

Analiza właściwości cewek w zastosowaniu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej ze względu na maksymalizację sprawności

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę właściwości cewek sprzężonych magnetycznie stosowanych w bezprzewodowym przesyśle energii elektrycznej. Analiza ta dokonana została ze względu na maksymalizację całkowitej sprawności / minimalizację strat mocy rezonansowej kaskady cewek. Przedmiotem rozważań jest analiza tzw. „problematyki kQ ” – sprawność układu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej jest m.in. funkcją iloczynu współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroci własnej cewki Q . Przeprowadzone badania pozwoliły określić ogólny wpływ parametrów konstrukcyjnych kaskady (współczynnika wypełnienia uzwojeń cewki S oraz względnej średnicy zewnętrznej cewki d^*_{out}) na współczynnik k oraz dobroć Q , a w konsekwencji na sprawność uzyskiwanej kaskady cewek. Badania zweryfikowano eksperymentalnie.

Abstract. The paper describes properties of magnetically coupled coils designed for wireless electrical energy transfer application. These properties were analyzed for maximizing efficiency of the resonant cascade of coils for wireless electrical energy transfer. The efficiency of the system for wireless electrical energy transfer is a function of the magnetic coupling coefficient k and the quality factor Q of the coil. The analysis determines the winding fill factor S of the coil and the relative outer diameter d^*_{out} for maximizing wireless electrical energy transfer efficiency. Obtained results were positively verified experimentally. (**Analysis of the properties of magnetically coupled coils for maximizing wireless electrical energy transfer efficiency**).

Słowa kluczowe: cewki sprzężone magnetycznie, bezprzewodowy przesył energii elektrycznej.

Keywords: magnetic coupled coils, wireless electrical energy transfer.

Wstęp

Początek badań nad możliwością bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej datuje się na koniec XIX wieku, a za twórcę koncepcji bezprzewodowego przesyłu energii powszechnie uznaje się serbskiego naukowca Nikolę Teslę. Prowadzone w tym czasie badania pozwoliły na opracowanie i rozwój metod bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Jednak układy tego typu znalazły powszechne zastosowanie dopiero obecnie. Są one wykorzystywane do ciągłego zasilania lub okresowego doładowywania różnych urządzeń, np. samochodów elektrycznych [1], telefonów komórkowych [2], czy też implantów [3]. Rosnące zainteresowanie bezprzewodowym przesyłem energii elektrycznej jest bezpośrednio związane z jego oczywistymi zaletami w porównaniu z klasycznym, przewodowym przesyłem energii – przede wszystkim wygodą i bezpieczeństwem.

Realizacja bezprzewodowego przesyłu energii może zostać przeprowadzona różnymi metodami [4]. Podstawowy podział metod bezprzewodowego przesyłu energii związany jest z wyborem rodzaju wykorzystywanych fal – mechanicznych (wymagających do propagacji medium) lub elektromagnetycznych (niewymagających medium). Biorąc pod uwagę fale elektromagnetyczne aktualnie najbardziej rozpowszechnioną metodą bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej jest jej przesył za pośrednictwem cewek sprzężonych magnetycznie – układy dwucewkowe (rys. 1). Efektywność tego rodzaju układów istotnie pogarsza się wraz ze wzrostem odległości pomiędzy cewkami – przy ich oddalaniu współczynnik sprzężenia magnetycznego k zmniejsza się wykładniczo, pogorsząc sprawność η . Poprawa właściwości w tym zakresie uzyskiwana jest w wyniku zastosowania dodatkowych cewek pośredniczących – rezonansowa kaskada cewek (rys. 2).

Przedmiotem rozważań prezentowanych w artykule jest analiza właściwości cewek sprzężonych magnetycznie w zastosowaniu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Analiza ta prowadzona jest ze względu na maksymalizację sprawności / minimalizację strat mocy rezonansowej kaskady cewek. Uwzględniając powyższe oraz literaturę związaną bezpośrednio z tą tematyką [5], [6], prowadzone badania zostały zorientowane na tzw.

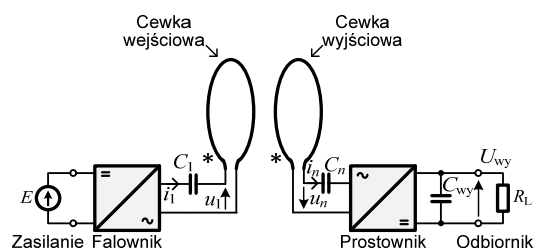
„problematykę kQ ” – sprawność układu bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej jest tym wyższa im większa wartość iloczynu współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroci własnej cewki Q .

W artykule przebadano wpływ wypełnienia uzwojeń S cewek płaskich na wartość współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroć własną Q . W rezultacie określono przedział wypełnień S , dla których wartość kQ , a w konsekwencji również sprawność η kaskady, uzyskuje możliwie jak najwyższe wartości.

W porównaniu z literaturą oryginalnymi wynikami prezentowanymi w artykule jest określenie charakteru zmian współczynnika sprzężenia magnetycznego k w funkcji wypełnienia uzwojeń S (sparametryzowanych względem względnej średnicy cewek d^*_{out}) oraz wyznaczenie zależności dobroci cewki Q od wypełnienia uzwojeń S . Ostatecznie uzyskano charakterystyki kQ w funkcji S , pozwalające określić optymalny ze względu na sprawność η przedział wypełnień uzwojeń cewki S – zalecaną geometrię cewki.

Rezonansowa kaskada cewek

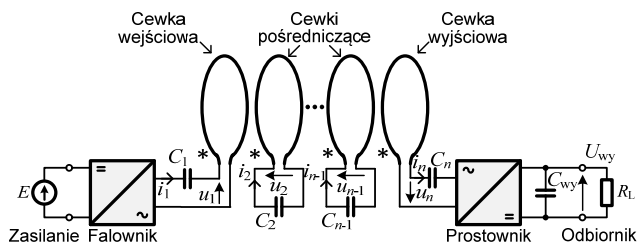
Typowe układy dwucewkowe obejmują klasyczne rozwiązania bazujące na dwóch cewkach (wejściowej i wyjściowej) sprzężonych magnetycznie (rys. 1). Zasilana cewka wejściowa, poprzez sprzężenie magnetyczne, przekazuje energię do cewki wyjściowej, a w konsekwencji do obciążenia R_L .



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

Zasadniczym ograniczeniem układu dwucewkowego jest względnie mała odległość na jaką w sposób efektywny przesyłana może być energia. Zwiększenie odległości

między cewkami do wartości porównywalnych z ich średnicami zewnętrznymi drastycznie pogarsza ich wzajemne sprzężenie magnetyczne, a tym samym powoduje gwałtowny spadek sprawności układu η . Poprawa właściwości układu w tym względzie (sprawności η) jest możliwa poprzez wprowadzenie dodatkowych cewek pośredniczących, uzyskując w ten sposób rezonansową kaskadę cewek sprzężonych magnetycznie (rys. 2). Energia z cewki wejściowej przekazywana jest za pośrednictwem cewek pośredniczących do cewki wyjściowej, która połączona jest z obciążeniem R_L .



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

Rezonansowa kaskada cewek (rys. 2) obejmuje również szczególny przypadek układu dwucewkowego (rys. 1), dla którego liczba cewek n jest równa 2 – cewki wejściowa i wyjściowa.

Model kaskady

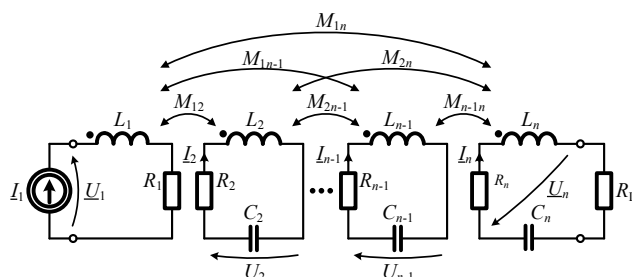
Analiza właściwości rezonansowej kaskady cewek sprowadzona może być do analizy układu AC/AC, bazując na klasycznej teorii obwodów z zastosowaniem metody symbolicznej. Przyjmuje się, że rozważane są obwody SLS (stacjonarne, liniowe, skupione). Cewki charakteryzowane są przez indukcyjności L_i ($i = 1 \dots n$) oraz ich rezystancje pasytywne R_i , a ich sprzężenia magnetyczne poprzez indukcyjności wzajemne M_{ik} ($i = 1 \dots n, k = 1 \dots n$). Ponadto, na schemacie (rys. 3) zaznaczono rezonansowe kondensatory szeregowo C_i ($i = 2 \dots n$) oraz rezystor obciążenia R_L . Cewka wejściowa zasilana jest ze źródła prądu sinusoidalnego \underline{I}_1 .

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

$$(1) \quad \underline{U} = \underline{Z}\underline{I} = \begin{bmatrix} R_1 + jX_{L1} & jX_{M12} & \dots & jX_{M1n} \\ jX_{M12} & R_2 + jX_{L2} & \dots & jX_{M2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ jX_{M1n} & jX_{M2n} & \dots & R_n + jX_{Ln} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \dots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix}$$

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

$$(2) \quad \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \dots \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \underline{Z}_{CR} \begin{bmatrix} \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \dots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jX_{C2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & jX_{C3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -R_L + jX_{Cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \dots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix}$$



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

Dla danych parametrów model rezonansowej kaskady cewek umożliwia wyznaczenie poszczególnych wartości prądów, napięć, mocy oraz sprawności.

Sprawność kaskady

Analizując przyjęty model rezonansowej kaskady cewek można dojść do wniosku, że sprawność bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej wyraża się funkcją:

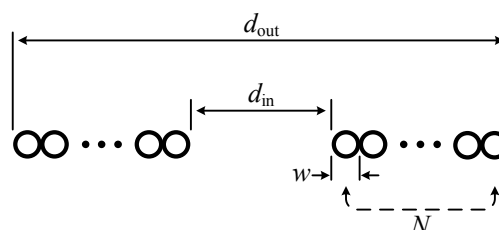
$$(3) \quad \eta = g(Q_i, k_{ik}, f, R_L, L_i, C_i),$$

gdzie Q_i jest dobrocią cewki, k_{ik} współczynnikami sprzężenia magnetycznych, f częstotliwością pracy.

Dobroć cewki Q_i zależy od jej rezystancji pasytywnej R_i , indukcyjności własnej L_i oraz częstotliwości pracy f .

$$(4) \quad Q_i = g(R_i, L_i, f).$$

Zakłada się, że brane są pod uwagę jedynie cewki płaskie, umieszczone współosiowo, których uzwojenia nawijane są licą. Parametry konstrukcyjne przykładowej cewki zaznaczono na rysunku 4.



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

Zgodnie z rysunkiem 4 przyjmuje się, że uzwojenia cewek są uzwojeniami skupionymi – poszczególne zwoje przylegają do siebie. W takim przypadku rezystancja pasytywne R_i oraz indukcyjność własna L_i zależą od średnicy zewnętrznej d_{out} , wypełnienia uzwojeń S (15) oraz zastosowanego typu licy (jej parametrów konstrukcyjnych i materiałowych):

$$(5) \quad R_i = g(d_{out}, S, lica),$$

$$(6) \quad L_i = g(d_{out}, S, lica).$$

Uwzględniając (5) i (6), funkcję (4) można wyrazić jako:

$$(7) \quad Q_i = g(d_{out}, S, lica, f).$$

Współczynnik sprzężenia k_{ik} pomiędzy cewką i oraz cewką k zależy od średnicy zewnętrznej d_{out} , wypełnienia uzwojeń S , długości kaskady h (odległości przesyłu) oraz liczby cewek kaskady n :

$$(8) \quad k_{ik} = g(d_{out}, S, h, n).$$

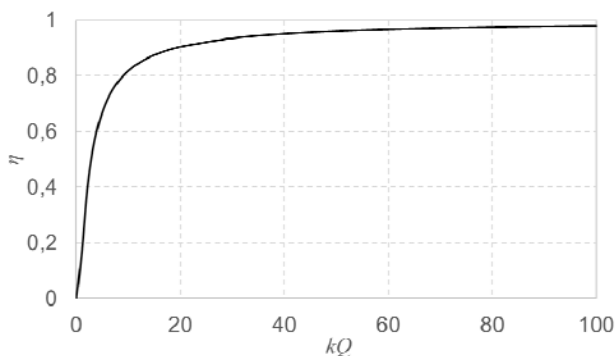
Jednocześnie parametry h oraz n wyznaczają elementarną odległość pomiędzy cewkami Δh – przyjmuje się, że cewki rozmieszczone są równomiernie.

Ostatecznie sprawność kaskady η może zostać wyrażona jako funkcja:

$$(9) \quad \eta = g(d_{out}, S, lica, h, n, f, R_L, C_i).$$

Parametry funkcji (9) można podzielić na „konstrukcyjne”: d_{out} , S , $lica$, h , n oraz „elektryczne”: f , R_L , C_i . Uwzględnienie tak dużej liczby parametrów zwiększa istotnie złożoność procesu projektowania kaskady cewek. W ramach dalszej analizy przebadany zostanie jedynie wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych kaskady na uzyskanie możliwie wysokiej sprawności. Należy jednak

zauważyć, że sam proces projektowania kaskady nie ogranicza się wyłącznie do analizy „problematyki kQ ”, ale wymaga również przeprowadzenia optymalizacji innych parametrów kaskady [4], co nie jest przedmiotem artykułu.



Rys. 5. Charakterystyka sprawności η w funkcji kQ

Na podstawie zależności znanych z literatury [5], [6] uzasadnione jest stwierdzenie, że jednym z warunków zapewnienia bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z możliwie wysoką sprawnością jest maksymalizowanie wartości iloczynu współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroci własnej cewki Q – sprawność η jest funkcją kQ . W przypadku bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej za pomocą dwóch jednakowych cewek sprzężonych magnetycznie (szczególny przypadek kaskady – $n = 2$) zależność ta przyjmuje postać [5]:

$$(10) \quad \eta \approx \frac{k^3 Q^3}{1 + 2kQ + 2k^2 Q^2 + k^3 Q^3}.$$

Ilustrację graficzną zależności (10) przedstawiono na rysunku 5. Zwiększanie wartości parametrów k oraz Q ma również bezpośrednie przełożenie na wzrost sprawności η układów wielocewkowych ($n > 2$). Wówczas współczynnik sprzężenia magnetycznego k należy interpretować jako współczynnik sprzężenia pomiędzy cewkami znajdującymi się w bezpośrednim sąsiedztwie.

Współczynnik sprzężenia magnetycznego k

Indukcyjność własną L_i cewki płaskiej o średnicy zewnętrznej d_{out} i średnicy wewnętrznej d_{in} oraz liczbie zwojów N można obliczyć na podstawie zależności [7]:

$$(11) \quad L_i = \frac{1}{2} \mu_0 N^2 d_{avg} \left[\ln \left(\frac{2,46}{\rho} \right) + 0,20 \rho^2 \right],$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni, a parametry ρ oraz d_{avg} określano następująco:

$$(12) \quad \rho = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in}),$$

$$(13) \quad d_{avg} = (d_{out} + d_{in}) / 2.$$

Wprowadzając względną średnicę zewnętrzną d_{out}^* :

$$(14) \quad d_{out}^* = \frac{d_{out}}{\Delta h},$$

gdzie Δh oznacza odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi cewkami, a współczynnik wypełnienia uzwojeń cewki S :

$$(15) \quad S = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out}} = \frac{d_{out}^* - d_{in}^*}{d_{out}^*},$$

względna indukcyjność własna cewki L_i^* przedstawiona może być w postaci:

$$(16) \quad L_i^* = \frac{L_i}{\mu_0 \Delta h} = \frac{1}{2} N^2 d_{avg}^* \left[\ln \left(\frac{2,46}{\rho^*} \right) + 0,20 \rho^{*2} \right],$$

$$(17) \quad \rho^* = \frac{S}{2 - S},$$

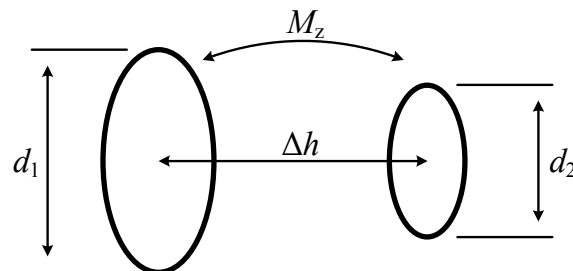
$$(18) \quad d_{avg}^* = d_{out}^* \left(1 - \frac{S}{2} \right).$$

Indukcyjność wzajemna dwóch pojedynczych zwojów o średnicy d_1 oraz d_2 , umieszczonych współosiowo w odległości Δh wynosi (rys. 6):

$$(19) \quad M_z = \frac{1}{2} \mu_0 \sqrt{d_1 d_2} \left[\left(\frac{2}{g} - g \right) K(g) - \frac{2}{g} E(g) \right],$$

$$(20) \quad g = \sqrt{\frac{d_1 d_2}{\frac{1}{4} (d_1 + d_2)^2 + \Delta h^2}},$$

gdzie $K(g)$ oraz $E(g)$ są całkami eliptycznymi zupełnymi, odpowiednio pierwszego i drugiego rzędu.



Rys. 6. Dwa zwoje sprzężone magnetycznie

Wprowadzając względne średnice zwojów:

$$(21) \quad d_1^* = \frac{d_1}{\Delta h}, d_2^* = \frac{d_2}{\Delta h},$$

możliwe jest uzyskanie względnej indukcyjności wzajemnej:

$$(22) \quad M_z^* = \frac{M_z}{\mu_0 \Delta h} = \frac{1}{2} \sqrt{d_1^* d_2^*} \left[\left(\frac{2}{g^*} - g^* \right) K(g^*) - \frac{2}{g^*} E(g^*) \right],$$

$$(23) \quad g^* = \sqrt{\frac{d_1^* d_2^*}{\frac{1}{4} (d_1^* + d_2^*)^2 + 1}}.$$

W celu obliczenia indukcyjności wzajemnej dwóch cewek o średnicy zewnętrznej d_{out} oraz wewnętrznej d_{in} , wykorzystano metodę Lyle'a [8]. W metodzie tej każda z cewek zastępowana jest dwoma cewkami jednozwojowymi o średnicach d_1 i d_2 :

$$(24) \quad d_1 = d_{avg} + \frac{d_{out} - d_{in}}{8\sqrt{3}}, d_2 = d_{avg} - \frac{d_{out} - d_{in}}{8\sqrt{3}}.$$

Wykorzystując zależności (15) i (21), uzyskuje się:

$$(25) \quad d_1^* = d_{avg}^* + \frac{d_{out}^* - d_{in}^*}{8\sqrt{3}} = d_{avg}^* + d_{out}^* \frac{S}{8\sqrt{3}},$$

$$(26) \quad d_2^\bullet = d_{\text{avg}}^\bullet - \frac{d_{\text{out}}^\bullet - d_{\text{in}}^\bullet}{8\sqrt{3}} = d_{\text{avg}}^\bullet - d_{\text{out}}^\bullet \frac{S}{8\sqrt{3}},$$

$$(27) \quad d_{\text{avg}}^\bullet = \frac{d_{\text{out}}^\bullet + d_{\text{in}}^\bullet}{2} = d_{\text{out}}^\bullet \left(1 - \frac{S}{2}\right).$$

W przypadku ogólnym, gdy pierwsza cewka ma N_1 zwojów i reprezentowana jest przez dwie cewki jednozwojowe A i B o średnicach d_A i d_B , a druga cewka ma N_2 zwojów i reprezentowana jest przez dwie cewki jednozwojowe C i D o średnicach d_C i d_D , to względną indukcyjność wzajemną można zapisać jako:

$$(28) \quad M^\bullet = \frac{M}{\mu_0 \Delta h} \approx N_1 N_2 \left(\frac{M_{\text{zAC}}^\bullet + M_{\text{zAD}}^\bullet + M_{\text{zBC}}^\bullet + M_{\text{zBD}}^\bullet}{4} \right),$$

gdzie przykładowo M_{zAC}^\bullet oznacza względną indukcyjność wzajemną pomiędzy cewkami jednozwojowymi A i C. Średnice cewek jednozwojowych A i B oraz C i D reprezentujących odpowiednio cewkę pierwszą i drugą są obliczane na podstawie zależności (24).

Współczynnik sprzężenia magnetycznego k_{ik} pomiędzy dwoma cewkami płaskimi i oraz k wynosi:

$$(29) \quad k_{ik} = \frac{M_{ik}}{\sqrt{L_i L_k}}.$$

Gdy obie cewki są jednakowe ($N_i = N_k = N$ oraz $L_i = L_k = L$), wykorzystując równania (28) oraz (16), uzyskuje się:

$$(30) \quad k = \frac{M^\bullet}{L} = \frac{M_{\text{zAC}}^\bullet + M_{\text{zAD}}^\bullet + M_{\text{zBC}}^\bullet + M_{\text{zBD}}^\bullet}{2d_{\text{avg}}^\bullet \left[\ln \left(\frac{2,46}{\rho^\bullet} \right) + 0,20\rho^{\bullet 2} \right]}.$$

Można wykazać, że współczynnik sprzężenia magnetycznego k opisany zależnością (30) jest wyłącznie funkcją względnej średnicy zewnętrznej d_{out}^\bullet (14) oraz wypełnienia uzwojeń S (15).

Dobroć własna cewki Q

Zgodnie z przedstawionym na rysunku 3 schematem zastępczym rezonansowej kaskady cewek przyjmuje się, że cewki charakteryzowane są poprzez indukcyjności własne L_i ($i = 1 \dots n$) oraz ich rezystancje pasożytnicze R_i . Pomijany jest więc wpływ międzyzwojowych pojemności pasożytniczych cewek, co jest słuszne ze względu na zastosowanie cewek płaskich oraz ograniczenie ich częstotliwości pracy f do 1 MHz – zakres korzystnych właściwości licy. Dobroć własną Q_i cewki i -tej (4) można przedstawić w postaci:

$$(31) \quad Q_i = \frac{2\pi f L_i}{R_i}.$$

Zakładając, że rezystancja licy nie zależy od częstotliwości ($R_i = R_{\text{DC}}$), co ma miejsce w przypadku dla prawidłowo dobranego typu licy oraz jej względnie niskiej częstotliwości pracy f – pomijalny jest wpływ efektów naskórkowego oraz zbliżenia, rezystancja cewki R_i może zostać wyrażona jako:

$$(32) \quad R_i = r_{\text{DC}} l,$$

gdzie r_{DC} jest rezystancją licy na jednostkę długości, a l to długość licy.

Uwzględniając zależności (11) i (32), wyrażenie (31) przyjmuje postać:

$$(33) \quad Q = \frac{\mu_0 f d_{\text{out}} S \left[0,2S^2 + (S^2 - 4S + 4) \ln \left(\frac{4,92}{S} - 2,46 \right) \right]}{2\pi r_{\text{DC}} (S - 2)^2},$$

gdzie μ_0 oznacza przenikalność magnetyczną próżni, a w jest średnicą zewnętrzną licy.

Problematyka kQ

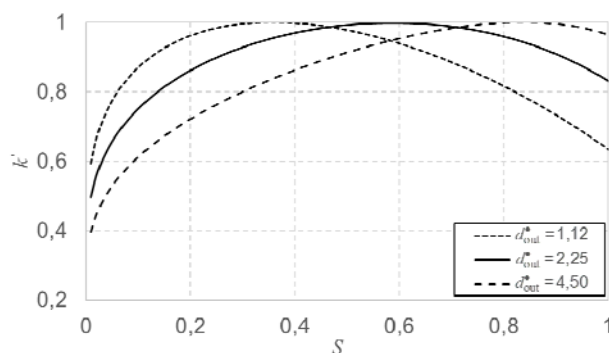
Pierwszym etapem badania wpływu parametrów konstrukcyjnych kaskady (wypełnienia uzwojeń S oraz względnej średnicy zewnętrznej cewki d_{out}^\bullet) na zmianę współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroci własnej cewki Q , jest przeprowadzenie analizy jakościowej „problematyki kQ ”. Pozwala ona wyznaczyć przedział współczynnika wypełnienia uzwojeń cewki S , dla którego zarówno współczynnik k , jak i dobroć Q uzyskują możliwie duże wartości, zapewniając w ten sposób możliwie wysoką sprawność η .

Ponieważ w kaskadzie cewek najsilniejsze sprzężenie magnetyczne występuje pomiędzy cewkami sąsiednimi, dlatego analizę zmienności współczynnika k ograniczono do szczególnego przypadku kaskady $n = 2$.

Znając parametry konstrukcyjne kaskady istnieje możliwość wyznaczenia uogólnionej charakterystyki zależności współczynnika k od względnych parametrów konstrukcyjnych d_{out}^\bullet oraz S . Na rysunku 7 zamieszczono charakterystyki względnego współczynnika sprzężenia magnetycznego k' określonego jako:

$$(34) \quad k' = \frac{k}{\max(k = g(d_{\text{out}}^\bullet, S))},$$

uzyskane na podstawie zależności (30). Taka reprezentacja współczynnika sprzężenia magnetycznego (odniesienie jego wartości do poszczególnych wartości maksymalnych) umożliwia bardziej czytelne zaobserwowanie tendencji jego zmian. Dla danej wartości d_{out}^\bullet współczynnik k uzyskuje wartość maksymalną dla określonej wartości S , przy czym dla większych wartości d_{out}^\bullet (cewki znajdują się bliżej siebie) wartość współczynnika wypełnienia uzwojeń cewki S powinna rosnąć ($S \rightarrow 1$).

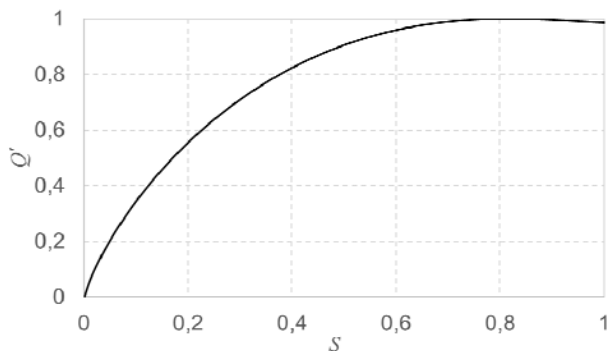


Rys. 7. Charakterystyki względnego współczynnika sprzężenia magnetycznego k' w funkcji S dla różnych d_{out}^\bullet

Dobroć własna cewki Q , zgodnie z wyrażeniem (7), jest funkcją parametrów konstrukcyjnych cewki i częstotliwości pracy f . Postępując analogicznie jak w przypadku współczynnika k (34), wartości Q odniesiono do jej wartości maksymalnej, uzyskując:

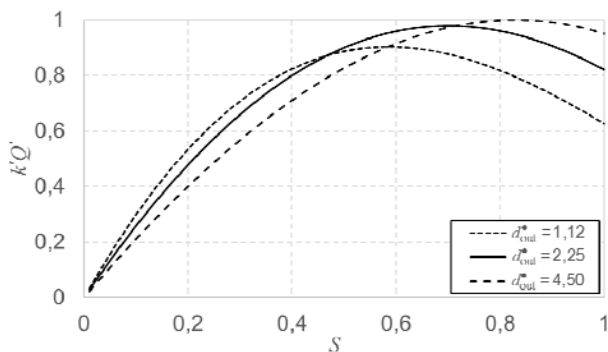
$$(35) \quad Q' = \frac{Q}{\max(Q = g(S))}.$$

Charakterystyka przedstawiona na rysunku 8 prezentuje zależność względnej dobroci cewki Q od współczynnika wypełnienia uzwojeń S , obliczoną na podstawie zależności (33). Można zaobserwować, że dobroć cewki Q osiąga maksimum dla $S \approx 0,8$.



Rys. 8. Charakterystyka względnej dobroci cewki Q w funkcji S

Ponieważ sprawność przesyłu η jest zależna od iloczynu wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroci cewki Q , dlatego na rysunku 9 wykreślono charakterystyki kQ . Na tej podstawie można stwierdzić, że optymalne wypełnienie uzwojeń cewki S powinno zawierać się w przedziale od 0,5 do 0,8.



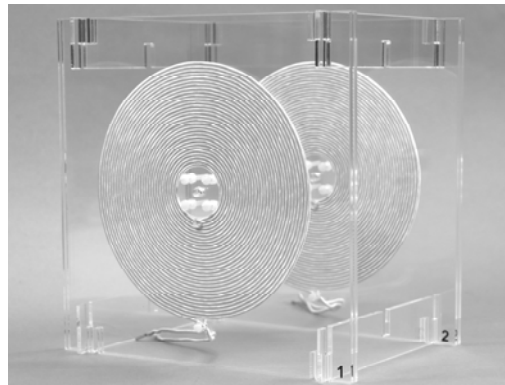
Rys. 9. Charakterystyki kQ cewki w funkcji S

Zaprezentowana analiza jakościowa „problematyki kQ ” pozwala jedynie na określenie przedziału S (geometrii cewki), dla którego sprawność układu bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej η uzyskuje możliwe wysokie wartości. Nie umożliwia ona natomiast wyznaczenia konkretnych wartości k oraz Q (kQ).

Weryfikacja eksperymentalna

Drugim etapem badania wpływu parametrów konstrukcyjnych kaskady (wypełnienia uzwojeń S oraz względnej średnicy zewnętrznej cewki d_{out}^*) na zmianę współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroci własnej cewki Q , jest przeprowadzenie analizy ilościowej „problematyki kQ ” – wyznaczenie konkretnych wartości k , Q , kQ . Analiza ilościowa wykorzystana została przede wszystkim do zweryfikowania obliczeń teoretycznych.

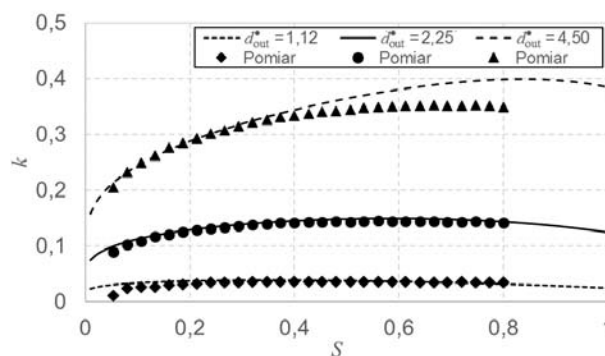
W przeprowadzonym eksperymencie wykorzystano dwie cewki płaskie (rys. 10), których średnica zewnętrzna d_{out} wynosiła 15 cm, liczba zwojów N była równa 30, a uzwojenia nawinięte zostały licą typu RUPALIT 405 x 0,071 mm, o średnicy w równej 2 mm. Lica ta przewidziana jest do pracy przy częstotliwościach f od 100 do 200 kHz. Odległości pomiędzy cewkami Δh wynosiły odpowiednio: 3,33, 6,67 i 13,34 cm, uzyskując tym samym względne średnice zewnętrzne d_{out}^* równe: 4,50, 2,25, 1,12. Wyniki eksperymentu posłużyły do weryfikacji obliczonych wartości współczynnika k oraz dobroci własnej cewki Q w funkcji współczynnika wypełnienia uzwojeń S .



Rys. 10. Badane cewki płaskie

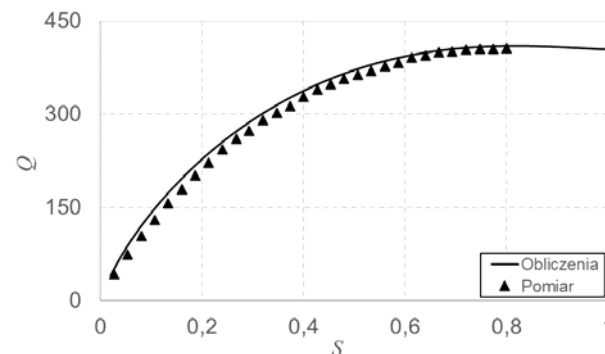
Pomiary przeprowadzone zostały przy wykorzystaniu precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A. Wypełnienie uzwojeń S zmieniano poprzez odwijanie wewnętrznych zwojów cewek. Pomiary wykonano przy częstotliwości 100 kHz.

Wyznaczone charakterystyki współczynnika sprzężenia magnetycznego k (rys. 11) porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonych na podstawie zależności (30). Potwierdzono w ten sposób, że zależność (30) jest poprawna dla mniejszych wartości względnych średnic zewnętrznych ($d_{out}^* < 4$) [7], czyli powinna być stosowana do cewek umieszczonych w odległości większej od ¼ ich średnicy. Jeżeli ta odległość jest mniejsza ($d_{out}^* > 4$), to uwidacznia się rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarami (przypadek $d_{out}^* = 4,50$ z rys. 11).



Rys. 11. Porównanie charakterystyk współczynnika sprzężenia magnetycznego k w funkcji S dla różnych d_{out}^*

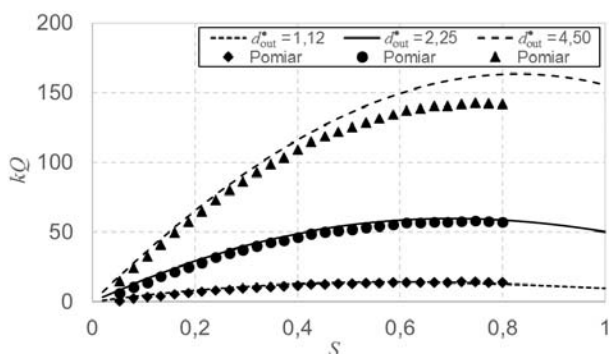
W przypadku rezonansowych kaskad cewek, z uwagi na konieczność ograniczenia liczby cewek kaskady, względne średnice zewnętrzne spełniają zwykle warunek $d_{out}^* < 4$. Zastosowana metoda obliczeń wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego k zapewnia dokładność nie gorszą niż 5%. Dla większych wartości d_{out}^* można zastosować inną metodę obliczeń wartości współczynnika k – np. metodę Rowlanda [8].



Rys. 12. Porównanie charakterystyki dobroci cewki Q w funkcji S

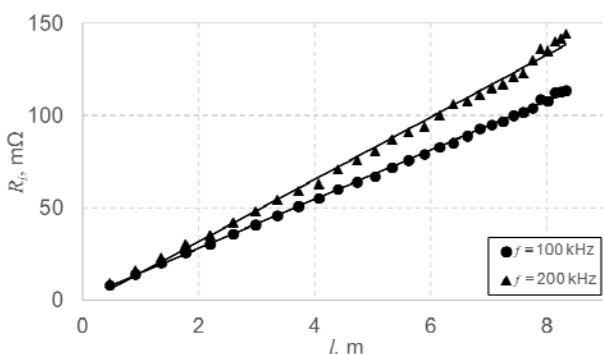
Porównanie wartości dobroci cewki Q zmierzonych oraz obliczonych na podstawie zależności (33) przedstawiono na rysunku 12. Można stwierdzić, że w ramach przyjętych założeń zależność (33) jest poprawna – dokładność na poziomie 2%.

Ostatecznie, na rysunku 13 przedstawiono porównanie charakterystyk kQ będących wynikiem pomiarów oraz obliczeń. Potwierdzono poprawność przyjętych założeń oraz przydatność przeprowadzonej analizy „problematyki kQ ” w procesie projektowania układów bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej ze względu na zapewnienie możliwie wysokiej sprawności η . Widoczna na rysunku 13 rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarami dla przypadku $d_{out}^* = 4,50$ jest konsekwencją zastosowania do obliczeń współczynnika sprzężenia magnetycznego k zależności (30), która powinna być stosowana jedynie do mniejszych wartości względnych średnic zewnętrznych ($d_{out}^* < 4$) [7].



Rys. 13. Porównanie charakterystyk kQ w funkcji S dla różnych d_{out}^*

Veryfikacja eksperymentalna potwierdza poprawność przyjętych założeń oraz przydatność przeprowadzonej analizy „problematyki kQ ” do projektowania układów bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej dla względnie niskich częstotliwości pracy (w przypadku zastosowanej licy do 100 kHz). Zwiększenie częstotliwości pracy będzie powodowało wzrost rezystancji pasożytniczej R_i cewki, co uniemożliwi poprawne obliczenie wartości dobroci cewki Q zgodnie z zależnością (33). Należy jednak zauważyć, że wzrost częstotliwości pracy nie wpłynie istotnie na zmianę wyznaczonego optymalnego przedziału współczynnika wypełnienia uzwojeń cewki S . Wyjaśnienie jest następujące. Na rysunku 14 przedstawiono charakterystyki rezystancji pasożytniczej R_i cewki wyznaczone pomiarowo w funkcji długości licy l dla częstotliwości pracy f równej 100 i 200 kHz. Ponieważ zmiany tej rezystancji są w przybliżeniu liniowe, dlatego analiza jakościowa „problematyki kQ ” doprowadzi do analogicznych wyników – dobroć cewki Q obliczona zgodnie z (33) ulegnie jedynie przeskalowaniu, natomiast względna dobroć Q nie ulegnie zmianie.



Rys. 14. Charakterystyki rezystancji cewki R_i w funkcji długości licy l dla różnych częstotliwości pracy f

Wnioski

Zaprezentowana w artykule analiza „problematyki kQ ” pozwala określić ogólny wpływ parametrów konstrukcyjnych rezonansowej kaskady cewek (współczynnika wypełnienia uzwojeń S oraz względnej średnicy zewnętrznej d_{out}^*) na współczynnik sprzężenia magnetycznego k oraz dobroć własną cewki Q , a w konsekwencji na sprawność kaskady.

Zgodnie z literaturą [5], [6] sprawność układu bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej jest funkcją współczynnika sprzężenia k oraz dobroci Q . W artykule wykazano, że współczynnik sprzężenia magnetycznego k jest zależny jedynie od parametrów konstrukcyjnych kaskady (S , d_{out}^*). W przypadku dobroci własnej cewki Q jej wartość jest funkcją większej liczby parametrów. Wartość Q zależy od parametrów geometrycznych cewki (d_{out} , S), a ponadto istotnie znacznie ma rodzaj zastosowanej licy oraz częstotliwość pracy.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu wypełnienia uzwojeń cewki płaskiej S na wartość współczynnika sprzężenia magnetycznego k oraz dobroć własną cewki Q . Wykazano, że współczynnik wypełnienia uzwojeń cewki S z przedziału od 0,5 do 0,8 zapewni uzyskanie możliwie dużych wartości kQ , a w konsekwencji również możliwie wysokich sprawności układu do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Ponadto, wzrost częstotliwości pracy nie wpłynie istotnie na zmianę wyznaczonego optymalnego przedziału współczynnika S – przeskalowaniu ulegnie jedynie dobroć cewki Q (względna dobroć Q nie ulegnie zmianie).

W ramach kontynuacji badań planuje się opracowanie metody obliczeń rezystancji licy dla wyższych częstotliwości pracy, bazującej na metodach FEM (ang. *Finite Element Method*) oraz PEEC (ang. *Partial Element Equivalent Circuit*), która uwzględni efekty naskórkowy i zbliżenia. Dzięki tej metodzie możliwe będzie obliczenie poprawnej dobroci własnej cewki dla wyższych częstotliwości pracy.

Autor: 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.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Chen Q., Wong S., Tse C., Ruan X., Analysis, Design, and Control of a Transcutaneous Power Regulator for Artificial Hearts, *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 3, no. 1, 2009, pp. 23-31.
- [4] 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, nr 4, 2016, s. 120-125.
- [5] Cieśla T., Kaczmarczyk Z., Grzesik B., Stępień M., Obwody do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej, *Kwartalnik Elektryka*, nr 4, 2009, s. 135-149.
- [6] Bosshard R., Muhlethaler J., Kolar J. W., Stevanović I., Optimized Magnetic Design for Inductive Power Transfer Coils, *28th Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013, pp. 1812-1819.
- [7] Harrison R., Designing Efficient Inductive Power Links for Implantable Devices, *Circuits and Systems, IEEE International Symposium*, 2007, pp. 2080-2083.
- [8] Grover F. W., *Inductance Calculations*, D. Van Nostrand, New York 1946.