

SŁAWOMIR JUDEK, KRZYSZTOF KARWOWSKI*

**ANALIZA SYSTEMU PRZEKAZYWANIA
ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA DRODZE INDUKCYJNEJ
PRZY DUŻEJ SZCZELINIE POWIETRZNEJ
I WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI**

**ANALYSIS OF CONTACTLESS ELECTRICAL ENERGY
TRANSFER SYSTEM VIA INDUCTIVE COUPLING
WITH LARGE AIRGAP AND HIGH FREQUENCY**

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono analizę pracy systemu CEETS oraz wybrane wyniki badania modelu laboratoryjnego układu bezstykowego przekazywania energii elektrycznej – w szczególności dobór parametrów układu i metodę sterowania w przypadku zmiany wielkości szczeliny powietrznej. Wielkość szczeliny powietrznej, a więc i współczynnik sprzężenia magnetycznego, może się zmieniać, np. w przypadku różnego pozycjonowania pojazdu z cewką wtórną względem nieruchomej cewki pierwotnej umieszczonej w miejscu przystankowym. Przedstawione rezultaty dotyczą komputerowej analizy symulacyjnej oraz badań laboratoryjnych w układzie cewek powietrznych z kilkucentymetrową szczeliną powietrzną przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym oraz prostokątnym z przekształtnika tranzystorowego dla stanów pracy quasi-ustalonej.

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

Abstract

CEETS is becoming more and more 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, linear transformer. Coupling between the windings is variables and depend on dimensions of air gap. The efficiency of CEETS is mainly influenced by the transmission frequency. In particular the efficiency of system with large air gap (d is 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.

Keywords: electric vehicle, high frequency power converter, transmission of electrical energy, resonance, coupled coils

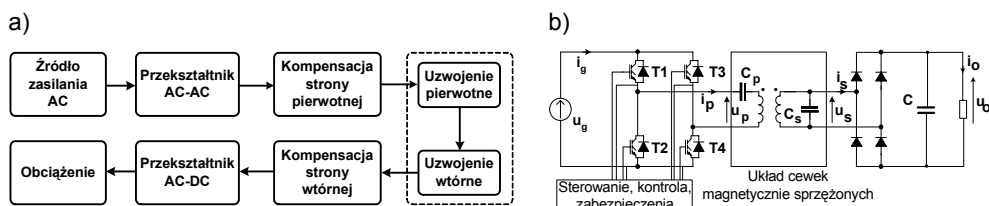
* Mgr inż. Sławomir Judek, dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, prof. PG, Zakład Trakcji Elektrycznej, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska.

1. Wstęp

Zasilanie odbiorników energią elektryczną odbywa się, w większości przypadków, za pośrednictwem przewodów łączących bądź innych zestykowych układów pośredniczących typu komutatory, odbieraki prądu itp. W przypadku gdy energia dostarczana jest do obiektu ruchomego, mogą występować niekorzystne zjawiska, takie jak zerwania przewodów jezdnych i doziemienia, iskrzenie lub niebezpieczeństwo porażenia, gdy taka instalacja znajduje się w obszarze dotyku bezpośredniego (np. systemy zasilania trakcji kopalnianej). Z tych względów atrakcyjną alternatywą staje się dla rozwiązań klasycznych bezstykowe zasilanie energią elektryczną CEETS (ang. *Contactless Electrical Energy Transfer System*) z zastosowaniem cewek magnetycznie sprzężonych z dużą szczeliną powietrzną, zwłaszcza w przypadku budowy bezobsługowych stacji doładowujących baterie akumulatorów lub superkondensatorów pojazdu. Systemy CEETS znajdują także zastosowanie do zasilania pojazdów w trakcie jego ruchu [1]. 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 budowa jego schematu zastępczego (ryc. 1). Dla układu cewek powietrznych słabo sprzężonych magnetycznie wystarczy schemat zastępczy, podobnie jak dla transformatora powietrznego, nawet jeśli częstotliwość napięcia zasilającego wynosi 100 kHz [3]. Do przesyłu energii z dużą sprawnością konieczne jest, oprócz zasilania układu cewek sprzężonych za pomocą wysokoczęstotliwościowego falownika napięcia, skompensowanie spadków napięcia na indukcyjnościach rozproszenia (ryc. 1b) [2]. Postępowanie w rozważaniach teoretycznych jest możliwe na dwa sposoby.



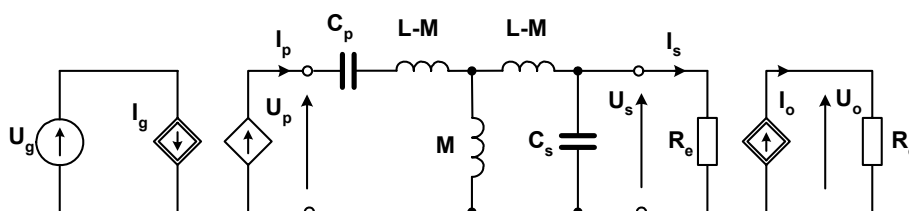
Ryc. 1. Schemat układu CEETS: a) schemat blokowy, b) przykładowy schemat ideowy

Fig. 1. Equivalent circuit diagram of CEETS: a) block diagram, b) example electrical circuit diagram

Pierwszym z nich jest metoda 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 punkcie rezonansu, zakłada się, że istotne znaczenie ma tylko pierwsza harmoniczna i pomija się pozostałe składowe. Takie rozwiązanie znacząco

upraszcza analizę skomplikowanego układu przekształtnikowego wraz z obciążeniem. Wszelkie obliczenia można wykonywać w dobrze znanej i niewymagającej skomplikowanych narzędzi obliczeniowych dziedzinie amplitud zespolonych. Otrzymane rezultaty stanowią ocenę jakościową i ilościową układu, a także umożliwiają wyznaczenie zależności analitycznych użytecznych w fazie projektowej [6, 4].

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



Ryc. 2. Model obwodowy systemu CEETS w analizie FMA

Fig. 2. Equivalent circuit diagram of CEETS for FMA analysis

Tablica 1

Zależności między parametrami modelu FMA

Zmienna/parametr	Wyrażenie/znaczenie
U_g	napięcie źródła zasilania
I_g	$\frac{2I_{pm}}{\pi} \cdot \cos \varphi_s$ I_{pm} – amplituda prądu cewki pierwotnej, φ_s – kąt przesunięcia fazowego między I_p a U_p
U_p	$\frac{4U_g}{\pi\sqrt{2}}$
U_s	$\frac{4U_0}{\pi\sqrt{2}}$
R_e	$\frac{8}{\pi^2} R_0$
I_0	$\frac{2}{\pi\sqrt{2}} I_s$

Relacje pomiędzy poszczególnymi zmiennymi i parametrami układu z ryc. 2 zestawiono w tabl. 1. 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 częstotliwości f_0 [2]. Warunek powyższy jest spełniony, gdy

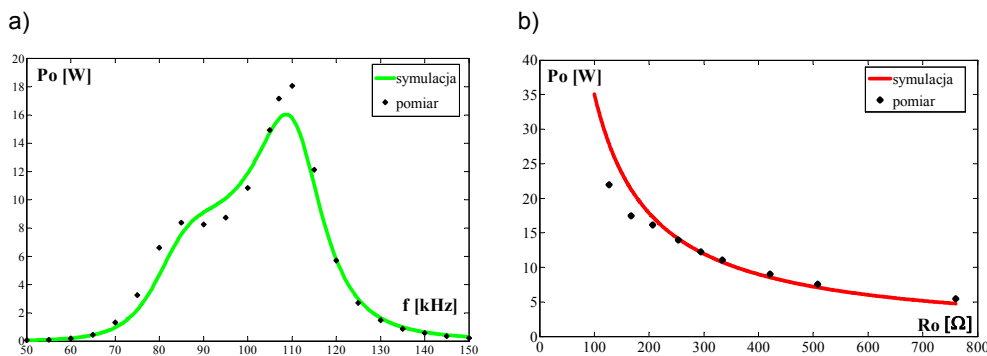
$$C_p = \frac{L}{\omega_0^2(L^2 - M^2)}, \quad C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L^2} \quad (1)$$

gdzie:

L – indukcyjność własna cewki,

M – indukcyjność wzajemna zespołu dwóch cewek.

Dla tak skonfigurowanego schematu przeprowadzono symulację w środowisku Matlab oraz poddano weryfikacji w układzie laboratoryjnym. Uzyskane wyniki przedstawiono na ryc. 3. Charakterystyka na ryc. 3a przedstawia zmienność mocy przekazywanej do odbiornika P_0 w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego f . Symulacje oraz pomiary przeprowadzono przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym o wartości skutecznej $U_g = 21,5$ V, szczeliny powietrznej $d = 51$ mm, rezystancji odbiornika $R_0 = 333 \Omega$. Charakterystyka na ryc. 3b opisuje zależność mocy odbiornika P_0 w funkcji zmian wartości rezystancji obciążenia R_0 . Przyjęte parametry obwodu to: napięcie zasilania $U_g = 21$ V, $d = 51$ mm, $f = 100$ kHz.



Ryc. 3. Charakterystyki mocy odbiornika P_0 : a) w funkcji częstotliwości napięcia zasilającego f , b) w funkcji rezystancji obciążenia R_0

Fig. 3. Output power: a) P_0 as function of frequency f , b) P_0 as function load resistance R_0

Z przedstawionego porównania wynika, że analiza oparta na metodzie FMA w sposób dobry odzwierciedla zmiany jakościowe i ilościowe parametrów badanego obwodu. Występujące rozbieżności w wartościach mocy P_0 są spowodowane głównie niedokładnością zastosowanych przyrządów pomiarowych.

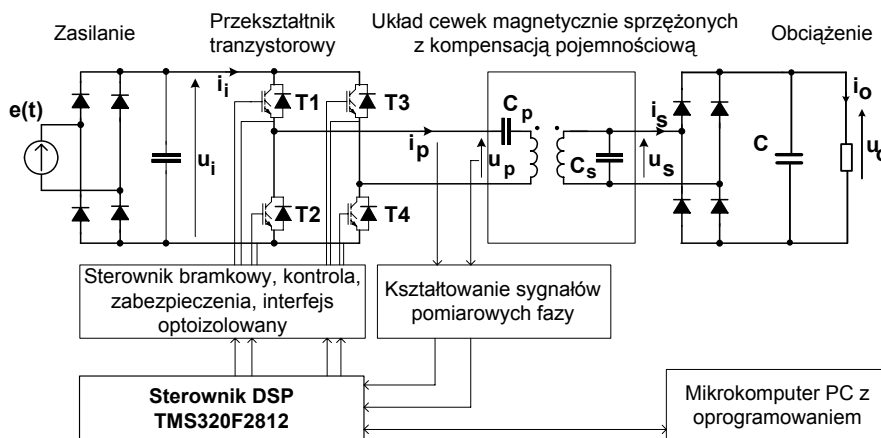
Alternatywnym sposobem postępowania w rozważaniach teoretycznych układu CEETS jest analiza w dziedzinie czasu (ang. *modal analysis*). Możliwe są tu dwie metody postępowania. Pierwsza polega na rozpatrzeniu trybów pracy poszczególnych elementów falownika i podzieleniu ich na przedziały czasowe, w których układ opisuje się równaniami różniczkowymi stanu. Rozwiązanie tych równań jest w ogólnym przypadku skomplikowane i wymaga zastosowania metod numerycznych [5, 6]. Druga metoda analizy czasowej to komputerowa symulacja działania układu. Jest to działanie znacznie prostsze niż poszukiwanie rozwiązań analitycznych, jednak nie daje ogólnego rozwiązania problemu. Zaletą badań symulacyjnych jest możliwość uzyskania przebiegów napięć i prądów jak dla

obiekty rzeczywiste, jeśli uwzględni się modele odwzorowujące podzespoły zastosowane w badanym układzie [1].

Dla prezentowanego układu przeprowadzono obliczenia numeryczne z zastosowaniem symulatora PSPICE według schematu przedstawionego na ryc. 1b. Wyniki przedstawiono na ryc. 6a i 7a. Przeprowadzona analiza obejmowała układ wysokoczęstotliwościowego, czterotranzystorowego falownika napięcia zasilanego ze źródła napięcia stałego $U = 15$ V. Model falownika stworzono na podstawie plików bibliotecznych dostarczonych przez producenta używanych tranzystorów, tj. IRGP50B60PD1 o parametrach $U_{CES} = 600$ V, $I_C = 33$ A. Wyjściowy mostek prostowniczy zbudowano na bazie diod szybkich HFA15TB60 o parametrach $I_{F(AV)} = 15$ A, $U_R = 600$ V, $t_{rr} = 19$ ns. Pozostałe wielkości zostały dobrane na podstawie pomiarów – w przypadku układu cewek powietrznych oraz na podstawie wyżej opisanej analizy FMA – wartości pojemności kompensujących. Symulacje przeprowadzono dla szczeliny powietrznej równej 15 mm w układzie z regulatorem oraz bez regulatora. Zadaniem regulatora cyfrowego było sterowanie przekształtnikiem tak, aby utrzymać pracę układu w stanie rezonansu, co warunkuje wysoką sprawność i możliwie dużą wartość przesyłanej mocy [2].

3. Układ bezstykowego przekazu energii elektrycznej

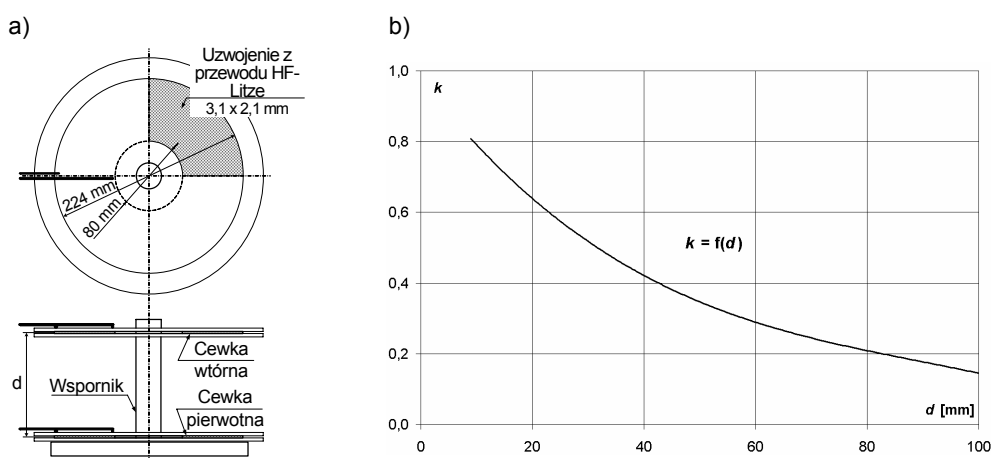
W celu weryfikacji założeń i rozważań teoretycznych zbudowano stanowisko laboratoryjne. Na rycinie 4 przedstawiono schemat blokowy cyfrowego układu sterowania wraz ze schematem ideowym systemu CEETS. W skład układu wchodzi: źródło zasilania $e(t)$ z prostownikiem sieciowym i kondensatorem filtrującym, przekształtnik z tranzystorami wysokoczęstotliwościowymi IGBT, układ cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie o regulowanej szczelinie powietrznej i kondensatorów kompensujących w układzie szeregowo-równoległym (C_p , C_s) oraz prostownik wyjściowy wraz z kondensatorem filtrującym i obciążeniem [2]. Dodatkowo stanowisko wyposażono w komputer PC z oprogramowaniem projektowo-uruchomieniowym dla mikrokontrolerów DSP i przyrządy pomiarowe.



Ryc. 4. Schemat modelu laboratoryjnego układu CEETS wraz z układem sterowania

Fig. 4. Schematic diagram of CEETS system together with control system

Główną część układu CEETS stanowią cewki sprzężone magnetycznie. Przyjęto najprostsza konstrukcję cewek, którą przedstawiono na ryc. 5 wraz z charakterystyką współczynnika sprzężenia w funkcji odległości pomiędzy uzwojeniami. Wykonany model laboratoryjny jest specyficznym układem transformatora powietrznego o szczeliny powietrznej zmieniającej się podczas normalnej pracy układu. Cewki wykonano z przewodu Litze. Indukcyjność własna każdej z nich wynosi $L_p = L_s = 205 \mu\text{H}$, a rezystancja $R_p = R_s = 0,101 \Omega$. Z cewkami włączono odpowiednio specjalnie skonstruowany układ kondensatorów kompensujących o pojemnościach dobranych wg (1), otrzymując $C_p = 12 \text{ nF}$ i $C_s = 14 \text{ nF}$.



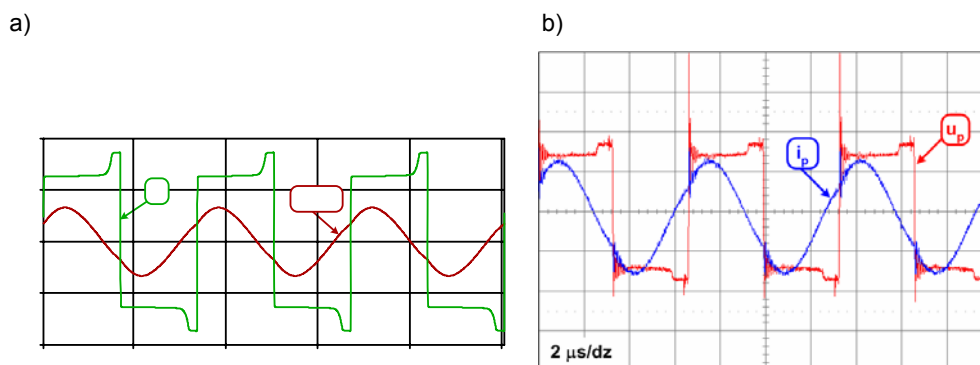
Ryc. 5. Układ cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie: a) układ cewek modelu laboratoryjnego, b) zależność współczynnika sprzężenia k od odległości między uzwojeniami d

Fig. 5. Magnetically coupled air-spaced coils: a) geometry of laboratory model, b) coupling coefficient k as a function of distance between coils d

Ze względu na zmianę wielkości szczeliny powietrznej między cewkami, wymagającej zmiany częstotliwości rezonansowej układu, należy odpowiednio sterować tranzystorami przekształtnika. Sterownik oparto na nowoczesnym 32-bitowy procesorze sygnałowym 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-ruchomiennowe znacznie przyspiesza prace nad aplikacją z zastosowaniem 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.

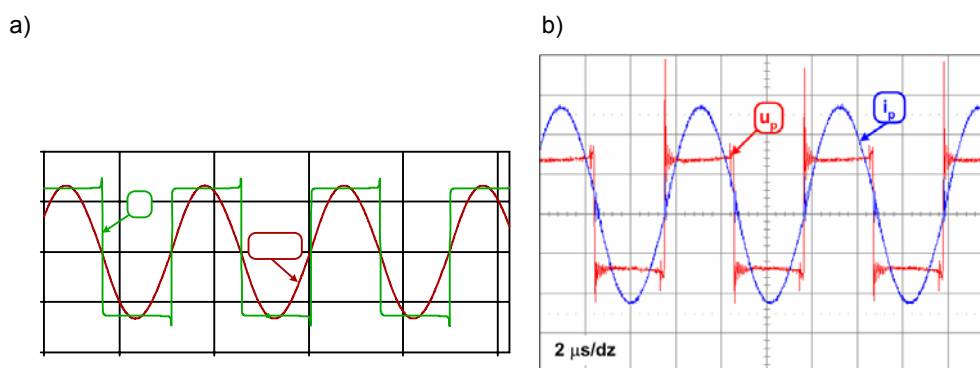
Na rycinach 6b i 7b przedstawiono oscylogramy napięcia u_p i prądu i_p cewki pierwotnej przy napięciu zasilania równym 15 V, szczeliny powietrznej $d = 15 \text{ mm}$ i wartości rezystancji obciążenia $R_0 = 380 \Omega$. W pierwszym przypadku układ pracuje przy częstotliwości

$f = 151,5$ kHz z wyłączonym członem regulacji przesunięcia pomiędzy przejściem przez zero wartości prądu i napięcia. W takiej sytuacji tranzystory falownika nie są przełączane przy niezerowych wartościach prądu i/lub napięcia. Powoduje to występowanie dodatkowych strat mocy. Ponadto transformator powietrzny wraz z kondensatorami kompensującymi nie pracuje w punkcie rezonansowym. Powoduje to obniżenie wartości mocy przesyłanej do odbiornika, jak i wzrost strat mocy występujących w cewce pierwotnej. W tym przypadku moc przekazywana do układu utrzymuje się na poziomie $P_0 = 4,2$ W.



Ryc. 6. Przebieg napięcia u_p i prądu i_p strony pierwotnej transformatora powietrznej przy szczelinie powietrznej $d = 15$ mm, w układzie bez regulatora: a) wyniki symulacji: $I_{pm} = 0,69$ A, $U_g = 12,7$ V, $f = 151$ kHz, $\varphi = 43^\circ$, b) oscylogram: $I_{pm} = 0,65$ A, $U_g = 14$ V, $f = 151,5$ kHz, $\varphi = 43^\circ$

Fig. 6. Primary voltage u_p and current i_p for distance between coils $d = 15$ mm at working point without control system: a) simulation results, b) measurements



Ryc. 7. Przebieg napięcia u_p i prądu i_p strony pierwotnej transformatora powietrznej przy szczelinie powietrznej $d = 15$ mm, w układzie z regulatorem: a) wyniki symulacji: $I_{pm} = 1,32$ A, $U_g = 12,7$ V, $f = 170$ kHz, b) oscylogram: $I_{pm} = 1,35$ A, $U_g = 14$ V, $f = 166$ kHz

Fig. 7. Primary voltage u_p and current i_p for distance between coils $d = 15$ mm at working point with 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 (ryc. 8b). Widać brak przesunięcia pomiędzy przebiegami napięcia i prądu. Zwiększeniu uległa również amplituda prądu i_p . Dla tej sytuacji moc przekazywana do układu wynosi $P_0 = 12$ W. Jest to trzykrotnie więcej niż dla pracy bez układu regulacji.

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

Przedstawione rezultaty są efektem badań wstępnych układu. Docelowo wartość napięcia zasilania zostanie znacznie podwyższona, a co za tym idzie zwiększeniu ulegnie poziom przekazywanej przez system mocy czynnej oraz poprawi się sprawność układu.

4. Podsumowanie

W pracy przeprowadzono analizę teoretyczną i symulacyjną układu bezstykowego przesyłania energii elektrycznej (CEETS). System CEETS może znaleźć zastosowanie w trakcji elektrycznej jako układ automatycznego doładowywania baterii akumulatorów lub superkondensatorów pojazdu podczas jego postoju przystankowego. Przy odpowiednio zmodyfikowanej konstrukcji transformatora powietrznego możliwe jest także zasilanie ciągle pojazdu w trakcie jego ruchu. Rozważania teoretyczne uzupełnione o badania symulacyjne, a następnie weryfikacja założeń w układzie laboratoryjnym dostarczyły niezbędnych informacji na temat zjawisk występujących w układzie. W pierwszej części przedstawiono analizę stanu ustalonego dla wymuszeń sinusoidalnych metodą FMA. Obliczenia oparto na transformatorowym schemacie zastępczym układu cewek powietrznych sprzężonych magnetycznie. W drugiej części przedstawiono wyniki symulacji układu przy zasilaniu z czterotranzystorowego falownika z uwzględnieniem modeli rzeczywistych elementów energoelektrycznych. Przedstawione wyniki obejmują pracę układu w stanie quasi-ustalonym bez regulatora oraz z regulatorem cyfrowym zaimplementowanym w strukturze sterownika mikrokontrolerowego. Posłużono się symulatorem PSPICE. Otrzymane rezultaty wskazują na to, że 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 punktu pracy układu (przesunięcie częstotliwości rezonansowej).

Dla zastosowań praktycznych CEETS należy rozszerzyć analizę pracy, uwzględniając wpływ konstrukcyjnych elementów ferromagnetycznych i przewodzących stanowiących otoczenie środowiskowe układu cewek związane z cechami konstrukcyjnymi odbiornika. W celu ograniczenia emisji zaburzeń EMC oraz zmniejszenia wartości wysokoczęstotliwościowych prądów wirowych wzbudzanych w konstrukcji konieczne może się okazać zastosowanie ekranu ferrytowego odpowiednio koncentrującego pole elektromagnetyczne.

Literatura

- [1] Judek S., Karwowski K., *Bezstykowe zasilanie pojazdów trakcyjnych*, XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa SEMTRAK 2004 i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Kraków–Zakopane 2004.
- [2] Judek S., Karwowski K., *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.
- [3] Mecke R., *Analysis of inductive energy transmission systems with large airgap at high frequencies*, 9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001, Graz 2001.
- [4] Erickson R.W., Maksimovic D., *Fundamentals of Power Electronics*, Springer Science + Business Media Inc., Boulder Colorado 2001.
- [5] Ying W., Luguang Y., Shangang X., *Modeling and Performance Analysis of the New Contactless Power Supply System*, Electrical Machines and Systems, 2005, ICEMS 2005, Proceedings of the Eighth International Conference, Vol. 3, 27–29 Sept. 2005, 1983–1987.
- [6] Hayes J.G., Egan M.G., Murphy J.M.D., Schulz S.E., Hall J.T., *Wide-load-range resonant converter supplying the SAE J-1773 electric vehicle inductive charging interface*, Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 35, Issue 4, July–Aug. 1999, 884-895.