

Michał FILIPIAK\*

## **ANALIZA WYBRANYCH UKŁADÓW UMOŻLIWIAJĄCYCH BEZPRZEWODOWY PRZESYŁ ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

W artykule przedstawiono podstawowe układy umożliwiające przesyłanie energii elektrycznej bezprzewodowo z wykorzystaniem zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Na wstępie określono możliwości doboru cewek do układu. A następnie przeprowadzono symulacje obwodów rezonansowych z kompensacją szeregową i równoległą. Przeanalizowano sprawności poszczególnych układów oraz przedstawiono zalety stosowania układów rezonansowych.

SŁOWA KLUCZOWE: układy rezonansowe, kompensacja, bezprzewodowe zasilanie

### **1. WSTĘP**

Zmiany w produkcji energii elektrycznej oraz jej przesyłu zostały wprowadzone na przełomie XIX i XX wieku przez Nikoła Teslę. Dzięki niemu możliwe stało się przesyłanie energii na duże odległości. W dobie gdzie infrastrukturę energetyczną dopiero zaczynano rozbudowywać powstał pomysł, aby przesłać energię bez użycia kabla. Niestety w tamtych czasach ta technologia nie doczekała się rozwoju gdyż większy zysk upatrywano w energetyce przewodowej. Prawie wiek później bezprzewodowe zasilanie wraca do rozważań naukowych. Już dziś popularne stają się urządzenia takie jak ładowarki do urządzeń mobilnych, elektryczne szczoteczki do zębów czy myszki bezprzewodowe. Technologia bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej opiera się na zasadzie indukcji elektromagnetycznej. Niestety sprawność takiego rozwiązania jest niewielka. Sprężenie między cewką pierwotną i wtórną transformatora bez rdzenia jest również bardzo małe, co przekłada się na duże straty. W artykule rozważono kilka układów poprawiających sprawność przesyłu energii elektrycznej bezprzewodowo.

### **2. TRANSFORMATOR POWIETRZNY**

Transformatory powietrzne, możemy podzielić na transformatory rdzeniowe i bezrdzeniowe. Do przesyłu energii elektrycznej bezprzewodowo za pomocą indukcji elektromagnetycznej mają zastosowanie transformatory bezrdzeniowe. Taki transformator charakteryzuje się dużą indukcyjnością rozproszenia oraz

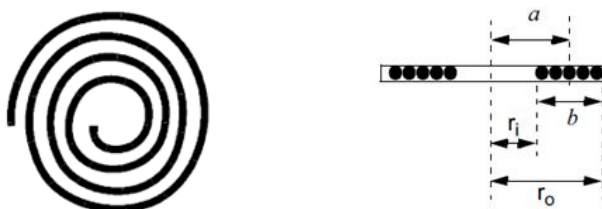
---

\* Politechnika Poznańska.

dużymi stratami. W przypadku przesyłu energii elektrycznej cechy te nie są korzystne gdyż przy większych odległościach rzędu kilku centymetrów rozproszenie jest na tyle wysokie, że sprawność urządzenia spada do kilku procent. W celu uzyskania jak największej sprawności urządzenia część nadajnika wprowadza się w stan rezonansu. W układzie rezonansowym wartość pojemności można dobrać z dużego przedziału produkowanych kondensatorów różnego typu. Natomiast w przypadku cewki, aby otrzymać zadaną indukcyjność, jest to znacznie bardziej skomplikowane, z uwagi na dobór wielkości, kształtu i ilości zwojów. W tym przypadku bardzo pomocne są wzory określające parametry kształtu i grubości użytego drutu. W celu określenia dokładności podanych wzorów przez firmę MICROCHIP przebadano kilka cewek powietrznych różnego typu.

W układach zasilania bezprzewodowego najczęściej spotyka się cewki spiralne oraz cewki wielowarstwowe okrągłe lub prostokątne. Do wykonania cewek wykorzystano następujące zależności [5]:

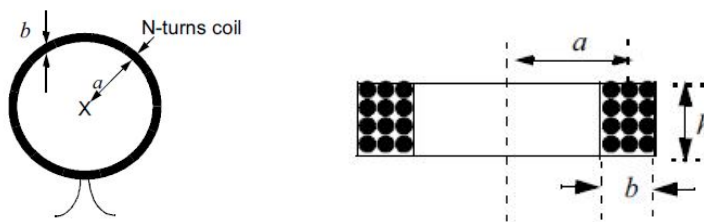
– Cewka spiralna:



Rys. 1. cewka spiralna jednowarstwowa gdzie:  $a - (r_i + r_o)/2$  [cm],  $b - r_o + r_i$  [cm],  $N$  – liczba zwojów,  $r_i$  – promień wewnętrzny,  $r_o$  – promień zewnętrzny [5]

$$L = \frac{0.3937(aN)^2}{8a + 11b} [\mu H]$$

– Cewka okrągła wielowarstwowa:



Rys. 2. Cewka okrągła wielowarstwowa, gdzie:  $a$  – średnia długość promienia [cm],  $N$  – liczba zwojów,  $b$  – grubość uzwojenia [cm],  $h$  – wysokość uzwojenia [cm] [5]

$$L = \frac{0.31(aN)^2}{6a + 9h + 10b} [\mu H]$$

Zostały one wykonane z drutu emaliowanego o przekroju 0,6 mm. Wartości obliczone oraz pomierzone zostały zamieszczone w tabeli poniżej. Pomiar wykonano miernikiem Motech MT4080A.

Cewka spiralna							
Wymiary cewki						Wartość obliczona	Wartość zmierzona
a[cm]	b[cm]	N	r <sub>o</sub>	r <sub>i</sub>	D drutu [cm]	L[uH]	L[uH]
5,46	1,08	18	6	4,92	0,06	68,44	77,98

Cewka wielowarstwowa						
Wymiary cewki					Wartość obliczona	Wartość zmierzona
a[cm]	b[cm]	N	h[cm]	D drutu [cm]	L[uH]	L[uH]
4,12	0,24	20	0,3	0,06	70,58	72,31

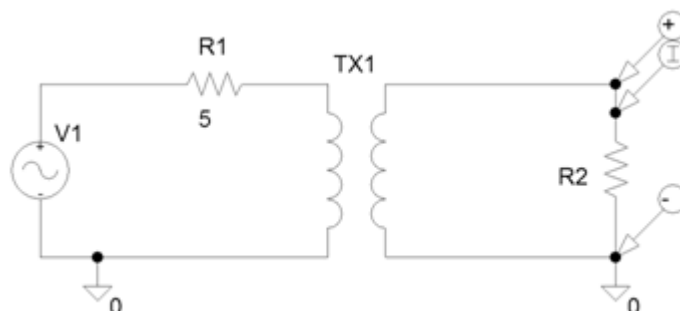
Zgodnie z praktyką przy nawijaniu cewek dwinęto 10% zwojów więcej gdyż w przypadku ich braku może okazać się że indukcyjność jest zbyt mała w stosunku do obliczonej. Jeśli natomiast będzie za duża to kilka zwojów zawsze można odwinąć. Zgodnie z obliczeniami indukcyjności były bardzo zbliżone do siebie. Wartości zmierzone były nieco wyższe, co stwarza możliwość dokładnego dopasowania indukcyjności do przyszłego układu. Pozostaje jeszcze określenie pojemności cewki, która będzie miała również wpływ na dostrojenie układu. Wykonane cewki mają posłużyć w kolejnych badaniach przy budowie prototypowego urządzenia. W tym celu przeprowadzono kilka symulacji.

### 3. SYMULACJE UKŁADÓW PRZESYŁU ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W celu sprawdzenia wad i zalet możliwych do zastosowania układów do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej zasymulowano kilka różnych obwodów elektrycznych. Sprawdzone różnice w stosowaniu obwodu bez i w rezonansie z uwzględnieniem kompensacji oraz porównano moce uzyskane na wyjściu z nadajnika. Powyższe parametry zostały przetestowane w programie PSpice 9.1 w wersji studenckiej, który charakteryzował się ograniczeniami w zakresie stosowanej ilości bibliotek i elementów elektronicznych. Dobór parametrów układu został tak dobrany, aby każdy z układów oddawał największą moc.

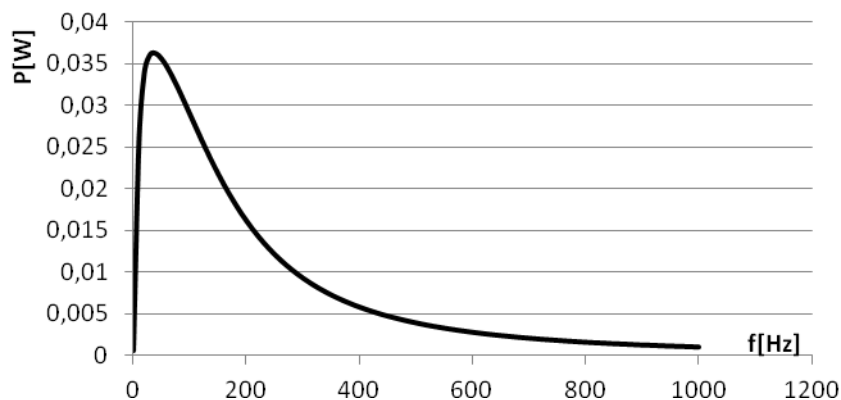
### 3.1. Układ RL

Na rysunku 3 przedstawiono schemat transformatora powietrznego obciążony rezystancją  $R_2 = 100 \Omega$  i zasilany napięciem  $U_{AC} = 10 \text{ V}$ , indukcyjność uzwojenia pierwotnego oraz wtórnego wynosiła  $L = 62 \mu\text{H}$ . Sprężenie między cewkami przyjęto na poziomie  $k = 0,2$  ze względu na dużą indukcyjność rozproszenia.



Rys. 3. Schemat obwodu transformatora powietrznego

Wobec bardzo małego sprężenia cewek powietrznych w układzie przesyłu energii elektrycznej sprawdzono, w jakich zakresach częstotliwości można uzyskać największą moc na odbiorniku R2. Zależność tę przedstawia charakterystyka na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ częstotliwości na moc wydzielaną na odbiorniku

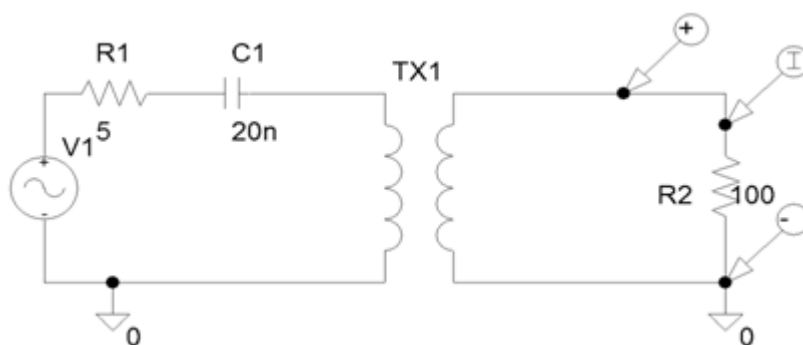
Z przedstawionego wykresu wynika, że maksymalna moc dla danego układu na odbiorniku wynosi około  $0,036 \text{ W}$ . Natomiast moc nadajnika wynosiła  $7 \text{ W}$ . Oznacza to, że większość energii uległa rozproszenia a sprawność takiego układu wynosi  $0,51\%$ .

### 3.2. Układ z zastosowanym rezonans szeregowy od strony zasilającej

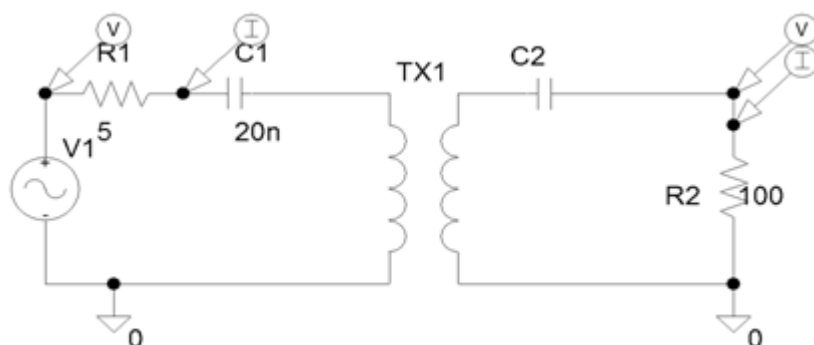
Kolejny schemat przedstawia identyczny obwód jak w punkcie 3.1 lecz z dołączonym kondensatorem wprowadzającym rezonans szeregowy w obwodzie pierwotnym. Częstotliwość pracy przyjęto z norm ISO 18000 stosowaną dla urządzeń opartych na technologii RFID (ang. *Radio-frequency identification*). Wartość kondensatora dla częstotliwości rezonansowej 145,7 kHz dobrano ze wzoru na pulsację rezonansową, który wynosi  $C_1 = 20 \text{ nF}$ . W dalszej części przeanalizowano również obwody z kompensacją szeregowo-szeregową oraz szeregowo-równoległą.

Po podłączeniu układu zauważalne jest zwiększenie mocy pobieranej przez odbiornik oraz wzrost mocy na odbiorniku, co zostało pokazane na rysunku 8. Sprawność układu dla rezystancji  $100 \Omega$  i sprzężenia 0,2 wynosiła odpowiednio dla:

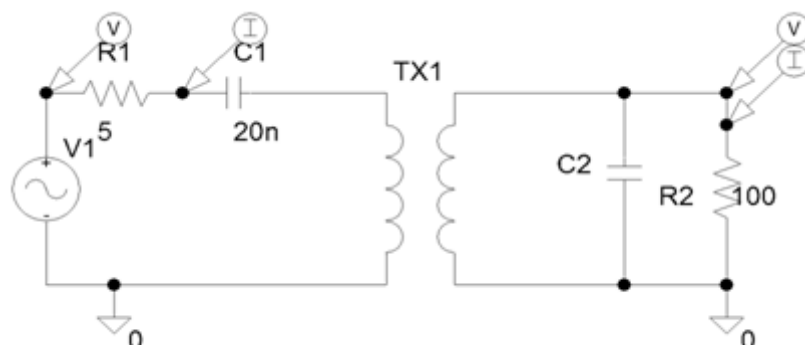
- obwodu bez kompensacji 16%,
- obwodu z kompensacją szeregową 24,5%,
- obwodu z kompensacją równoległą 44%.



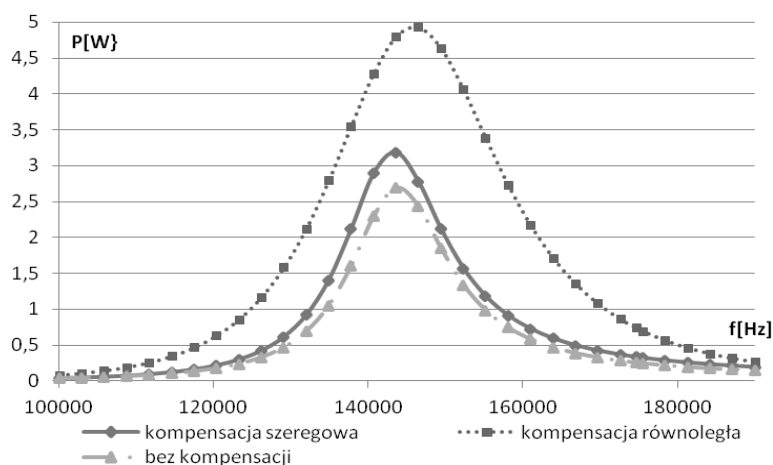
Rys. 5. Schemat obwodu transformatora powietrznego z obwodem rezonansowym bez kompensacji



Rys. 6. Schemat obwodu transformatora powietrznego z obwodem rezonansowym z kompensacją szeregową



Rys. 7. Schemat obwodu transformatora powietrznego z obwodem rezonansowym z kompensacją równoległą



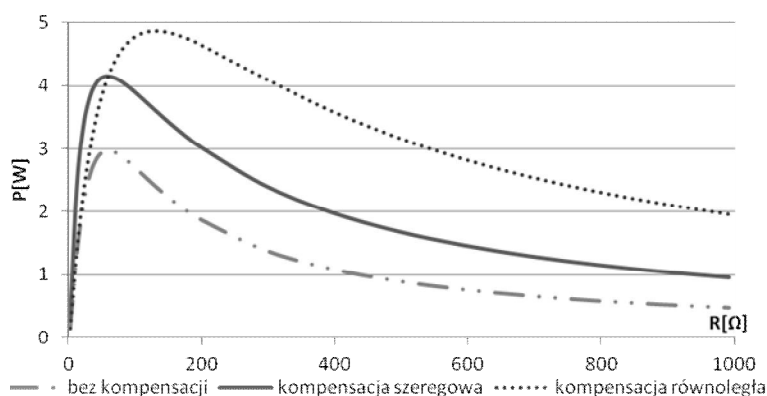
Rys. 8. Wpływ częstotliwości na moc wydzielana na odbiorniku dla układu w rezonansie napięciowym

Dla częstotliwości rezonansowej moc na odbiorniku wzrosła. Chociaż układ pobierał więcej energii to jego sprawność była kilkukrotnie większa od układu bez rezonansu. Sprawdzono również wariant dla układu pobierającego identyczną moc jak w pkt. 3.1 w celu porównania mocy wyjściowych na odbiorniku. W drugim przypadku również sprawność przesyłu energii była znacznie większa niż w punkcie 3.1. Dobroć układu wynosi  $Q = 11,35$ .

Wykonano symulacje dla różnego obciążenia odbiornika w zakresie do  $1\text{ k}\Omega$ , którą przedstawiono na rysunku poniżej.

Powyższy wykres został wykonany dla częstotliwości  $143,8\text{ kHz}$  i sprężeniu cewek  $k = 0,2$ . Zmiana rezystancji obciążenia jak również zmiana sprężenia

między cewkami wyprowadza układ z częstotliwości rezonansowych a tym samym zmniejsza się moc wydzielana na odbiorniku. Taka sytuacja może wystąpić szczególnie w urządzeniach mobilnych ładowanych z podstawek indukcyjnych. Niedokładne ułożenie odbiornika na podstawie w celu jego naładowania powoduje mniejszy przesył energii a tym samym niedoładowanie urządzenia lub większe straty energii. W tym celu należy zapewnić odpowiednie sterowanie częstotliwością albo wykorzystać pozycjonowanie mechaniczne.



Rys. 9. Wpływ rezystancji obciążenia na moc wydzielaną na odbiorniku

#### 4. PODSUMOWANIE

Dobór elementów w układach zasilania indukcyjnego przy stałej częstotliwości może powodować wiele problemów konstrukcyjnych. Bardzo często zdarza się, że zakupione podzespoły nie posiadają zadanych parametrów, gdyż tolerancja ich wykonania jest bardzo duża. Podobnie w przypadku doboru cewki parametry związane zarówno z kształtem jak i dokładnością nawinięcia powoduje zmiany indukcyjności oraz pojemności między zwojami. W układach wykorzystujących indukcję elektromagnetyczną dochodzi również sprzężenie cewek powietrznych, który wpływa na moc w części nadajnika. Z powyższych zależności wynika, że takie układy powinny być sterowane tak, aby częstotliwość była ustalana dla danego układu indywidualnie w celu uzyskania jak najmniejszych strat w układzie.

#### 5. WNIOSKI

Układy rezonansowe są najbardziej efektywnymi układami (bezprzewodowego) przesyłania energii elektrycznej. Odpowiednio dobrane parametry układu RLC pozwolą działać ze znacznie większą sprawnością niż układy RL. Największą sprawność uzyskał układ z kompensacją szeregowo-równoległą. Natomiast w zakresie

obciążenia do około  $100\Omega$  najbardziej wydajny był układ z kompensacją szeregowo-szeregową. Poprzez wprowadzenie układu nadajnika w stan rezonansu można uzyskać kilkudziesięciokrotne zwiększenie sprawności przesyłanej mocy. Przy bardzo niskim sprzężeniu cewek i małej dobroci układu uzyskano dostateczną moc wyjściową do zasilania urządzeń codziennego użytku. Niestety, istnieje wiele niebezpieczeństw przy stosowaniu układów rezonansowych, do których zaliczamy między innymi możliwość wystąpienia przepięć w obwodzie. Skutkiem takiego stanu jest uszkodzenie sprzętu elektronicznego. Brak odpowiednio zaprojektowanego układu może wywołać uszkodzenia przy zmianie odległości między cewkami. Zaletami układów RLC będzie również większy zasięg zasilania. Podstawą kolejnych badań nad układami bezprzewodowego zasilania wykorzystujące zjawisko rezonansu będzie analiza analityczna układu wraz z jego budową.

### LITERATURA

- [1] Bolkowski S.: *Teoria Obwodów Elektrycznych*, WNT, Warszawa 2003.
- [2] Moradewicz A., Miśkiewicz R.: *Systemy bezstykowego zasilania komputerów przenośnych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 236, 2008, str 51.
- [3] Kuen-Cheng Wang, Che-Wei Hsu Tung- Jung Chan Tsung-Shih Chien Tsair-Rong Chen *Study of Applying Contactless Power Transmission System to Battery Charge* PEDS2009, str. 257.
- [4] Du Guiping, Li Xiongtao, Sheng Songtao *Modeling and Simulation of Contactless Power Transmission System by Inductance Coupling* ISIEA 2009 str. 123.
- [5] MICROCHIP,: *Antena circuit design for RFID applications*, datasheet.
- [6] Judek S., Karwowski K.: *Analiza systemu przekazywania energii na drodze indukcyjnej przy dużej szczelinie powietrznej i wysokiej częstotliwości*, WPK, Kraków 2007.

### ANALYSIS CHOSEN OF WIRELESS TECHNOLOGY TRANSFER THE ELECTRICITY

This paper presents the basic systems which transmit electricity wirelessly using electromagnetic induction phenomenon, a preliminary set of selection possibilities of coils into the system. And then conducted simulations of resonant circuits with compensation for serial and parallel. Were analyzed the efficiency of the different systems and presents the advantages of using resonant circuits.