

Milena KURZAWA\*  
Rafał M. WOJCIECHOWSKI\*

## UKŁAD BEZPRZEWODOWEJ TRANSMISJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z SZEREGOWO-RÓWNOLEGLYM OBWODEM REZONANSOWYM WSPÓŁPRACUJĄCY Z MOSTKOWYM FAŁOWNIKIEM NAPIĘCIA

W artykule przedstawiono układ bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej (UBTE) współpracujący z mostkowym falownikiem napięcia. Rozpatrzono układ z szeregowo-równoległym połączeniem kondensatorów kompensujących. Omówiono sposób doboru optymalnych wartości pojemności rezonansowych oraz rezystancji obciążenia. Do wyznaczania optymalnych wartości pojemności i rezystancji obciążenia opracowano autorską aplikację. Na potrzeby obliczeń projektowych rozpatrywanego układu opracowano model symulacyjny, który zaimplementowano w środowisku *Matlab*. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych. Zbudowano układ falownika mostkowego pracującego w UBTE. Przeprowadzono weryfikację wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

SŁOWA KLUCZOWE: bezprzewodowa transmisja energii elektrycznej, model symulacyjny, mostkowy falownik napięcia, transformator powietrzny, układ rezonansowy

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach do zasilania urządzeń mobilnych coraz częściej wykorzystuje się systemy bezprzewodowego przesyłu energii. Taki sposób ładowania baterii urządzeń jest korzystny ze względu na bezpieczeństwo, niezawodność oraz wygodę, związaną z mobilnością urządzeń bez konieczności stosowania połączeń przewodowych. Przesył energii w tego typu układach odbywa się zazwyczaj na niewielkie odległości (od 0.5 cm do 4 cm). Najczęściej jest realizowany za pomocą bezrdzeniowych cewek sprzężonych magnetycznie umieszczonych w powietrzu. Przesył energii w ośrodku, jakim jest powietrze sprawia, że wartość sprzężenia magnetycznego pomiędzy cewkami maleje wykładniczo wraz ze wzrostem odległości pomiędzy nimi. Powoduje to powstanie dużych wartości indukcyjności rozproszeń, które znacząco obniżają sprawność transmi-

---

\* Politechnika Poznańska.

sji energii pomiędzy cewkami transformatora powietrznego (TP). W celu zwiększenia sprawności układu oraz ilości transmitowanej energii pomiędzy cewkami układu, zarówno po stronie pierwotnej TP – w obwodzie nadajnika, jak i po stronie wtórnej TP – w obwodzie odbiornika energii tworzy się obwody rezonansowe kompensujące indukcyjności rozproszeń. W ogólnodostępnej literaturze można znaleźć 4 podstawowe sposoby połączeń obwodów rezonansowych. Sposoby te przedstawiono w tabeli 1. Dzięki zastosowaniu pojemności kompensujących można maksymalizować sprawność układu i tym samym minimalizować straty mocy powstałe podczas przesyłu energii [4].

Tabela 1. Schematy obwodów rezonansowych UBTE

		Kondensator po stronie pierwotnej	
		Szeregowy	Równoległy
Kondensator po stronie wtórnej	Szeregowy		
	Równoległy		

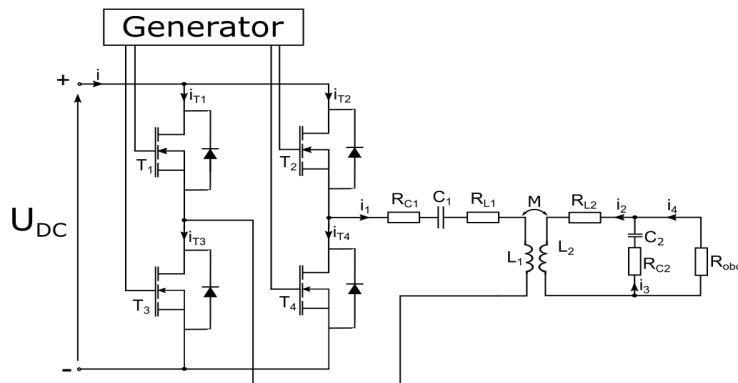
Dobór wartości kondensatora w obwodzie nadajnika jest uzależniony od rodzaju zastosowanego źródła zasilania, tj. falownika napięcia lub prądu. Po stronie wtórnej natomiast od przyjętej wartości obciążenia [1] oraz ilości transmitowanej energii pomiędzy obwodami. Na wartość sprawności ma również wpływ częstotliwość, z jaką pracuje układ. Częstotliwość ta w przeważającej większości układów zależy od rodzaju oraz konfiguracji zastosowanego falownika [6].

W pracy rozpatrzono układ bezprzewodowej transmisji energii z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym zasilany z falownika mostkowego typu H. Wartości pojemności kompensujących i rezystancji obciążenia, wyznaczano na podstawie zależności przedstawionych w [2]. Dążono do osiągnięcia maksymalnej sprawności układu. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych. Opracowano i zbudowano układ falownika mostkowego współpracujący z TP. Przeprowadzono weryfikację wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

## 2. MODEL SYMULACYJNY UBTE

W pracy, jak już wspomniano wcześniej, rozpatruje się układ składający się z transformatora powietrznego, obwodów rezonansowych: szeregowego po stronie nadajnika energii oraz równoległego po stronie odbiornika, obwodu zasilającego i obciążenia. W badanym układzie obwód zasilający stanowi falownik napięcia z mostkiem typu H złożonym z 4 modułów tranzystorowych wraz z diodą zwrotną. Falownik zasila UBTE napięciem o przebiegu prostokątnym. Schemat rozpatrywanego układu przedstawiono na rysunku 1.

W rozpatrywanym UBTE poza indukcyjnościami własnymi cewek  $L_1$  i  $L_2$ , indukcyjnością wzajemną  $M$  transformatora powietrznego, wartościami pojemności kompensujących  $C_1$  i  $C_2$  i rezystancją obciążenia  $R_{obc}$ , uwzględniono również straty mocy na rezystancjach cewek  $R_{L1}$  i  $R_{L2}$  transformatora TP oraz rezystancje  $R_{C1}$  i  $R_{C2}$ , reprezentujące upływność kondensatorów. Dla tak przyjętego modelu układu sformułowano równania napięciowe obwodu zasilania i nadawczego o postaci:



Rys. 1. Schemat UBTE współpracujący z falownikiem napięcia

$$U_{DC} = u_{T2}(t) + u_{C1}(t) + R_{C1}i_1 + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + R_{L1}i_1(t) - u_{T3}(t) - M \frac{di_2(t)}{dt} \quad (1)$$

$$U_{DC} = u_{T1}(t) + u_{T3}(t) \quad (2)$$

$$U_{DC} = u_{T2}(t) + u_{T4}(t) \quad (3)$$

które uzupełniono o równania prądowe:

$$i(t) = i_{T1}(t) + i_{T2}(t) \quad (4)$$

$$i_{T2}(t) = i_1(t) + i_{T4}(t) \quad (5)$$

gdzie:  $U_{DC}$  - wartość napięcia stałego (DC) zasilającego falownik,  $u_{Tv}$  oraz  $i_{Tv}$  ( $v = 1,2,3,4$ ) - odpowiednio spadek napięcia oraz prąd przepływający przez  $v$ -

ty tranzystor,  $u_{C1}$  spadek napięcia na pojemności kondensatora  $C_1$ , a  $i_1$  i  $i_2$  to prądy po stronie pierwotnej i wtórnej TP.

Następnie przystąpiono do sformułowania równań napięciowych i prądowych dla obwodu odbiornika, które zapisano następująco:

$$0 = M \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - R_{L2}i_2(t) - R_{C2}i_3(t) - u_{C2}(t) \quad (6)$$

$$0 = u_{C2}(t) + R_{C2}i_3(t) - R_{obc}i_4(t) \quad (7)$$

$$i_2(t) = i_3(t) + i_4(t) \quad (8)$$

w którym:  $u_{C2}$  - spadek napięcie na pojemności kondensatora  $C_2$ , a  $i_3$  i  $i_4$  odpowiednio prądem płynący w gałęzi z kondensatorem  $C_2$  i prądem na rezystancji obciążenia  $R_{obc}$ .

Opracowując model symulacyjny UBTE przyjęto, że tranzystory wraz z diodą zwrotną, stanowiące mostek H falownika napięcia, będą rozpatrywane jako elementy rezystancyjne o wartościach  $R_{sv}$  uzależnionych od przyjętego stanu pracy, tj. stanu przewodzenia lub blokowania. Wówczas dla  $v$ -tego modułu tranzystor – dioda wartość rezystancji określano z relacji:

$$R_{sv} = \begin{cases} r_s, & \text{dla stanu przewodzenia} \\ r_{off}, & \text{dla stanu blokowania} \end{cases} \quad (9)$$

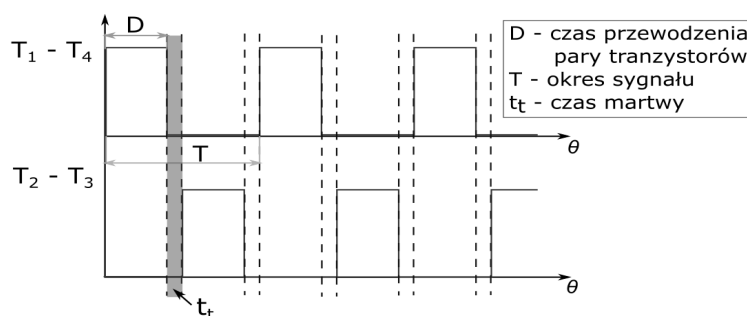
gdzie:  $r_s$  jest rezystancją tranzystora w stanie przewodzenia, a  $r_{off}$  rezystancją w stanie blokowania modułu tranzystor – dioda. Przy czym w stanie blokowania wyróżniono jeszcze dwa podstany: (a) stan pełnego blokowania tranzystora przy wartości napięcia większej od napięcia  $U_D$  i (b) stan przewodzenia diody zwrotnej, gdy napięcia na module przyjmuje wartość ujemną mniejszą od wartości napięcia progowego diody  $U_D$ , tj.:

$$r_{off} = \begin{cases} r_B & \text{dla } u_{vT} \geq U_D \\ r_D & \text{dla } u_{vT} < U_D \end{cases} \quad (10)$$

w którym:  $r_B$  jest rezystancją tranzystora w stanie pełnego blokowania oraz  $r_D$  jest rezystancją w stanie przewodzenia diody zwrotnej. Wówczas wartości spadków napięć na  $v$ -tym module tranzystor – dioda określano z następującej zależności:

$$u_{Tn}(t) = R_S i_{Tn} \quad (11)$$

Opracowując układ sterowania mostkiem falownika zastosowano sposób naprzemiennego załączania par tranzystorów  $T_1 - T_4$  i  $T_2 - T_3$  (rys. 3) [6]. Pomiedzy kolejnymi przełączeniami par tranzystorów uwzględniono występowanie tzw. czasu martwego  $t_i$ , który w układzie rzeczywistym odpowiada za odzyskanie zdolności zaworowych przez dany tranzystor.



Rys. 2. Przebieg napięć sterujących odpowiednie pary tranzystorów w mostku H

W pracy wartości pojemności obwodów rezonansowych określano na podstawie zależności analitycznych podanych w [2]. Zależności te pozwalają na dobór pojemności kompensujących w sposób umożliwiający pracę układu z współfazowym napięciem i prądem w obwodzie nadawczym. Warunek ten jest spełniony, gdy:

$$C_1 = \frac{L_2}{\omega^2(L_1L_2 - M^2)} \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2L_2} \quad (13)$$

W celu maksymalizacji sprawności określono optymalną wartość rezystancji obciążenia opisaną wzorem (12). Wartość sprawności oszacowano korzystając z relacji (13).

$$R_{obc} = \omega L_2 \sqrt{\frac{\omega^2 R_{L1} L_2^2 + \omega^2 M^2 R_{L2} + R_{L1} R_{L2}^2}{R_{L1} R_{L2}^2 + R_{L2} \omega^2 M^2}} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{L1} L_2^2}{M^2 R_{obc}} + 2 \frac{R_{L1} R_{L2}}{\omega^2 M^2} + \frac{R_{L2}}{R_{obc}} + \frac{R_{L2} R_{obc}}{\omega^2 L_2^2} + \frac{R_{L1} R_{L2}^2}{\omega^2 M^2 R_{obc}} + \frac{R_{L1} R_{L2}^2 R_{obc}}{\omega^4 L_2^2 M^2}} \quad (15)$$

Na potrzeby obliczeń optymalnych wartości pojemności kompensacyjnych oraz rezystancji obciążenia opracowano autorską aplikację w środowisku *Visual Studio C#*. Widok okna opracowanego programu przedstawiono na rysunku 3.

Parametry wejściowe		Wyniki obliczeń	
L1 [H]	17.7E-6	C1 [F]	1.881E-7
R1 [ohm]	0.31	C2 [F]	1.415E-7
L2 [H]	17.9e-6	Robc [ohm]	25.36
R2 [ohm]	0.32	Sprawność [%]	88.08
f [Hz]	100000	OBLICZ	
k [-]	0.489		

Rys. 3. Okno aplikacji umożliwiającej dobór optymalnych wartości pojemności kompensacyjnych oraz rezystancji obciążenia

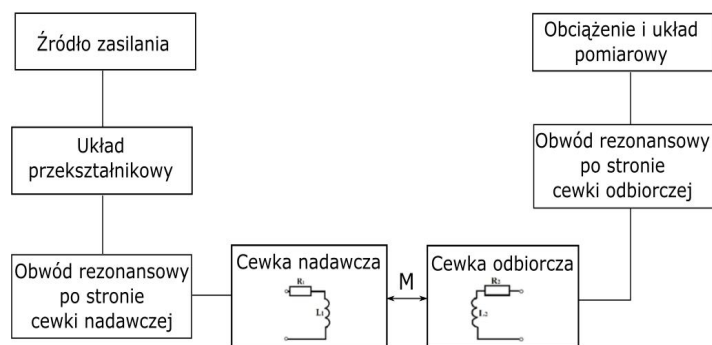
Opracowując aplikację, wartości pojemności  $C_1$  i  $C_2$  oraz rezystancji  $R_{obc}$  określano na podstawie znanej wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego  $k$  pomiędzy cewkami, indukcyjności własnych cewek  $L_1$  i  $L_2$ , ich rezystancji  $R_1$  i  $R_2$  oraz przyjętej wartości częstotliwości  $f$ . Wartości tych elementów obliczano dla istniejącego układu transformatora powietrznego [3].

#### 4. STANOWISKO POMIAROWE UBTE

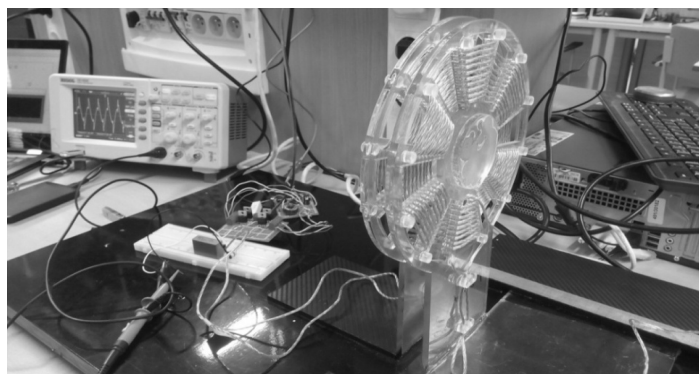
W celu weryfikacji uzyskanych wyników symulacyjnych opracowano oraz zbudowano układ falownika mostkowego współpracującego z transformatorem powietrznym. Stanowisko zrealizowano z myślą o możliwości podglądu i rejestracji przebiegów napięć i prądów na poszczególnych elementach układu. Zastosowano istniejący układ TP z możliwością zmiany odległości pomiędzy cewkami.

Rozpatrywany w pracy układ składał się z dwóch cewek sprzężonych magnetycznie i elementów obwodów rezonansowych. Jako źródło zasilania zastosowano falownik mostkowy typu H stanowiący źródło napięcia. Przyjęto, że w celu poprawy efektywności układu, włączone zostaną rezonansowe pojemności kompensujące odpowiednio: po stronie nadajnika szeregowo, a po stronie odbiornika równoległe. Schemat blokowy stanowiska badawczego zilustrowano na rysunku 4.

Opracowując układ falownika mostkowego przyjęto, że będzie on kluczowany z częstotliwością 100 kHz. Wartość napięcia zasilającego falownik wynosiła 5 V DC. Funkcję kluczowania sygnału napięciowego umożliwił moduł Arduino z dołączonymi odpowiednio układami driverów TC4420. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Schemat blokowy UBTE

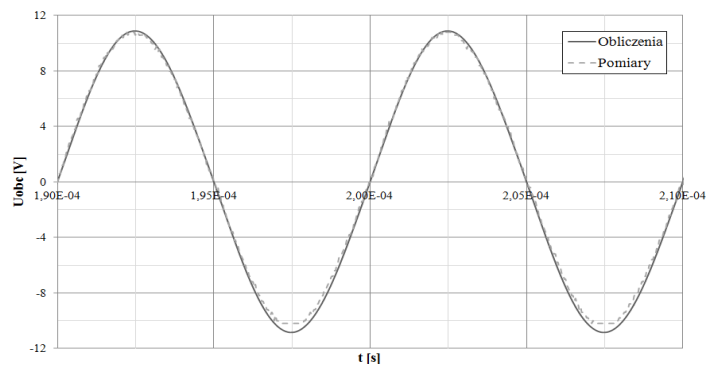


Rys. 5. Widok opracowanego stanowiska pomiarowego

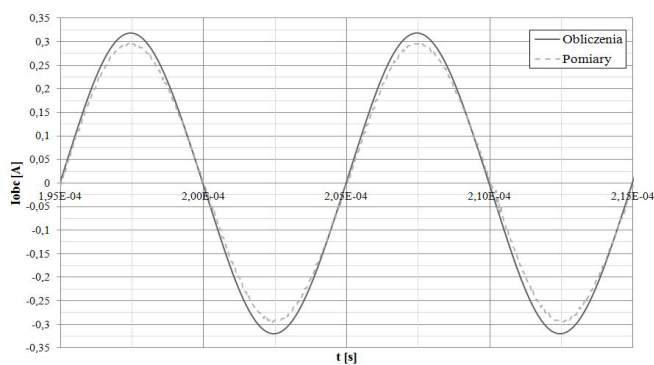
## 5. PORÓWNANIE WYNIKÓW POMIARÓW Z WYNIKAMI OBLICZEŃ

Opracowane i wykonane stanowisko pomiarowe posłużyło Autorom do weryfikacji obliczeń symulacyjnych. Wykonano serie pomiarów dla różnych wartości rezystancji obciążenia i odległości pomiędzy cewkami TP. Uzyskane wyniki pomiarów w pierwszej kolejności porównano z wynikami obliczeń symulacyjnych. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przebiegi napięć i prądów na rezystancji obciążenia  $R_{obc}$  dla odległości pomiędzy cewkami TP równej 35 mm, co odpowiadało współczynnikowi sprzężenia  $k = 0,44$ . Wartość rezystancji obciążenia wynosiła 34  $\Omega$ . Przebiegi uzyskano dla wartości pojemności kompensujących  $C_1 = 172$  nF i  $C_2 = 150$  nF.

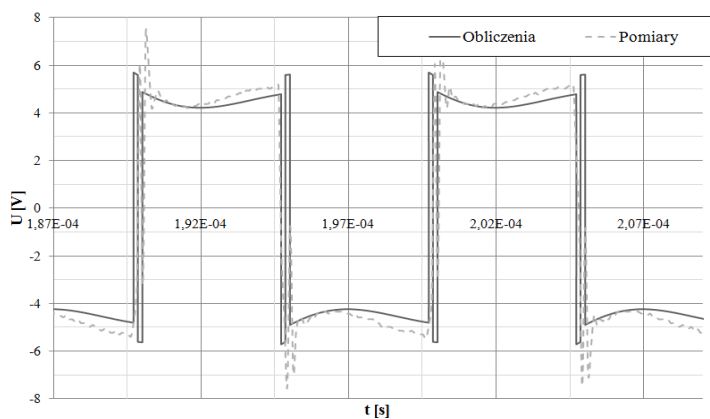
Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi napięć na wyjściu mostka tranzystrowego, natomiast na rysunku 9 przebiegi prądu przepływającego przez cewkę nadajnika.



Rys. 6. Porównanie przebiegów napięć na obciążeniu  $R_{obc}$  uzyskanych z pomiarów i obliczeń symulacyjnych



Rys. 7. Porównanie przebiegów prądów przepływającego przez obciążenie  $R_{obc}$  uzyskanych z pomiarów i obliczeń symulacyjnych

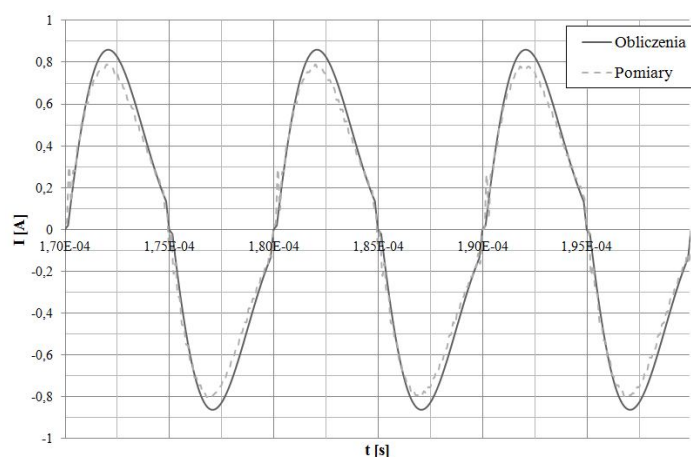


Rys. 8. Porównanie przebiegów napięć na wyjściu falownika uzyskanych z pomiarów i obliczeń symulacyjnych

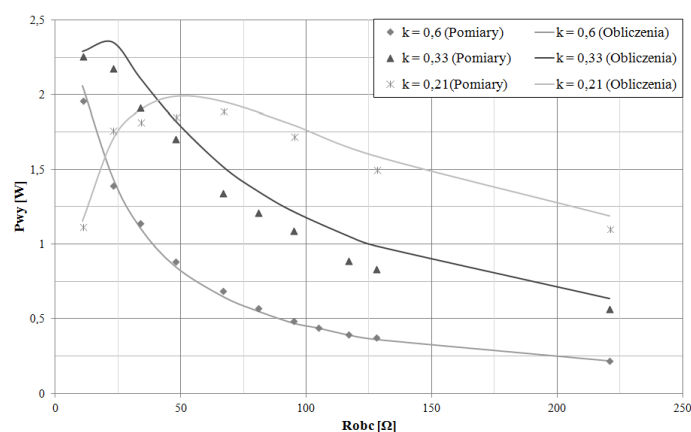


W pracy zbadano również wpływ wartości rezystancji obciążenia  $R_{obc}$  na sprawność układu  $\eta$  i moc  $P_{wy}$  wydzieloną na obciążeniu. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono porównanie wyników pomiarów i obliczeń dla trzech wybranych odległości pomiędzy cewkami, odpowiadających współczynnikom sprzężenia magnetycznego  $k = 0,6; 0,33$  oraz  $0,21$ .

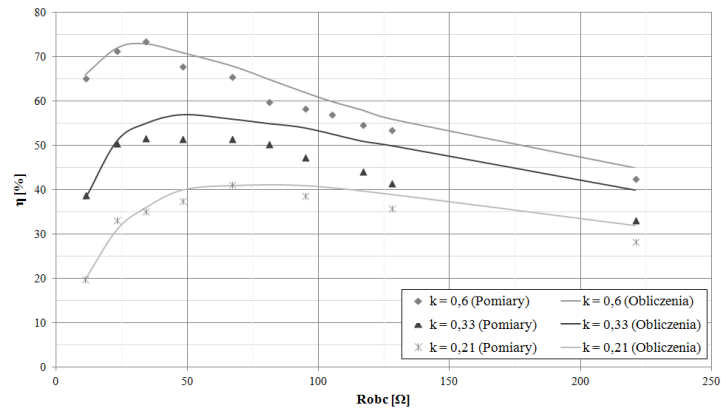
Kolejnym etapem badań było zestawienie wyników pomiarów z wynikami obliczeń dla zależności mocy wydzielonej na rezystancji obciążenia  $R_{obc}$  (rys. 12) i sprawności układu  $\eta$  (rys. 13) w funkcji współczynnika sprzężenia magnetycznego  $k$ , tj. odległości pomiędzy cewkami nadajnika i odbiornika. Wartości pojemności kompensacyjnych  $C_1$  i  $C_2$  pozostawiono niezmiennic.



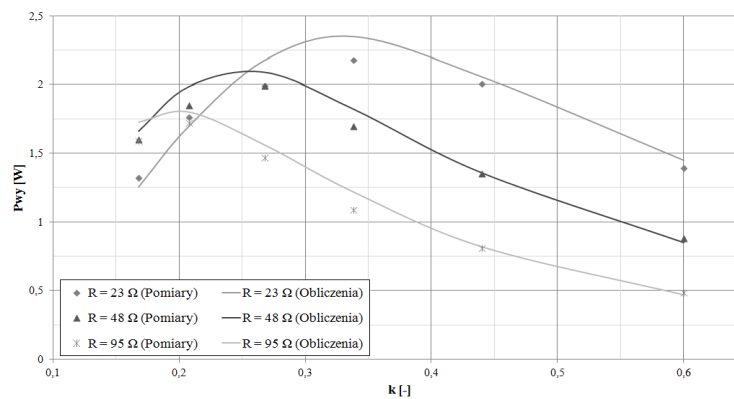
Rys. 9. Porównanie przebiegów prądów przepływających przez cewkę nadajnika uzyskanych z pomiarów i obliczeń symulacyjnych



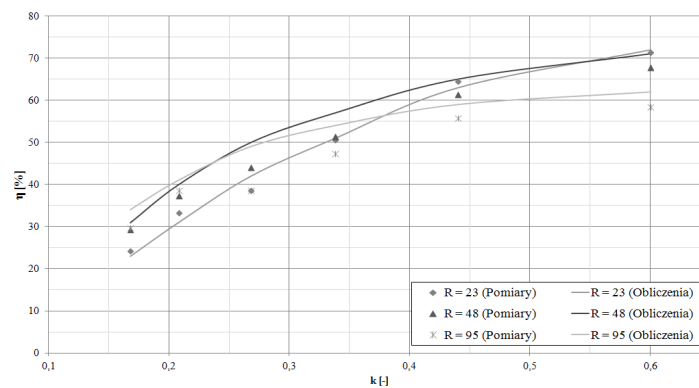
Rys. 10. Moc wydzielona na rezystancji obciążenia w funkcji wartości rezystancji obciążenia



Rys. 11. Zależność sprawności UBTE w funkcji wartości rezystancji obciążenia



Rys. 12. Moc wydzielona na rezystancji obciążenia w funkcji wartości współczynnika sprzężenia cewek nadajnika i odbiornika



Rys. 13. Zależność sprawności UBTE w funkcji wartości współczynnika sprzężenia cewek nadajnika i odbiornika

Na podstawie przeprowadzonych porównań stwierdzono dużą zgodność wyników pomiarów z wynikami obliczeń symulacyjnych. Przyjęto, że zbudowany układ falownika mostkowego typu H (współpracującego z UBTE) został opracowany w sposób poprawny. Powstałe różnice pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń mogą wynikać z zastosowanego zastępczego modelu TP.

## 6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono układ bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej współpracujący z mostkowym falownikiem napięcia typu H. Rozpatrzono układ z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym. Przedstawiono sposób doboru wartości pojemności rezonansowych i rezystancji obciążenia pod względem zastosowania do istniejącego TP. Na potrzeby obliczeń projektowych UBTE współpracującego z mostkowym falownikiem napięcia opracowano model symulacyjny. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych, na podstawie których zbudowano falownik z mostkiem H. Porównano wyniki obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów. Stwierdzono satysfakcjonującą zgodność wyników. Zauważono jednak, że zastosowany ekwiwalentny, obwodowy model TP ma tendencje do zawyżania wartości uzyskiwanych wyników obliczeń. Dlatego Autorzy uważają, że wiarygodność tego modelu może zostać zwiększona poprzez jego modyfikację i wprowadzenie do modelu "obwodów Foster'a i Cauera" [5], których parametry będą określane na podstawie obliczeń z wykorzystaniem modeli połowych. Podejście to jest następnym etapem badań podejmowanych przez Autorów.

## LITERATURA

- [1] Cieśla T., Kaczmarczyk Z., Grzesik B., Stępień M., Obwody do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, *Elektryka*, Zeszyt 4, s. 135 – 149, 2009.
- [2] Judek S., Karwowski K., Korycki K., Soczyński D., Wysokoczęstotliwościowy falownik napięcia – badania symulacyjne, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, nr 21, s. 125 – 130, 2005.
- [3] Kurzawa M., Łyskawiński W., Wojciechowski R. M., A System of Wireless Transmission of Electric Energy with the Selection of Resonant Capacitances, *IEEE*, 2016.
- [4] Kurzawa M., Wojciechowski R. M., Analiza układu bezprzewodowego przesyłu energii z szeregowo – szeregowym obwodem rezonansowym, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, No 86, pp. 241 – 253, 2016.
- [5] Shimotani T., Sato Y., Igarashi H., Direct synthesis of equivalent circuits from reduced FE models Using proper orthogonal decomposition, *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol. 35 Iss: 6, pp. 2035 – 2044, 2016.
- [6] Yosoff M. B M., Sekiya H., Lu J., Yahagi T., Class E inverter using thinned-out method, *Telecommunication Energy Conference, INTELEC'03*, 2003.

**THE SYSTEM OF WIRELESS POWER TRANSMISSION  
CONTAINING THE SERIAL-PARALLEL RESONANT CIRCUIT  
IN COOPERATION WITH THE BRIDGE VOLTAGE INVERTER**

In the paper the system of wireless power transmission (UBTE) cooperated with a full H-bridge inverter has been presented. The serial-parallel connection of compensating capacitors has been considered. The way of selection of optimal values of resonant capacitances and value of load resistance has been discussed. The software to determination of the optimal values of capacitances and load resistance has been elaborated in Visual Studio C# environment. For the design calculations, the simulation model of the UBTE connected with inverter has been developed. The model has been implemented in Matlab environment. The selected results of calculations have been presented. Based on the obtained calculation results, the bridge inverter cooperated with TP has been designed and elaborated. Finally, the verification of calculation results with measurement results has been conducted.

*(Received: 21. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)*