

Michał FILIPIAK*

ZJAWISKA REZONANSU W UKŁADACH ZASILANIA BEZPRZEWODOWEGO

W artykule zaprezentowano perspektywy zastosowania bezprzewodowego zasilania urządzeń elektronicznych. Krótko opisano zalety stosowania tej technologii wraz z jej zasadą działania i budową typowych układów stosowanych w urządzeniach codziennego użytku. Przedstawiono dwa rodzaje układów rezonansowych stosowanych do bezprzewodowego przesyłu energii. Zaprezentowano zalety i wady stosowania każdego z tych układów. Przedstawiono również analizę impedancyjną i sprawnościową układów bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Charakterystyki sprawnościowe przedstawiono w zależności od kilku parametrów w formie trójwymiarowej. Wykazano minimalną dobroć układu rezonansowego umożliwiającą osiągnięcie wysokiej sprawności układu przy małym sprzężeniu między cewkami uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Porównano dwa badane obwody i wyznaczono obszary zastosowań każdego z nich. Określono trudności związane z utrzymaniem obwodu w rezonansie oraz ograniczeniem strat.

SŁOWA KLUCZOWE: zasilanie bezprzewodowe, dobroć, sprawność układów, kompensacja indukcyjności

1. WSTĘP

Stosowanie bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej jest możliwe w wielu dziedzinach techniki. W szczególności można go zastosować w urządzeniach mobilnych, czyli telefonach i smartfonach, gdzie stosowanie takiego sposobu ładowania wpływa na cenę zakupu i komfort użytkowania. Oszczędności wynikają z zakupu jednej ładowarki, którą można wykorzystać do różnych urządzeń. Komfort ładowania urządzenia jest większy, gdyż wystarczy umieścić je na odpowiedniej podkładce. W tym przypadku eliminujemy mechaniczne zużycie np. portu micro USB. Bezprzewodowe zasilanie ma służyć również bezpieczeństwu użytkowników. Podczas łączenia kablowego mogą powstać wyładowania elektryczne, które w styczności z gazem palnym mogą doprowadzić do wybuchu. Ważna jest również możliwość wykorzystania tej technologii w maszynach zawierających elementy ruchome. Przykładem są pojazdy elek-

* Politechnika Poznańska.

tryczne, w których proces ładowania baterii jest długi i może zostać zastąpiony ładowaniem bezprzewodowym podczas jazdy.

Układy bezprzewodowego zasilania działają na zasadzie przekazywania energii za pośrednictwem pola elektromagnetycznego tak, jak w transformatorach powietrznych. Występują różne wersje transformatorów mające na celu poprawę sprawności układu. Wyróżnia się układy, w których uzwojenie pierwotne ma cewkę nawiniętą na rdzeniu lub cewkę powietrzną. Natomiast od strony odbiornika, czyli od strony wtórnej transformatora nie stosuje się cewek rdzeniowych, gdyż jest ona montowana w urządzeniu i nie ma podnosić jego masy. Przy założeniu, że układ jest zasilany z sieci energetycznej system składa się z kilku bloków przekształtnikowych i systemu sterowania. Na wejściu każdego układu nadajnika jest przekształtnik napięciowy AC/DC, którego zadaniem jest przekształcenie sieciowego napięcia przemiennego na napięcie stałe. W dalszej kolejności znajduje się przekształtnik DC/AC, który zamienia napięcie stałe na napięcie przemiennie wysokiej częstotliwości. Napięcie przemiennie przyłożone jest do szeregowo połączonej cewki i kondensatora, których parametry dobrane są tak, aby działały w rezonansie. Układ odbiornika posiada odbiorczy układ rezonansowy z przekształtnikiem napięcia przemiennego na stałe i układem impulsowym służącym do zasilania odbiornika.

Budowa systemu przekazującego energię w postaci pola elektromagnetycznego jest skomplikowana ze względu na stosowane przekształtniki DC-AC służące dopasowaniu odpowiedniej częstotliwości pracy. W dużej mierze efektywne stosowanie bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej zależy od sprawności układu, czyli od jak najmniejszych strat energii. Największy wpływ na straty ma strumień pola elektromagnetycznego rozproszonego [3].

W celu analizy pracy i budowy takiego układu wykonano kilka niezbędnych badań dla dwóch wybranych sposobów kompensacji reaktancji cewki uzwojenia wtórnego.

2. ANALIZOWANE UKŁADY

W artykule przeprowadzono analizę impedancyjną układu bezprzewodowego zasilania. Porównano dwa sposoby kompensacji układu w konfiguracji [2]:

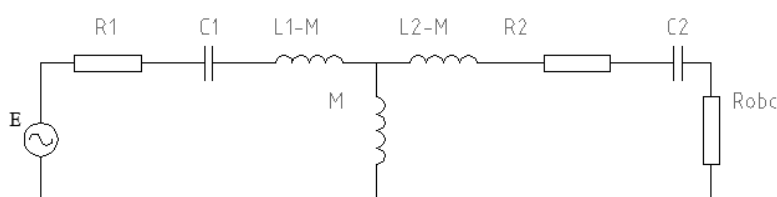
- szeregowo-szeregowej (rys. 1),
- szeregowo-równoległej (rys. 2).

Równania opisujące impedancje układu, dla dwóch rodzajów kompensacji odpowiednio szeregowej (1) i równoległej (2) mają postać:

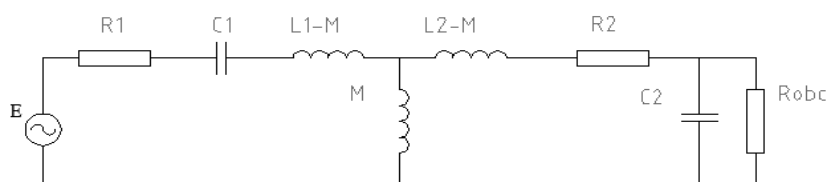
$$Z = Z_{11} + \frac{(X_M)^2}{R_2 + R_o + j(X_{L2} - X_{C2})} \quad (1)$$

$$Z = Z_{11} + \frac{(X_M)^2 C}{R_2 C - jR_o^2 X_{C2} + R_o + jX_{L2} C} \quad (2)$$

gdzie: $Z_{11} = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})$, $C = R_o^2 X_{C2}^2 + 1$.



Rys. 1. Układ z kompensacją szeregowo-szeregową



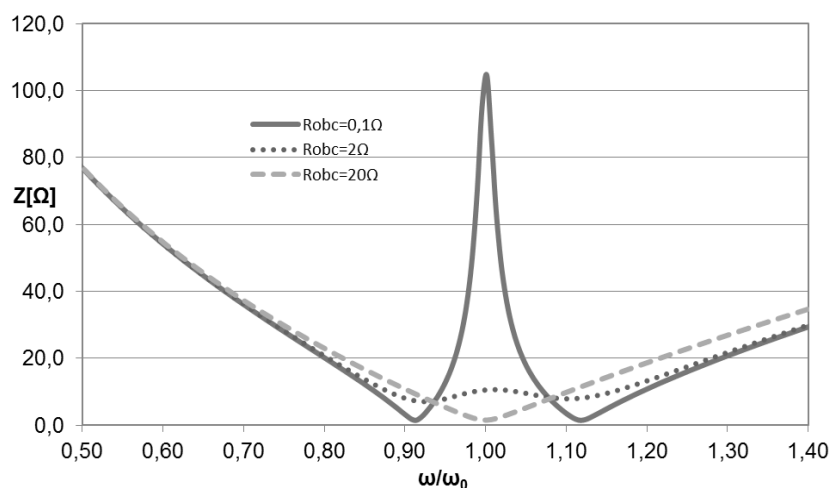
Rys. 2. Układ z kompensacją szeregowo-równoległą

Dla przedstawionych układów wyznaczono impedancje wejściowe i wykonano charakterystyki impedancyjne oraz sprawnościowe dla stałej wartości sprzężenia między cewkami $k = 0,2$. W celu przedstawienia najlepszego punktu pracy urządzeń korzystających z technologii bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej przyjęto identyczne cewki $L1$ i $L2$. Badania wykonano dla różnych rezystancji obciążenia i częstotliwości.

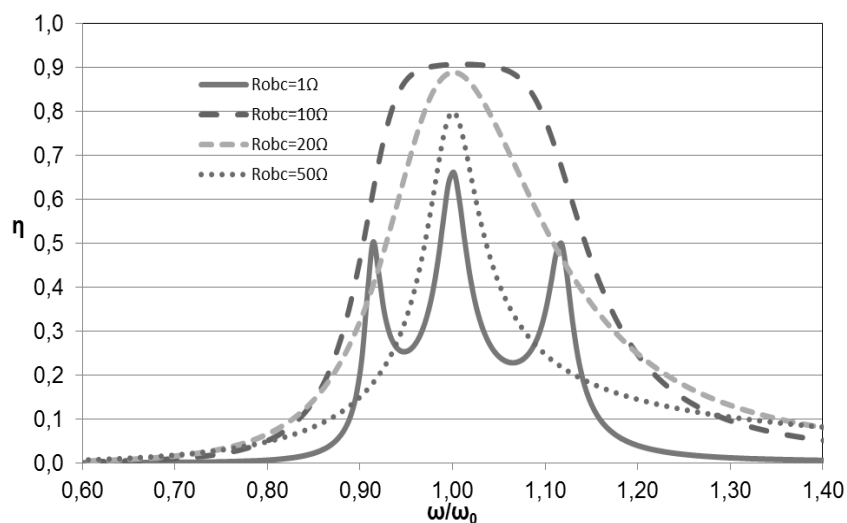
3. KOMPENSACJA SZEREGOWO-SZEREGOWA

Charakterystykę impedancyjną dla układu z kompensacją w konfiguracji szeregowo-szeregowej przedstawiono na rys. 3, natomiast na rys. 4 przedstawiono charakterystykę impedancyjną układu szeregowo-równoległego.

Na wykresie 3 można zauważyć, że układ w stanie rezonansu ma impedancję największą dla rezystancji obciążenia od $0,1 \Omega$ do około 2Ω , natomiast dla $R_{obc} > 2 \Omega$ impedancja układu dąży do wartości rezystancji $R1$. Na kolejnej charakterystyce (rys. 5) przedstawiono sprawność układu. Do rezystancji obciążenia 10Ω występują lokalne maksima funkcji, w częstotliwości bliskiej rezonansowej. Taka sytuacja wpływa niekorzystnie dla poprawnej pracy większości układów adaptacyjnych, które poszukują częstotliwość w celu określenia maksymalnej sprawności układu.

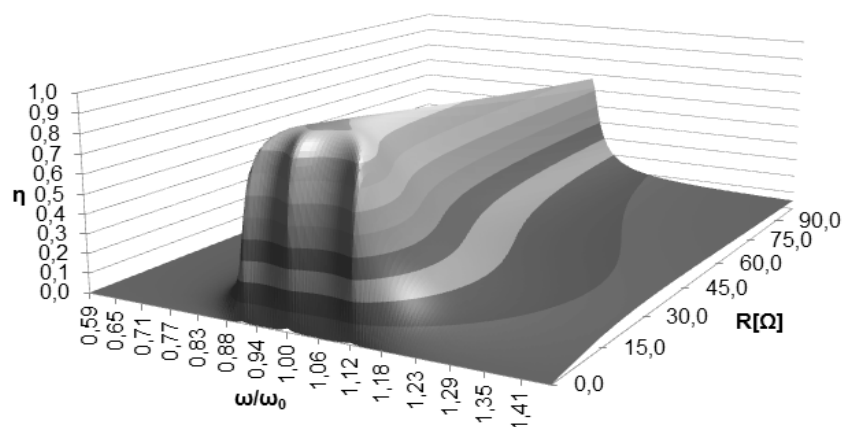


Rys. 3. Impedancja układu z kompensacją szeregowo-szeregową dla wybranych rezystancji obciążenia



Rys. 4. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-szeregową dla wybranych rezystancji obciążenia

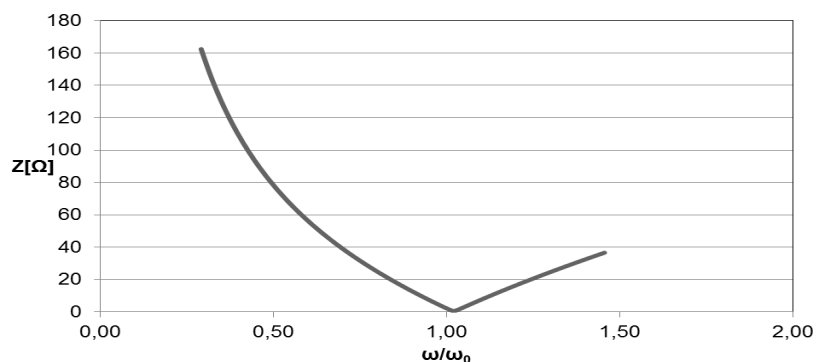
Z opracowanych charakterystyk (rys. 4 i rys. 5) wynika, że największą sprawność układu uzyskuje się dla częstotliwości rezonansowych. Wszelkie odchylenia od stanu rezonansu w uzwojeniu wtórnym mają niekorzystny wpływ na przenoszoną moc do odbiornika. W przedziale R_{obc} od 10 do 20 Ω uzyskano 90% sprawności natomiast każde kolejne zwiększanie R_{obc} obniża sprawność.



Rys. 5. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-szeregową

4. KOMPENSACJA SZEREGOWO-RÓWNOLEGLA

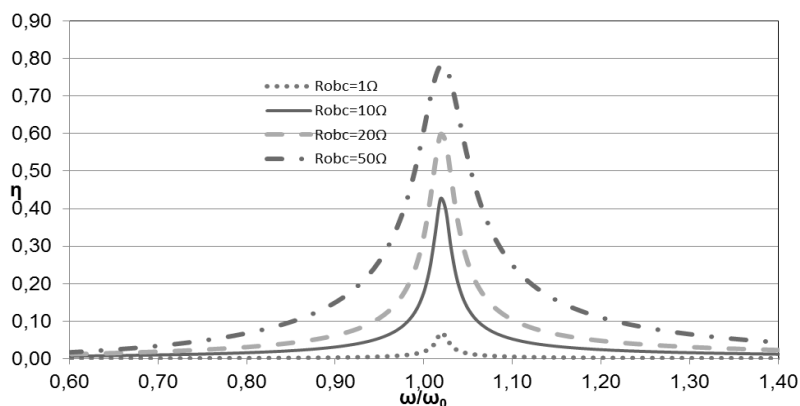
W pracy poddano również analizie układ z kompensacją szeregowo-równoległą, dla którego przeprowadzono identyczne badania jak dla układu z kompensacją szeregową. Wykonane charakterystyki przedstawiono na rys.6-10. Na rys. 6 przedstawiono tylko jedną charakterystykę, gdyż nie uległa ona zmianie przy badanej R_{obc} w zakresie 0–50 Ω .



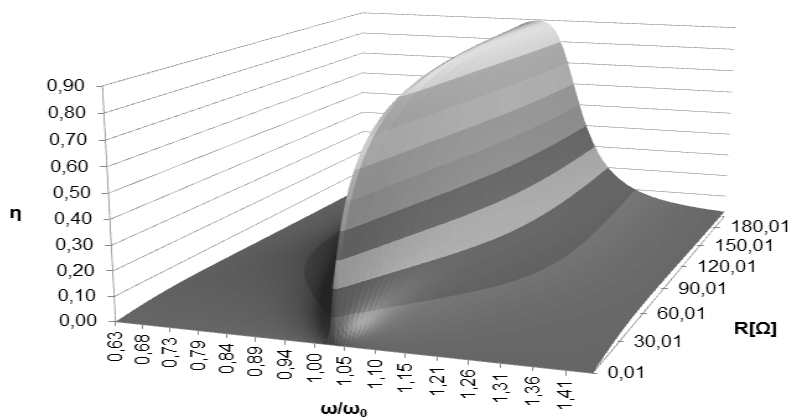
Rys. 6. Impedancja układu z kompensacją szeregowo-równoległą

Z charakterystyki (rys. 6) wynika, że dla rezystancji obciążenia od 0,1 do 50 Ω impedancja była najmniejsza dla stanu rezonansu. Niestety, aby uzyskać ten stan w każdym punkcie układu przy zmianie sprzężenia między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym oraz przy zmianie obciążenia należy dobierać każdorazowo wartość pojemności C2 (rys. 2). Niedokładny dobór kondensatora skutkuje

osiągnięciem punktu rezonansu przesuniętym w stosunku do częstotliwości zasilania. Co zostało przedstawione na rys. 7. Do prawidłowego dopasowania układu do stanu rezonansu zmiana wartości kondensatora C2 nie wystarcza i należy dopasować ją wraz z cewką L2 do częstotliwości zasilającej.



Rys. 7. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-równoległą dla wybranych rezystancji obciążenia

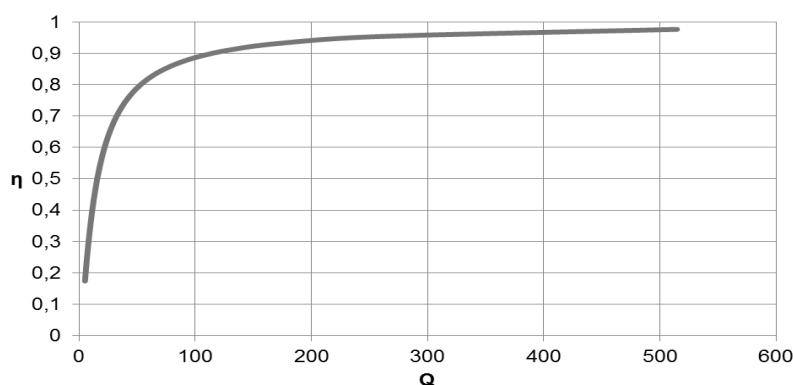


Rys. 8. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-równoległą

5. ANALIZA SPRAWNOCI BADANYCH UKŁADÓW

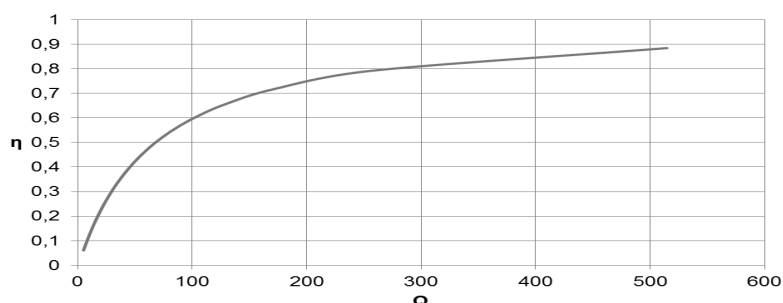
W pracy zbadano również zmianę sprawności układu zależną od dobroci układu rezonansowego, wyniki zaprezentowano na rysunkach 9–11.

Z charakterystyki dla kompensacji szeregowo-szeregowej (rys. 9) wynika, że zadowalającą 90% sprawność można uzyskać tworząc układ rezonansowy o dobroci $Q = 100$.



Rys. 9. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-szeregową w funkcji dobroci układu rezonansowego

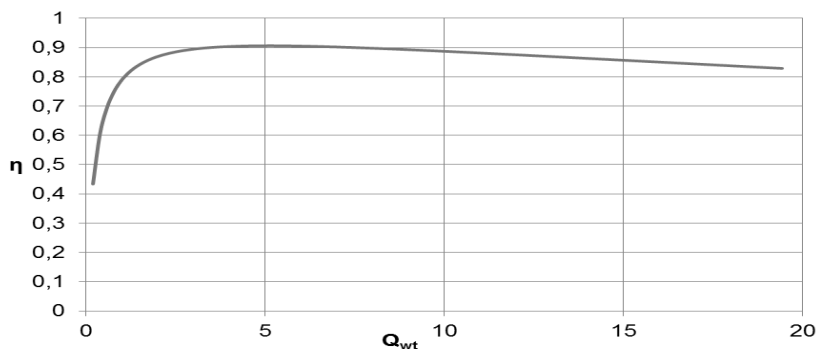
Podobnie wyznaczono charakterystykę sprawności w funkcji dobroci dla układu z kompensacją szeregowo-równoległą, z której wynika, że na sprawność ma wpływ dobroć strony wtórnej transformatora powietrznego. Z rysunku 10 wynika, że przy dobroci $Q = 100$ sprawność układu wynosiła 60%. Zwiększanie dobroci układu zwiększa jego sprawność, lecz osiągnięcie wyniku na poziomie 90% wymaga osiągnięcia dobroci większej od 500.



Rys. 10. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-równoległą w funkcji dobroci cewki w uzwojeniu pierwotnym

Dla wykresu z rysunku 11 przyjęto stałą dobroć dla układu szeregowego strony pierwotnej ($Q = 100$) i zmienną dobroć strony wtórnej. Pozwala to na określenie maksymalnej sprawności całego układu.

Z powyższej analizy wynika, że dla układu szeregowo-szeregowego wystarczy zastosować znane zależności na częstotliwość rezonansową, aby dopasować układ do rezonansu. Natomiast w układzie szeregowo-równoległym należy rozpatrywać osobno stronę pierwotną jako szeregową oraz wtórną jako równoległą, aby dopasować układ do rezonansu.



Rys. 11. Sprawność układu z kompensacją szeregowo-równoległą w funkcji dobroci cewki w uzwojeniu wtórnym dla stałej dobroci układu rezonansowego pierwotnego.

6. PODSUMOWANIE

Z przedstawionej analizy dwóch metod kompensacji układów bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej wynika, że przy stałych wartościach elementów reaktancyjnych dla wartości rezystancji obciążenia do 50Ω wydajniejsza jest kompensacja szeregowo-szeregowa. Powyżej tej wartości sytuacja się odwraca i układ z kompensacją szeregowo-równoległą staje się lepszym rozwiązaniem z wyższą sprawnością. Dopasowanie do stanu rezonansu w układzie szeregowo-równoległym jest utrudnione, ponieważ należy dopasować częstotliwość rezonansową układu szeregowego z układem równoległym. Stosując dla strony pierwotnej i wtórnej identyczne wartości indukcyjności występują problemy z osiągnięciem punktu rezonansu układu. Rozwiązaniem tej sytuacji jest dopasowanie układu do rezonansu przy zmianie indukcyjności cewki uzwojenia wtórnego, gdyż zmiana samej pojemności nie wystarcza.

Z charakterystyk sprawności układu rezonansowego w funkcji dobroci wynika, że ma ona kluczowe znaczenie dla sprawności całego układu. W przypadku struktury z rys.1 zadowalającą sprawność uzyskuje się dla dobroci powyżej 100. Jej dalsze zwiększanie może poprawić sprawność o maksymalnie 10%. Zwiększanie dobroci dla częstotliwości rzędu setek kiloherców staje się trudnym zadaniem technologicznym i zwiększa koszty budowy obwodu. Dla układu z rys.2 nie wystarcza zwiększanie dobroci układu szeregowego i równoległego, gdyż dopiero powyżej $Q = 500$ otrzymujemy zadowalającą sprawność na poziomie 90%. Wywnioskowano również, że sprawność układu szeregowo-równoległego zależy od rezystancji obciążenia (R_{obc}). Największa sprawność wynosiła 90% w zakresie dobroci od $Q = 3$ do $Q = 8$, co odpowiadało rezystancji obciążenia w przedziale od 100 do 700Ω .

LITERATURA

- [1] Filipiak M.: Analiza wybranych układów umożliwiających bezprzewodowy przesył energii elektrycznej, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, Poznań 28-29 kwietnia 2014, No 79 197-204.
- [2] Moradewicz A., Miśkiewicz R.: Systemy bezstykowego zasilania komputerów przenośnych. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 236, 2008 str. 51,
- [3] Judek S., Karwowski K.: Analiza systemu przekazywania energii na drodze indukcyjnej przy dużej szczelinie powietrznej i wysokiej częstotliwości, WPK, Kraków 2007.
- [4] Bolkowski S.: Teoria Obwodów Elektrycznych, WNT, Warszawa 2003.
- [5] Du Guiping, Li Xiongtao.: Modeling and Simulation of Contactless Power Transmission System by Inductance Coupling, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2009),, October 4-6, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [6] Bednarek K., Jajczyk J.: Effectiveness of optimization methods in heavy-current equipment designing, Przegląd Elektrotechniczny, 12/2009, ISSN 0033-2097, R. 85 NR 12/2009, s. 29-32.
- [7] Mendes R., Klaric Felic G., Analysis of Coupling Coefficient in Inductive Energy Transfer Systems, Hindawi Publishing Corporation Active and Passive Electronic Components, Volume 2014, Article ID 951624.

O RESONANCE PHENOMENON WIRELESS POWER SYSTEM

The article presents the perspective of the use of wireless power electronic devices. Briefly describes the advantages of using this technology with its operating principle and construction of typical systems used in the devices of everyday use. Are two types of resonant circuits used for wireless transmission of energy. They presented the advantages and disadvantages of using each of these systems. An analysis of impedance and agility circuits wireless transmission of electricity. Performances are shown depending on several parameters in the three-dimensional form. It has been demonstrated minimal goodness resonance system, achieving high system efficiency at low coupling between the coils primary and secondary windings. We compared the two tested circuits and designated areas of application for each of them. Identified several difficulties associated with maintaining the circuit in resonance and reducing losses.

(Received: 10. 02. 2016, revised: 7. 03. 2016)