

Analiza właściwości rezonansowych kaskad cewek ze względu na zwiększanie odległości przesyłu

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano wybrane właściwości rezonansowych kaskad cewek sprzężonych magnetycznie realizujących bezprzewodowy przesył energii elektrycznej. Przedstawiono metody umożliwiające zwiększanie odległości bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej bez konieczności ponownego wyznaczania parametrów układu. Metody te zostały zilustrowane przykładem oraz zweryfikowane eksperymentalnie: metoda „bezprzewodowa” – 13 płaskich cewek o średnicy zewnętrznej 15 cm, odległość przesyłu 80 cm, częstotliwość pracy 300 kHz, moc wyjściowa 100 W, sprawność 85,9%; metoda „przewodowa” – 14 płaskich cewek o średnicy zewnętrznej 15 cm, łączna odległość przesyłu 80 cm, częstotliwość pracy 300 kHz, moc wyjściowa 100 W, sprawność 83,5%.

Abstract. The paper describes selected properties of resonant cascades composed of magnetically coupled coils and designed for wireless electrical energy transfer. Methods for increasing a distance of wireless electrical energy transfer without having to re-calculate the system parameters were presented. The methods were illustrated by an example and verified experimentally: „wireless” method – 13 flat coils with outer diameter of 15 cm, transfer distance of 80 cm, operating frequency of 300 kHz, output power of 100 W, efficiency of 85,9%, „wire” method – 14 flat coils with outer diameter of 15 cm, total transfer distance of 80 cm, operating frequency of 300 kHz, output power of 100 W, efficiency of 83,5%. (*Analysis of properties of resonant cascades of coils due to increase in transfer distance*)

Słowa kluczowe: bezprzewodowy przesył energii elektrycznej, sprzężenie magnetyczne, obwody rezonansowe.

Keywords: wireless electrical energy transfer, magnetic coupling, resonant circuits.

Wstęp

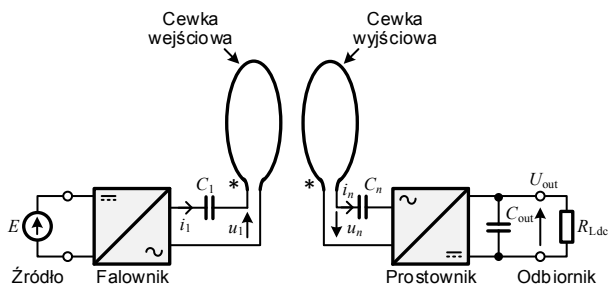
Bezprzewodowy przesył energii elektrycznej można zrealizować różnymi metodami [1]. Najczęściej w tym celu stosowane są dwie cewki sprzężone magnetycznie [2], [3] – układ dwucewkowy (rys. 1). Zwiększanie odległości pomiędzy cewkami, przy jednoczesnym zachowaniu ich średnic zewnętrznych, skutkuje gwałtownym zmniejszeniem współczynnika sprzężenia magnetycznego [4], co z kolei pogarsza sprawność energetyczną przesyłu. Poprawę sprawności uzyskuje się wprowadzając dodatkowe (pośredniczące) cewki sprzężone magnetycznie [5] – rezonansowa kaskada cewek (rys. 2). Rozwiązania tego typu mogą przykładowo zapewnić bezpieczną separację galwaniczną w zastosowaniach wysokonapięciowych.

W artykule scharakteryzowano wybrane właściwości rezonansowych kaskad cewek. Zaproponowano metody zwiększania odległości przesyłu bez konieczności ponownego wyznaczania parametrów układu – bez powtarzania procesu optymalizacji. Metody te wykorzystują pierwotnie wyznaczone parametry tzw. kaskady bazowej, stanowiącej podstawę do wydłużenia toru przesyłu energii elektrycznej.

W porównaniu z literaturą przedmiotu oryginalnymi wynikami prezentowanymi w artykule są charakterystyka wybranych właściwości rezonansowych kaskad cewek oraz bazujące na tych właściwościach metody zwiększania odległości bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej.

Rezonansowa kaskada cewek

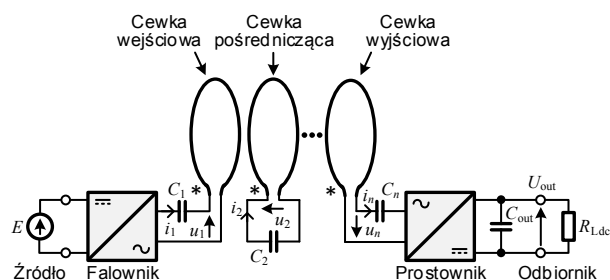
Najprostsze układy bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej składają się z dwóch cewek rezonansowych sprzężonych magnetycznie (rys. 1).



Rys. 1. Rezonansowy układ dwucewkowy (DC/DC)

Cewka wejściowa zasilana jest poprzez falownik ze źródła napięcia oraz przekazuje energię do sprzężonej z nią magnetycznie cewki wyjściowej, która połączona jest poprzez prostownik z odbiornikiem.

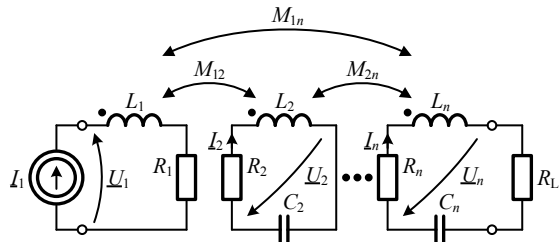
Zasadniczym ograniczeniem układu dwucewkowego jest względnie mała odległość na jaką przesył energii może odbywać się z akceptowalną sprawnością energetyczną. Efektywne zwiększenie odległości bezprzewodowego przesyłu energii uzyskuje się przez umieszczenie pomiędzy cewką wejściową i wyjściową dodatkowych cewek pośredniczących. Utworzony w ten sposób zestaw cewek (obwodów rezonansowych LC), nazywany rezonansową kaskadą cewek, przedstawiono na rysunku 2. Energia z cewki wejściowej przekazywana jest poprzez szereg cewek pośredniczących do cewki wyjściowej.



Rys. 2. Rezonansowa kaskada cewek (DC/DC)

Model kaskady

Bazując na metodzie symbolicznej, analiza właściwości rezonansowej kaskady cewek sprowadzana jest do analizy właściwości obwodu AC/AC. Obliczenia prowadzone są w środowisku Matlab. Cewki charakteryzowane są przez indukcyjności własne L_i ($i = 1..n$) oraz rezystancje pasożytnicze R_i , a sprzężenia magnetyczne cewek przez indukcyjności wzajemne M_{ik} ($i = 1..n, k = 1..n$). Na schemacie (rys. 3) zaznaczono również kondensatory rezonansowe C_i ($i = 2..n$) oraz rezystor obciążenia R_L . Cewka wejściowa zasilana jest ze źródła prądu sinusoidalnego \underline{I}_1 . W praktyce prąd ten jest wynikiem dołączonego do wejścia kaskady, poprzez szeregowy kondensator rezonansowy, falownika napięcia. Wyższe harmoniczne prądu zasilającego są pomijane.



Rys. 3. Schemat zastępczy rezonansowej kaskady cewek (AC/AC)

Wzajemne oddziaływanie pomiędzy cewkami opisuje zależność (1). Przyjmując, że cewki znajdują się w ośrodku jednorodnym, macierz \underline{Z} jest macierzą symetryczną.

$$(1) \quad \underline{U} = \underline{Z}\underline{I} = \begin{bmatrix} R_1 + jX_{L1} & jX_{M12} & \dots & jX_{M1n} \\ jX_{M12} & R_2 + jX_{L2} & \dots & jX_{M2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ jX_{M1n} & jX_{M2n} & \dots & R_n + jX_{Ln} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix}$$

Dołączenie do cewek kondensatorów rezonansowych C_i oraz rezystora obciążenia R_L wyraża zależność (2).

$$(2) \quad \begin{bmatrix} U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \underline{Z}_{CR} \begin{bmatrix} I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jX_{C2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -R_L + jX_{Cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix}$$

W celu uogólnienia modelu rezonansowej kaskady cewek wprowadzane są wielkości względne. Prądy odnoszone są do wartości skutecznej prądu wejściowego I_1 , napięcia do iloczynu $I_1 R_L$, a reaktancje do rezystancji obciążenia R_L (3).

$$(3) \quad I_i^* = \frac{I_i}{I_1}, \quad U_i^* = \frac{U_i}{I_1 R_L}, \\ X_{Li}^* (X_{Mik}^*) = \frac{X_{Li} (X_{Mik})}{R_L}, \quad X_{Ci}^* = \frac{X_{Ci}}{R_L}$$

Właściwości pojedynczej cewki można wyrazić przez jej dobroć Q_i oraz impedancję \underline{Z}_{Li} :

$$(4) \quad Q_i = \frac{X_{Li}}{R_i}, \quad \underline{Z}_{Li} = R_i + jX_{Li} = jX_{Li} (1 - j/Q_i).$$

Wykorzystując zależności (3) i (4) równanie (1) przyjmuje postać:

$$(5) \quad \underline{U}^* = \underline{K} \circ \underline{Z}_L^* \cdot \underline{I}^*,$$

gdzie \underline{K} jest macierzą współczynników sprzężeń magnetycznych pomiędzy poszczególnymi cewkami:

$$(6) \quad \underline{K} = \begin{bmatrix} 1 & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{12} & 1 & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{1n} & k_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad k_{ik} = \frac{M_{ik}}{\sqrt{L_i L_k}},$$

a macierz \underline{Z}_L^* można przedstawić następująco:

$$(7) \quad \underline{Z}_L^* = \begin{bmatrix} jX_{L1}^* (1 - j/Q_1) & j\sqrt{X_{L1}^* X_{L2}^*} & \dots & j\sqrt{X_{L1}^* X_{Ln}^*} \\ j\sqrt{X_{L1}^* X_{L2}^*} & jX_{L2}^* (1 - j/Q_2) & \dots & j\sqrt{X_{L2}^* X_{Ln}^*} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ j\sqrt{X_{L1}^* X_{Ln}^*} & j\sqrt{X_{L2}^* X_{Ln}^*} & \dots & jX_{Ln}^* (1 - j/Q_n) \end{bmatrix}.$$

Symbol „ \circ ” oznacza iloczyn po współrzędnych macierzy. Zakłada się, że wszystkie cewki są jednakowe, czyli $X_{L1}^* = X_{L2}^* = \dots = X_{Ln}^* = X_L^*$ oraz $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q$.

W analogiczny sposób równanie (2), po uwzględnieniu zależności (3) oraz (4), przyjmuje postać:

$$(8) \quad \begin{bmatrix} U_2^* \\ \dots \\ U_n^* \end{bmatrix} = \underline{Z}_{CR}^* \begin{bmatrix} I_2^* \\ \dots \\ I_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jX_{C2}^* & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -1 + jX_{Cn}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2^* \\ \dots \\ I_n^* \end{bmatrix}.$$

Przyjmuje się, że zasilające źródło prądu I_1 zawiera jedynie składową rzeczywistą o wartości skutecznej I_1 ($I_1 = |I_1| = I_1$; $I_1^* = 1$). Ostatecznie równania (5) i (8) rozwiązywane są względem prądów cewek, uzyskując:

$$(9) \quad \underline{I}^* = \left[1, \left(\left[\underline{Z}_{CR}^* - \underline{K} \circ \underline{Z}_L^* (2..n, 2..n) \right]^{-1} \cdot \underline{K} \circ \underline{Z}_L^* (2..n, 1) \right)^T \right]^T,$$

gdzie $\underline{K} \circ \underline{Z}_L^* (a,b)$ to podmacierz macierzy $\underline{K} \circ \underline{Z}_L^*$ o podanych przez a i b zakresach elementów.

Na podstawie obliczonego względnego wektora prądu \underline{I}^* oraz zależności (5) wyznaczane są względne napięcia cewek \underline{U}^* . Z kolei względne moce czynne (moc wejściowa) (moc wyjściowa) oraz cewki wyjściowej (moc wyjściowa) opisują odpowiednio zależności (10) i (11), a sprawność energetyczna kaskady wyraża się zależnością (12).

$$(10) \quad P_1^* = \operatorname{Re}(U_1^* I_1^{*}) = \operatorname{Re}(U_1^*) = P_1 / (I_1^2 R_L)$$

$$(11) \quad P_n^* = -\operatorname{Re}(U_n^* I_n^{*}) = P_n / (I_1^2 R_L)$$

$$(12) \quad \eta = (P_n^* / P_1^*) \cdot 100\%$$

Znając względne parametry modelu kaskady cewek, możliwe jest obliczenie jej parametrów bezwzględnych. Uwzględniając sprawność kaskady η oraz zakładając przykładowo moc wyjściową P_n i rezystancję obciążenia R_L , odpowiednia wartość skuteczna prądu zasilania (cewki wejściowej) jest równa:

$$(13) \quad I_1 = \sqrt{\frac{100 P_n}{\eta R_1^* R_L}}, \quad R_1^* = \operatorname{Re} \left(\frac{U_1^*}{I_1^*} \right)_{I_1^*=1} = \operatorname{Re}(U_1^*).$$

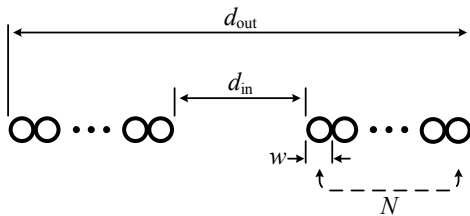
Parametr R_1^* oznacza względną rezystancję wejściową rezonansowej kaskady cewek. Wartości bezwzględne prądów i napięć cewek obliczane są następująco:

$$(14) \quad \underline{I} = \underline{I}^* I_1, \quad \underline{U} = \underline{U}^* I_1 R_L.$$

Metoda projektowania

Projektowanie rezonansowej kaskady cewek wymaga uwzględnienia wielu parametrów. Rozpoczyna się od przyjęcia pewnych założeń wstępnych. Następnie wyznaczane są pozostałe wymagane parametry modelu macierzowego. Podstawową rolę w projektowaniu kaskady pełnią parametry cewek. Należy zauważyć, że niektóre parametry mogą być określone dokładniej tylko na podstawie pomiarów (np. dobroć cewki Q).

Przyjmuje się, że rozważane są jedynie cewki płaskie, rozmieszczone współosiowo i równomiernie, a ich poszczególne zwoje przylegają do siebie (rys. 4).

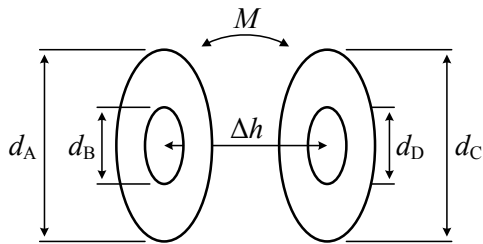


Rys. 4. Pojedyncza cewka płaska (d_{out} , d_{in} – średnica zewnętrzna / wewnętrzna, w – średnica zewnętrzna licy, N – liczba zwojów)

Indukcyjność własną L_i cewki płaskiej (rys. 4) wyraża zależność [6]:

$$(15) \quad L_i = \frac{1}{2} \mu_0 N^2 d_{avg} \left[\ln \left(\frac{2,46}{\rho} \right) + 0,20 \rho^2 \right],$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni, N jest liczbą zwojów oraz $d_{avg} = (d_{out} + d_{in}) / 2$ i $\rho = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in})$.



Rys. 5. Dwie cewki płaskie zastąpione cewkami jednozwojowymi

Indukcyjność wzajemną dwóch cewek o średnicy zewnętrznej d_{out} oraz wewnętrznej d_{in} obliczono bazując na metodzie Lyle'a [7]. Metoda ta zakłada zastąpienie każdej z cewek dwiema cewkami jednozwojowymi o średnicach odpowiednio $d_{A(C)}$ i $d_{B(D)}$ (rys. 5):

$$(16) \quad d_{A(C)} = d_{avg} + \frac{d_{out} - d_{in}}{8\sqrt{3}}, \quad d_{B(D)} = d_{avg} - \frac{d_{out} - d_{in}}{8\sqrt{3}}.$$

Indukcyjność wzajemna dwóch pojedynczych zwojów o średnicach $d_{A(B)}$ oraz $d_{C(D)}$, umieszczonych współosiowo w odległości Δh wynosi:

$$(17) \quad M_z = \frac{1}{2} \mu_0 \sqrt{d_{A(B)} d_{C(D)}} \left[\left(\frac{2}{g} - g \right) K(g) - \frac{2}{g} E(g) \right],$$

gdzie $K(g)$ i $E(g)$ to całki eliptyczne zupełne, odpowiednio pierwszego i drugiego rzędu, a parametr g wynosi:

$$(18) \quad g = \sqrt{\frac{4d_{A(B)}d_{C(D)}}{(d_{A(B)} + d_{C(D)})^2 + 4\Delta h^2}}.$$

W ogólnym przypadku (rys. 5), gdy pierwsza cewka posiada N_1 zwojów i zastępowana jest dwiema cewkami jednozwojowymi A i B o średnicach d_A i d_B , a druga cewka posiada N_2 zwojów i zastępowana jest dwiema cewkami jednozwojowymi C i D o średnicach d_C i d_D , to indukcyjność wzajemną obu cewek można zapisać jako:

$$(19) \quad M \approx \mu_0 N_1 N_2 \Delta h \left(\frac{M_{zAC} + M_{zAD} + M_{zBC} + M_{zBD}}{4} \right).$$

Przykładowo M_{zAC} jest indukcyjnością wzajemną pomiędzy cewkami jednozwojowymi A i C. Współczynnik sprzężenia magnetycznego k_{ik} pomiędzy dwoma cewkami płaskimi i oraz k wyznacza się na podstawie zależności (6).

Algorytm projektowania rezonansowej kaskady cewek ze względu na uzyskanie możliwie jak najwyższej sprawności ilustruje rysunek 6. Rozpoczyna się od przyjęcia założeń wstępnych – danych wejściowych. Są nimi następujące parametry względne: dobroć cewki Q (4), współczynnik wypełnienia uzwojenia cewki:

$$(20) \quad S = (d_{out} - d_{in}) / d_{out},$$

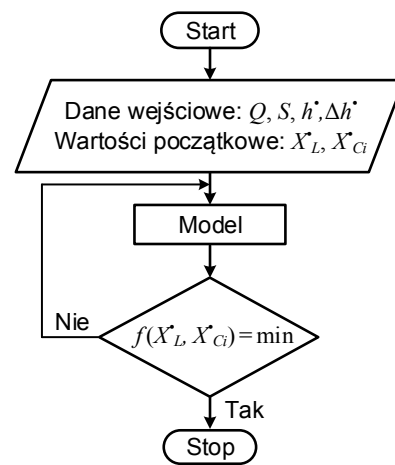
względna odległość przesły:

$$(21) \quad h^* = h / d_{out}$$

oraz względna odległość pomiędzy sąsiednimi cewkami kaskady:

$$(22) \quad \Delta h^* = \Delta h / d_{out}.$$

Parametr h oznacza odległość bezprzewodowego przesły energii, natomiast $\Delta h = h / (n - 1)$ jest odległością pomiędzy sąsiednimi cewkami, a n to liczba cewek kaskady.

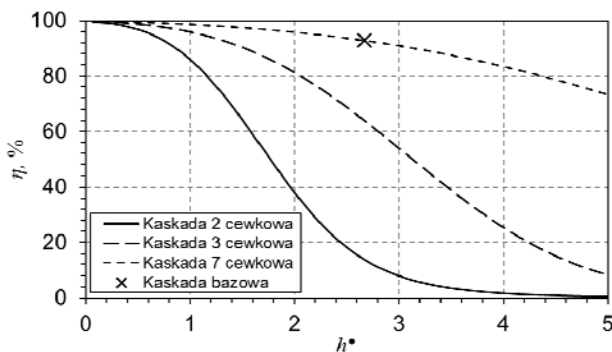


Rys. 6. Algorytm projektowania rezonansowej kaskady cewek

Na podstawie przyjętych założeń wyznaczone zostają wartości początkowe względnej reaktancji indukcyjnej X_L oraz względnych reaktancji pojemnościowych X_{C_i} ($i = 2 \dots n$). W przypadku parametru X_L wartość początkową oblicza się jako $X_L = 1 / k$, podobnie jak dla układu dwucewkowego [8], przyjmując współczynnik sprzężenia magnetycznego k pomiędzy dwoma sąsiednimi cewkami kaskady. Wartości początkowe parametrów X_{C_i} wyznacza się na podstawie warunku rezonansu ($X_{C_i} = X_L$).

Podczas projektowania rezonansowej kaskady cewek wykorzystuje się względny model macierzowy. Obliczane są macierze Z_{CR} i Z_L oraz sprawność kaskady η . Następnie dokonuje się procesu optymalizacji. Wprowadzana jest funkcja celu, której wartość zależy od parametrów decyzyjnych. Wyraża ona zadany warunek optymalizacji, którym jest maksymalizacja sprawności. Wartość funkcji celu $(1 - \eta)$ jest minimalizowana, aż do uzyskania wartości optymalnych przyjętych parametrów decyzyjnych X_L i X_{C_i} . Do tego stosowana jest procedura optymalizacji *fminsearch* dostępna w środowisku Matlab.

Na rysunku 7 zostały przedstawione reprezentatywne charakterystyki sprawności η w funkcji względnej odległości przesły h^* dla kaskad o różnej liczbie cewek n . Parametry poszczególnych cewek ($Q = 550$, $S = 0,8$ – tabela 1) zostały przyjęte jak dla kaskady bazowej, użytej w badaniach laboratoryjnych. Zwiększenie odległości przesły, przy zachowaniu możliwie wysokiej sprawności, jest realizowane przez wprowadzanie dodatkowych cewek pośredniczących.



Rys. 7. Charakterystyki sprawności η w funkcji względnej odległości przesyłu h^* dla kaskad o różnej liczbie cewek n

Dodatkowo, na rysunku 7 zaznaczono parametry kaskady bazowej (tabela 1), stanowiącej podstawę do wydłużenia toru przesyłu energii elektrycznej.

Metody zwiększania odległości przesyłu

Metody zwiększania odległości przesyłu h bez konieczności ponownego wyznaczenia parametrów układu wynikają bezpośrednio z przyjętego modelu rezonansowej kaskady cewek (rys. 3). Realizowane są one przez zwiększanie liczby użytych cewek n , zachowując stałe (niezmienione) odległości pomiędzy sąsiednimi cewkami Δh . Modyfikacja innych parametrów kaskady mających wpływ na sprawność energetyczną wymagałaby przeprowadzenia ponownej optymalizacji (rys. 6).

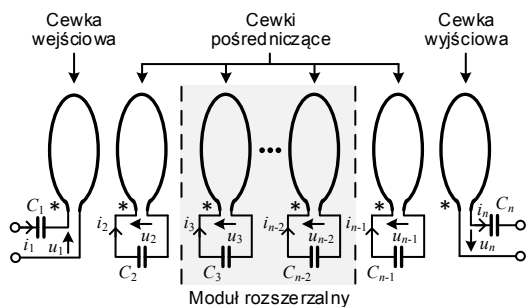
Wyróżniono następujące dwie metody zwiększania odległości bezprzewodowego przesyłu energii bez konieczności ponownego wyznaczenia parametrów układu:

- metoda „bezprzewodowa” – polega na wprowadzeniu do kaskady dodatkowych cewek,
- metoda „przewodowa” – polega na bezpośrednim połączeniu (dwóch lub więcej) kaskad.

Metoda „bezprzewodowa” bazuje na wydłużeniu części środkowej rezonansowej kaskady cewek – modułu rozszerzalnego (rys. 8) i ma bezpośredni związek z metodą optymalizacji 3C (23). Metoda 3C zakłada, że kondensatory rezonansowe, dołączane do poszczególnych cewek kaskady (poza kondensatorem C_1 , którego pojemność dobierana jest ze względu na warunki pracy zasilającego falownika napięcia) zostają sprowadzone jedynie do wyznaczenia trzech pojemności. Wyraża to przyjęta funkcja celu, której wartość jest minimalizowana:

$$(23) \quad g(X_L^*, X_{C_n}^*, X_{C_{2,n-1}}^*, X_{C_{3,n-2}}^*) = 1 - \eta,$$

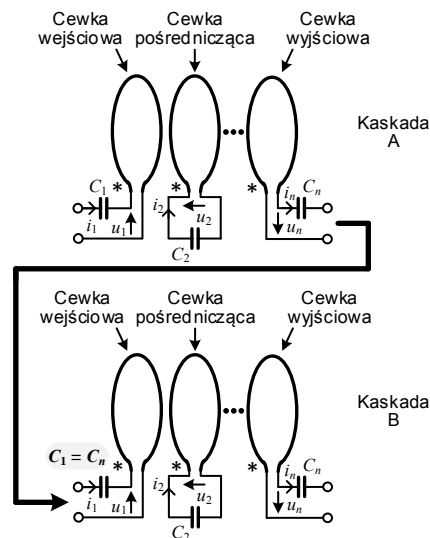
gdzie $X_{C_n}^* \rightarrow C_n$ (C_n – pierwsza pojemność), $X_{C_{2,n-1}}^* \rightarrow C_2$, C_{n-1} ($C_2 = C_{n-1}$ – druga pojemność) oraz $X_{C_{3,n-2}}^* \rightarrow C_3 \div C_{n-2}$ ($C_3 = \dots = C_{n-2}$ – trzecia pojemność). Pojemności kondensatorów dołączanych do cewek kaskady tworzących moduł rozszerzalny są jednakowe.



Rys. 8. Metoda „bezprzewodowego” zwiększania odległości przesyłu energii elektrycznej

Metoda „bezprzewodowego” zwiększania odległości przesyłu energii elektrycznej polega na dodawaniu kolejnych, identycznych cewek pośredniczących modułu rozszerzalnego kaskady (rys. 8), aż do uzyskania wymaganej odległości przesyłu, zachowując przy tym elementarne odległości Δh pomiędzy cewkami.

Metoda „przewodowa” zwiększania odległości przesyłu energii elektrycznej zakłada bezpośrednie (przewodowe) połączenie cewki wyjściowej kaskady A (kaskady zasilanej bezpośrednio z falownika napięcia) z cewką wejściową kaskady dołączanej B (rys. 9). Przyjmuje się, że łączone ze sobą kaskady są jednakowe oraz nie występuje pomiędzy nimi sprzężenie magnetyczne. Istnieje możliwość połączenia teoretycznie dowolnej liczby m kaskad, przy czym wraz ze wzrostem odległości przesyłu zmniejsza się jej sprawność. Metoda „przewodowa” znajduje zastosowanie wtedy, gdy na drodze bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej istnieją przeszkody, które uniemożliwiają zastosowanie sprzężenia magnetycznego.



Rys. 9. Metoda „przewodowego” zwiększania odległości przesyłu energii elektrycznej

Stosując metodę „przewodową” konieczne jest zastąpienie pojemności kondensatora C_1 kaskady dołączanej B przez pojemność kondensatora C_n :

$$(24) \quad C_1 = C_n.$$

Warunek (24) wynika z zależności występującej pomiędzy impedancją wejściową Z_1 a impedancją wyjściową Z_n kaskady o zoptymalizowanych ze względu na sprawność parametrach [9]:

$$(25) \quad Z_1 = \bar{Z}_n.$$

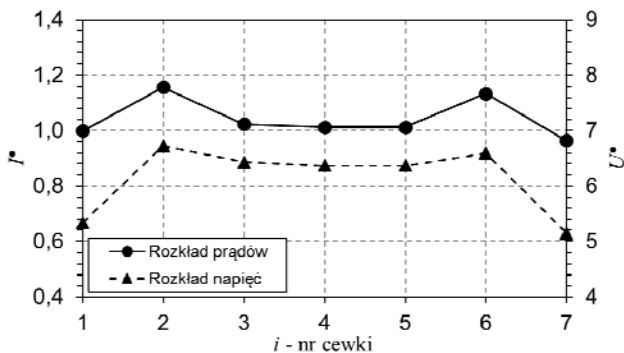
Przykład

W przykładzie punktem wyjścia do zilustrowania właściwości metod zwiększania odległości przesyłu energii elektrycznej bez konieczności ponownego wyznaczenia parametrów układu jest tzw. kaskada bazowa. Proces optymalizacji (rys. 6) parametrów kaskady bazowej ze względu na jej sprawność η_b , zgodnie z przyjętymi założeniami, przeprowadzono stosując metodę 3C. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry względne kaskady bazowej

Parametr	Wartość	Opis
η_b	92,9%	sprawność
Q	550	dobroć cewki
S	0,80	współczynnik wypełnienia uzwojenia cewki
h^*_b	2,67	względna odległość przesylu
X^*_L	5,10	względna reaktancja cewki
X^*_{Cr}	5,25	względna reaktancja kondensatora n
$X^*_{C2;n-1}$	5,82	względna reaktancja kondensatorów 2 oraz $n-1$
$X^*_{C3;n-2}$	6,29	względna reaktancja kondensatorów od 3 do $n-2$

Rozkłady względnych prądów i napięć cewek kaskady bazowej przedstawiono na rysunku 10.

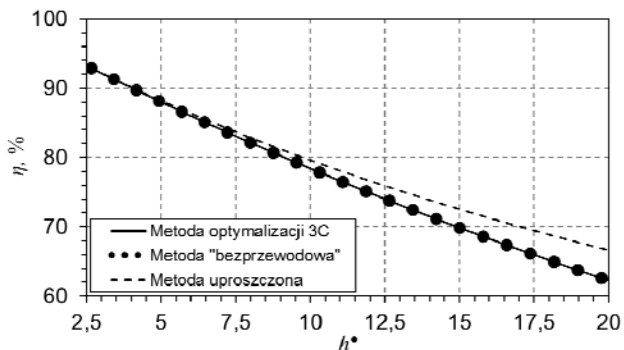


Rys. 10. Wartości względne prądów i napięć poszczególnych cewek kaskady bazowej

Metoda „bezprowodowa”: Na rysunku 11 widoczne są charakterystyki sprawności η kaskady w funkcji względnej odległości h^* przesylu, obliczone dla:

- metody optymalizacji 3C,
- metody „bezprowodowej” po wydłużeniu kaskady poprzez modyfikację modułu rozszerzalnego, przy czym sprawność obliczono powtórnie za pomocą modelu kaskady bez optymalizacji jej parametrów oraz
- metody uproszczonej, oszacowując sprawność na podstawie zależności (26).

Punktem początkowym przedstawionych charakterystyk jest przypadek kaskady bazowej ($\eta_b = 92,9\%$, $h^*_b = 2,67$). Uzyskane sprawności pokrywają się dla metody „bezprowodowej” i metody optymalizacji 3C, natomiast dla metody uproszczonej widoczne są rozbieżności, które zwiększają się wraz ze wzrostem odległości przesylu.



Rys. 11. Charakterystyki sprawności rezonansowej kaskady cewek w funkcji względnej odległości przesylu h^*

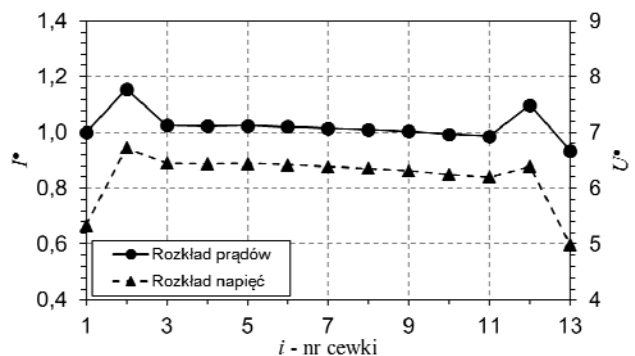
Zależność (26) może posłużyć do oszacowania sprawności kaskady wydłużonej, przy założeniu, że straty mocy w poszczególnych cewkach modułu rozszerzalnego

są jednakowe. Sprawność η kaskady wydłużonej o względnej odległości h^* przesylu i liczbie n cewek szacowana jest na podstawie sprawności η_b kaskady bazowej o względnej odległości h^*_b przesylu i liczbie n_b cewek.

$$(26) \quad \eta = \frac{1}{1 + h^*/h^*_b(1/\eta_b - 1)} = \frac{1}{1 + n/n_b(1/\eta_b - 1)}$$

W przykładzie ilustrującym metodę „bezprowodowego” zwiększania odległości przesylu założono wydłużenie kaskady bazowej ($n_b = 7$ – tabela 2) do 13 cewek poprzez dodanie 6 cewek do modułu rozszerzalnego. Sprawność kaskady wydłużonej wyniosła 87,4%, a względna odległość przesylu h^* wzrosła do 5,33.

Na rysunku 12 przedstawiono rozkłady względnych prądów i napięć poszczególnych cewek kaskady wydłużonej metodą „bezprowodową”. W przybliżeniu równomierny rozkład prądów cewek od 3 do 11 modułu rozszerzalnego kaskady świadczy o powstawaniu podobnych strat mocy w tych cewkach.

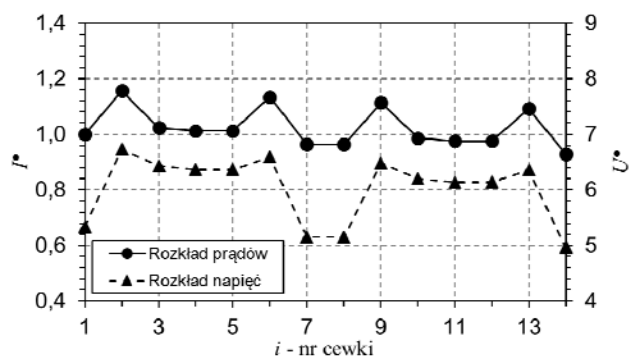


Rys. 12. Wartości względne prądów i napięć cewek dla kaskady wydłużonej – metoda „bezprowodowa”

Metoda „prowodowa”: Metodę zwiększania odległości przesylu polegającą na bezpośrednim połączeniu kaskad zrealizowano wykorzystując dwie kaskady bazowe ($n_b = 7$ – tabela 2) o sprawności $\eta_b = 92,9\%$ każda. Uzyskana kaskada podwójna ($m = 2$) zawierała $n = 14$ cewek, a względna odległość przesylu h^* była równa 5,33. Obliczona na podstawie zależności (27) sprawność kaskady η wyniosła 86,3%. Sprawność ta okazała się o 1,1% mniejsza w porównaniu ze sprawnością otrzymaną po wydłużeniu kaskady metodą „bezprowodową”, pomimo zachowania tej samej odległości przesylu. Powodem tego jest większa o jeden liczba użytych cewek ($n = 14$) dla metody „prowodowej”.

$$(27) \quad \eta = \eta_b^m$$

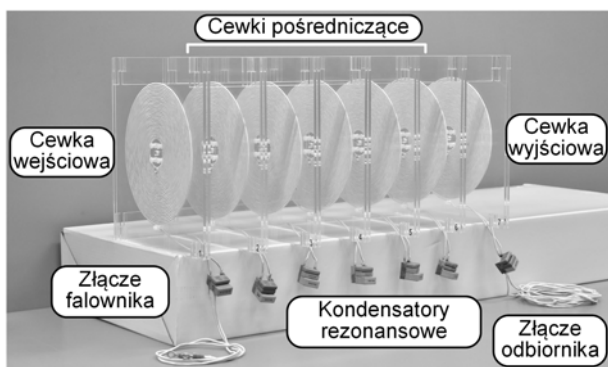
Na rysunku 13 zamieszczono rozkłady względnych prądów i napięć poszczególnych cewek kaskady podwójnej.



Rys. 13. Wartości względne prądów i napięć cewek dla kaskady podwójnej – metoda „prowodowa”

Weryfikacja eksperymentalna

Bazując na przedstawionym przykładzie skonstruowana została kaskada bazowa (rys. 14), którą następnie poddano badaniom laboratoryjnym.



Rys. 14. Laboracyjna kaskada bazowa

Przyjęte i obliczone parametry bezwzględne kaskady bazowej, które uzyskano na podstawie jej parametrów względnych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry bezwzględne kaskady bazowej

Parametr	Wartość	j. m.	Opis
n_b	7	-	liczba cewek
h_b	40	cm	odległość przesytu
d_{out}	15	cm	średnica zewnętrzna cewek
f	300	kHz	częstotliwość pracy
R_L	25,1	Ω	rezystancja obciążenia
L	68,2	μH	indukcyjność cewki
C_n	4,01	nF	pojemność kondensatora n
$C_{2,n-1}$	3,62	nF	pojemność kondensatorów 2 oraz $n-1$
$C_{3,n-2}$	3,35	nF	pojemność kondensatorów od 3 do $n-2$

Przedmiotem pomiarów były wszystkie istotne parametry kaskady. Indukcyjności własne L_i i dobroci Q_i cewek oraz pojemności C_i kondensatorów zostały zmierzone przy częstotliwości 300 kHz analizatorem impedancji Agilent 4294A. Porównanie tych parametrów z obliczonymi parametrami projektowymi zamieszczono w tabeli 3. Wyniki pomiarów indukcyjności L_i oraz dobroci Q_i dla poszczególnych cewek kaskady bazowej są zbliżone. Wymagane pojemności C_i zestawiono, łącząc równolegle kondensatory foliowe typu FKP. Z uwagi na przyjętą częstotliwość pracy układu pominięte zostały pojemności pasytywne cewek.

Tabela 3. Zmierzone indukcyjności i dobroci cewek oraz pojemności kondensatorów kaskady bazowej

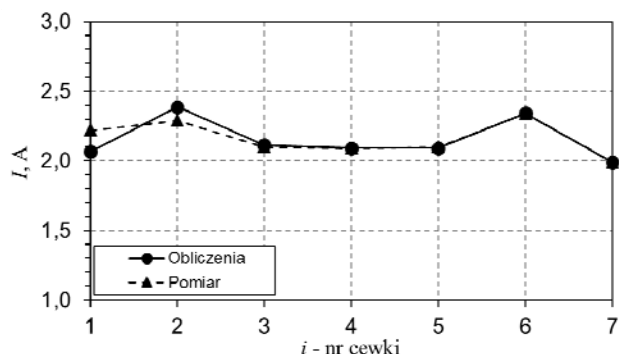
nr	$L_i, \mu\text{H}$	$\Delta L_i, \%$	$Q_i, -$	$\Delta Q_i, \%$	C_i, nF	$\Delta C_i, \%$
1	67,93	-0,40	572	3,85	4,93	-
2	67,93	-0,40	502	-9,56	3,59	-0,84
3	68,00	-0,29	519	-5,97	3,34	-0,30
4	68,05	-0,22	534	-3,00	3,33	-0,60
5	68,10	-0,15	509	-8,06	3,32	-0,90
6	68,12	-0,12	488	-12,7	3,59	-0,84
7	68,28	0,12	489	-12,5	4,00	-0,25

$$\Delta X = (X_{\text{pomiar}} - X_{\text{obliczenia}}) / X_{\text{pomiar}} \cdot 100\%$$

Przy częstotliwości pracy 300 kHz oraz mocy wyjściowej 100 W wartość skuteczna prądu cewki wejściowej była równa 2,22 A. Wyznaczona sprawność kaskady bazowej wyniosła 92,2%.

Wyniki pomiaru rozkładu wartości skutecznych prądów cewek przedstawiono na rysunku 15. Można zauważyć, że

zmierzone i obliczone rozkłady prądów w przybliżeniu pokrywają się, a różnice względne nie przekraczają 7%. Pomiary prądów cewek zostały dokonane metodą oscyloskopową – oscyloskop Agilent DSO-X-2004, sondy prądowe N2774A.



Rys. 15. Porównanie rozkładów wartości skutecznych prądów cewek dla kaskady bazowej

Metoda „bezprowadowa”: W tabeli 4 zamieszczono zmierzone indukcyjności własne L_i i dobroci Q_i cewek oraz pojemności C_i kondensatorów dodanych do modułu rozszerzalnego kaskady bazowej. Parametry zmierzone porównano z obliczonymi parametrami projektowymi.

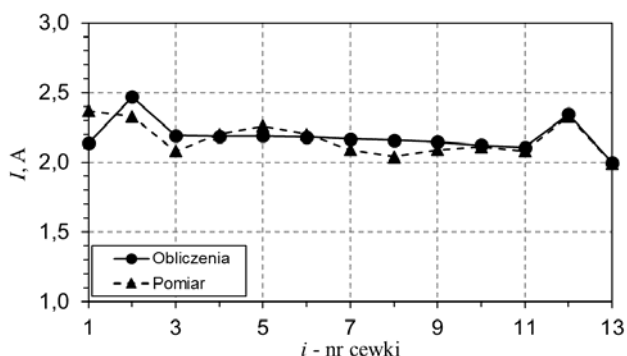
Tabela 4. Zmierzone indukcyjności i dobroci cewek oraz pojemności kondensatorów dodanych do modułu rozszerzalnego

Nr	$L_i, \mu\text{H}$	$\Delta L_i, \%$	$Q_i, -$	$\Delta Q_i, \%$	C_i, nF	$\Delta C_i, \%$
6	68,12	-0,12	554	0,72	3,32	-0,90
7	68,28	0,12	562	2,14	3,32	-0,90
8	68,34	0,20	567	3,00	3,33	-0,60
9	68,34	0,20	490	-12,3	3,32	-0,90
10	68,35	0,22	503	-9,34	3,32	-0,90
11	68,44	0,35	498	-10,44	3,33	-0,60

$$\Delta X = (X_{\text{pomiar}} - X_{\text{obliczenia}}) / X_{\text{pomiar}} \cdot 100\%$$

Przy częstotliwości pracy 300 kHz oraz mocy wyjściowej 100 W wartość skuteczna prądu cewki wejściowej była równa 2,37 A. Uzyskana sprawność kaskady wydłużonej metodą „bezprowadową” wyniosła 85,9%.

Porównanie rozkładów wartości skutecznych prądów cewek kaskady wydłużonej przedstawiono na rysunku 16. Zmierzone i obliczone rozkłady prądów w przybliżeniu pokrywają się, a różnice względne nie przekraczają 10%.



Rys. 16. Porównanie rozkładów wartości skutecznych prądów cewek dla kaskady wydłużonej – metoda „bezprowadowa”

Metoda „przewodowa”: W tabeli 5 zamieszczono zmierzone indukcyjności własne L_i i dobroci Q_i cewek oraz pojemności C_i kondensatorów kaskady B (rys. 9), którą dołączono do bazowej kaskady A (tabela 2 i 3). Zgodnie z przykładem kaskad B charakteryzowała się w przybliżeniu takimi samymi parametrami jak bazowa kaskada A.

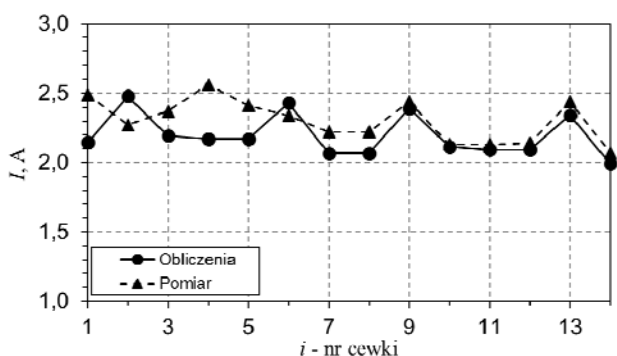
Połączenie obu kaskad wykonano za pomocą licy o długości 1,5 m. W rezultacie przesył energii elektrycznej odbywał się na dystansie 2,3 m (2 x 40 cm – łączna długość kaskad, 1,5 m – długość połączenia).

Tabela 5. Porównanie indukcyjności i dobroci cewek oraz pojemności kondensatorów kaskady B (kaskady dołączonej)

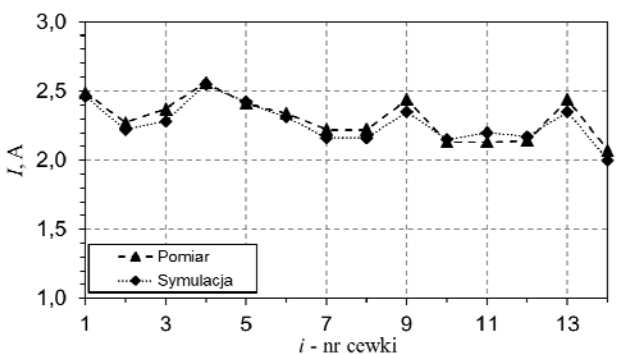
nr	$L_i, \mu\text{H}$	$\Delta L_i, \%$	$Q_i, -$	$\Delta Q_i, \%$	C_i, nF	$\Delta C_i, \%$
8	68,34	0,20	492	-11,8	4,00	-0,25
9	68,34	0,20	494	-11,3	3,59	-0,84
10	68,34	0,20	490	-12,2	3,32	-0,90
11	68,35	0,22	503	-9,34	3,32	-0,90
12	68,44	0,35	498	-10,44	3,33	-0,60
13	68,45	0,37	492	-11,8	3,59	-0,84
14	68,49	0,42	525	-4,76	3,99	-0,50

$$\Delta X = (X_{\text{pomiar}} - X_{\text{obliczenia}}) / X_{\text{pomiar}} \cdot 100\%$$

Na rysunku 17 przedstawiono porównanie rozkładów wartości skutecznych prądów poszczególnych cewek kaskady podwójnej (2 x 40 cm). Znaczące rozbieżności pomiędzy rozkładami prądów obliczonymi i zmierzonymi dotyczą kaskady A (cewki od 1 do 7), natomiast w przypadku kaskady B (cewki od 8 do 14) rozkłady te są zbliżone. Zaobserwowane rozbieżności spowodowane są zaniedbaniem parametrów pasożytniczych połączenia „przewodowego” kaskad (dwóch przewodów z licy typu 405 x 0,071 mm o długości 1,5 m każdy). Parametry pasożytnicze tego połączenia zmierzono za pomocą analizatora impedancji Agilent 4294A przy częstotliwości 300 kHz. Wyznaczone szeregowe parametry zastępcze połączenia (indukcyjność i rezystancja) wyniosły odpowiednio 1,34 μH i 22 m Ω . Uwzględniając w modelu uzyskane parametry pasożytnicze połączenia kaskad, przeprowadzono powtórne obliczenia.



Rys. 17. Porównanie rozkładów wartości skutecznych prądów cewek kaskady podwójnej – metoda „przewodowa”



Rys. 18. Porównanie rozkładów wartości skutecznych prądów cewek po uwzględnieniu parametrów pasożytniczych połączenia

Porównanie wyników powtórnych obliczeń z pomiarami przedstawiono na rysunku 18. Uzyskane rozkłady są

zgodne, zarówno w odniesieniu do kaskady A (cewki od 1 do 7), jak i do kaskady B (cewki od 8 do 14).

Przy częstotliwości pracy 300 kHz oraz mocy wyjściowej 100 W wartość skuteczna prądu cewki wejściowej była równa 2,49 A. Sprawność kaskady podwójnej po zastosowaniu metody „przewodowej” wyniosła 83,5%.

Przeprowadzone badania laboratoryjne pozytywnie weryfikują przedstawione metody zwiększania odległości bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej.

Wnioski

Przedstawiono metodę „bezprzewodową” i metodę „przewodową” zwiększania odległości przesyłu energii elektrycznej za pośrednictwem rezonansowej kaskady cewek bez konieczności ponownego wyznaczania parametrów układu. Umożliwiają one prostą modyfikację odległości przesyłu energii elektrycznej i nie wymagają powtarzania procesu optymalizacji.

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły poprawność przyjętych założeń. Wykorzystując kaskadę bazową ($n_b = 7$, $h_b = 40$ cm, $\eta_b = 92,2\%$), przy częstotliwości pracy 300 kHz i mocy wyjściowej 100 W, uzyskano:

- kaskadę wydłużoną metodą „bezprzewodową” ($n = 13$, $h = 80$ cm, $\eta = 85,9\%$) oraz
- kaskadę wydłużoną (podwójną) metodą „przewodową” ($n = 14$, $h = 80$ cm, $\eta = 83,5\%$).

Autorzy: dr hab. inż. Zbigniew Kaczmarczyk, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Zbigniew.Kaczmarczyk@polsl.pl; mgr inż. Krystian Frania, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Krystian.Frania@polsl.pl; dr inż. Krzysztof Bodzek, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Krzysztof.Bodzek@polsl.pl; dr inż. Adam Ruszczyk, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, E-mail: Adam.Ruszczyk@pl.abb.com.

LITERATURA

- [1] Kaczmarczyk Z., Frania K., Bodzek K., Ruszczyk A., Metoda projektowania i właściwości rezonansowej kaskady cewek w zastosowaniu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, 2016, nr 4, s. 120-125.
- [2] Blakiewicz G., Bezprzewodowe zasilanie sensorów medycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90, 2014, nr 9, s. 12-14.
- [3] Sakai E., Sakamoto H., Wireless Rapid Charger of Super Capacitor, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, 2012, nr 6, s. 114-117.
- [4] Frania K., Analiza właściwości cewek w zastosowaniu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej ze względu na maksymalizację sprawności, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93, 2017, nr 3, s. 242-247.
- [5] Lee C.K., Zhong W.X., Hui S.Y.R., Effects of Magnetic Coupling of Nonadjacent Resonators on Wireless Power Domino-Resonator Systems. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, 2012, pp.1905-1916.
- [6] Harrison R., Designing Efficient Inductive Power Links for Implantable Devices, *Circuits and Systems, IEEE International Symposium*, 2007, pp. 2080-2083.
- [7] Grover F. W., Inductance Calculations, *D. Van Nostrand*, New York 1946.
- [8] Cieśla T., Kaczmarczyk Z., Grzesik B., Stępień M., Obwody do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, *Kwartalnik Elektryka*, 2009, nr 4, s. 135-149.
- [9] Kim K. Y., Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations, *Publisher InTech*, ISBN 978-953-307-874-8, January 2012.