

Milena KURZAWA\*  
Rafał M. WOJCIECHOWSKI\*

## ANALIZA ZJAWISK ELEKTROMAGNETYCZNYCH W UKŁADZIE BEZPRZEWODOWEGO PRZESYŁU ENERGII

W artykule przedstawiono wyniki polowej analizy zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w układzie bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej (*WREL*). Rozpatrzono transformator powietrzny złożony z dwóch sprzężonych cewek połączonych z elementami obwodów zewnętrznych. Model polowo-obwodowy rozpatrywanego układu opracowano w profesjonalnym oprogramowaniu Maxwell, w którym zaimplementowano popularną metodę elementów skończonych (MES). Utworzony 3D model transformatora łącznie z równaniami obwodów elektrycznych umożliwia wykreślenie trójwymiarowego rozkładu pola, wyznaczenie wartości parametrów całkowitych i przebiegów prądów oraz napięć na poszczególnych elementach składowych układu. W pracy zbadano wpływ odległości pomiędzy cewkami oraz częstotliwości źródła zasilania na wartość sprawności układu. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń.

SŁOWA KLUCZOWE: bezprzewodowa transmisja energii, transformator powietrzny

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie bezrdzeniowymi transformatorami wysokiej częstotliwości oraz możliwościami wykorzystania tych przetworników do budowy m.in. układów umożliwiających bezprzewodowe ładowanie urządzeń elektronicznych [2, 7], tj. telefony komórkowe, komputery przenośne; zasilania baterii pojazdów elektrycznych [1], czy układów zasilania manipulatorów stosowanych w produkcji przyrządów półprzewodnikowych [6]. Transformatory te znajdują także zastosowanie w układach bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej przez tkankę ludzką umożliwiając tym samym ładowanie baterii urządzeń wspomagających pracę serca [5]. Autorzy artykułu w swoich badaniach naukowych właśnie tymi ostatnimi układami pragną się zajmować. W niniejszej publikacji przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczące analizy zjawisk oraz stanów pracy w prostym układzie bezprzewodowej transmisji energii (*WREL*). Rozpatrzony zostanie układ złożony

---

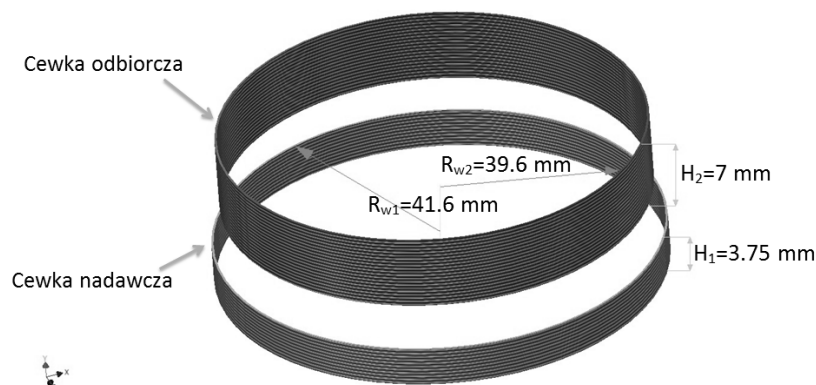
\* Politechnika Poznańska.

z dwu uzwojeniowego transformatora powietrznego, w którym jedno z uzwojeń stanowi nadajnik energii, a drugie odbiornik. Uzwojenia te dodatkowo połączono z obwodami zewnętrznymi, stanowiącymi odpowiednio obwód zasilania i obciążenia. W celu analizy zjawisk zachodzących w rozpatrywanym układzie opracowano połowo-obwodowy model w oprogramowaniu Maxwell. Skoncentrowano się na badaniu układu, w którym transmisja energii odbywa się w powietrzu. Docelowo jednak autorzy przewidują analizę układów, w których transmisja energii będzie odbywała się na drodze cewka nadawcza – powietrze – tkanka ludzka – cewka odbiorcza. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych.

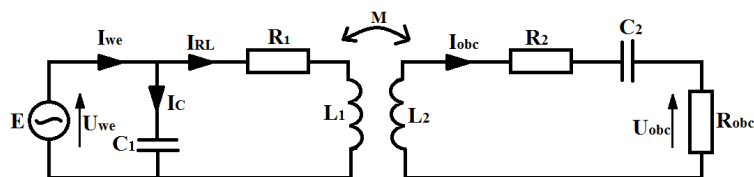
## 2. STRUKTURA ROZPATRYWANEGO UKŁADU WREL

W ramach przeprowadzonych badań rozpatrzono układ transmisji bezprzewodowej *WREL* złożony z transformatora powietrznego oraz dwóch obwodów zewnętrznych. Uzwojenie pierwotne wraz z zewnętrznym obwodem zasilającym stanowi obwód nadajnika zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego. Odbiór energii przesłanej za pomocą pola elektromagnetycznego odbywa się w uzwojeniu wtórnym transformatora, które połączono z elementami pasywnymi wchodzącymi w skład obwodu obciążenia. Jako transformator powietrzny zastosowano przetwornik zbudowany z dwóch cewek koncentrycznych. Widok rozpatrywanego w pracy transformatora powietrznego wraz z naniesionymi wymiarami geometrycznymi odpowiednio cewki nadawczej i odbiorczej pokazano na rys. 1. Ponadto przyjęto, że cewka nadawcza ma 10 zwojów, a liczba zwojów cewki odbiorczej jest równa 20. Liczby zwojów obu cewek dobrano doświadczalnie tak, aby przy wartości napięcia zasilającego obwód nadajnika równej 3,2 V, wartość napięcia wyjściowego zawierała się w przedziale od 1,35 do 1,5 V przy odległości pomiędzy cewkami transformatora w zakresie 2÷5 mm. Podany zakres napięcia wyjściowego wynika z wartości napięć dostosowanych do ładowania akumulatorów (1,2 V) stosowanych w układach wspomagających pracę serca. Ze względu na małą średnicę drutu cewek (0,2 mm) są one traktowane w opracowanym modelu połowym transformatora jako uzwojenia cienkozwojne. Jak już wspomniano wcześniej do uzwojenia strony pierwotnej rozpatrywanego transformatora dołączono obwód zewnętrzny zawierający napięciowe źródło zasilania o regulowanej częstotliwości oraz kondensator  $C_1$ . Rozpatrzono układ, w którym kondensator  $C_1$  włączono równolegle z cewką nadawczą. Samą cewkę nadawczą odwzorowywano jako szeregowe połączenie rezystancji  $R_1$  oraz indukcyjności własnej tej cewki  $L_1$ . W taki sam sposób odwzorowano cewkę odbiorczą również jako szeregowe połączenie jej rezystancji  $R_2$  oraz indukcyjności własnej  $L_2$ . Do uzwojenia strony wtórnej transformatora

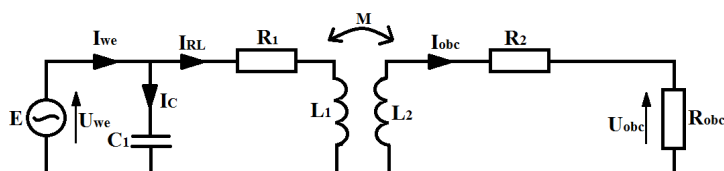
włączono szeregowo kondensator  $C_2$  wraz z rezystancją  $R_{obc}$  reprezentującą obciążenie. Ponadto uwzględniono występującą pomiędzy tymi cewkami indukcyjność wzajemną  $M$ . Parametry obu sprzężonych ze sobą cewek wyznaczano w programie Maxwell. Poprzez włączenie i dobór pojemności  $C_1$  oraz  $C_2$  do układu istnieje możliwość ograniczenia lub całkowitego wyeliminowania wpływu indukcyjności własnych cewek [3], zwiększając tym samym sprawność układu. Schemat układu wraz z parametrami skupionymi transformatora pokazano na rys. 2. Przeprowadzono również analizę układu, w którym pominięto pojemność  $C_2$ . Celem tej analizy było porównanie i zweryfikowanie wpływu kondensatora włączonego po stronie wtórnej transformatora na sprawność układu *WREL*. Schemat układu, w którym pominięto pojemność  $C_2$  przedstawiono na rys. 3.



Rys. 1. Widok rozpatrywanego transformatora powietrznego



Rys. 2. Rozpatrywany schemat obwodowy układu *WREL*



Rys. 3. Schemat obwodowy układu *WREL* z pominięciem pojemności  $C_2$

Przy obliczaniu wartości pojemności kondensatorów korzystano z zależności (1) oraz (2) opisujących częstotliwości rezonansowe obwodu strony pierwotnej i wtórnej układu przy pominięciu sprzężenia pomiędzy obwodami cewek.

$$C_1 = \frac{I}{(2\pi f)^2 \frac{R_1^2}{L_1}} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{I}{(2\pi f)^2 L_2} \quad (2)$$

gdzie:  $f$  jest częstotliwością źródła zasilania,  $R_1$  reprezentuje rezystancję cewki nadawczej, natomiast  $L_1$  i  $L_2$  indukcyjność własną odpowiednio cewki nadawczej i odbiorczej.

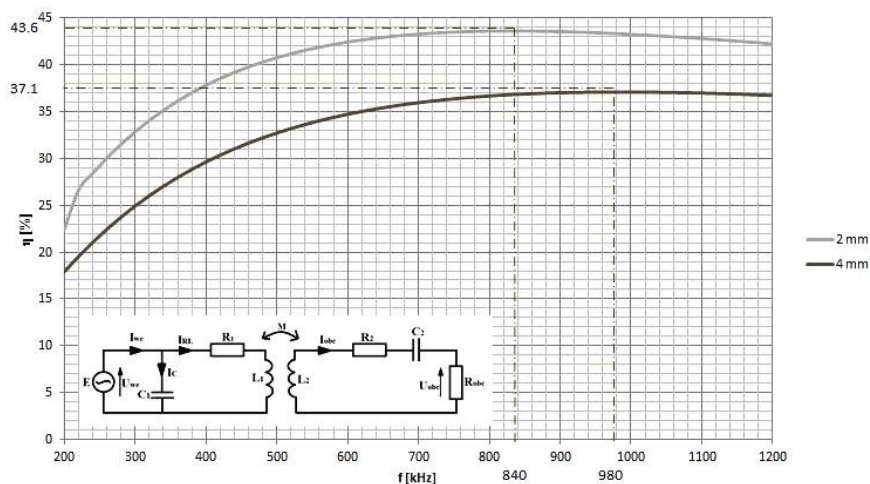
Do wyznaczania rozkładu pola elektromagnetycznego w badanym układzie *WREL*, o czym wspomniano wcześniej, zastosowano oprogramowanie Maxwell. W programie tym zaimplementowano trójwymiarowe ujęcie metody elementów skończonych (MES) wykorzystujące sformułowanie  $\Omega - T$  [4]. Oprogramowanie to wykorzystano do analizy rozkładu pola w badanym układzie m.in. ze względu na możliwość uwzględnienia prądów przesunięcia dielektrycznego. Opracowując połowy model transformatora powietrznego dokonano parametryzacji wybranych wymiarów geometrycznych. W module *Schematics* współpracującym z programem Maxwell utworzono elementy obwodów zewnętrznych, tj. obwodu zasilania i obciążenia oraz sposób ich połączenia, uzyskując tym samym połowo-obwodowy model rozpatrywanego układu. Moduł ten umożliwia również parametryzację wartości elementów obwodów zewnętrznych, które nie zależą od rozkładu pola wyznaczanego w Maxwellu.

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

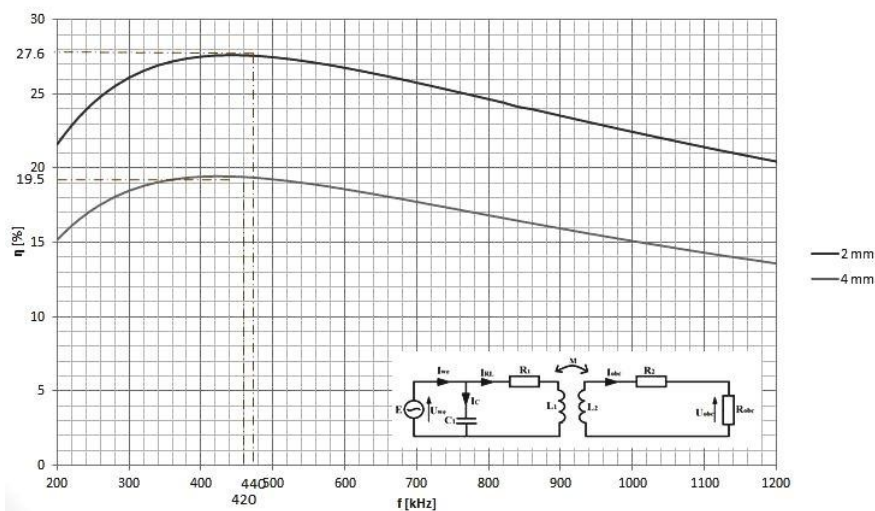
Badania symulacyjne z wykorzystaniem opracowanego połowo-obwodowego modelu rozpatrywanych układów *WREL* przeprowadzono w dwóch etapach, w których przyjęto, że pojemności występujące w tych układach są każdorazowo dobierane w zależności od zadanej częstotliwości napięcia zasilania  $f$ .

W etapie pierwszym analizowano wpływ częstotliwości napięcia zasilania na sprawność układu oraz wartość napięcia wyjściowego, tj. wartość napięcia na rezystancji obciążenia  $R_{obc}$  wynoszącej  $50 \Omega$ , dla danej wartości odległości pomiędzy cewkami. Przyjęto, że cewki zostały umieszczone w odległości 2 mm i 4 mm od siebie, a częstotliwość zmieniano w zakresie od 200 kHz do 1.2 MHz. Odległość pomiędzy cewkami wynika z typowej głębokości umieszczenia cewki odbiorczej w ciele człowieka, tzn. pod warstwą tkanki skórnej. Obliczenia wykonano dla dwóch układów *WREL*, tj. układu, w którym uwzględniono kondensator  $C_2$  i układu bez tego kondensatora. Na rysunku 4 przedstawiono

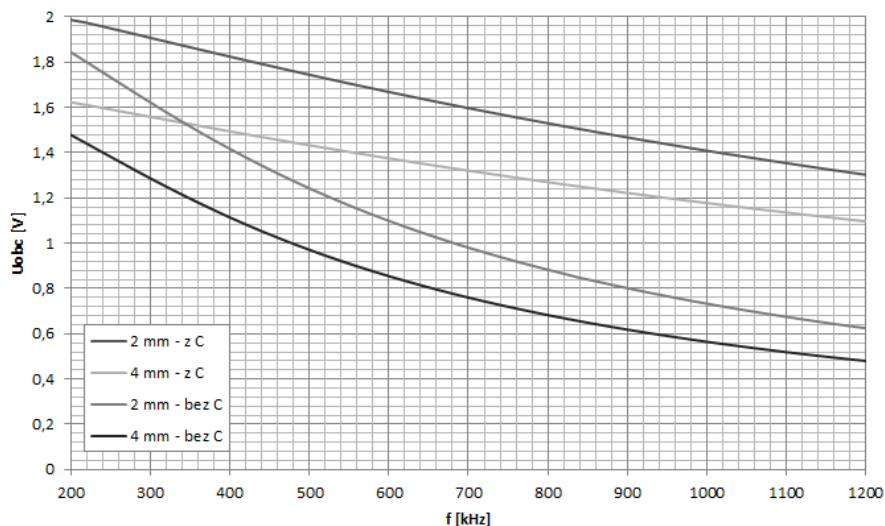
wyniki obliczeń sprawności układu z kondensatorem po stronie wtórnej. Natomiast na rys. 5 pokazano zależność sprawności od częstotliwości dla układu *WREL* z pominięciem wpływu kondensatora  $C_2$ . Porównanie zmian napięcia na zaciskach wyjściowych w funkcji częstotliwości dla rozpatrywanych układów przedstawiono natomiast na rys. 6.



Rys. 4. Porównanie zależności sprawności układu *WREL*, z uwzględnionym kondensatorem  $C_2$  po stronie wtórnej, w funkcji częstotliwości układu zasilania dla przypadku, w którym odległość pomiędzy cewkami wynosiła odpowiednio 2 i 4 mm

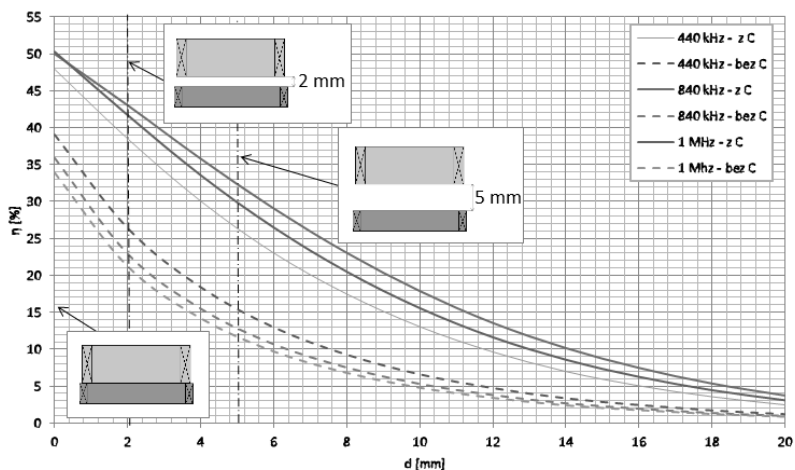


Rys. 5. Porównanie zależności sprawności układu *WREL*, z pominięciem wpływu kondensatora  $C_2$ , w funkcji częstotliwości układu zasilania dla przypadku, w którym odległość pomiędzy cewkami wynosiła odpowiednio 2 i 4 mm



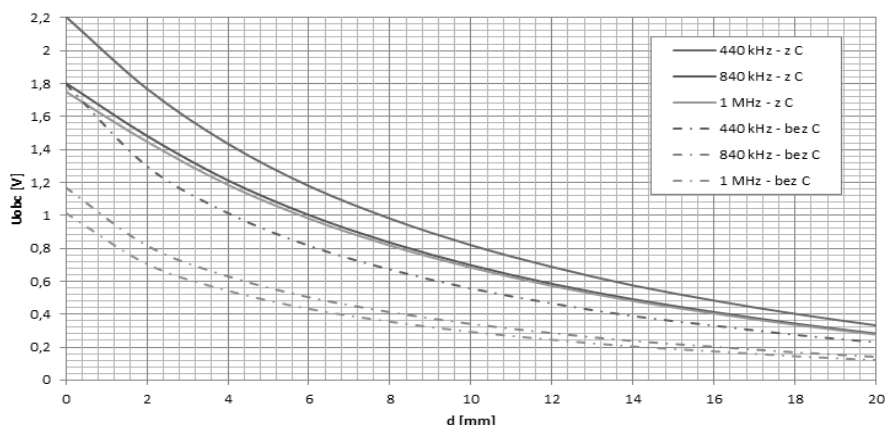
Rys. 6. Porównanie wartości napięcia wyjściowego w funkcji częstotliwości układu zasilania dla odległości między cewkami równej 2 i 4 mm

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w układzie zawierającym kondensator  $C_2$  po stronie wtórnej sprawność układu można zwiększyć o 30 – 40% w porównaniu do układu *WREL*, w którym pominięto kondensator  $C_2$ . Ponadto maksimum sprawności dla układu z kondensatorem  $C_2$  przesuwa się w kierunku wyższych częstotliwości napięcia zasilania. Dla tego układu obserwuje się również znacznie mniejszą zmianę napięcia wyjściowego transformatora, niż w układzie bez kondensatora  $C_2$  (rys.6).



Rys. 7. Sprawność układu w funkcji odległości dla częstotliwości 440 kHz, 840 kHz oraz 1 MHz

W kolejnym etapie badań analizowano wpływ odległości pomiędzy cewkami transformatora na sprawność układu oraz napięcie na rezystancji obciążenia, przy danej częstotliwości źródła zasilania. Obliczenia wykonano również dla dwóch wyżej wspomnianych układów *WREL* z i bez kondensatora  $C_2$ . Na rysunku 7 i 8 przedstawiono wyniki obliczeń, odpowiednio częstotliwości oraz napięcia wyjściowego w funkcji odległości dla trzech wybranych wartości częstotliwości napięcia zasilania, tj. 440 kHz, 840 kHz i 1 MHz. Wartości częstotliwości dobrano ze względu na uzyskane maksymalne wartości sprawności rozpatrywanych układów wynikające z wcześniejszych badań (rys. 4 i rys. 5). Uzyskane wyniki potwierdzają, że układ *WREL* z kondensatorem  $C_2$  jest korzystniejszy od układu bez tego kondensatora.



Rys. 8. Porównanie wartości napięcia wyjściowego w funkcji odległości dla częstotliwości 440 kHz, 840 kHz oraz 1 MHz

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych uzyskane dla prostego układu bezprzewodowej transmisji energii z wykorzystaniem pola elektromagnetycznego. Skoncentrowano się przede wszystkim na zbadaniu wpływu odległości pomiędzy cewkami transformatora powietrznego stanowiącymi nadajnik i odbiornik energii elektromagnetycznej oraz wpływu wartości częstotliwości napięcia zasilania na sprawność układu i wartość napięcia wyjściowego układu. Badania wykonano dla układu obciążonego odbiornikiem o charakterze rezystancyjnym. Rozpatrzono także wpływ dodatkowych pojemności włączonych do układu. W szczególności zbadano wpływ włączenia pojemności  $C_2$  po stronie odbiorczej układu. Przeprowadzone wstępne badania pozwoliły na zapoznanie się z charakterem układów bezprzewodowej transmisji energii w skład, których wchodzi dwuuzwojeniowe transformatory powietrzne.

Zaprezentowane powyżej wyniki badań symulacyjnych pozwalają stwierdzić, że układ z kondensatorem po stronie wtórnej jest korzystniejszy niż układ bez tego kondensatora. W układzie z kondensatorem po stronie wtórnej ze względu na rezonans występują mniejsze straty. Z tego powodu w układzie tym zarówno przy zmianach częstotliwości napięcia zasilającego jak i zmianie odległości między cewkami uzyskano wyższe sprawności niż w układzie bez tego kondensatora. Najwyższą sprawność uzyskano dla częstotliwości 840 kHz. Dalsze prace Autorów będą związane z uwzględnieniem w opracowanym modelu niekorzystnych zjawisk prądów wirowych i przesunięcia dielektrycznego oraz optymalizacją układu *WREL* w celu uzyskania jeszcze wyższej sprawności.

## LITERATURA

- [1] Ahn S., Lee J. Y., Cho D. H., Kim J., *Magnetic field design for low EMF and high efficiency wireless power transfer system in on-line electric vehicles*, CIRP Design Conference 2011, s. 233-239.
- [2] Choi W. P., Ho W. C., Liu X., Hiu S. Y. R., *Bidirectional Communication Techniques for Wireless Battery Charging System & Portable Consumer Electronics*, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 2251-2257.
- [3] Cieśla T., *Układ do bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej, rozprawa doktorska*, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Gliwice 2012.
- [4] Demenko A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
- [5] Li X., Zhang H., Peng F., Li Y., Yang T., Wang B., Fang D., *A Wireless Magnetic Resonance Energy Transfer System for Micro Implantable Medical Sensors*, Sensor 2012, 12, 10292-10308; ISSN 1424-8220 s.10292-10308.
- [6] Maradewicz A., Kaźmierkowski M.P., *Resonant converter based contactless power supply for robots and manipulators*, *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, Vol. 2, No. 3, 2008, s. 20-25.
- [7] Moradewicz A., Miśkiewicz R., *Systemy bezstykowego zasilania komputerów przenośnych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 236, 2008, s. 47- 62.

## THE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PHENOMENA IN THE SYSTEM OF WIRELESS POWER TRANSMISSION

In the paper, the results of a field analysis of electromagnetic phenomena in the system of the wireless power transmission (*WREL*) have been discussed and presented. The considered air-transformer consists of two coupled coils connected to the elements of external circuits. The field-circuit model of considered system has been developed in a professional Maxwell software, in which a popular finite element method (FEM) has been employed. The elaborated 3D model of the transformer together with external circuit allows to determining of the three-dimensional distributions of the electromagnetic field, defining of the integral parameters and plotting of the waveforms of currents and voltages on elements of external circuits. In the work the influence of the distance between the coils of air-transformer and the frequency of the power source of the value system efficiency have been studied. The selected results of the calculations have been given.