

## CALCULUL CÂMPULUI ELECTRIC ASOCIAT UNUI CUPLORE INDUCTIV DESTINAT TRANSFERULUI DE PUTERE WIRELESS

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.** Materializarea transmisiei fără contact este realizată în teorie și practică prin diferite tipuri de circuite de cuplaj fără contact, denumite generic “cuploare fără contact”. În lucrarea de față se analizează prin metoda elementului finit, în aproximare 2D, câmpul electric produs de un cuplor inductiv în diferite variante constructive simplificate și se calculează anumite mărimi conexe ce prezintă importanță practică precum: distribuția câmpului electric în domeniul de calcul, intensitatea câmpului electric în vecinătatea cuplorului inductiv, liniile echipotențiale, puterea reactivă, capacitățile echivalente, etc.

### 1. INTRODUCERE

Cuplorul inductiv poate fi considerat un transformator electric în aer sau cu circuit magnetic deschis la care înfășurarea primară (Tx) și cea secundară (Rx) pot ocupa diferite poziții una față de cealaltă în funcție de aplicație [1]. El este considerat un element reprezentativ pentru sistemele WPT (Wireless Power Transfer) folosite în prezent de la puteri transferate de ordinul W până la zeci sau sute de kW. Pentru creșterea randamentului de transfer, cuplorul lucrează la frecvențe ridicate, de ordinul kHz sau MHz și are în anumite cazuri înfășurări de tip planar, de diferite forme, realizate din litz wire și dispune de regulă de concentratoare de flux magnetic [2]. Orice cuplor inductiv este integrat într-un sistem de transmisie complex, alcatuit din numeroase alte componente [3]. Principala problemă de rezolvat la orice sistem de transmisie inductivă a energiei fără contact este creșterea randamentului de transfer al energiei care depinde în mare măsură de “factorul de merit” al cuplorului dat de produsul dintre factorul de cuplaj ( $k$ ) și factorul de calitate ( $Q$ ) al înfășurărilor Tx și Rx [2]:

$$FOM = k \cdot Q \quad (1)$$

Dacă valoarea lui  $Q$  rezultă din calculul electromagnetic al înfășurărilor, valoarea lui  $k$  depinde de distanța dintre înfășurări și de alinierea acestora [4].

În afara calculului electromagnetic prezentat pe larg în alte lucrări, construcția cu circuit magnetic deschis produce câmpuri electrice și magnetice de dispersie care au un efect negativ atât asupra echipamentelor electrice și electronice aflate în vecinătate, cât și asupra sănătății umane dacă expunerea depășește anumite praguri impuse. Aceste praguri sunt indicate de standarde și prescripții internaționale [5 - 6] realizate prin aplicarea principiului precauționar [7] astfel încât pot fi revizuite periodic și nu sunt obligatorii decât dacă sunt preluate în legislația națională.

În prezent există numeroase studii de compatibilitate electromagnetică care se referă în mod diferențiat în funcție de amplasare și frecvența de lucru [8 - 12] la implanturi medicale, robotică, telefonie mobilă și mai ales la sistemele de încărcare wireless pentru vehiculele electrice [13 - 15].

În câmpul apropiat specific utilizării WPT situația este diferită de cazul câmpului electromagnetic îndepărtat, deoarece aici impedanța de undă, adică raportul dintre  $E$  și  $H$  este variabilă și ca urmare cele două câmpuri trebuie evaluate separat. La fel trebuie procedat și în cazul măsurilor de limitare a nivelului perturbator. Pe măsura creșterii puterilor transmise wireless și proliferarea mobilității electrice la autovehicule ușoare și la autobuze au devenit

insuficiente studiile asupra câmpului magnetic de dispersie [16 - 17] și este necesară și analiza câmpului electric de dispersie produs de cuplorul inductiv.

În această lucrare se analizează prin Metoda Elementelor Finite (MEF) câmpul electric produs de un cuplor inductiv în diferite variante constructive simplificate și se calculează anumite mărimi specifice care prezintă importanță practică precum: distribuția câmpului electric în domeniul de calcul, intensitatea câmpului electric în vecinătatea cuplorului inductiv, liniile echipotențiale, puterea reactivă, capacitățile echivalente, etc.

## 2. RECOMANDĂRILE ICNIRP PENTRU CÂMPUL ELECTRIC

Recomandările ICNIRP din 2010 prezintă atât nivelurile de bază, cât și nivelurile de referință pentru câmpul magnetic B și câmpul electric E. În practică, sunt importante nivelurile de referință care se obțin din restricțiile de bază obținute prin modelare matematică, folosind date publicate care oferă protecție maximă. Fig.1 prezintă aceste niveluri de referință (marcate cu roz) pentru domeniul de frecvențe 10 - 100 kHz, domeniu folosit în prezent pentru WPT de mare putere. Liniile continue reprezintă nivelurile pentru personalul ocupațional, iar liniile întrerupte reprezintă nivelurile pentru publicul larg (aceste valori sunt mai mici, fiindcă aici sunt incluși nu numai adulții ci și copiii).

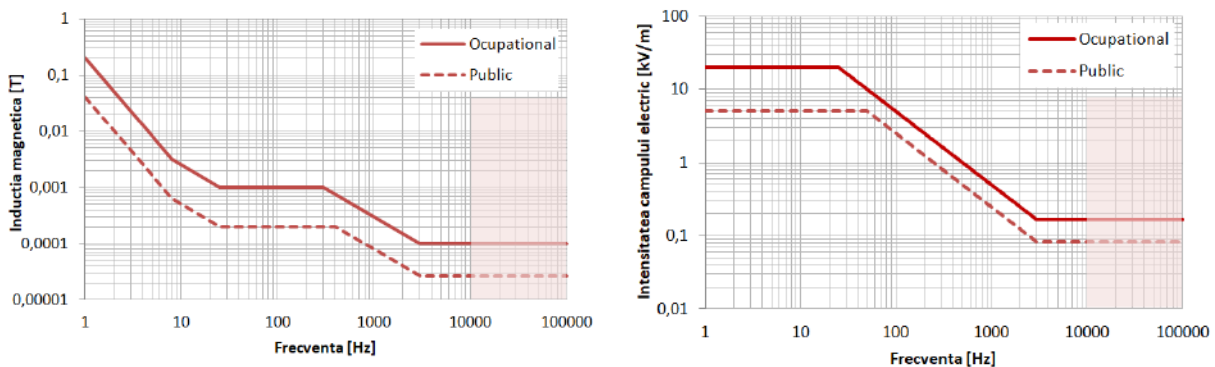


Fig. 1. Nivele de referință pentru câmp magnetic (stanga) și câmp electric (dreapta) conform [1]. Zonele roșie și albastră: domeniul de frecvențe de lucru 10 – 100 kHz pentru WPT de mare putere.

Din grafice rezultă valorile limită admise: 27  $\mu$ T pentru inducția magnetică B și 83 V/m pentru intensitatea câmpului electric E, ultima valoare fiind cea în care urmează să se încadreze rezultatele din analiza efectuată în lucrare.

## 3. MODELELE NUMERICE UTILIZATE ÎN STUDIULUI CÂMPULUI ELECTRIC AL CUPLORULUI INDUCTIV

Cuplorul inductiv analizat în lucrare este alcătuit din două bobine planare, Tx și Rx având diametre exterioare de 290 mm, respectiv 262 mm și același diametru interior de 126 mm, 7, respectiv 6 spire, cu un pas al spirei de 12 mm, situate la distanța de 84 de mm. Spirele sunt realizate din conductor de tip litz wire (900 x 0,1) cu  $\Phi = 4$  mm, iar bobinele sunt prevăzute cu concentratoare de flux magnetic, de formă discoidală compactă cu diametre de 342 mm, respectiv 284 mm, realizate din ferită de tip N 87 Mn-Zn cu  $\epsilon_r = 10$  și  $\rho = 2 - 5 \Omega$ m, Fig. 2b.

Analiza cuplorului inductiv are la bază Metoda Elementelor Finite (MEF) în aproximare 2D axi-simetrică, aceasta fiind efectuată cu ajutorul pachetului de programe de calcul de câmp Flux® [18].

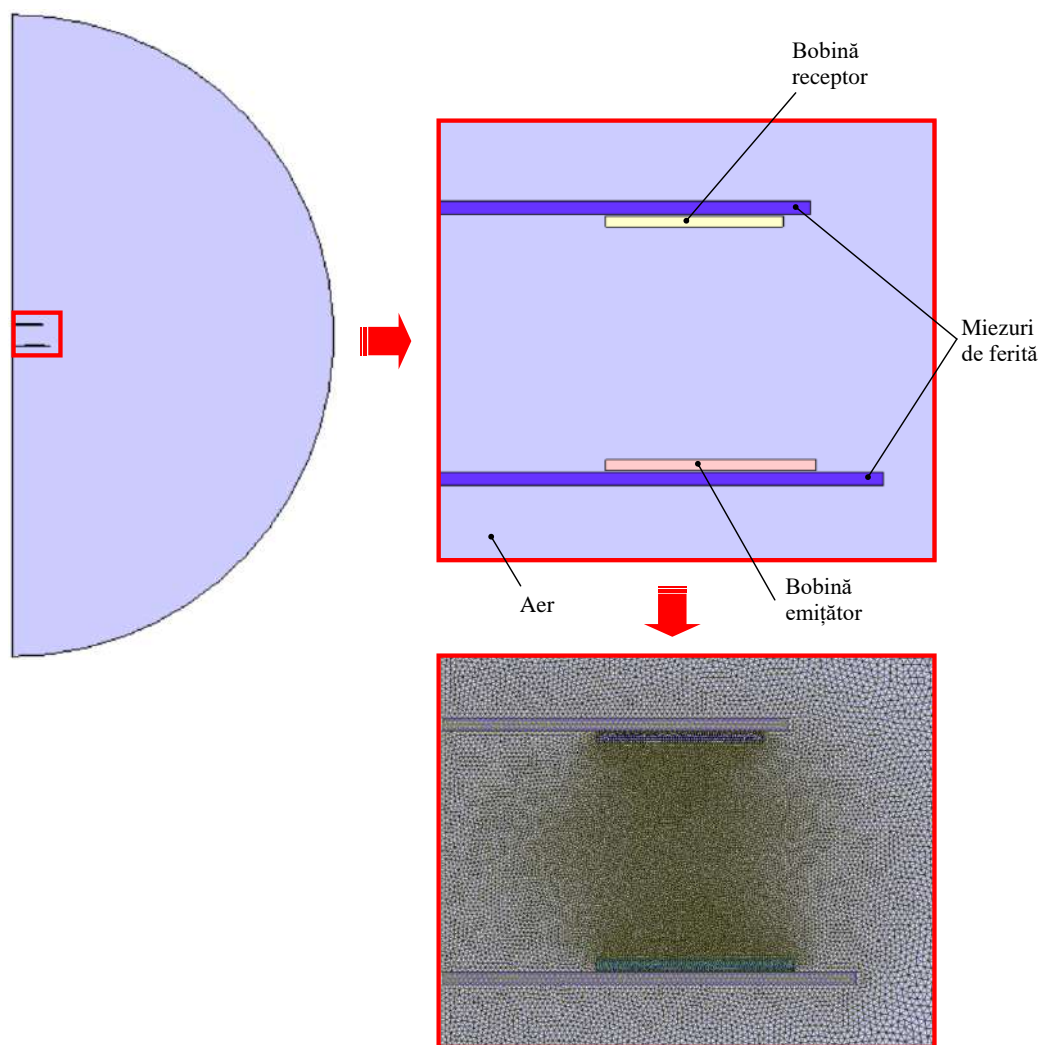
Studiul numeric este realizat în regim cvasi-staționar amagnetic (capacitiv) armonic al câmpului electromagnetic, formularea utilizată fiind exprimată în potențial electric scalar  $V$  prin relația [18]:

$$\operatorname{div} [-(\sigma + j \cdot \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0) \cdot \operatorname{grad} \underline{V}] = 0 \quad (2)$$

unde  $\sigma$  este conductivitatea electrică a regiunilor conductoare,  $\omega = 2\pi f$  este pulsația câmpului electric,  $f = 100$  kHz este frecvența de lucru,  $\epsilon_r$  și  $\epsilon_0$  reprezintă permitivitățile electrice relativă și cea a vidului.

Se studiază două configurații geometrice ale cuplorului inductiv, prima fiind o configurație simplificată, în care bobinele sunt înlocuite cu două plăci echipotențiale din cupru, Fig. 2a). Cea de-a doua configurație, mai apropiată de realitate, presupune o construcție a bobinelor cuplorului inductiv din 7, respectiv 6 spire concentrice, ca în Fig. 2b). Se consideră că ambele geometrii analizate prezintă simetrie axială, problemele de calcul de câmp analizate fiind 2D axi-simetrice.

Domeniile de calcul 2D sunt delimitate de axa de simetrie verticală, respectiv de o frontieră semi-circulară, pe care se impune câmp electric tangențial. Frontiera este extinsă mult spre exterior pentru a permite calculul câmpului electric la distanță mare de bobine. Potențialul aplicat bobinei emițător este nul, iar potențialul bobinei receptor este de 1600 V.



a)

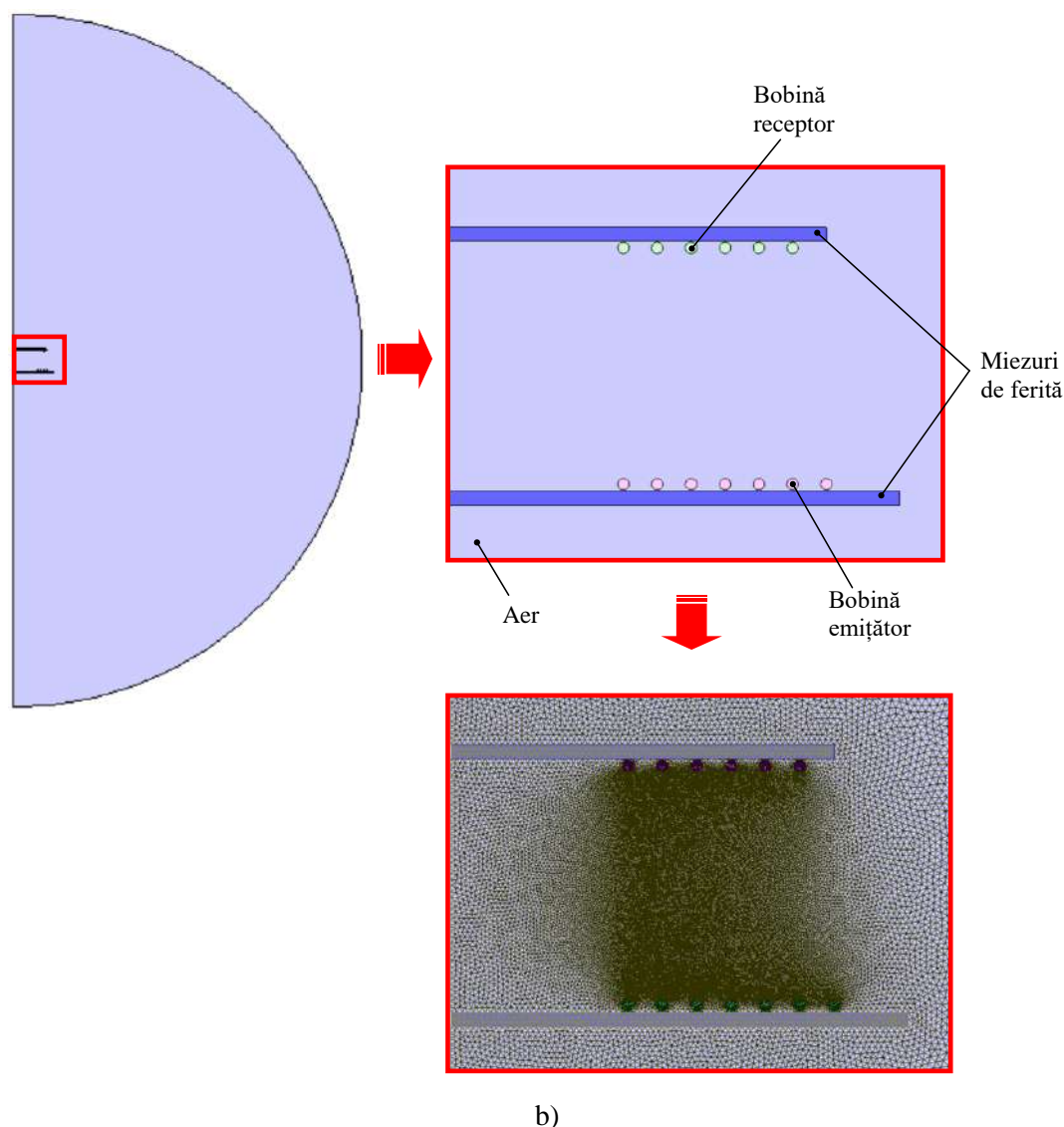


Fig. 2. Domenii de calcul 2D al câmpului electric și detalii privind rețelele de discretizare asociate; a) bobinele sunt modelate ca plăci echipotențiale; b) bobinele sunt considerate alcătuite din spire concentrice (7 spire, respectiv 6 spire).

#### 4. REZULTATE NUMERICE

În urma rezolvării problemei de calcul de câmp electric 2D în variantele bobină/placă și bobină/spire s-au obținut rezultatele numerice prezentate în Fig. 3 - 5.

În Fig. 3 sunt prezentate liniile echipotențiale, pentru cele două configurații geometrice analizate.

În Fig. 4 și 5 sunt prezentate variațiile intensității câmpului electric funcție de distanța față de centrul cuplorului inductiv, iar în tabelul 1 se indică valorile numerice de vârf ale intensității câmpului electric  $E$  la două distanțe în raport cu centrul cuplorului analizat (90 cm și 140 cm).

Tabelul 1. Intensitatea câmpului electric la diferite distanțe față de axa de simetrie a sistemului

Bobină/placă		Bobină/spire	
$E_{90\text{cm}}$ [V/m]	$E_{140\text{cm}}$ [V/m]	$E_{90\text{cm}}$ [V/m]	$E_{140\text{cm}}$ [V/m]
35,94	18,5	33,95	17,47

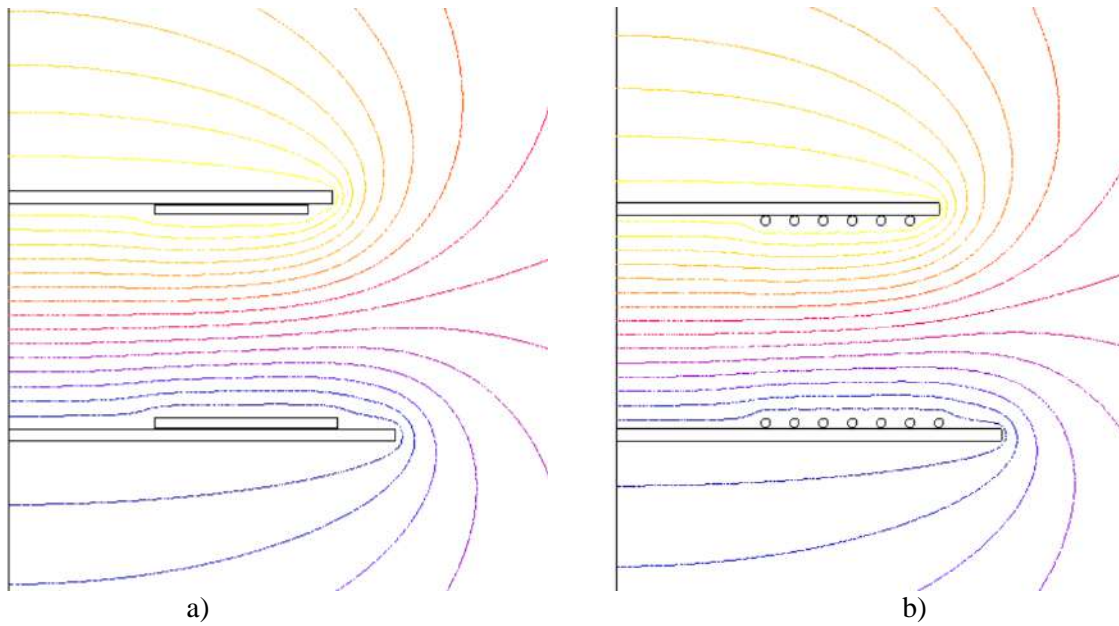


Fig. 3. Liniile echipotențiale obținute în urma rezolvării problemei de câmp electric pentru: a) configurația bobină/placă; b) configurația bobină/spire.

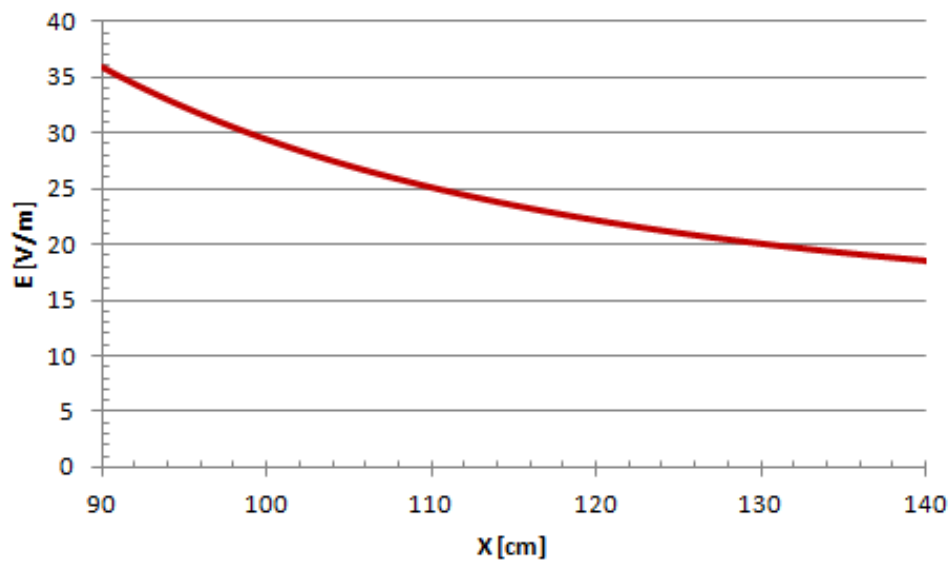


Fig. 4. Distribuția spațială a câmpului electric funcție de distanța față de centrul cuplorului inductiv (bobină/placă).

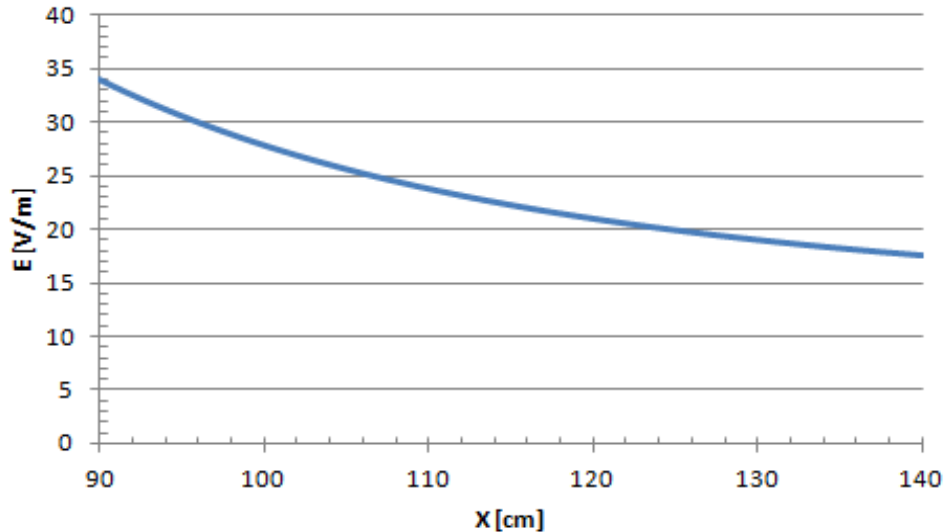


Fig. 5. Distribuția spațială a câmpului electric funcție de distanța față de centrul cuplorului inductiv (bobină/spire).

Pentru cele două configurații geometrice studiate s-a calculat de asemenea puterea reactivă în domeniul de calcul și capacitatea echivalentă a cuplorului inductiv, conform Tabel 2.

Tabelul 2. Puterea reactivă și capacitatea electrică a cuplorului inductiv

Bobină/placă		Bobină/spire	
Q [VAr]	C [pF]	Q [VAr]	C [pF]
20,44	12,71	20,19	12,55

Rezultatele numerice confirmă faptul că la frecvența de lucru a sistemului de transfer de putere fără fir, puterea reactivă este neglijabilă, ca și valoarea capacității electrice echivalente.

Valorile intensității câmpului electric calculate la montarea cuplorului inductiv pe un vehicul electric cu lățimea de 1,8 m sunt mai mici decât valorile limită date în (Fig.1) pentru aceste sisteme, atât la marginea vehiculului (90 cm față de centru) cât și la o distanță de 50 cm față de această margine (adică la o distanță de 140 cm de centru), unde se presupune că se deplasează pasagerii sau pietonii.

Rezultatele obținute permit determinarea densității de volum a energiei electrice  $w_e$  în spațiul de aer dintre Tx și Rx și pe baza densității de volum a energiei magnetice  $w_m$  calculată pentru o inducție medie în aer de 10 mT conduc la un raport  $w_m/w_e$  de 15000. În concluzie contribuția transferului de energie prin câmp electric este neglijabilă la un cuplor inductiv.

## 5. CONCLUZII

În lucrare se face o analiză a condițiilor de funcționare ale unui sistem WPT care folosește un cuplor inductiv pentru o putere transferată de 3,7 kW.

Spre deosebire de analizele numerice realizate de autori până în prezent, cu privire la nivelul fluxului magnetic de dispersie al cuplorului inductiv, în lucrare se determină câmpul electric de dispersie al acestuia. Analiza numerică a permis determinarea unor mărimi specifice precum: distribuția câmpului electric, intensitatea câmpului electric în vecinătatea cuplorului inductiv, liniile echipotențiale, puterea reactivă, capacitățile echivalente, etc.

Rezultatele numerice dovedesc faptul că pentru cuplorul analizat nu se depășește nivelul limită de referință al intensității câmpului electric de 83 V/m prevăzut de ICNIRP. Analiza efectuată a evidențiat totodată faptul că transferul de energie în câmp electric este neglijabil.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] G. A. Covic, J. T. Boys, “Inductive Power Transfer”, *Proceedings of the IEEE* Vol. 101, No. 6, pp.1276-1289, June 2013.
- [2] A. Marinescu, I. Dumbrava, A. Vintila, D. G. Marinescu, V. Nicolae, D. Neagu, A. Radu, “The Way to Engineering EV Wireless Charging: DACIA Electron”, *Electric Vehicles International Conference & Show (EV 2017)*, 5- 6 october, Bucharest.
- [3] A. Marinescu, I. Dumbravă, “Coupling Factor of Planar Power Coils Used in Contactless Power Transfer”, *Proceeding of the 9th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE’15*, Bucharest, 7 - 9 May 2015.
- [4] IEC 61980-1 Ed. 2.0, “Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General requirements”, 2019.
- [5] ICNIRP, “ICNIRP Statement-Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)”, *Health Phys.*, vol. 99, pp. 818–836, 2010.
- [6] ETSI TR 103 409 V1.1.1 (2016-10), “WPT systems for EV operating in the frequency band 79 - 90 kHz”.
- [7] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, *Health Phys.*, vol. 74, pp. 494–522, 1998.
- [8] J. Nadakuduti, M. Douglas, L. Lu, A. Christ, P. Guckian, N. Kuster, “Compliance Testing Methodology for Wireless Power Transfer Systems”, *IEEE Trans. Power Electronics.*, Vol. XX, No. XX, January 2015.
- [9] M. Cheikh, G. Vigneau, A. Takacs, “Compliance Assessment of Human Body Exposure to Wireless Power Systems”, *Proceedings of the 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16) Budapest, Hungary, August 16 - 17, 2016*.
- [10] J. Oh, T. Kim, J. Yoo, J. Pack, Y. Yoon, M. Choi, and S. Lee, “Human exposure assessment for wireless power transmission system”, *Proc. 27th Progr. Electromagn. Res. Symp.*, Xi’an, China, March 2010, pp. 316–319.
- [11] M. Mark, T. Bjorninen, L. Ukkonen, L. Sydanheimo, and J. Rabaey, “SAR reduction and link optimization for mm-size remotely powered wireless implants using segmented loop antennas”, *Proc. IEEE Topical Conf. Biomed. Wireless Technol. Netw. Sens. Syst.*, 2011, pp. 7-10.
- [12] E. N. Baikova, S. S. Valtchev, R. Melicio, A. Krusteva, V. Fernão Pires, “Study of the Electromagnetic Interference Generated by Wireless Power Transfer Systems”, *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, Vol. 11, N. 5, September - October 2016
- [13] H. Jiang, P. Brazis Jr., M. Tabaddor J. Bablo, “Safety Considerations of Wireless Charger For Electric Vehicles – A Review Paper”, pp.1-11, 2012 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering.
- [14] M. Kim, S. Kim, S. Ahn, Y. Chun, S. Park, “Low frequency electromagnetic compatibility of wirelessly powered electric vehicles”, *The International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2014, pp. 426–429, Tokyo, Japan.
- [15] A. Marinescu, I. Dumbrava, G. Rosu, O. Baltag, “New Magnetic Field Qualification & Standards for EV Wireless Power Transfer”, *The 11<sup>th</sup> International Workshop of Electromagnetic Compatibility (CEM) 2018*, Targoviste, septembrie 2018.
- [16] T. Tudorache, A. Marinescu, “Analiza numerică 3D a unui cuplor inductiv echipat cu concentratoare de flux magnetic din ferită”, *SME’17*, noiembrie 2017.
- [17] IEC TR 62905 ED1, “Technical report on exposure assessment methods for wireless power transfer systems”, 2017.
- [18] \*\*\*Cedrat: “User guide Flux® 11”, 2015.