

Tomasz CIEŚLA¹, Zbigniew KACZMARCZYK¹, Mariusz STĘPIEŃ¹,
Roman KustosZ², Bogusław GRZESIK¹

¹ WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ, KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI, NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO I ROBOTYKI,
ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

² FUNDACJA ROZWOJU KARDIOCHIRURGII IM. PROF. ZBIGNIEWA RELIGI, ul. Wolności 345a, 41-800 Zabrze

Prototyp układu bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej

Mgr inż. Tomasz CIEŚLA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Od 2009 roku uczestnik studiów doktoranckich w dyscyplinie elektrotechnika. Zainteresowania naukowe: konstrukcja i symulacja przekształtników energoelektronicznych, ich stabilność, metody sterowania, odnawialne źródła energii elektrycznej oraz bezprzewodowa transmisja energii na niewielkie odległości.



e-mail: Tomasz.Ciesla@polsl.pl

Mgr inż. Roman KUSTOSZ

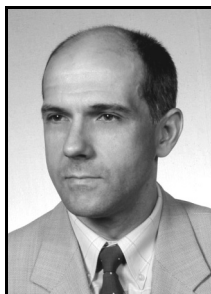
Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki, specjalność elektronika medyczna. Obszarem aktywności naukowej są badania naukowe i inżynierskie w obszarze sztucznego serca. Są to badania o charakterze interdyscyplinarnym obejmujące inżynierię systemów wspomagania serca, w tym dla dzieci. W obszarze zainteresowań badawczych znajdują się w szczególności pozaustrojowa pulsacyjna proteza wspomagania serca, częściowo i całkowicie implantowana proteza serca.



e-mail: RomanKustosZ@frk.pl

Dr hab. inż. Zbigniew KACZMARCZYK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Od 1991 roku pracownik naukowy w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki. Od 2009 roku zatrudniony na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Zainteresowania naukowe: analiza, synteza, symulacje komputerowe, konstrukcje, pomiary i zastosowania przekształtników energoelektronicznych, a zwłaszcza falowników rezonansowych (1 – 30 MHz, 100 – 1000 W).



e-mail: Zbigniew.Kaczmarczyk@polsl.pl

Dr hab. inż. Bogusław GRZESIK

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Zatrudniony w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej (profesor nadzwyczajny). Zainteresowania naukowe: energoelektronika, teoria przekształcania energoelektronicznego, elektronika przemysłowa, zastosowania nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego (HTS), całkowicie wszczepialne sztuczne serce (transmisja energii i danych, napęd pompy).



e-mail: Boguslaw.Grzesik@polsl.pl

Dr inż. Mariusz STĘPIEŃ

Adiunkt w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej. Związany z Katedrą od 1999 roku, od 2006 roku na stanowisku adiunkta. Zakres zainteresowań badawczych obejmuje dwa nurty. Pierwszy skupia się na modelowaniu połowym elementów i układów energoelektronicznych, w tym transformatorów, wzбудników oraz systemów bezprzewodowej transmisji energii. Drugi obejmuje zastosowania przemysłowe nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego.



e-mail: Mariusz.Stepien@polsl.pl

was fabricated and tested to confirm theoretical predictions. Measured voltage and current waveforms illustrates the inverter and synchronous rectifier operation (Fig. 7). The DC-DC efficiency and output power of the system as a function of the distance between the coils were also measured (Fig. 8). The maximum efficiency of 92,3% was obtained for the distance between the coils of 13 mm and output power of 32,5 W. Additionally, the analysis of power losses distribution in each component of the system was included (Fig. 9). The results confirm satisfactory performances of the tested prototype system.

Keywords: wireless energy transfer, Class E inverter, synchronous rectifier.

Streszczenie

W artykule opisano prototyp układu bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej, który może być zastosowany do zasilania protezy serca. Opisano poszczególne podzespoły prototypu oraz zaprezentowano wybrane wyniki pomiarów przy mocy wyjściowej ~30 W i odległości pomiędzy planarnymi cewkami sprzężonymi magnetycznie 10÷15 mm. Przy mocy wyjściowej 32,5 W i odległości pomiędzy cewkami 13 mm, pomimo wysokiej częstotliwości pracy układu (800 kHz), uzyskano całkowitą sprawność 92,3%. W artykule zaproponowano metodę projektowania układu oraz oszacowano rozkład strat mocy w jego podzespołach.

Słowa kluczowe: bezprzewodowa transmisja energii, falownik klasy E, prostownik synchroniczny.

Prototype of wireless energy transfer system

Abstract

A prototype of a wireless energy transfer system is described in the paper. It could be applicable for powering the artificial heart. Wireless energy transfer is based on magnetically coupled planar coils (Fig. 4). The coils are attached to the coordinate table (Fig. 2) which is used to set the distance between them. The system operates at 800 kHz with output power of ~30 W and distance between the coils of 10÷15 mm. It is powered by a Class E inverter (Fig. 3). A synchronous rectifier (Fig. 6) and capacitive output filter are used to supply a resistive load with high efficiency. In order to minimize power losses of the system, an appropriate design procedure is included and explained in the paper. The prototype system

1. Wprowadzenie

Współcześnie istnieje duże zainteresowanie małymi układami do bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej na niewielkie odległości. Układy te stosowane są do ciągłego zasilania [1] lub okresowego doładowywania [2] różnych urządzeń, np. telefonów komórkowych [3], protez serca [4, 5]. Najbardziej rozpowszechniona jest transmisja za pośrednictwem cewek sprzężonych magnetycznie. Ze względu na konieczność zapewnienia wymaganej odległości pomiędzy cewkami, współczynnik sprzężenia magnetycznego $k = M \sqrt{L_1 L_2}$ jest zwykle mały ($k < 0,5$). Efektywna transmisja energii przez takie cewki wymaga użycia dodatkowych kondensatorów kompensujących, które mogą być dołączone do nich szeregowo lub równoległe [5]. Strona pierwotna uzyskanego w ten sposób obwodu przyłączona jest do falownika rezonansowego, natomiast strona wtórna do prostownika, który wraz z filtrem wyjściowym umożliwia zasilanie odpowiednich odbiorników. W dalszej części artykułu używane będzie określenie *układ bezprzewodowej transmisji energii* (w skrócie UBTE), który składa się z falownika, obwodu złożonego z dwóch cewek sprzężonych i kondensatorów kompensujących oraz prostownika i filtru – rys. 1. Część układu UBTE złożona z cewek sprzężonych i kondensatorów nazywana jest w artykule *obwodem bezprzewodowej transmisji energii* (OBTE). Ze względu na potrzebę minimalizacji masy i gabarytów układy UBTE pracują z wysokimi częstotliwościami, typowo od 100 kHz do 1 MHz. Ponadto, przekształtniki energoelektroniczne (falownik i prostow-

nik) pracować powinny przy przełączaniu miękkim ze względu na kompatybilność elektromagnetyczną.

W artykule dokonano krótkiego przeglądu znanych z literatury układów UBTE (pkt. 2), opisano metodę projektowania układu (pkt. 3), opisano budowę opracowanego prototypu układu (pkt. 4) oraz przedstawiono wybrane wyniki pomiarów (pkt. 5).

2. Przegląd znanych układów

W literaturze o bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej układy do zasilania protez serca znajdują istotne miejsce ze względu na małą masę, gabaryty, niskie straty mocy, wysoki stopień kompatybilności elektromagnetycznej oraz bardzo wysoki stopień niezawodności i bezpieczeństwa. Dane kilku reprezentatywnych układów tego typu zestawiono w tabeli 1.

Tabel 1. Porównanie układów UBTE

Tabel 1. A comparison of wireless energy transfer circuits

Lp.	Publikacja	Rok	f kHz	P_{wy} W	Δx mm	η %
1.	[5]	2009	300	25	10÷20	90,5÷89
2.	[6]	2006	400	15	10	75
3.	[4]	2006	160	35	5÷10	93,4÷92,4
4.	[7]	2000	400	50	10	80

Dzięki zastosowaniu prostownika synchronicznego (diody zastąpiono odpowiednio sterowanymi tranzystorami) oraz niskiej częstotliwości pracy (160 kHz) najwyższą sprawność ma układ 3. Układ 1 jest podobny do układu 3. Charakteryzuje się jednak niższą sprawnością, wynikającą z użycia prostownika diodowego oraz wyższej częstotliwości (300 kHz). Sprawność pozostałych układów nie przekracza 80%. Należy zaznaczyć, że w publikacjach tych brak jest informacji, czy podawane sprawności dotyczą całego układu przy uwzględnieniu mocy zasilania podzespołów sterujących falownikiem i ewentualnym prostownikiem synchronicznym, czy tylko toru obwodu głównego transmisji energii.

3. Metoda projektowania układu

Projektowanie układu UBTE składa się z pięciu etapów: I) ustalenie parametrów odbiornika – moc i napięcie odbiornika (stałe, przemienne, sinusoidalne, częstotliwość etc.) oraz dopuszczalnego zakresu zmian jego parametrów, II) wybór prostownika, III) projekt obwodu OBTE, IV) wybór falownika oraz V) synteza parametrów układu UBTE. Zastosowaniem opisywanego projektu jest układ UBTE przeznaczony do zasilania protezy serca.

Etap I: Odbiornik ma moc $P_{wy} = 30$ W przy napięciu stałym $U_{wy} = 24$ V, czyli $R_{wy} = 19,2$ Ω .

Etap II: Przeprowadzona analiza, symulacje komputerowe oraz badania laboratoryjne różnych typów prostowników wykazały, że korzystnymi właściwościami wyróżnia się mostkowy prostownik synchroniczny miękko-przełączalny (w zerze prądu).

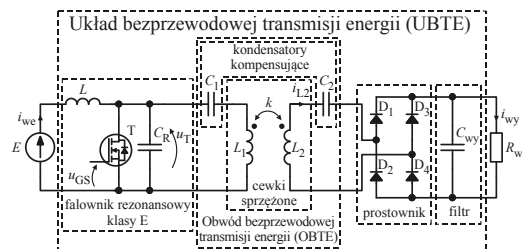
Etap III: Opis właściwości obwodów OBTE znajduje się w publikacji [8]. Zgodnie z [8], ze względu na maksymalizację sprawności obwodu i wybrany prostownik wymagane jest szeregowe połączenie elementów strony wtórnej (L_2 - C_2). Ze względu na zastosowany falownik elementy strony pierwotnej powinny być również połączone szeregowo (L_1 - C_1).

Etap IV: Podczas wyboru falownika rezonansowego rozważono mostkowy oraz półmostkowy falownik klasy D, ich wersje klasy DE oraz falownik klasy E. Stwierdzono, że najmniejszymi stratami mocy oraz dużą prostotą cechuje się falownik klasy E.

Cztery etapy pozwalają na ustalenie schematu prototypu UBTE, który przedstawiono na rys. 1.

Etap V: W etapie tym dokonywana jest synteza parametrów układu UBTE przy założeniu określonej częstotliwości pracy. Wartości kondensatora C_2 oraz cewki L_2 oblicza się zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w [8]. Wartości elementów L i C_{wy} dobiera się ze względu na dopuszczalne tętnienia prądu wejściowego i_{we} i napięcia

wyjściowego u_{wy} . Wartości elementów C_R , C_1 , L_1 określane są dla założonego współczynnika D wypełnienia przełączeń tranzystora T oraz napięcie zasilania E w dwóch kolejnych krokach. W pierwszym wyznacza się ich wstępne wartości z warunków na pracę optymalną falownika klasy E [9]. Stosuje się uproszczenie, polegające na sprwadzeniu obwodu OBTE wraz z prostownikiem i odbiornikiem do zastępczego szeregowego dwójnika RLC . Krok drugi polega na optymalizacji parametrów układu UBTE w programie Simploter. W tym celu dokonywane są symulacje zweryfikowanego eksperymentalnie modelu układu z rys. 1, przyjmując jako wartości początkowe parametry obliczone w pierwszym kroku. Używany jest wbudowany w program algorytm genetyczny, za pomocą którego maksymalizowana jest sprawność dla zadanej mocy.



Rys. 1. Schemat układu UBTE

Fig. 1. Diagram of wireless energy transfer system

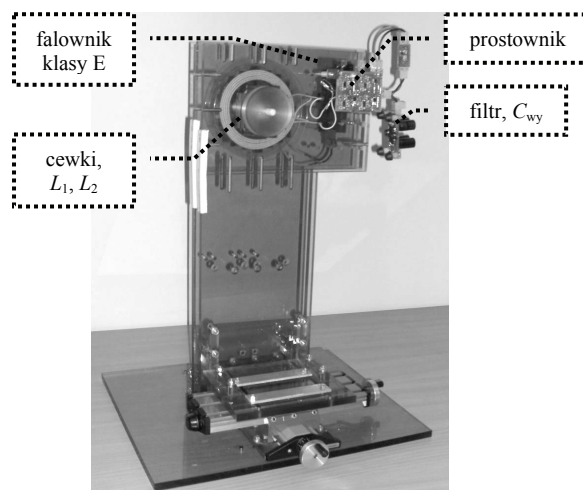
Opisana metoda projektowania umożliwiła skonstruowanie prototypu UBTE. Prototyp omawia się w pkt. 4.

4. Prototyp układu

Do projektu prototypu przyjęto następujące założenia:

- moc czynna dostarczana do modelowego obciążenia rezystancyjnego układu $P_{wy} = 30$ W,
- cewki umieszczone są w powietrzu, przy czym odległość pomiędzy nimi $\Delta x = 10$ ÷15 mm,
- układ powinien mieć możliwie małą masę i gabaryty oraz cechować się jak najwyższą sprawnością.

Wykonany prototyp UBTE składa się z: falownika klasy E, obwodu OBTE oraz prostownika z filtrem i obciążeniem. Cewki sprzężone magnetycznie L_1 i L_2 zostały zamocowane na stole nastawczym, umożliwiającym ich precyzyjne pozycjonowanie (rys. 2). Falownik zasilano z zasilacza laboratoryjnego ($E = 24$ V). Obciążenie układu stanowi programowalny rezystor mocy o wartości odpowiadającej zastępczej rezystancji pompy protezy serca ($R_{wy} = 19,2$ Ω). Poniżej opisano poszczególne podzespoły.

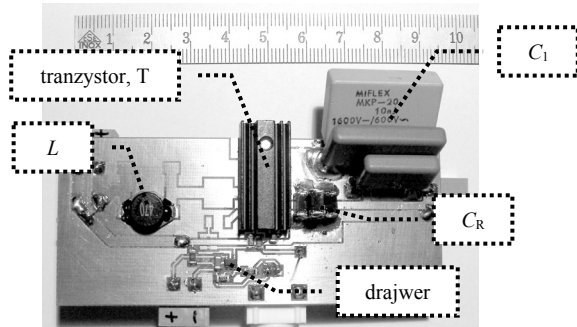


Rys. 2. Fotografia stołu nastawczego

Fig. 2. A photograph of the coordinate table

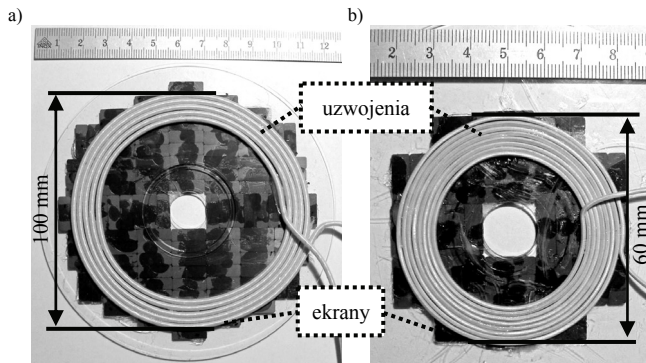
Falownik: Zastosowano rezonansowy falownik klasy E (rys. 1) [9]. Falownik zawiera jeden tranzystor MOSFET T przełączany

miętko (załączany przy zerowym napięciu i zerowym prądzie oraz wyłączany przy zerowym napięciu i niezerowym prądzie). Dzięki temu uzyskiwana jest wysoka sprawność i częstotliwość pracy przy małym poziomie generowanych zaburzeń. Na rys. 3. przedstawiono fotografię skonstruowanego falownika klasy E.



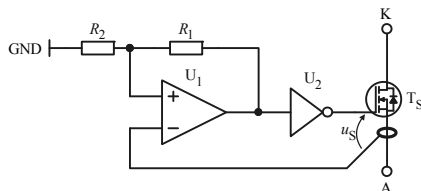
Rys. 3. Fotografia skonstruowanego falownika klasy E
Fig. 3. A photograph of the designed Class E inverter

Obwód bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej (OBTE): Obwód składa się z nawiniętych licą cewek sprzężonych L_1 i L_2 (rys. 4) oraz podłączonych do nich szeregowo kondensatorów C_1 i C_2 (rys. 1). Obie cewki mają ekrany magnetyczne wykonane z prostokątnych kształtek. Dla odległości pomiędzy cewkami $\Delta x_1 = 10$ mm ich współczynnik sprzężenia magnetycznego wynosił $k_1 = 0,339$, a dla $\Delta x_2 = 15$ mm $k_2 = 0,294$.



Rys. 4. Fotografia a) cewki pierwotnej b) cewki wtórnej
Fig. 4. A photograph of a) primary coil b) secondary coil

Prostownik: W prototypie układu zastosowano mostkowy prostownik synchroniczny [10]. Schemat dowolnej gałęzi prostownika mostkowego (odpowiadającej diodzie z rys. 1) zamieszczono na rys. 5. Tranzystor MOSFET T_s sterowany jest komparatorem histerezowym (U_1 , R_1 , R_2) poprzez drajwer (U_2). Fotografia prostownika znajduje się na rys. 6.



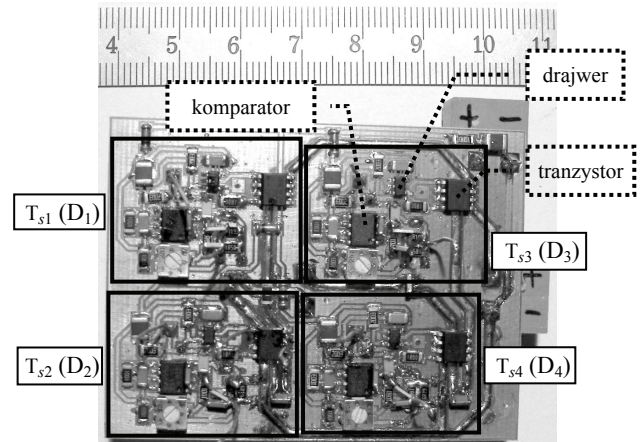
Rys. 5. Schemat jednej gałęzi prostownika synchronicznego T_s
Fig. 5. Diagram of one leg of synchronous rectifier

5. Pomiary

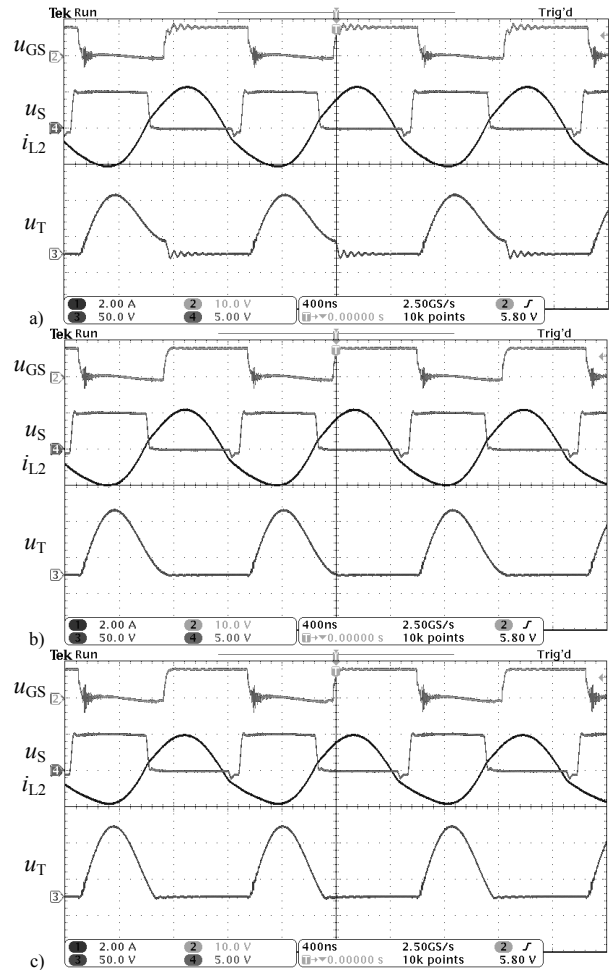
Przeprowadzono pomiary prototypu UBTE. Mierzono przebiegi napięć i prądów oraz charakterystyki sprawności i mocy wyjściowej.

Na rys. 7 zamieszczono przebiegi (rys. 1, 5): napięcia sterującego tranzystorem falownika u_{GS} (10 V/div), prądu cewki wtórnej i_{L2} (2 A/div – sonda prądowa P6022 Tektronix), napięcia sterującego tranzystorem prostownika u_s (5 V/div) dla ujemnej półfali

prądu i_{L2} oraz napięcia na tranzystorze falownika u_T (50 V/div). Przebiegi zarejestrowano oscyloskopem DPO3014 Tektronix dla trzech odległości pomiędzy cewkami: 10, 13 i 15 mm.



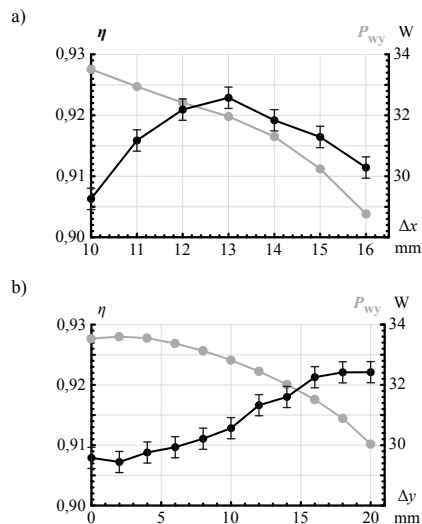
Rys. 6. Fotografia skonstruowanego prostownika synchronicznego
Fig. 6. A photograph of the designed synchronous rectifier



Rys. 7. Oscylogramy dla odległości pomiędzy cewkami: a) 10 mm, b) 13 mm, c) 15 mm
Fig. 7. Waveforms for distances between coils: a) 10 mm, b) 13 mm, c) 15 mm

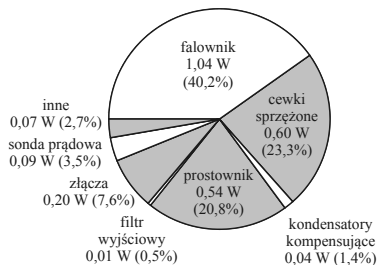
Na podstawie obserwacji przebiegów napięcia u_T można stwierdzić, że dla odległości pomiędzy cewkami 10 mm falownik pracuje nieoptymalnie. Tranzystor załączany jest przy niewielkim napięciu (około 25 V). Zwiększenie odległości do 13 mm powoduje, że falownik pracuje optymalnie (załączanie miętkie tranzystora). Dalsze zwiększenie odległości do 15 mm prowadzi do pracy suboptymalnej (załączanie tranzystora przy zerowym napięciu i niezerowym prądzie) [9].

Na rys. 8 przedstawiono charakterystyki sprawności η i mocy wyjściowej P_{wy} w funkcji położenia cewek – wpływ zmian odległości pomiędzy cewkami Δx na rys. 8a) oraz wpływ przesunięcia bocznego cewek Δy przy stałej odległości 10 mm na rys. 8b). Podane sprawności DC-DC (wejście-wyjście) uwzględniają straty mocy związane ze sterowaniem tranzystorów falownika i prostownika synchronicznego. Standardowa niepewność określenia mocy wyjściowej wynosiła 0,04 W, niepewność złożona określenia sprawności była równa 0,17% [11, 12]. Pomiary napięć i prądów stałych wykonano multimetrami PC5000 firmy Sanwa.



Rys. 8. Charakterystyki sprawności i mocy wyjściowej układu w funkcji: a) odległości pomiędzy cewkami, b) przesunięcia bocznego cewek
Fig. 8. Efficiency of the system and output power as a function of: a) distance between coils, b) misalignment between coils

Maksymalną sprawność transmisji energii elektrycznej zanotowano dla odległości pomiędzy cewkami 13,0(1) mm. Wyniosła ona 92,29(17)% przy mocy wyjściowej 32,50(4) W.



Rys. 9. Rozkład strat mocy w badanym układzie
Fig. 9. Distribution of system's power losses

Oszacowano rozkład strat mocy w poszczególnych podzespołach prototypu UBTE dla odległości pomiędzy cewkami 13 mm (rys. 9). Straty mocy w dławiku wejściowym L i kondensatorze równoległym falownika C_R , cewkach sprzężonych L_1 , L_2 , kondensatorach kompensujących C_1 , C_2 , filtrze wyjściowym C_{wy} , złączach oraz sondzie prądowej obliczono na podstawie pomiaru ich rezystancji zastępczych analizatorem impedancji (Agilent 4294A) oraz przybliżonego określenia wartości skutecznych prądów przepływających przez te elementy. Straty mocy w tranzystorze falownika obliczono jako sumę strat na rezystancji przewodzenia i strat powstających podczas przeładowywania jego bramki. Straty mocy w prostowniku synchronicznym oceniono w trzech krokach. W pierwszym kroku, metodą skalowania temperaturowego, wyznaczono straty mocy w prostowniku zbudowanym z diod Schottkiego. Zmierzone i porównano w stanie cieplnie ustalonym przyrost temperatury diody w prostowniku podczas pracy w układzie oraz podczas zasilania prostownika prądem stałym. W ten sposób określono równoważne straty mocy prostownika przy zasilaniu prądem stałym. W drugim kroku obliczono pozostałe straty mocy układu ΔP , odejmując od strat całkowitych

tych ΔP_{tot} straty prostownika z diodami Schottkiego ΔP_{diod} : $\Delta P = \Delta P_{tot} - \Delta P_{diod}$. W trzecim kroku prostownik z diodami Schottkiego zastąpiono prostownikiem synchronicznym i dla tych samych parametrów układu, zakładając, że straty ΔP zostaną zachowane, wyznaczono ponownie straty całkowite ΔP_{tot} i obliczono straty prostownika synchronicznego ΔP_s : $\Delta P_s = \Delta P_{tot} - \Delta P$.

Największy udział w całkowitych stratach mocy układu ma falownik, następnie cewki i prostownik. W ramach dalszych prac kontynuowane będą próby ich minimalizacji, szczególnie w falowniku.

6. Wnioski

Opisano prototypowy układ bezprzewodowej transmisji energii, jego podzespoły oraz charakterystyki. Bazuje on na przekształtnikach miękko-przełączalnych – falowniku klasy E i mostkowym prostowniku synchronicznym. Układ dostarcza moc wyjściową 32,50 W przy częstotliwości 800 kHz. Osiągnięta sprawność 92,29% przewyższa dotychczas znane rozwiązania (tabela 1). W wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano metodę projektowania tego typu układów. Opracowany prototyp przeznaczony jest do bezprzewodowego zasilania całkowicie wszczepialnej protezy serca.

Kolejnym etapem prowadzonych badań będzie minimalizacja strat mocy układu oraz opracowanie prostej i efektywnej metody stabilizacji napięcia wyjściowego przy zmianach parametrów obciążenia oraz niewielkich przemieszczeniach cewek.

Praca niniejsza finansowana była ze środków programu wieloletniego na lata 2007 - 2011 pt. Polskie Sztuczne Serce.

7. Literatura

- [1] Guanying M., Guozheng Y., Xiu H.: Power transmission for gastrointestinal microsystems using inductive coupling. IOP Publishing, Phys Meas., VOL. 28, N9-18, 2007, pp. 140-147.
- [2] Mukhopadhyay S.C., Gupta Sen G., Lake B.J.: Design of a Contactless Battery Charger for Micro-robots. IEEE I2MTC – Int. Instr. and Meas Techn. Conf., May. 2008 pp. 3578-3580.
- [3] Choi B., Nho J., Cha H., Ahn T., Choi S.: Design and Implementation of Low-Profile Contactless Battery Charger Using Planar Printed Circuit Board Windings as Energy Transfer Device. IEEE Trans. on Ind. Electron., VOL. 51, NO. 1, Feb. 2004, pp. 140-147.
- [4] Miura H., Arai S., Kakubari Y., Sato F., Matsuki H., Sato T.: Improvement of the Transcutaneous Energy Transmission System Utilizing Ferrite Cored Coils for Artificial Hearts. IEEE Trans. on Magn., VOL. 42, NO. 10, Oct. 2006, pp. 3578-3580.
- [5] Chen Q., Wong S.C., Tse C.K., Ruan X.: Analysis, Design, and Control of a Transcutaneous Power Regulator for Artificial Hearts. IEEE Trans. on Biomed. Circ. and Syst., VOL. 3, NO. 1, Feb. 2009, pp. 23-31.
- [6] Mizannojehdehi A., Shams M., Mussivand T.: Design and Analysis of A Class-E Frequency-Controlled Transcutaneous Energy Transfer System. IEEE ICECS Int. Conf. on Electr. Circ. and Syst., 2006, pp. 21-24.
- [7] Tsai C.-C., Chen B.-S., Tsai C.-M.: Design of Wireless Transcutaneous Energy Transmission System for Totally Artificial Hearts. IEEE APCCAS Conf. on Circ. and Syst., 2000, pp. 646-649.
- [8] Cieśla T., Kaczmarczyk Z., Grzesik B., Stępień M.: Obwody do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, 4/2009.
- [9] Kaczmarczyk Z.: A high-efficiency Class E inverter – computer model, laboratory measurements and SPICE simulation. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, VOL. 55, NO. 4, 2007, pp. 411-417.
- [10] Fukushima K., Hashimoto T., Ninomiya T.: Analysis of Abnormal Oscillation Phenomenon in DC-DC Converter with Active-Clamp Snubber and Self-driven Synchronous Rectifier. IEEE Intern. Power Electr. Congr., 2006, pp. 1-6.
- [11] Skubis T.: Opracowanie wyników pomiarów. Przykłady. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice, 2003.
- [12] Kubisa S., Moskowicz S.: Niepewność pomiaru. Próba usystematyzowania pojęć i metod obliczeń. Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola. 1/2004, pp. 32-36.