

Metoda projektowania i właściwości wieloodbiornikowej kaskady cewek w zastosowaniu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano wieloodbiornikową kaskadę cewek sprzężonych magnetycznie realizującą bezprzewodowy przesył energii elektrycznej. Kaskada wieloodbiornikowa (rys. 2) stanowi uogólnienie rezonansowej kaskady cewek (rys. 1) [2]. Opracowano względny macierzowy model kaskady wieloodbiornikowej umożliwiający określenie jej właściwości. Wykorzystując opracowany model, zaproponowano metodę projektowania tego typu kaskady. Metoda została zilustrowana przykładem oraz zweryfikowana eksperymentalnie (18 płaskich cewek o średnicy zewnętrznej 22 cm, odległości rozmieszczenia odbiorników 8,8, 44,1, 79,4, 114,7 i 150 cm, częstotliwość pracy 350 kHz, całkowita moc wyjściowa 12 W, sprawność 81,4%).

Abstract. The paper describes the multi-load cascade of magnetically coupled coils designed for wireless electrical energy transfer. The multi-load cascade (Fig. 2) is a generalization of the resonant cascade of coils (Fig. 1) [2]. The matrix, relative model of the multi-load cascade was formulated to determine its properties. Applying the model, the design method of such cascades was proposed. The method was illustrated by an example and verified experimentally (18 flat coils with outer diameter of 22 cm, distribution distances of receivers of 8.8, 44.1, 79.4, 114.7 and 150 cm, operating frequency of 350 kHz, total output power of 12 W, efficiency of 81,4%). (**Design method and properties of the multi-load cascade of coils for wireless electrical energy transfer application**).

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

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

Wstęp

Badania nad bezprzewodowym przesyłem energii elektrycznej sięgają XIX wieku. Ich prekursorem był serbski naukowiec Nikola Tesla. W 1891 roku, jako pierwszy, dokonał on udanej próby bezprzewodowego przesyłu energii na zasadzie indukcji elektrostatycznej [1]. Prowadzone od tego czasu badania pozwoliły na opracowanie i rozwój wielu metod bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Metody te ogólnie można podzielić na mechaniczne oraz elektromagnetyczne [2]. W pierwszym przypadku konieczne jest medium pośredniczące w przekazywaniu energii – np. [3], natomiast w drugim, niewymagającym medium, przesył energii może odbywać się m.in. za pośrednictwem pola magnetycznego [4] lub pola elektrycznego [5].

Współcześnie bezprzewodowy przesył energii elektrycznej realizowany jest najczęściej poprzez układ dwóch cewek sprzężonych magnetycznie. Tego typu rozwiązanie stosowane jest zarówno w urządzeniach codziennego użytku, jak również znajduje zastosowania przemysłowe oraz medyczne – np. bezprzewodowe zasilanie ruchomych urządzeń (manipulatorów [6]) lub okresowe doładowywanie zasobników energii telefonów [7], pojazdów elektrycznych [4] oraz implantów [8]. Zasadnicze ograniczenie stanowi tu wyraźny spadek efektywności przesyłu przy zwiększaniu względnej odległości pomiędzy cewkami – współczynnik sprzężenia magnetycznego zmniejsza się wykładniczo, pogorsząc sprawność. Konieczne staje się wówczas zastosowanie dodatkowych cewek pośredniczących, co prowadzi do uzyskania tzw. rezonansowej kaskady cewek (rys. 1). Z kolei w przypadku zasilania kilku niezależnych odbiorników rezonansowa kaskada cewek przekształca się w tzw. wieloodbiornikową kaskadę cewek (rys. 2), stanowiącą przedmiot prezentowanych dalej rozważań.

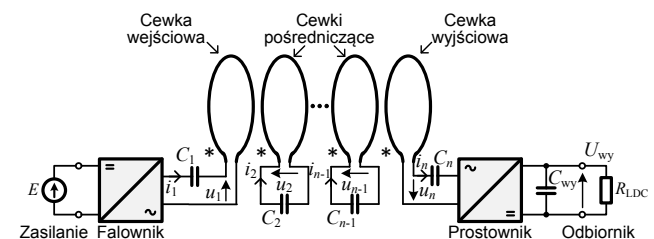
W artykule scharakteryzowano podstawowe właściwości kaskady cewek realizującej bezprzewodowy przesył energii elektrycznej jednocześnie do kilku odbiorników. Uwzględniając jej charakter wieloodbiornikowy, opracowano względny model macierzowy, opisano metodę projektowania oraz dokonano weryfikacji eksperymentalnej. Analizę właściwości kaskady wieloodbiornikowej

przeprowadzono na bazie modelu AC/AC (rys. 3) – układ zasilany ze źródła prądu sinusoidalnego oraz odbiornik po stronie zmiennoprądowej. Problematyka pełnego układu DC/DC do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, z falownikiem po stronie zasilania oraz prostownikiem po stronie obciążenia, nie jest przedmiotem artykułu.

W porównaniu z aktualną literaturą dotyczącą układów do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej nowym stanowi zaproponowana metoda usystematyzowanego projektowania kaskady wieloodbiornikowej, wykorzystująca jej względny model macierzowy.

Wieloodbiornikowa kaskada cewek

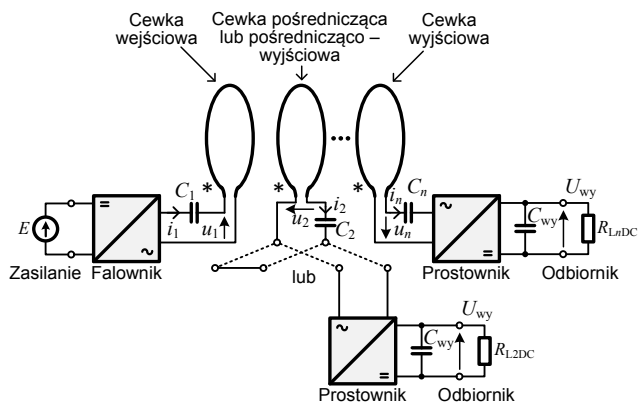
Ograniczeniem układów dwucewkowych jest względnie mała odległość (nieprzekraczająca zwykle promienia cewek), na którą w sposób efektywny (z możliwie ograniczonymi stratami mocy) może zostać zrealizowany bezprzewodowy przesył energii elektrycznej. Zwiększanie odległości pomiędzy cewkami powoduje istotne zmniejszenie wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego k pomiędzy nimi, prowadząc do obniżenia sprawności układu η . Poprawa właściwości układu w tym względzie uzyskiwana jest przez wprowadzenie dodatkowych cewek pośredniczących, uzyskując rezonansową kaskadę cewek (rys. 1).



Rys. 1. Rezonansowa kaskada cewek (DC/DC)

Uogólnienie rezonansowej kaskady cewek z rysunku 1 stanowi wieloodbiornikowa kaskada cewek przedstawiona na rysunku 2. Moc czynna w tego typu kaskadzie odbierana jest nie tylko z cewki wyjściowej P_n , ale również z wybranych cewek pośredniczących P_i ($i=2...n-1$), do których dołączone są odbiorniki R_{Li} . W ten sposób, oprócz cewek

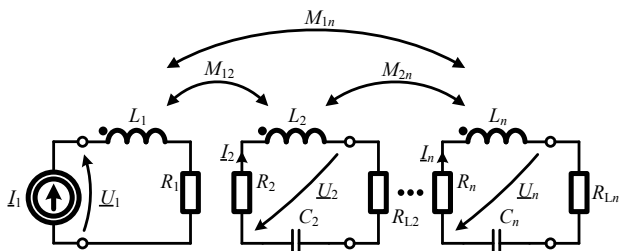
pośredniczących, utworzone zostają cewki pośrednicząco – wyjściowe. W wieloodbiornikowej kaskadzie cewek istnieje możliwość dość swobodnego określenia liczby oraz odległości rozmieszczenia poszczególnych odbiorników.



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

Model wieloodbiornikowej kaskady cewek

Analiza właściwości wieloodbiornikowej kaskady cewek może zostać sprowadzona do analizy układu AC/AC z zastosowaniem metody symbolicznej. Przyjmuje się, że rozważane są obwody SLS. Cewki charakteryzowane są przez indukcyjności L_i ($i=1..n$) oraz ich rezystancje pasytywne R_i , a ich sprzężenia magnetyczne przez indukcyjności wzajemne M_{ik} ($i=1..n, k=1..n$). Ponadto, na schemacie zastępczym z rysunku 3 zaznaczono rezonansowe kondensatory szeregowo C_i ($i=2..n$) oraz rezystory obciążenia R_{Li} ($i=2..n$). Ponieważ cewka wejściowa zasilana jest ze źródła prądu sinusoidalnego I_1 , dlatego widoczny na rysunku 2 kondensator C_1 może zostać pominięty (rys. 3). Jego uwzględnienie staje się konieczne na etapie dopasowania parametrów kaskady cewek do parametrów zasilającego ją źródła. W przypadku zasilania kaskady z falownika napięcia, ze względu na jej charakter rezonansowy, zachowany zostanie w przybliżeniu sinusoidalny prąd zasilania.



Rys. 3. Schemat zastępczy kaskady wieloodbiornikowej (AC/AC)

Bazując na schemacie zastępczym wieloodbiornikowej kaskady cewek (rys. 3), stosując metodę symboliczną, uzyskuje się równanie macierzowe:

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

Zakładając, że cewki znajdują się w ośrodku jednorodnym, macierz \underline{Z} jest macierzą symetryczną.

Dołączenie do cewek kondensatorów C_i oraz rezystorów obciążenia R_{Li} wyraża równanie macierzowe charakteryzujące elementy dołączone:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \underline{Z}_{CR} \begin{bmatrix} I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{L2} + jX_{C2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -R_{Ln} + jX_{Cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix}$$

Przekształcając równania macierzowe (1) i (2), znając parametry kaskady, możliwe jest obliczenie wartości prądów i napięć poszczególnych cewek. W kolejnym etapie wprowadzane zostają wielkości względne. Prądy odnoszone są do wartości skutecznej prądu wejściowego (zasilania) I_1 , napięcia do iloczynu $I_1 R_{Ln}$, natomiast reaktancje i rezystancje obciążenia R_{Li} do rezystancji obciążenia cewki wyjściowej R_{Ln} , uzyskując:

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

Ponadto, wyrażając właściwości pojedynczej cewki przez jej dobroć własną Q_i oraz impedancję \underline{Z}_{Li} :

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

zależność (1) przyjmuje postać:

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

gdzie \underline{K} jest macierzą współczynników sprzężenia magnetycznego 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 „o” oznacza iloczyn po współrzędnych macierzy – mnożenie poszczególnych elementów macierzy o jednakowych współrzędnych.

Analogicznie równanie (2), po uwzględnieniu zależności (3) i (4), przyjmuje postać:

$$(8) \quad \begin{bmatrix} U_2^* \\ \dots \\ U_n^* \end{bmatrix} = \underline{Z}_{CR}^* \begin{bmatrix} I_2^* \\ \dots \\ I_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{L2}^* + jX_{C2}^* & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -1 + jX_{Cn}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2^* \\ \dots \\ I_n^* \end{bmatrix}$$

Upraszczając, zakłada się, że zespolone wymuszenie prądowe I_1 zawiera jedynie składową rzeczywistą, odpowiadającą wartości skutecznej ($I_1 = |I_1| = I_1$; $I_1^* = 1$). 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 $K \circ \underline{Z}_{1(a,b)}$ oznacza podmacierz macierzy $K \circ \underline{Z}_L$ o podanych przez a i b zakresach elementów.

Na podstawie obliczonego względnego wektora prądu \underline{I} oraz równania (5) istnieje możliwość obliczenia względnych napięć cewek \underline{U} . Z kolei względne moce czynne cewki wejściowej (moc wejściowa) oraz cewek pośrednicząco – wyjściowych i cewki wyjściowej (moce wyjściowe) opisują odpowiednio zależności (10) i (11), zaś sprawność kaskady wyraża się zależnością (12).

$$(10) \quad P_1^* = \operatorname{Re}(\underline{U}_1^* \underline{I}_1^{**}) = \operatorname{Re}(\underline{U}_1^*) = \frac{P_1}{I_1^2 R_{L1}}$$

$$(11) \quad P_i^* = -\operatorname{Re}(\underline{U}_i^* \underline{I}_i^{**}) = \frac{P_i}{I_i^2 R_{Li}}$$

$$(12) \quad \eta = \frac{\sum_{i=2}^n P_i^*}{P_1^*} \cdot 100\%$$

Znając względne parametry modelu kaskady cewek, możliwe staje się obliczenie jej parametrów bezwzględnych. Uwzględniając sprawność kaskady η oraz zakładając całkowitą moc wyjściową $\sum P_i$, gdzie dla każdej i -tej cewki pośredniczącej (cewki bez odbiornika) jej moc wyjściowa P_i jest równa zero, jak również znając rezystancję obciążenia cewki wyjściowej R_{Ln} , wymagana wartość skuteczna prądu zasilania (cewki wejściowej) wynosi:

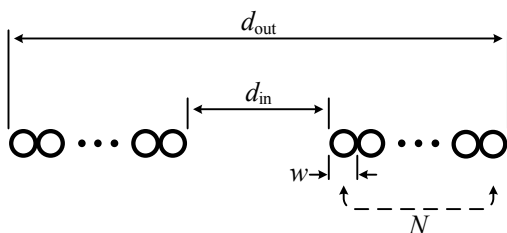
$$(13) \quad I_1 = \sqrt{\frac{100 \sum_{i=2}^n P_i}{\eta R_1^* R_{Ln}}}, \quad R_1^* = \operatorname{Re} \left(\frac{\underline{U}_1^*}{\underline{I}_1^*} \right) = \operatorname{Re}(\underline{U}_1^*)$$

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

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

Metoda projektowania

Projektowanie wieloodbiornikowej kaskady cewek wiąże się z uwzględnieniem jej wielu parametrów, co istotnie komplikuje ten proces. Pierwszy etap projektowania kaskady wymaga przyjęcia pewnych założeń wstępnych. Następnie, w drugim etapie, wyznaczane są pozostałe, szukane parametry. Ważną rolę w projektowaniu odgrywają parametry cewek sprzężonych magnetycznie, tworzących kaskadę. Bazując na publikacji [9], przedstawiono zależności umożliwiające wyznaczenie parametrów cewek niezbędnych do utworzenia macierzowego modelu kaskady. Należy również zauważyć, że niektóre z parametrów mogą zostać określone dokładniej dopiero na podstawie przeprowadzonych pomiarów – np. dobroć cewek Q .



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

W ramach artykułu zakłada się, że brane są pod uwagę jednakowe cewki płaskie, rozmieszczone współosiowo oraz równomiernie, których uzwojenia nawinięte są licą. Dane konstrukcyjne cewki zaznaczono na rysunku 4.

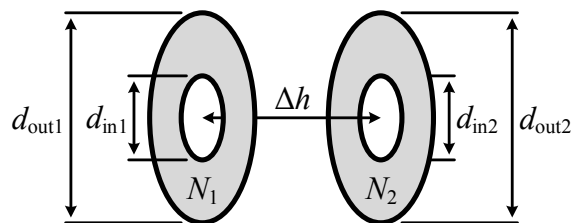
Indukcyjność własna L cewki płaskiej wyrażona jest zależnością [9]:

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

gdzie: $d_{avg} = (d_{out} + d_{in})/2$, $\rho = (d_{out} - d_{in})/(d_{out} + d_{in})$.

Indukcyjności cewek obliczane za pomocą zależności (15) różnią się co najwyżej o 5% od wartości uzyskiwanych dokładniejszą metodą elementów skończonych [9].

Dwie cewki płaskie umieszczone współosiowo zostały przedstawione na rysunku 5. Do wyznaczenia indukcyjności wzajemnej pomiędzy tymi cewkami stosowana jest zasada superpozycji, polegająca na zsumowaniu indukcyjności wzajemnych pomiędzy poszczególnymi zwojami każdej z cewek (16).



Rys. 5. Dwie cewki płaskie

$$(16) \quad M = \sum_{p=1}^{N_1} \sum_{q=1}^{N_2} M_{pq}$$

gdzie p i q oznaczają kolejne zwoje odpowiednich cewek, a N_1 i N_2 ich liczby zwojów. Z kolei indukcyjność wzajemna M_{pq} pomiędzy dwoma zwojami o średnicach d_p i d_q , znajdującymi się w odległości Δh , może być wyrażona jako [9]:

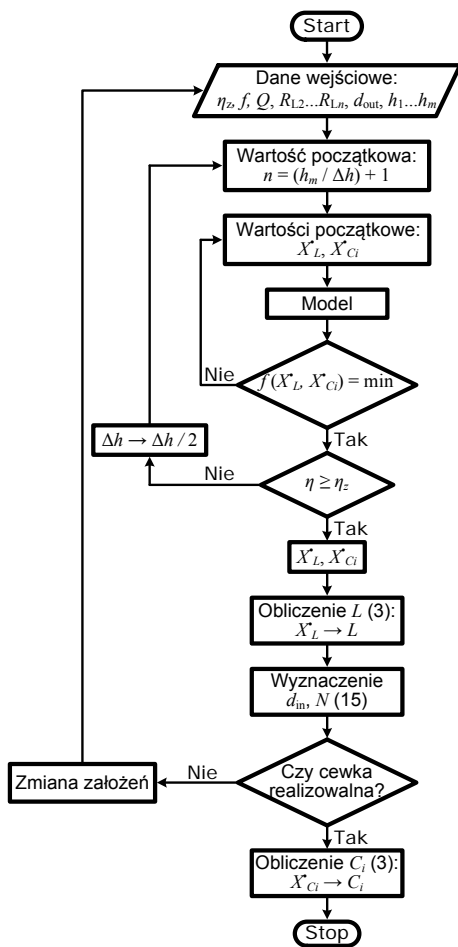
$$(17) \quad M_{pq} = \frac{1}{2} \mu_0 \sqrt{d_p d_q} \left[\left(\frac{2}{g} - g \right) K(g) - \frac{2}{g} E(g) \right],$$

gdzie $K(g)$ oraz $E(g)$ są całkami eliptycznymi zupełnymi, a parametr g obliczany jest zgodnie z zależnością:

$$(18) \quad g = \sqrt{\frac{4d_p d_q}{(d_p + d_q)^2 + 4\Delta h^2}}$$

Algorytm projektowania wieloodbiornikowej kaskady cewek ze względu na uzyskanie możliwie jak najwyższej (niemniejszej od założonej) sprawności ilustruje rysunek 6. Projektowanie rozpoczyna się od przyjęcia założeń wstępnych – danych wejściowych. Stanowią one wstępne ograniczenia nałożone na projekt kaskady, dotyczące parametrów elektrycznych: sprawności przesyłu η_z , częstotliwości pracy f , dobroci cewek Q , rezystancji dołączonych odbiorników R_{L2}, \dots, R_{Ln} oraz parametrów geometrycznych: średnicy zewnętrznej cewek d_{out} , odległości rozmieszczenia h_1, \dots, h_m kolejnych m odbiorników względem położenia cewki wejściowej. Jednocześnie odległości h_1, \dots, h_m są wielokrotnościami odległości Δh , a największa odległość h_m określa całkowitą długość kaskady. Założono również, że najmniejsza odległość pomiędzy cewkami, do których przyłączono

odbiorniki wyznacza wstępnie minimalną odległość pomiędzy cewkami kaskady Δh (rys. 7b).



Rys. 6. Algorytm projektowania wieloodbiornikowej kaskady cewek

Na bazie przyjętych założeń określone są wartości początkowe: liczba cewek n , względna reaktancja indukcyjna X_L^* oraz względne reaktancje pojemnościowe X_{Ci}^* ($i = 2 \dots n$). Początkowa liczba cewek n wynosi:

$$(19) \quad n = (h_m / \Delta h) + 1.$$

Znajomość parametru Δh umożliwia nadanie wartości początkowych względnym parametrom decyzyjnym X_L^* oraz X_{Ci}^* . Wartość początkową parametru X_L^* oblicza się jako $X_L^* = 1/k$, analogicznie jak dla układu dwucewkowego [10], przyjmując współczynnik sprzężenia magnetycznego k pomiędzy dwoma sąsiednimi cewkami. Wartości współczynnika k oraz elementów macierzy współczynników K kaskady mogą zostać wyznaczone, pomijając nieznaczną wpływ na ich wartości zmiany współczynnika wypełnienia uzwojeń cewek, na podstawie zależności (6), (16) i (17). W przypadku parametrów X_{Ci}^* , wartości początkowe określa się z warunku rezonansu ($X_{Ci}^* = X_L^*$).

Metoda projektowania wieloodbiornikowej kaskady cewek bazuje na opracowanym uprzednio względnym modelu macierzowym. Obliczane są macierze Z_{CR}^* i Z_L^* oraz sprawność kaskady η . W dalszej kolejności przeprowadzana jest optymalizacja. Wprowadzona zostaje funkcja celu, która zależy od parametrów decyzyjnych oraz wyraża zadane warunki optymalizacji. Podstawowym warunkiem jest warunek maksymalizacji sprawności dla przyjętych danych wejściowych. Dodatkowym wymaganym warunkiem jest warunek umożliwiający powiązanie ze sobą mocy wyjściowych poszczególnych odbiorników kaskady, np. wyrażający uzyskanie równości mocy wyjściowych.

Wartość funkcji celu jest minimalizowana, aż do znalezienia wartości optymalnych przyjętych parametrów decyzyjnych X_L^* i X_{Ci}^* . Do poszukiwania minimum funkcji celu zastosowano procedurę optymalizacyjną *fminsearch* wbudowaną w pakiet oprogramowania Matlab. Optymalizacja kończy się znalezieniem wartości optymalnych parametrów X_L^* i X_{Ci}^* .

Kolejnym krokiem algorytmu projektowania kaskady jest weryfikacja uzyskanej sprawności η . Jeżeli wyznaczona sprawność jest mniejsza od założonej ($\eta < \eta_z$), to liczba cewek kaskady n ulega zwiększeniu – bezpośrednio dwukrotnego zmniejszenia odległości pomiędzy cewkami kaskady Δh (rys. 6). Jeżeli uzyskana w kolejnej iteracji sprawność jest nie mniejsza od założonej ($\eta \geq \eta_z$), to na podstawie wyznaczonych wartości X_L^* i X_{Ci}^* , znając częstotliwość pracy f oraz rezystancję obciążenia R_{Ln} , obliczana jest indukcyjność cewki L . Umożliwia to z kolei, wykorzystując zależność (15), określenie średnicy wewnętrznej cewki d_{in} oraz jej liczby zwojów N . Następnie powinna nastąpić weryfikacja pomiarowa parametrów cewki. Jeżeli cewka charakteryzuje się parametrami odbiegającymi istotnie od założeń projektowych, to należy przeprowadzić kolejną iterację dla skorygowanych danych. Jeżeli natomiast założenia projektowe zostały spełnione, to następuje obliczenie pojemności kondensatorów rezonansowych C_i oraz zakończenie procesu projektowania wieloodbiornikowej kaskady cewek.

Przykład

Przykład ilustruje metodę projektowania wieloodbiornikowej kaskady cewek ze względu na warunek maksymalizacji sprawności η oraz warunek uzyskania równości mocy wyjściowych poszczególnych odbiorników ($P_2 = P_6 = P_{10} = P_{14} = P_{18}$). Odbiorniki charakteryzują się identycznymi rezystancjami ($R_{L2} = R_{L6} = R_{L10} = R_{L14} = R_{L18} = R_L$).

Dane wejściowe: $\eta_z = 80\%$, $f = 350$ kHz, $Q = 300$, $R_L = 50 \Omega$, $d_{out} = 22$ cm, $h_1 = 8,8$ cm, $h_2 = 44,1$ cm, $h_3 = 79,4$ cm, $h_4 = 114,7$ cm, $h_5 = 150$ cm.

Wartości początkowe: $n = 18$, $X_L^* = X_{Ci}^* = 5,65$.

Do kaskady przyłączono pięć odbiorników o rezystancji 50Ω każdy. Przepisanie kolejnych odbiorników do właściwych cewek jest następujące: $h_1 \rightarrow 2$, $h_2 \rightarrow 6$, $h_3 \rightarrow 10$, $h_4 \rightarrow 14$, $h_5 \rightarrow 18$.

Parametrami poszukiwanymi kaskady są indukcyjność własna cewki L_i (ostatecznie jej parametry geometryczne) oraz pojemności kondensatorów rezonansowych C_i , które w zapisie względnym związane są ze zmiennymi decyzyjnymi X_L^* i X_{Ci}^* . W przypadku maksymalizacji sprawności kaskady oraz równości mocy wyjściowych funkcja celu przyjmuje postać:

$$(20) \quad f(X_L^*, X_{Ci}^*) = |1 - \eta/100| + |P_2^* - P_6^*| + |P_6^* - P_{10}^*| + |P_{10}^* - P_{14}^*| + |P_{14}^* - P_{18}^*|,$$

gdzie: $i = 2 \dots n$.

Optymalizację przeprowadzono dla przypadku (tabela 1 i 2), w którym pojemności poszczególnych kondensatorów są niezależne – poszukiwane są indywidualne wartości reaktancji $X_{C2}^* \dots X_{C18}^*$. Należy zauważyć, że nie jest to jedyna możliwa metoda optymalizacji, a mianowicie kondensatory rezonansowe mogą zostać odpowiednio pogrupowania pod względem ich pojemności, zmniejszając w ten sposób liczbę parametrów decyzyjnych funkcji celu. Niestety prowadzi to jednocześnie do pewnego obniżenia sprawności kaskady [2].

Tabela 1. Sprawność, względna reaktancja indukcyjna oraz indukcyjność własna cewki

$\eta, \%$	X_L^*	$L_i, \mu\text{H}$
82,5	1,94	44,1

Tabela 2. Względne reaktancje pojemnościowe oraz pojemności kondensatorów rezonansowych

Cewka	X_{Cr}	C_i, nF
1	-	-
2	4,03	2,26
3	2,19	4,15
4	2,81	3,23
5	2,06	4,41
6	2,88	3,16
7	2,08	4,37
8	2,78	3,28
9	2,09	4,35
10	3,16	2,88
11	2,25	4,04
12	2,55	3,57
13	2,04	4,46
14	2,35	3,86
15	2,15	4,23
16	3,21	2,84
17	1,98	4,59
18	1,57	5,79

Na podstawie przeprowadzonej optymalizacji uzyskana została ostatecznie cewka kaskady charakteryzująca się następującymi parametrami: $L_i = 44,1 \mu\text{H}$, $d_{\text{out}} = 22 \text{ cm}$, $d_{\text{in}} = 19 \text{ cm}$, $N = 10$.

Pomijając ograniczenia związane z poszczególnymi podzespołami kaskady, moc wyjściowa poszczególnych odbiorników, a przez to sumaryczna moc wyjściowa zadawana jest przez odpowiedni dobór prądu zasilania. Zaprezentowany przykład posłużył do przeprowadzenia weryfikacji eksperymentalnej.

Weryfikacja eksperymentalna

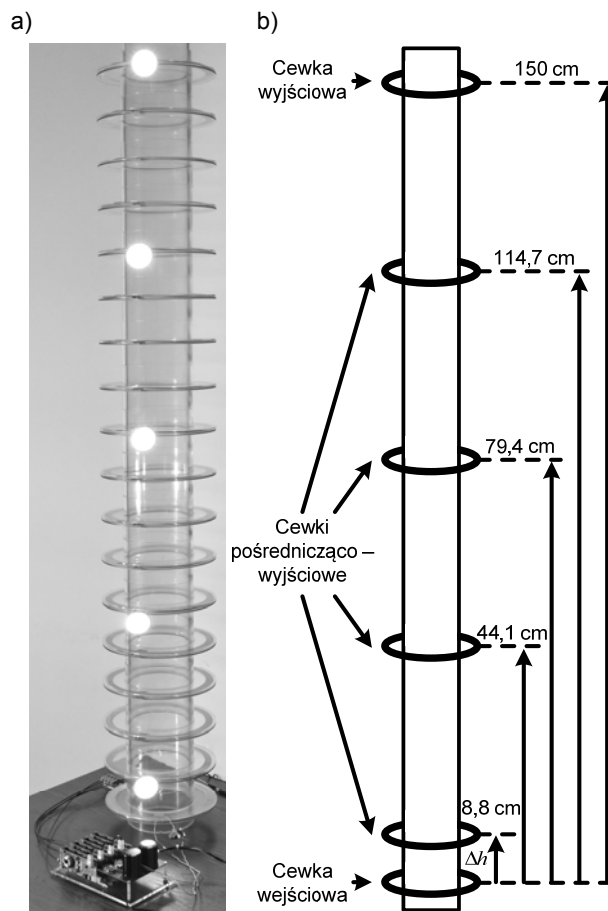
Na bazie przedstawionego przykładu skonstruowano wieloodbiornikową kaskadę cewek (rys. 7a), którą następnie poddano badaniom laboratoryjnym.

Tabela 3. Wyniki pomiarów oraz porównanie indukcyjności cewek i pojemności kondensatorów kaskady

Cewka	$L_i, \mu\text{H}$	$\Delta L_i, \%$	C_i, nF	$\Delta C_i, \%$
1	44,0	-0,2	-	-
2	43,8	-0,7	2,25	-0,4
3	44,5	0,9	4,20	1,2
4	44,1	0,0	3,26	0,9
5	44,1	0,0	4,45	0,9
6	44,2	0,2	3,13	-1,0
7	43,9	-0,5	4,40	0,7
8	44,3	0,5	3,27	-0,3
9	44,1	0,0	4,33	-0,5
10	44,2	0,2	2,93	1,7
11	44,0	-0,2	4,07	0,7
12	44,5	0,9	3,61	1,1
13	44,0	-0,2	4,46	0,0
14	44,0	-0,2	3,90	1,0
15	44,3	0,5	4,24	0,2
16	44,3	0,5	2,88	1,4
17	44,0	-0,2	4,63	0,9
18	44,3	0,5	5,77	-0,3

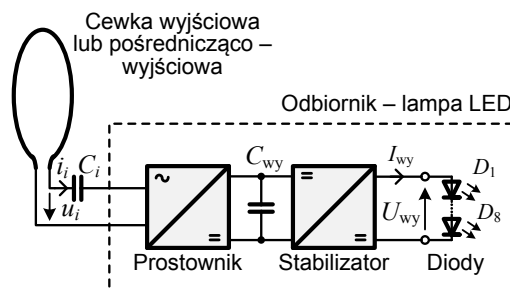
$$\Delta X = (X_{\text{pomiar}} - X_{\text{obliczenia}}) / X_{\text{pomiar}} \cdot 100\%$$

Kaskada składa się z 18 równomiernie rozmieszczonych, jednakowych cewek. Bezprzewodowy przesył energii elektrycznej realizowany jest jednocześnie do 5 odbiorników, których rozmieszczenie ilustruje rysunek 7b.



Rys. 7. Wieloodbiornikowa kaskada cewek: a) zdjęcie, b) rozmieszczenie cewek z dołączonymi odbiornikami

Przeprowadzone badania wieloodbiornikowej kaskady cewek obejmowały określenie jej wszystkich istotnych parametrów. Pomiary indukcyjności własnej cewek L_i oraz pojemności kondensatorów rezonansowych C_i wykonano przy częstotliwości pracy układu ($f = 350 \text{ kHz}$) za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A. Wyniki zestawiono w tabeli 3.



Rys. 8. Schemat zastępczy odbiornika – uniwersalnej lampy LED

W trakcie badań cewkę wejściową kaskady zasilono z rezonansowego falownika klasy DE poprzez szeregowy kondensator C_i o dobranej doświadczalnie pojemności $5,38 \text{ nF}$. Wartość ta zapewnia w przybliżeniu optymalne warunki komutacji tranzystorów falownika. Pełny mostek falownika utworzono z tranzystorów MOSFET typu IPB107N20N3. Do cewek pośrednicząco – wyjściowych (cewek nr 2, 6, 10, 14) oraz cewki wyjściowej (cewki nr 18) dołączono odbiorniki. Na rysunku 8 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy odbiornika – uniwersalnej lampy LED. Składa się ona z prostownika mostkowego z kondensatorem wyjściowym C_{wy} oraz impulsowego

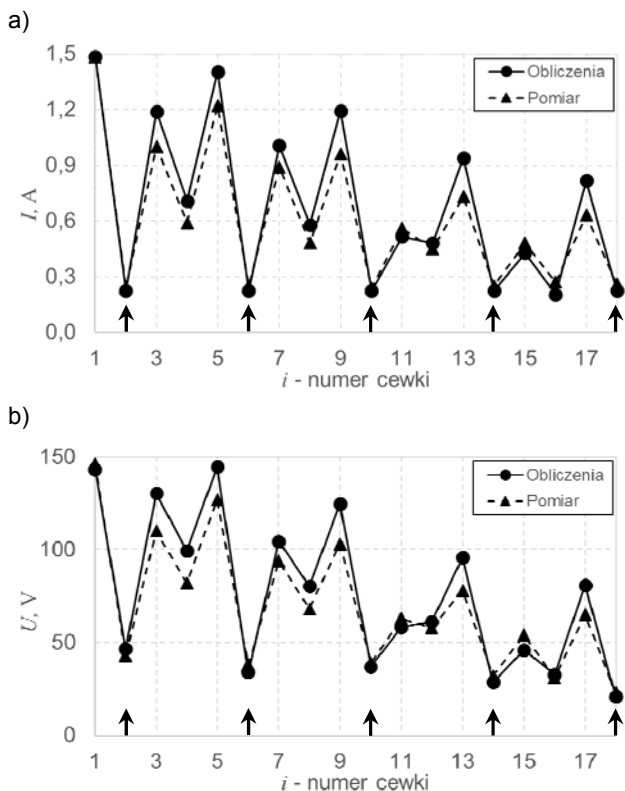
stabilizatora prądu, na wyjściu którego znajduje się 8 szeregowo połączonych diod LED $D_1 \dots D_8$.

Ponieważ odbiornik ma charakter nieliniowy, dlatego w celu wyznaczenia jego rezystancji zastępczej dla określonych warunków pracy posłużono się metodą techniczną. Pomiaru dokonano przy znamionowej mocy lampy 2,4 W oraz zasilającym ją prądzie stałym 0,22 A, uzyskując rezystancję zastępczą w przybliżeniu równą 50Ω . Parametry te (moc i rezystancja) charakteryzowały pojedynczy odbiornik konstruowanej kaskady. Należy jednocześnie zauważyć, że wieloodbiornikowa kaskada cewek może również pracować przy innych rezystancjach odbiornika. Towarzyszyć temu jednak będzie obniżenie jej sprawności w porównaniu ze sprawnością uzyskaną dla znamionowej rezystancji odbiornika, dla której przeprowadzono optymalizację.

Pomiarów chwilowych napięć i prądów cewek dokonano stosując metodę oscyloskopową – oscyloskop Agilent DSO-X-2004, sondy napięciowe N2791A i prądowe N2774A.

Przy częstotliwości pracy 350 kHz oraz sumarycznej mocy wyjściowej 12 W wartość skuteczna prądu cewki wejściowej była równa 1,48 A. Wyznaczona sprawność kaskady wieloodbiornikowej wyniosła 81,4% i była na poziomie sprawności obliczonej (82,5%).

Rysunek 9 ilustruje rozkłady wartości skutecznych prądów i napięć poszczególnych cewek kaskady. Cewki z dołączonymi odbiornikami oznaczono za pomocą strzałek. Z przedstawionego porównania wynika, że zmierzone oraz obliczone wartości prądów i napięć w przybliżeniu pokrywają się, co potwierdza poprawność opracowanego względnego modelu macierzowego kaskady oraz zaproponowanej metody projektowania.



Rys. 9. Porównanie rozkładów wartości skutecznych: a) prądy oraz b) napięcia poszczególnych cewek kaskady

Wnioski

Przeprowadzona w ramach artykułu analiza, dzięki zastosowaniu względnego modelu macierzowego, pozwoliła w sposób kompleksowy i uporządkowany określić

właściwości wieloodbiornikowej kaskady cewek realizującej bezprzewodowy przesył energii elektrycznej.

Zaproponowana metoda projektowania daje możliwość optymalizacji właściwości kaskady wieloodbiornikowej ze względu na zadane warunki, zdefiniowane przez właściwy dobór funkcji celu. W przedstawionym przykładzie przyjęto warunek maksymalizacji sprawności oraz warunek równości mocy wyjściowych poszczególnych odbiorników.

Badania laboratoryjne wieloodbiornikowej kaskady cewek potwierdziły poprawność przyjętych założeń oraz przydatność względnego modelu macierzowego i metody projektowania. Przy częstotliwości pracy 350 kHz, sumarycznej mocy wyjściowej 12 W (5 odbiorników – lamp LED) oraz całkowitej długości laboratoryjnej kaskady cewek równej 150 cm jej sprawność wyniosła 81,4%.

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] Tesla N., Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination, *Wilder Publications*, New York 2007 (wydanie zbiorcze).
- [2] Kaczmarczyk Z., Frania K., Bodzek K., Ruszczyk A., Metoda projektowania i właściwości rezonansowej kaskady cewek w zastosowaniu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 92, 2016, nr 4, s. 120-125.
- [3] Ottman G., Hofmann H., Bhatt A., Lesieutre G., Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, 2002, pp. 669-676.
- [4] Imura T., Okabe H., Hori Y., Basic Experimental Study on Helical Antennas of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles by using Magnetic Resonant Couplings, *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion*, 2009, pp. 936-940.
- [5] Liu C., Hu A., Nair N.-K., Coupling Study of a Rotary Capacitive Power Transfer System, *IEEE Conference on Industrial Technology*, 2009, pp. 1-6.
- [6] Junji H., Tae-Woong K., Atsuo K., Practical Study on Wireless Transmission of Power and Information for Autonomous Decentralized Manufacturing System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 2, 1999, pp. 349-359.
- [7] Byungcho C., Jaehyun N., Honnyong C., Taeyoung A., Seungwon C., Design and Implementation of Low-Profile Contactless Battery Charger Using Planar Printed Circuit Board Windings as Energy Transfer Device, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, 2004, pp. 140-147.
- [8] Cieśla T., Kaczmarczyk Z., Stępień M., Kustosz R., Grzesik B., Prototyp układu bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej *Pomiary Automatyka Kontrola*, 56, 2010, nr 8, s. 922-925.
- [9] Harrison R., Designing Efficient Inductive Power Links for Implantable Devices, *Circuits and Systems, IEEE International Symposium*, 2007, pp. 2080-2083.
- [10] Cieśla T., Kaczmarczyk Z., Grzesik B., Stępień M., Obwody do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, *Kwartalnik Elektryka*, 2009, nr 4, s. 135-149.