

Sławomir JUDEK, Krzysztof KARWOWSKI
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Sterowanie falownikiem napięcia w układzie cewek sprzężonych do zasilania pojazdów elektrycznych

Mgr inż. Sławomir JUDEK

Ur. 28.04.1978 r. w Bydgoszczy. Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2003 r. Od tego roku jest słuchaczem Studium Doktoranckiego tegoż wydziału. Zajmuje się systemem bezstykowego przesyłu energii elektrycznej.



e-mail: S.Judek@ely.pg.gda.pl

Dr hab. inż. Krzysztof KARWOWSKI

Ur. 17.11.1951 r. w Toruniu. Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1975 r. oraz w 1981 r. na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu im. M. Kopernika. W roku 1984 obronił pracę doktorską, a w 1996 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie elektrotechniki. Pracuje w Zakładzie Trakcji Elektrycznej na stanowisku prof. nadzw. PG. Zajmuje się mikrokomputerowym sterowaniem układów napędowych pojazdów i diagnostyką urządzeń trakcyjnych.



e-mail: K.Karwowski@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę pracy oraz wybrane wyniki badania modelu laboratoryjnego układu bezstykowego przekazywania energii elektrycznej do pojazdów elektrycznych z wykorzystaniem cewek o słabym sprzężeniu magnetycznym. W szczególności omówiono warunki pracy układu w stanie rezonansu, dobór parametrów układu i metodę sterowania przekształtnika tranzystorowego w przypadku zmiany wielkości szczeliny powietrznej pomiędzy cewkami.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, bezstykowy przesył energii, cewki sprzężone, rezonans, przekształtnik energoelektroniczny.

Control of inverter for inductively powered electric vehicles

Abstract

Most electrical equipment in common use is connected to the supply via plugs, flexible cables, slip rings, pantograph, etc. It can be useless in moist or explosion-endangered environment. This paper describes a technique, the contactless electrical energy transfer system, by which electrical energy may be transmitted through the large air gap. The transfer system is attractive especially for automatic battery charging stations and for energy supply of inductively powered electric vehicles and other movable consumers. In this case energy is transmitted via ironless transformer. Coupling between the windings is variables and depend on dimensions of air gap. The efficiency of system with large air gap (about 100 mm) can be considerably improved by using higher transmission frequencies in the range approximately 100 kHz. Large leakage inductances may be compensated also in resonance condition by adding capacitances to the windings. Paper presented analysis of power electronics converter with variable voltage frequency. These theoretical developments are compared with practical measurements from a prototype contactless system.

Keywords: electric vehicle, contactless power transfer, inductive coupling, resonance, power converter.

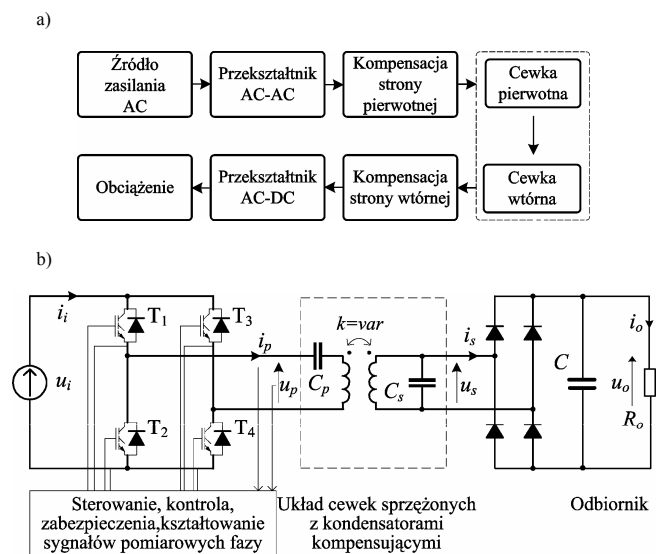
1. Wstęp

Zasilanie odbiorników ruchomych energią elektryczną odbywa się, w dominującej liczbie przypadków, za pośrednictwem giętkich przewodów łączących, bądź innych zestykowych układów pośredniczących typu komutatory, odbieraki prądu, itp. W tych przypadkach występować mogą niekorzystne zjawiska, takie jak zerwanie przewodów jezdnych i doziemienia, iskrzenie, czy niebezpieczeństwo porażenia, gdy taka instalacja znajduje się w obszarze dotyku bezpośredniego, np. w zasilaniu trakcji kopalnianej. Z tych względów, atrakcyjną alternatywą staje się dla rozwiązań klasycznych bezstykowe zasilanie energią elektryczną CEETS (ang. Contactless Electrical Energy Transfer System) z wykorzystaniem cewek magnetycznie sprzężonych o dużej szczeliny powietrznej [1]. W szczególności jest to rozwiązanie korzystne w przypadku budowy bezobsługowych stacji doładowujących baterie akumulatorów lub superkondensatorów pojazdu.

Systemy CEETS znajdują także zastosowania do zasilania pojazdów w trakcie jego ruchu [2]. W tych zastosowaniach wartość współczynnika sprzężenia magnetycznego między cewkami zależy od zmiany uniesienia pojazdu lub nieprecyzyjnego pozycjonowania pojazdu z cewką wtórną nad cewką pierwotną umieszczoną w podłożu. Układ należy zasilac ze sterowanego źródła napięciowego o pulsacji dostosowującej się do pulsacji rezonansowej. Systemy bezstykowego przesyłania energii separują galwanicznie obwody zasilania i odbiornika oraz ułatwiają wykonanie izolacji między tymi obwodami.

2. Analiza teoretyczna

Przeprowadzenie rozważań teoretycznych poprzedza etap opracowania analogów obwodowych dla poszczególnych elementów całego systemu i budowy jego schematu zastępczego (rys. 1). Dla układu cewek powietrznych słabo sprzężonych magnetycznie wystarczającym jest schemat zastępczy jak dla transformatora powietrznego, nawet jeśli częstotliwość napięcia zasilającego jest rzędu stu kiloherców [1].



Rys. 1. Schemat układu CEETS: a) schemat blokowy; b) przykładowy schemat ideowy wraz z układem sterowania

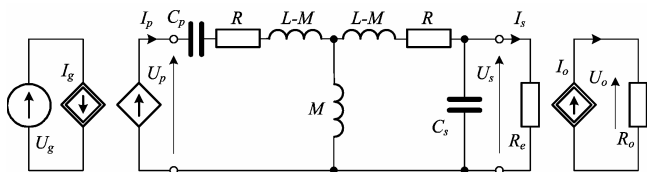
Fig. 1. System CEETS: a) block diagram; b) example power converter scheme with control system

Aby w takich warunkach zrealizować przesył energii z dużą sprawnością konieczne jest, prócz zasilania układu cewek sprzężonych za pomocą wysokoczęstotliwościowego falownika napięcia, skompensowanie spadków napięcia na indukcyjnościach

rozproszenia (rys. 1b) [3]. Z tych powodów postępowanie w rozważaniach teoretycznych jest możliwe na dwa sposoby.

Pierwszym z nich jest zastosowanie metody FMA (ang. Fundamental Mode ac sine-wave Approximation). W podejściu tym wyjściowe napięcie prostokątne falownika rozkłada się na szereg Fouriera. Ze względu na symetrię tego przebiegu posiada on tylko składowe nieparzyste harmonicznych o malejących wraz z rzędem składowej amplitudach. Ponieważ rozpatrywany układ ma pracować w rezonansie zakłada się, że istotne znaczenie ma tylko pierwsza harmoniczna i pomija się pozostałe składowe. Takie rozwiązanie znacząco upraszcza analizę złożonego układu przekształtnikowego wraz z obciążeniem. Wszelkie obliczenia można wykonywać w dziedzinie amplitud zespolonych. Otrzymaone rezultaty stanowią ocenę jakościową i ilościową układu, a także umożliwiają wyznaczenie zależności analitycznych będących użytecznymi w fazie projektowej [4, 5].

Model analizowanego układu cewek powietrznych zasilanych z falownika napięcia (rys. 1b) opracowany według metody FMA przedstawia rys. 2. Jest to obwód, który odwzorowuje stan pracy ustalonej układu z zachowaniem stałej mocy średniej na wyjściu i wejściu względem układu z elementami energoelektronicznymi.



Rys. 2. Model obwodowy systemu CEETS w analizie FMA
Fig. 2. Equivalent circuit for FMA analysis

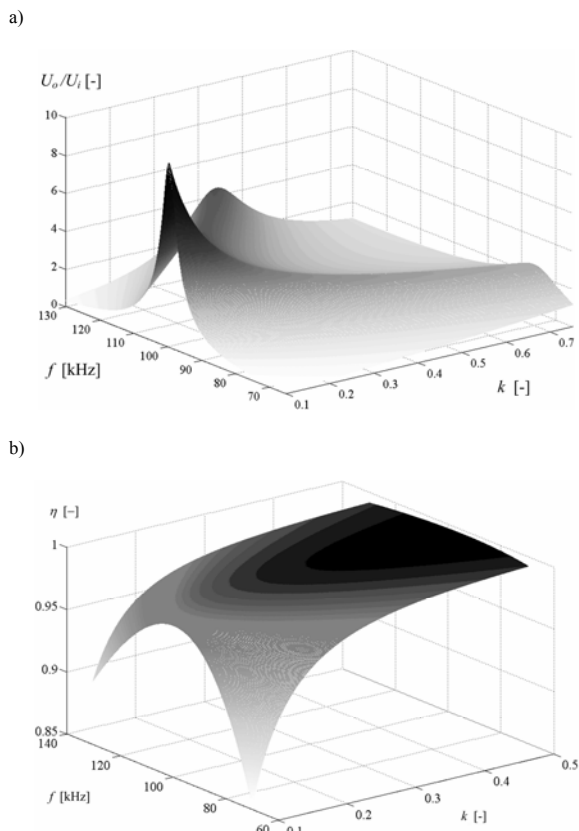
Do rozważań przyjęto równą liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego, dlatego indukcyjności własne cewek L i ich rezystancje R oznaczone na rysunku są takie same. Pozostałe relacje pomiędzy poszczególnymi zmiennymi i parametrami układu przedstawiają się następująco: U_i – wartość skuteczna pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego z falownika, $I_i = 2I_{pm}\cos\varphi_s/\pi$, I_{pm} – amplituda prądu cewki pierwotnej, φ_s – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy I_p a \underline{U}_p , $U_p = 2\sqrt{2}U_i/\pi$, $U_s = 2\sqrt{2}U_o/\pi$, $R_e = 8R_o/\pi^2$, $I_o = \sqrt{2}I_s/\pi$ [6]. Dla tak zdefiniowanego obwodu można dobrać wartości pojemności kompensujących strony pierwotnej C_p oraz wtórnej C_s tak, aby napięcie U_p i prąd I_p były ze sobą w fazie dla pewnej pulsacji ω [3]. Warunek powyższy jest spełniony, gdy:

$$C_p = \frac{L}{\omega^2(L^2 - M^2)}; \quad C_s = \frac{L}{\omega^2 L}; \quad (1)$$

gdzie L – indukcyjność własna cewki, M – indukcyjność wzajemna między sprzężonymi cewkami.

Dla tak skonfigurowanego schematu przeprowadzono symulację w środowisku Matlab. Uzyskane wyniki zestawiono na rys. 3. Charakterystyka na rys. 3a przedstawia zmienność stosunku wartości skutecznej napięcia wyjściowego do wejściowego U_o/U_i w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego f i współczynnika sprzężenia magnetycznego k . Widoczne jest wyraźne zwiększanie się napięcia odbiornika w przypadku oddalania od siebie uzwojeń. Dla sytuacji przeciwnej występuje złagodzenie przebiegu funkcji $U_o/U_i = g(f,k)$. Jest to sytuacja korzystna, gdyż znaczne uniesienie podłoża pojazdu ponad nominalny prześwit jest sytuacją nietypową, w przeciwieństwie do zmniejszenia się szczeliny na skutek np. zwiększenia masy przewożonych obiektów. Funkcja z rys. 3b przedstawia sprawność energetyczną układu $\eta(f,k) = P_o/P_i$ jako stosunek mocy odbiornika do mocy pobieranej w funkcji zmian częstotliwości i współczynnika sprzężenia. Na tej podstawie można określić pożądane punkty pracy układu, dla których sprawność przesyłu energii jest największa. Należy jednak zwrócić uwagę na

fakt, że maksymalne wartości sprawności nie muszą być związane z wysokim poziomem przesyłanej mocy.



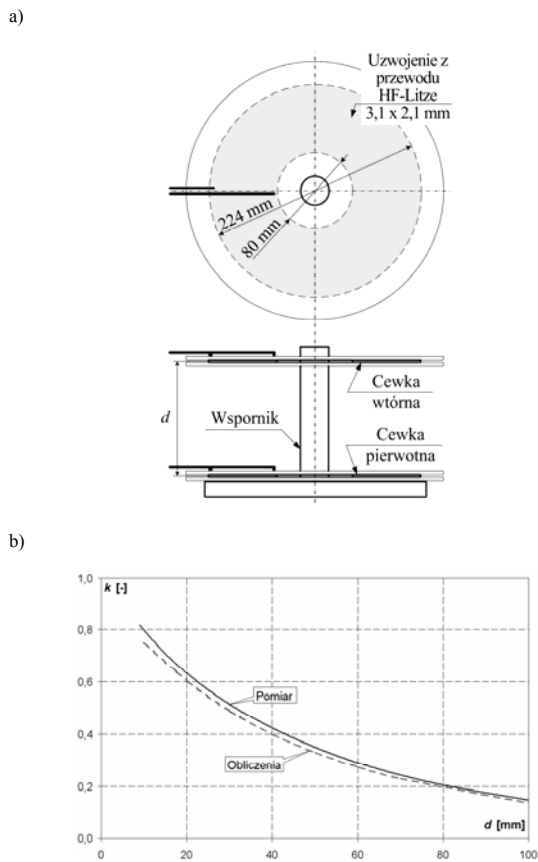
Rys. 3. Wyniki symulacji przedstawione w funkcji zmiany częstotliwości napięcia zasilającego f i współczynnika sprzężenia k : a) względne napięcie wyjściowe układu U_o/U_i ; b) sprawność układu $\eta = P_o/P_i$
Fig. 3. Matlab simulation presented as a function of supply voltage frequency f and coupling coefficient k : a) relative output voltage U_o/U_i ; b) efficiency $\eta = P_o/P_i$

Alternatywnym sposobem postępowania w rozważaniach teoretycznych układu CEETS jest analiza w dziedzinie czasu MA (ang. Modal Analysis). Istnieją dwa kierunki działania. Pierwszy polega na rozpatrzeniu trybów pracy poszczególnych elementów falownika i podzieleniu ich na przedziały czasowe, w których układ opisuje się równaniami różniczkowymi stanu. Rozwiązanie tych równań jest w ogólnym przypadku złożone i wymaga zastosowania metod numerycznych [4, 7]. Druga metoda analizy czasowej, to komputerowa symulacja działania układu. Jest to działanie znacznie prostsze, jednak nie daje ogólnego rozwiązania problemu. Zaletą badań symulacyjnych jest możliwość uzyskania przebiegów napięć i prądów jak dla obiektu rzeczywistego, jeśli uwzględni się dokładne modele odwzorowujące podzespoły zastosowane w badanym układzie [2]. Przykładowe przebiegi uzyskane z wykorzystaniem programu PSpice przedstawiono na rys. 6a i 7a.

3. Badania modelowe i symulacyjne

W celu weryfikacji rozważań teoretycznych zbudowano model laboratoryjny układu CEETS, który opierał się na schemacie ideowym przedstawionym na rys. 1b. W skład układu wchodzi: źródło zasilania z prostownikiem sieciowym i kondensatorem filtrującym (u_i), przekształtnik z tranzystorami wysokoczęstotliwościowymi IGBT, układ cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie o regulowanej szczeliny powietrznej, kondensatory kompensujące w układzie szeregowo-równoległym (C_p , C_s) oraz prostownik wyjściowy wraz z kondensatorem filtrującym C i obciążeniem R_o [6]. Dodatkowo stanowisko wyposażono w komputer PC z oprogramowaniem projektowo-uruchomieniowym dla mikrokontrolerów DSP i przyrządy pomiarowe [8].

Główną część układu CEETS stanowią cewki sprzężone magnetycznie. Przyjęto najprostszą konstrukcję cewek, którą przedstawiono na rys. 4 wraz z charakterystyką współczynnika sprzężenia w funkcji odległości pomiędzy uzwojeniami. Zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych i rezultaty obliczeń polowych wykonanych w oparciu o metodę elementów skończonych. Zbudowany model laboratoryjny jest specyficznym układem transformatora powietrznego o szczeliny powietrznej zmieniającej się podczas normalnej pracy układu. Cewki wykonano z przewodu Litz'a. Indukcyjność własna każdej z nich wynosi $L_p = L_s = L = 205 \mu\text{H}$, a rezystancja $R_p = R_s = R = 0,101 \Omega$. Z cewkami włączono odpowiednio specjalnie skonstruowany układ kondensatorów kompensujących o pojemnościach dobranych wg (1), otrzymując $C_p = 12 \text{ nF}$ i $C_s = 14 \text{ nF}$.

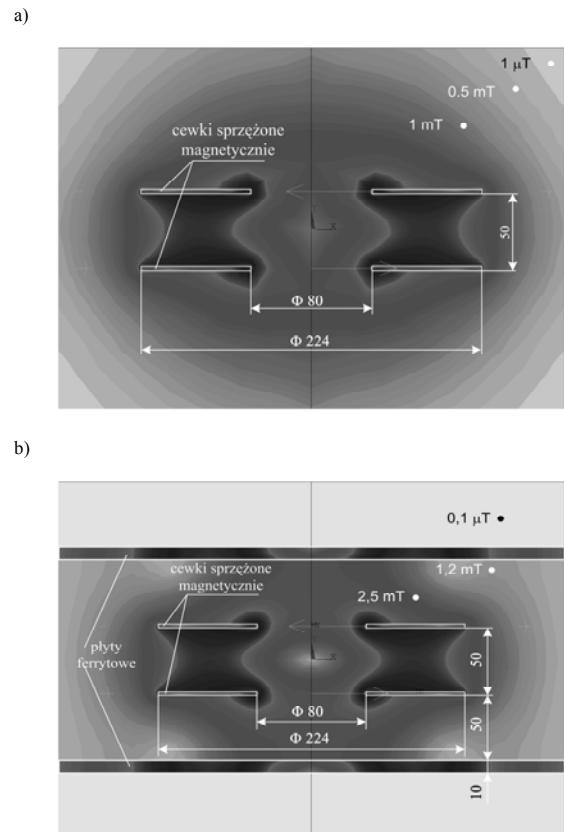


Rys. 4. Układ cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie: a) geometria modelu laboratoryjnego; b) zależność współczynnika sprzężenia k od odległości między uzwojeniami d

Fig. 4. Coils with large air gap: a) geometry of laboratory model; b) magnetic coupling coefficient k as function of distance between coils d

Wykonane pomiary i obliczenia są zbieżne. Ze względu na specyfikę działania układu CEETS z cewkami sprzężonymi z dużą szczeliną powietrzną przeprowadzono obliczenia rozkładu pola magnetycznego. Przykładowe rozkłady modułu wektora indukcji magnetycznej przedstawia rys. 5. W pierwszym przypadku (rys. 5a) pokazano rozkład indukcji magnetycznej dla dwóch cewek zasilanych prądem o wartości 10 A. Cewki oddalone są od siebie na odległość $d = 50 \text{ mm}$. Maksymalne wartości indukcji występują pomiędzy cewkami, zwłaszcza przy wewnętrznych krawędziach (ciemne obszary) i osiągają poziom ok. $B = 3\text{--}4 \text{ mT}$. Indukcja pola szybko maleje i w odległości powyżej 200 mm od środka układu wynosi $1 \mu\text{T}$. W celu dalszego ograniczenia obszaru występowania pola o większych wartościach indukcji wprowadzono ekrany ferromagnetyczne. Na rys. 5b przedstawiono wyniki obliczeń dla dwu cewek ekranowanych płytami ferrytowymi o przenikalności względnej $\mu_w = 3000$, grubości 10 mm, oddalonych od cewek o 50 mm. Zastosowanie ekranów spowodowało odseparowanie obszarów ponad płytami od pola magnetycznego (obszary

najjaśniejsze) – eliminuje to wpływ zewnętrznych elementów ferromagnetycznych i przewodzących na pracę układu CEETS. Jednocześnie rozkład pola magnetycznego w pobliżu cewek nie uległ znaczącym zmianom. Wartości maksymalne modułu indukcji magnetycznej pozostały na poziomie kilku militesli (obszary najciemniejsze).

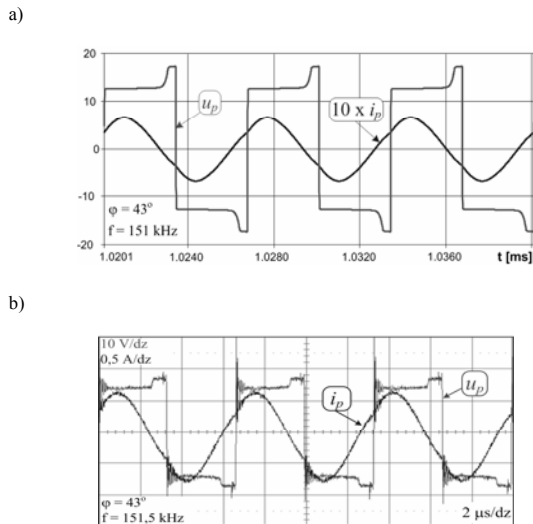


Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej dla: a) dwóch cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie b) cewek sprzężonych ekranowanych
Fig. 5. Magnetic flux density for: a) two coupling windings b) two coils with magnetic shield

Ze względu na zmianę wielkości szczeliny powietrznej między cewkami, wymagającej zmiany częstotliwości rezonansowej układu, należy odpowiednio sterować tranzystorami przekształtnika. Sterownik oparto o nowoczesny 32-bitowy procesor sygnałowy firmy Texas Instrument typu TMS320F2812, który zapewnia możliwość generacji sygnałów PWM (ang. Pulse With Modulation) o wysokiej częstotliwości modulacji, rzędu setek kiloherców. Obszerna biblioteka firmowa procedur sterujących, możliwość pisania programów w języku C oraz oprogramowanie projektowo-uruchomieniowe znacznie przyspiesza prace nad aplikacją z wykorzystaniem tego mikrokontrolera. W szczególności dotyczy to modułów programowych obsługujących: pomiar fazy pomiędzy sygnałem prądu i napięcia cewki pierwotnej, standardowego regulatora PID i generatora PWM. Ze względu na zakładaną niewielką prędkość przemieszczania się cewek, a więc i powolne zmiany współczynnika sprzężenia między cewkami, wymagana szybkość zmian częstotliwości pracy falownika jest mała. Wystarczający jest regulator o strukturze PI z dominującym członem całkującym [8].

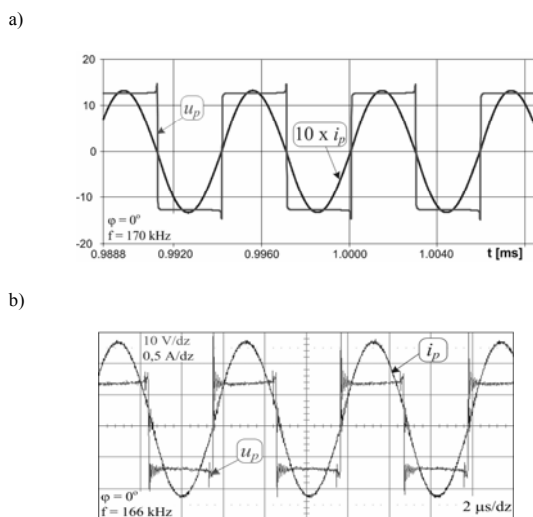
Rysunki 6b oraz 7b przedstawiają oscylogramy napięcia u_p i prądu i_p cewki pierwotnej przy napięciu zasilania równym 15 V, szczeliny powietrznej $d = 15 \text{ mm}$ i wartości rezystancji obciążenia $R_o = 380 \Omega$. W pierwszym przypadku układ pracuje przy częstotliwości $f = 151,5 \text{ kHz}$ z wyłączonym członem regulacji przesunięcia pomiędzy przejściem przez zero wartości prądu i napięcia. W takiej sytuacji tranzystory falownika są przełączane przy niezerowych wartościach prądu i/lub napięcia. Powoduje to

występowanie dodatkowych strat komutacyjnych. Ponadto transformator powietrzny wraz z kondensatorami kompensującymi nie pracuje w punkcie rezonansowym. Skutkuje to obniżeniem wartości mocy przesyłanej do odbiornika, jak i wzrostem strat mocy.



Rys. 6. Przebieg napięcia u_p i prądu i_p strony pierwotnej transformatora, w układzie bez regulatora; a) wyniki symulacji; b) pomiar
Fig. 6. Primary voltage u_p and current i_p for basic topology of power converter without control system; a) simulation results; b) measurements

Po załączeniu układu regulacji system przechodzi do punktu pracy rezonansowej. Częstotliwość napięcia prostokątnego generowanego przez falownik zwiększyła się w stosunku do poprzedniego przypadku i wynosi $f = 166$ kHz (rys 7b). Widać brak przesunięcia pomiędzy przebiegami napięcia i prądu. Uległa również zwiększeniu amplituda prądu i_p . Dla tej sytuacji moc przekazywana do układu jest trzykrotnie większa niż dla pracy bez układu regulacji.



Rys. 7. Przebieg napięcia u_p i prądu i_p strony pierwotnej transformatora powietrznego w układzie z regulatorem; a) wyniki symulacji; b) pomiar
Fig. 7. Primary voltage u_p and current i_p for basic topology of power converter with control system; a) simulation results; b) measurements

Poza przebiegami uzyskanymi na drodze pomiarowej przedstawiono odpowiadające im rezultaty analizy symulacyjnej przeprowadzonej w programie PSpice, co pokazano odpowiednio na rys. 6a i 7a.

Przedstawione rezultaty są efektem badań wstępnego układu. Docelowo należy zwiększyć wartość napięcia zasilania, a co za tym idzie zwiększeniu ulegnie moc przekazywana przez system.

4. Podsumowanie

System CEETS może znaleźć zastosowanie w trakcji elektrycznej jako układ automatycznego doładowywania baterii akumulatorów lub superkondensatorów pojazdu podczas jego postoju przy-stankowego. Przy odpowiednio zmodyfikowanej konstrukcji transformatora powietrznego możliwe jest także zasilanie ciągle pojazdu w trakcie jego ruchu. Układ jest w stanie przekazywać energię elektryczną o określonym poziomie mocy również w przypadku dynamicznie zmieniających się jego parametrów (w szczególności współczynnika sprzężenia magnetycznego).

Z przedstawionych charakterystyk i przebiegów wynika, że uzyskano dobrą zgodność analizy teoretycznej z wynikami eksperymentalnymi z modelu laboratoryjnego. Rozbieżności wynikają głównie z niedokładności pomiaru oraz temperaturowej zmienności pojemności zastosowanych kondensatorów kompensujących. Nie bez znaczenia pozostają także pojemności tranzystorów i diod, które powodują zmianę częstotliwości rezonansowej układu. Potwierdziła to symulacja pracy układu z wykorzystaniem programu PSpice i bibliotecznymi dokładnymi modelami tranzystorów i diod.

Sterownik mikrokontrolerowy DSP, ze sprzętowym wspomaganie określania fazy pomiędzy prądem i napięciem, prawidłowo steruje przekształtnikiem energoelektronicznym dostosowując częstotliwość zasilania do częstotliwości rezonansowej układu.

Dla zastosowań praktycznych CEEST należy rozszerzyć analizę pracy optymalizując kształt geometryczny cewek oraz uwzględniając wpływ konstrukcyjnych elementów ferromagnetycznych i przewodzących stanowiących otoczenie środowiskowe układu cewek. W celu ograniczenia zaburzeń EMC oraz zmniejszenia wartości wysokoczęstotliwościowych prądów wirowych wzbudzanych w konstrukcji konieczne jest zastosowanie ekranu ferrytowego koncentrującego pole elektromagnetyczne. W pracy wskazano na możliwości ekranowania cewek.

5. Literatura

- [1] R. Mecke: Analysis of inductive energy transmission systems with large airgap at high frequencies. 9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001, Graz 2001.
- [2] S. Judek, K. Karwowski: Bezstykowe zasilanie pojazdów trakcyjnych. XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa SEMTRAK 2004 i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Kraków – Zakopane 2004.
- [3] S. Judek, K. Karwowski: Analiza układów przekształtnikowych w systemach bezstykowego przesyłania energii elektrycznej do pojazdu trakcyjnego. Seventh International Conference Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe, Warszawa 2005.
- [4] J. G. Hayes, M. G. Egan, J. M. D. Murphy, S. E. Schulz, J. T. Hall: Wide-load-range resonant converter supplying the SAE J-1773 electric vehicle inductive charging interface. Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume 35, Issue 4, July–Aug. 1999.
- [5] R. W. Erickson, D. Maksimovic: Fundamentals of Power Electronics. Springer Science + Business Media Inc., Boulder Colorado 2001.
- [6] S. Judek, K. Karwowski: Analiza systemu przekazywania energii elektrycznej na drodze indukcyjnej przy dużej szczelnie powietrznej i wysokiej częstotliwości. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa SEMTRAK 2006 i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Kraków – Zakopane 2006.
- [7] W. Ying, Y. Luguang, X. Shangang: Modeling and Performance Analysis of the New Contactless Power Supply System. Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Volume 3, 27–29 Sept. 2005.
- [8] M. R. Gzella: Przekształtnik IGBT o wysokiej częstotliwości modulacji do bezstykowego przesyłu energii elektrycznej. Praca dyplomowa PG. Gdańsk 2006.