cu parametrul L_b , deci cu suprafața bobinelor. Totuși această creștere nu are un caracter liniar ci tinde să se satureze treptat la lățimi $L_b > 500$ mm. Parametrul D_z între limitele considerate în acest studiu ($D_z = 100 \div 400$ mm), are de asemenea o influență semnificativă asupra mărimilor caracteristice ale cuplorului inductiv, dar inferioară parametrului L_b .

4.2. Influența distanței între spirele bobinelor T_x și R_x în zona centrală (D_{sp}) și a distanței dintre ele în plan vertical (D_z)

Simulări numerice succesive s-au efectuat pentru diferite distanțe (D_{sp}) între spirele bobinelor T_x și R_x în zona centrală (Fig. 10), respectiv pentru diferite distanțe între bobine în plan vertical (D_z), iar rezultatele numerice sunt prezentate în Fig. 11 - 14.

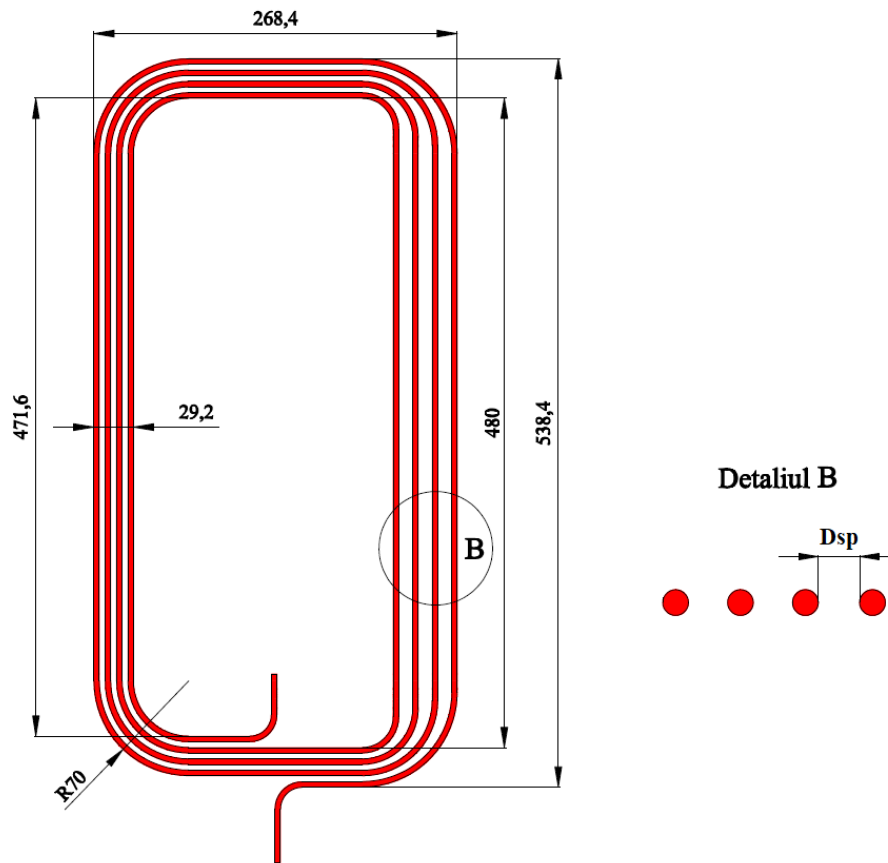


Fig. 10. – Detaliu geometric privind distanța dintre spire (parametru Dsp).

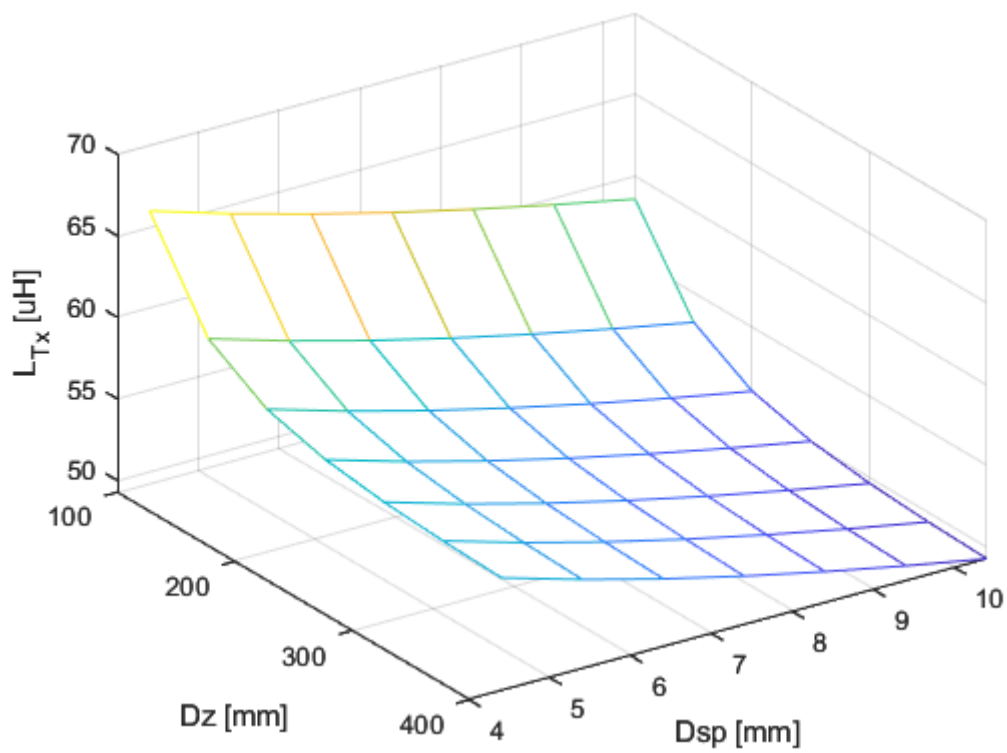


Fig. 11 – Variația inductivității L_{Tx} funcție de parametrii Dsp și Dz.

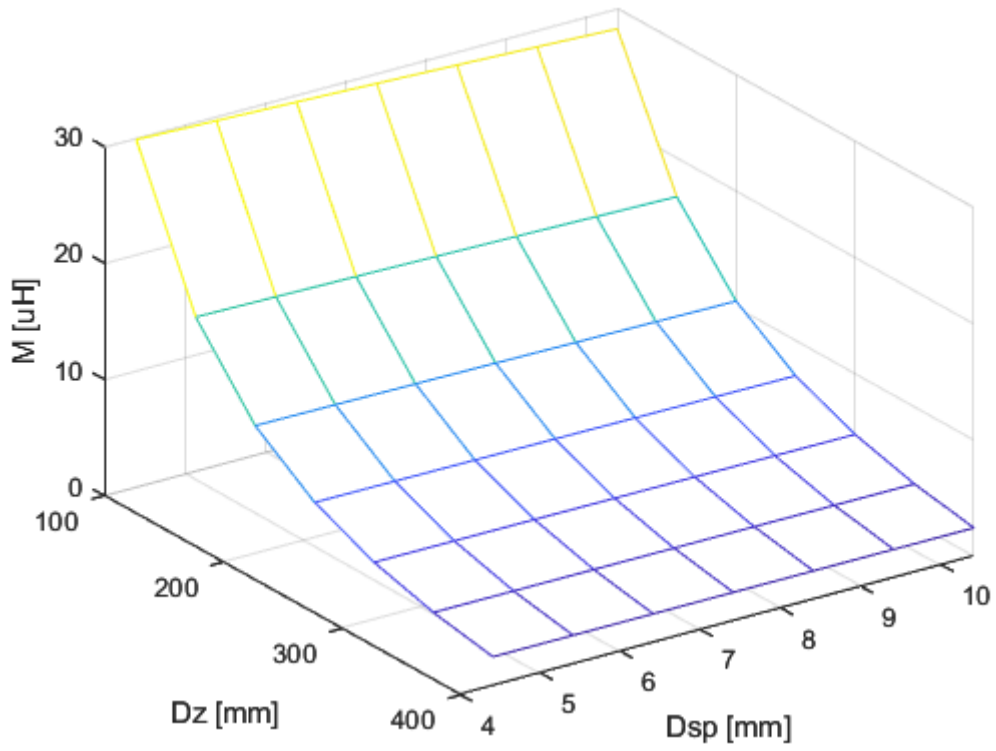


Fig. 12 – Variația inductivității mutuale M funcție de parametrii Dsp și Dz .

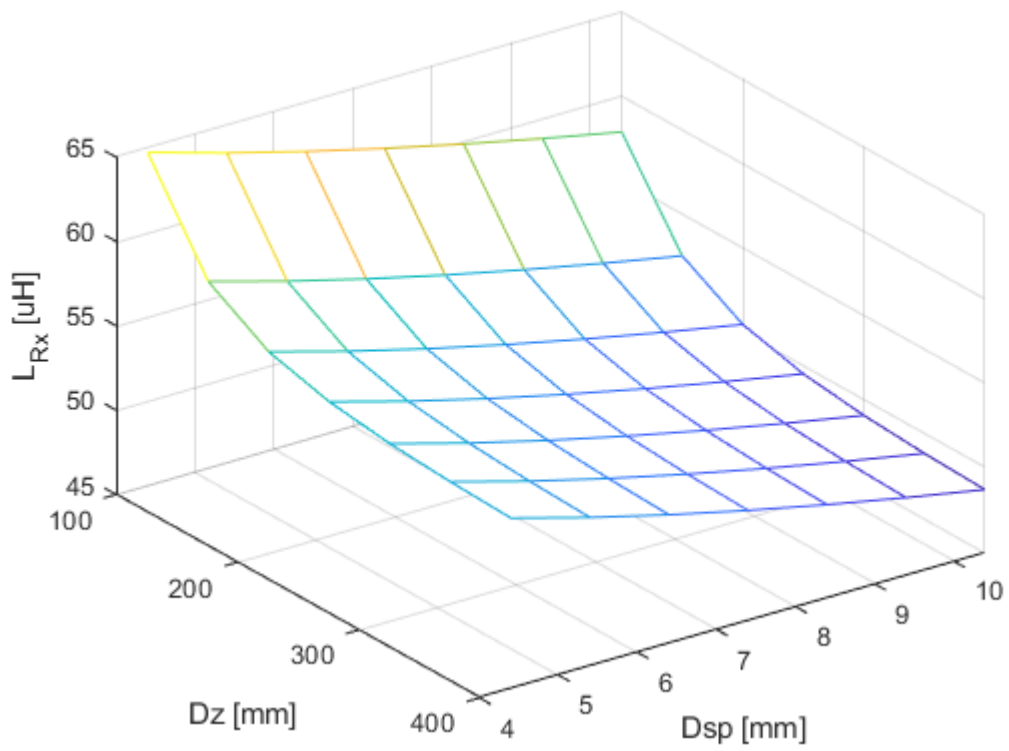


Fig. 13 – Variația inductivității L_{Rx} funcție de parametrii Dsp și Dz .

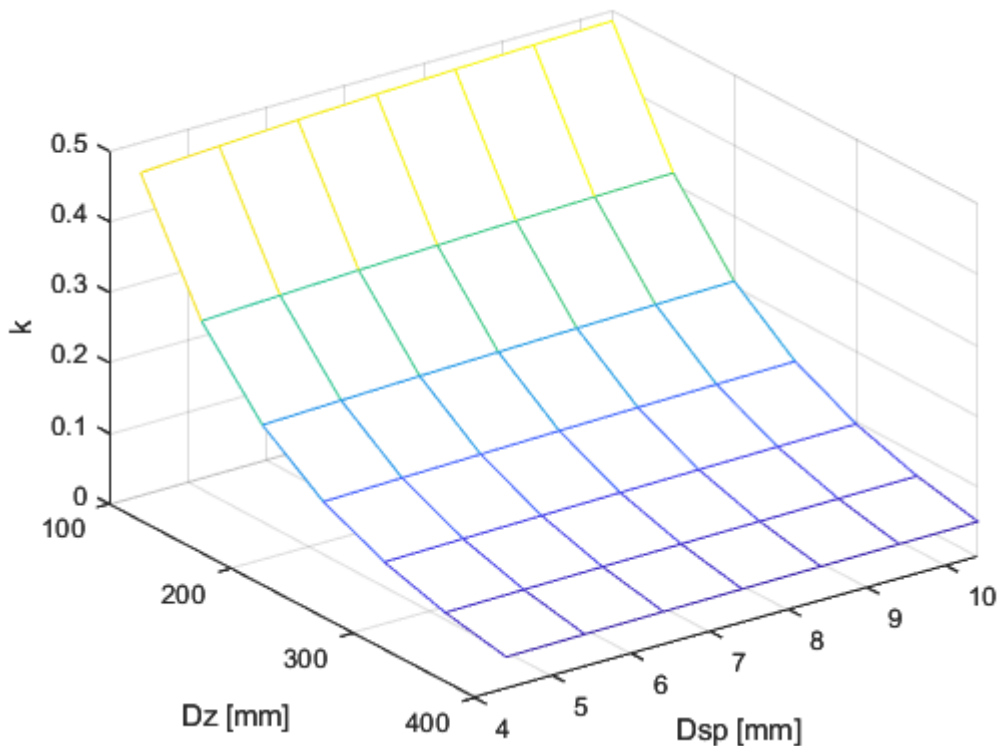


Fig. 14 – Factorul de cuplaj magnetic k funcție de parametrii D_{sp} și D_z .

Rezultatele numerice din Fig. 11– 14 indică faptul că distanța între spirele bobinelor în zona centrală (parametrul D_{sp}) nu influențează semnificativ (sub 15%) mărimile caracteristice cuplorului inductiv (inductivitățile proprii, mutuale și cuplajul magnetic dintre bobine). Se remarcă o scădere ușoară a inductivităților proprii și mutuale ale bobinelor cu parametrul D_{sp} și o creștere ușoară, cu câteva procente, a factorului de cuplaj magnetic. O influență sensibil mai mare o are distanța D_z dintre bobine, în plan vertical.

5. CONCLUZII

În lucrarea de față s-a studiat influența unor parametri geometrici ai bobinelor emițătoare și receptoare T_x și R_x (bobine planare Dublu-D) asupra mărimilor caracteristice ale unui cuplor inductiv destinat încărcării wireless a bateriilor vehiculelor electrice grele.

Analiza numerică efectuată, utilizând metoda elementului finit, a permis pentru diferite configurații geometrice ale bobinelor T_x și R_x , determinarea unor mărimi specifice cuplorului inductiv studiat precum: distribuția câmpului magnetic în domeniul de calcul, inductivitățile proprii și mutuale ale bobinelor, respectiv factorul de cuplaj magnetic util.

Rezultatele obținute au dovedit că lățimea bobinelor L_b are o influență foarte mare asupra mărimilor caracteristice cuplorului inductiv (inductivități proprii și mutuale, respectiv factorul de cuplaj magnetic util) însă influența nu este una liniară, ci tinde să se satureze ușor pentru $L_b > 500$ mm. Distanța în plan vertical dintre spire D_z are de asemenea o influență importantă asupra performanțelor cuplorului inductiv. O influență mai redusă s-a dovedit a avea distanța D_{sp} între spirele bobinelor, în zona centrală a structurii Dublu-D.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'18, ediția 2022.

BIBLIOGRAFIE

1. N. Golovanov, A. Marinescu, *Electromobility and climate change*, Proceeding of MPS (Modern power systems), Cluj Napoca 2019.
2. SAE J2954-2, Wireless power transfer & alignment for heavy duty applications, Task Force Project, 2020.
3. G.A. Covic, J.T. Boys, *Inductive power transfer*, Proceedings of the IEEE, **101**, 6, pp. 1276–1289, June 2013.
4. 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*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 960 012022 IOP Publishing, 2022.
5. A. Marinescu, T. Tudorache, A. Vintila, I. Dumbrava, *A comparative assessment of magnetic concrete versus ferrite for a high power inductive coupler*, 9th International Conference on Modern Power Systems (MPS), pp. 1-8, 2021.
6. ***Cedrat: “User guide Flux® 11”, 2015.