

Mariusz STĘPIEŃ, Bogusław GRZESIK
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

TRANSFORMATOR WSPÓŁOSIOWY LINIOWY – IDEA KONSTRUKCJI ORAZ PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI

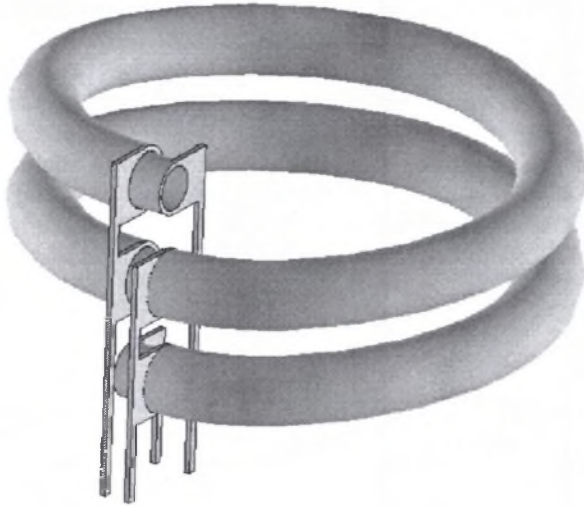
Streszczenie. Artykuł przedstawia istotę budowy oraz podstawowe właściwości współosiowego transformatora liniowego wysokiej częstotliwości (rzędu 1 MHz). Transformator liniowy jest modyfikacją konstrukcji transformatora spiralnego. Właściwości transformatora liniowego przebadano i odniesiono do właściwości transformatora spiralnego. Porównanie dotyczy właściwości energetycznych oraz właściwości związanych z wielkościami polowymi. Właściwości energetyczne to przede wszystkim sprawność oraz gęstość mocy uzyskiwana przy zadanych stratach mocy. Transformator spiralny cechują bardzo dobre właściwości energetyczne, tj. sprawność powyżej 98% w szerokim zakresie obciążeń (5 – 73 A), gęstość mocy około 100 kW/kg przy 10 W strat mocy. Podobne właściwości wykazuje transformator liniowy. Drugi element porównania to rozkłady gęstości prądu w uzwojeniach oraz indukcji w rdzeniu magnetycznym. Transformator spiralny wykazuje niecentryczność rozkładu tych wielkości. Powoduje to lokalnie wzrost strat mocy w transformatorze (nadmierne nagrzewanie). W transformatorze liniowym zjawisko to zostaje wyeliminowane. Analiza obejmuje badania symulacyjne, oparte na metodzie elementów skończonych, przeprowadzone przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS.

THE STRAIGHT LINE COAXIAL TRANSFORMER – IDEA OF DESIGN AND BASIC PROPERTIES

Summary. The paper describes idea of design and basic properties of straight line coaxial transformer designed for high frequency operation (about 1 MHz). The straight line transformer is modification of spiral transformer. The properties of straight line transformer are calculated and compared to spiral transformer. Comparison contains power properties and properties related to field quantities of transformer. First one consists of efficiency and power density calculated and given total power losses. The spiral transformer point very good power properties: efficiency above 98% in broad range of load and power density about 100 kW/kg at 10 W of power losses. The properties of straight line transformer are similar to basic one. The second analysis item is comparison of current density in windings and flux density distribution in magnetic core between straight line and basic design. The spiral transformer shows non-concentric distribution of these quantities. It decreases local heating of windings and total power in magnetic core. The straight line transformer excludes this phenomenon. The analysis consists of computations based on finite elements method using ANSYS software.

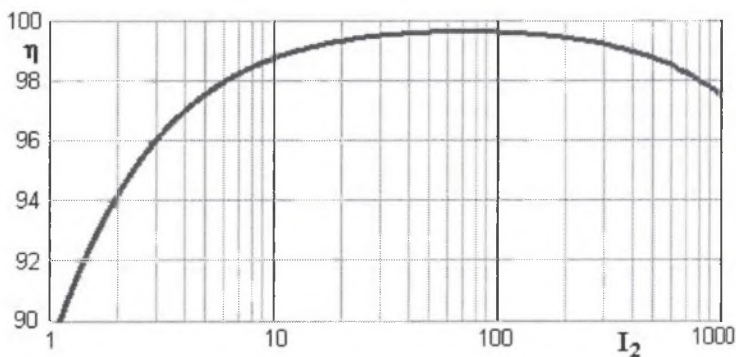
1. WPROWADZENIE

Współczesne tendencje w technologii przekształcania energii elektrycznej, to dążność do osiągnięcia wysokiej jego sprawności, przy jak najwyższej gęstości mocy i najniższym oddziaływaniu na środowisko (szczególnie elektromagnetyczne). W niniejszym artykule opisuje się transformator odpowiadający wymienionym wymogom. Aby osiągnąć takie własności, należy zastosować odpowiednią konstrukcję, która umożliwi pracę przy wielkiej częstotliwości. Inspiracją do konstrukcji transformatora opisywanego w niniejszym artykule były konstrukcje transformatorów opisywane szczegółowo w pracach [1, 2]. Istota tej konstrukcji polega na współosiowym nałożeniu na siebie uzwojeń oraz rdzenia przy zastosowaniu specyficznego systemu połączeń i wyprowadzeń elektrycznych oraz wyprowadzeń cieczy chłodzącej. Oprócz korzystnych właściwości elektrycznych konstrukcja ta umożliwia bardzo intensywne chłodzenie, dając przez to możliwości uzyskania wysokiej masowej i objętościowej gęstości mocy. Ideę transformatora współosiowego w realizacji spiralnej [1, 2] przy przekładni $z_1:z_2=2:1$ zaprezentowano na rys. 1. Przeprowadzona dotychczas analiza [1, 2] transformatora wykazała, że uzyskanie zadowalających gęstości mocy (kilkadziesiąt kW/kg) jest możliwe dla częstotliwości od kilkuset kHz do kilku MHz.



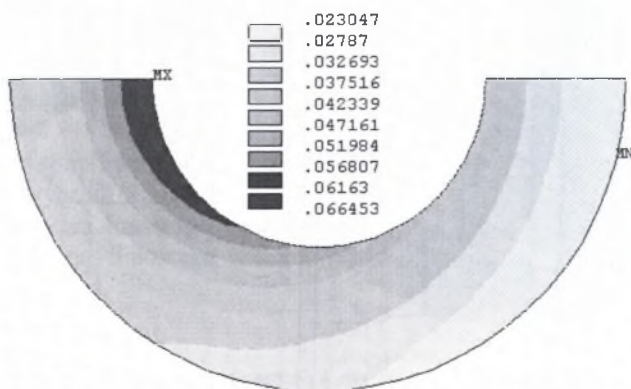
Rys. 1. Budowa uzwojeń transformatora współosiowego spiralnego, $D_z=40$ mm, $d_z=5$ mm, $H=20$ mm
 Fig. 1. The windings design of coaxial spiral transformer, $D_z=40$ mm, $d_z=5$ mm, $H=20$ mm

Transformator współosiowy spiralny (rys. 1) cechuje się bardzo wysoką sprawnością (wartość maksymalna sprawności $\eta_{\max}=99,65\%$) w szerokim zakresie prądów obciążenia (rys. 2). Transformator ten wykazuje także pewne negatywne właściwości, dotyczące jego pracy i wydajności energetycznej. Właściwości te dotyczą przede wszystkim niejednorodności rozkładu gęstości prądu w uzwojeniach transformatora oraz niejednorodności rozkładu indukcji magnetycznej w rdzeniu magnetycznym.



Rys. 2. Sprawność transformatora spiralnego jako funkcja prądu obciążenia
 Fig. 2. The efficiency of the spiral transformer vs. load current

Rozważając przekrój poprzeczny transformatora przez uzwojenia i rdzeń magnetyczny, otrzymuje się układ współosiowych pierścieni o odpowiednich promieniach. Wiadome jest, że rozkłady prądu i indukcji magnetycznej będą niejednorodne wzdłuż promieni rozważanego obwodu. Rozkład prądów w uzwojeniach będzie zniekształcony poprzez zjawisko zbliżenia i naskórkowości (w konstrukcji współosiowej zjawiska te pokrywają się) i będzie się zmniejszał od warstwy między uzwojeniami w kierunku zewnętrznej części uzwojeń. Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu będzie najwyższy wewnątrz rdzenia. Rozkłady te nie powinny się jednak zmieniać wzdłuż obwodu o danym promieniu. Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej zamieszczono na rys. 3. Na przedstawionym rysunku widać wyraźne niejednorodności (znacznie wyższe wartości po lewej stronie przekroju). Podobnie wygląda niejednorodność rozkładu prądu w uzwojeniach. Niejednorodność ta wynika między innymi ze zmian efektywnej cząstkowej rezystancji uzwojenia po jego zewnętrznej i wewnętrznej stronie.



Rys. 3. Rozkład indukcji magnetycznej B w rdzeniu transformatora współosiowego spiralnego
 Fig. 3. The distribution of magnetic flux density B in the magnetic core of the spiral coaxial transformer

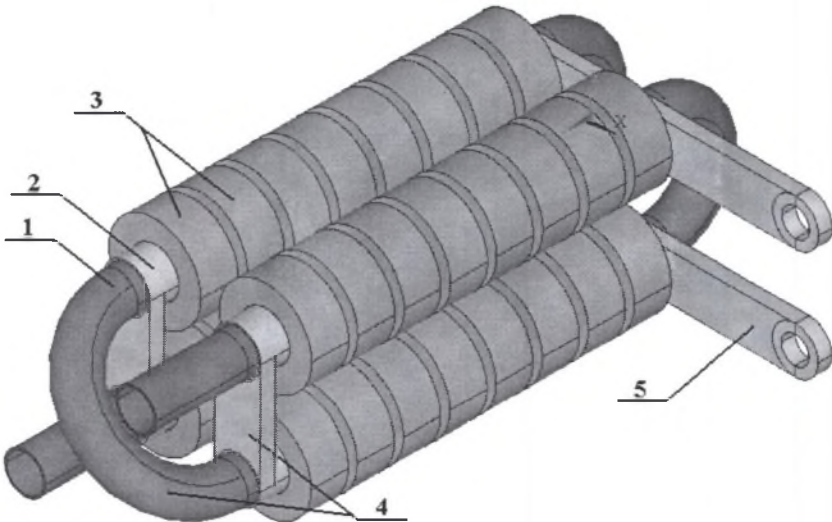
Wylimitowanie opisanych powyżej zjawisk możliwe jest poprzez zastosowanie transformatora z uzwojeniami wykonanymi w postaci odcinków prostoliniowych. Wadą takiej konstrukcji jest konieczność wykonania większej liczby połączeń czołowych, które mogą

stanowiąc źródło dodatkowych strat i zakłóceń pracy transformatora. Stosowanie takiej konstrukcji jest jednak zasadne, jeśli zysk wynikający z uzyskania jednorodności rozkładu prądu i indukcji magnetycznej przewyższa straty wynikające z wykonania dodatkowych połączeń. Transformator liniowy zostanie szczegółowo opisany w następnym punkcie artykułu.

2. KONSTRUKCJA WSPÓŁOSIOWEGO TRANSFORMATORA LINIOWEGO

Transformator współosiowy liniowy przedstawiony na rys. 4 składa się z odpowiedniej liczby prostych współosiowo umieszczonych par rurek, stanowiących elementarne transformatory współosiowe o przekładni $z_1:z_2=1:1$. Odpowiednie połączenie uzwojeń transformatorów elementarnych (rys. 5) daje możliwość uzyskania przekładni innej niż 1:1. W celu porównania właściwości transformatora liniowego z transformatorem spiralnym przebadano transformator liniowy mający wszystkie możliwe parametry konstrukcyjne takie same, jak transformator spiralny. Dotyczy to przede wszystkim: średnic przekroju poprzecznego transformatora, długości czynnej uzwojeń (sumarycznej), przekładni oraz systemu chłodzenia.

Konstrukcja transformatora liniowego będąca przedmiotem analizy ma następujące parametry: przekładnię $z_1:z_2=2:1$, średnicę zewnętrzną rdzenia pierścieniowego $d_c=10$ mm, średnicę zewnętrzną uzwojenia wtórnego $d_{o0}=5$ mm, długość czynną uzwojeń $l_u=188$ mm (4 transformatory elementarne, każdy z uzwojeniami o długości 47 mm).

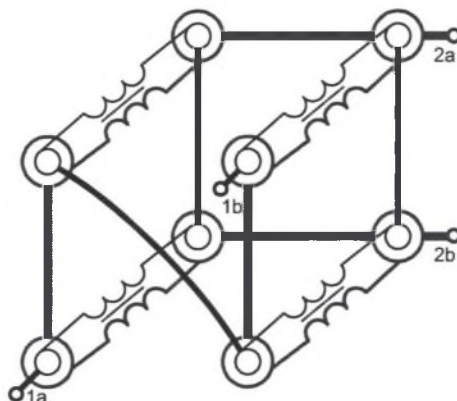


Rys. 4. Konstrukcja transformatora liniowego; 1 - uzwojenie pierwotne, 2 - uzwojenie wtórne, 3 - rdzenie pierścieniowe, 4 - połączenia międzyuzwojowe, 5 - zaciski wyjściowe

Fig. 4. The straight line transformer design; 1 - primary winding, 2 - secondary windings, 3 - ring cores, 4 - interwindings connections, 5 - output clamps

Żadaną przekładnię transformatora $z_1:z_2=2:1$ uzyskano łącząc odpowiednio początki i końce uzwojeń (rys. 4, 5). Z przedstawionej konstrukcji możliwe jest uzyskanie konstrukcji o dowolnej przekładni w postaci przekładni podstawowej $z_1:1$, gdyż każde dwie pary rurek

(górną i dolną) stanowią pojedynczy moduł transformatora i mogą być powielane dowolną ilość razy (stąd też często spotykane określenie konstrukcji jako konstrukcja modułarna). Ze względu na stałą, niewielką wysokość, niezależną od ilości modułów transformatora, konstrukcja taka może być traktowana jako transformator płaski (ang. flat transformer [5]). Wykonanie połączeń uzwojenia wewnętrznego z rurki o odpowiedniej średnicy zapewnia wprowadzenie do wnętrza uzwojenia czynnika chłodzącego, co znacznie poprawia zdolności odprowadzania strat mocy z transformatora i stanowi istotną zaletę takiej konstrukcji.



Rys. 5. Schemat połączeń transformatorów elementarnych w transformatorze liniowym
Fig. 5. The elementary transformer connections diagram in the straight line transformer

Dodatkową zaletą technologiczną transformatora liniowego jest możliwość zastosowania bezszczelinowego magnetowodu wykonanego ze standardowych małogabarytowych rdzeni pierścieniowych; uwidoczniło to na rys. 4. Dla porównania, w transformatorze spiralnym zastosowanie takich rdzeni tworzy szczeliny pomiędzy rdzeniami po zewnętrznej stronie spirali. W celu zlikwidowania tych szczelin rdzenie pierścieniowe powinny być odpowiednio zeszlifowane. Innym rozwiązaniem jest wytworzenie rdzenia z materiału ferromagnetycznego termoplastycznego. Jedno i drugie rozwiązanie rdzenia magnetycznego transformatora spiralnego jest kłopotliwe technologicznie i droższe w porównaniu z rdzeniem transformatora liniowego.

Transformator spiralny z rdzeniami pierścieniowymi nieprzylegającymi wykazuje dobre właściwości energetyczne [2]. Porównanie właściwości transformatora spiralnego z właściwościami transformatora liniowego będzie możliwe po wykonaniu analizy tego ostatniego. Analizę transformatora liniowego zamieszczono w punkcie 3 niniejszego artykułu, a porównanie w punkcie 4.

3. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI TRANSFORMATORA LINIOWEGO

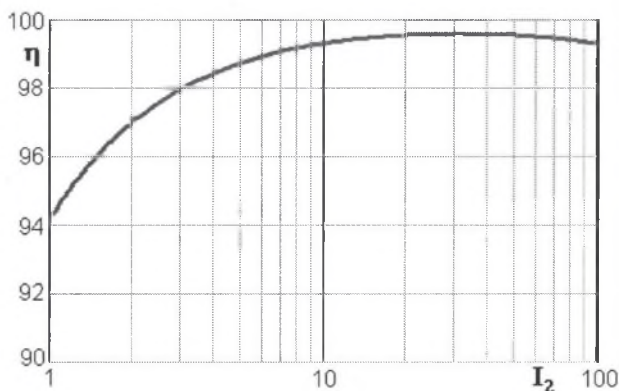
Analizę właściwości transformatora liniowego przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS [7]. Analiza składała się z dwóch części, tj. wyznaczenia strat mocy w uzwojeniach oraz wyznaczenia strat mocy w rdzeniu. Na tej podstawie określone były parametry energetyczne transformatora wyznaczone przy stałej wartości całkowitych strat mocy $\Delta P = 10$ W (wartość określona na podstawie wcześniejszych badań dotyczących transformatorów wysokiej częstotliwości

chłodzonych cieczą). Wyznaczone zostały następujące parametry: napięcie zasilania i moc wyjściowa przy danych stratach mocy, maksymalna sprawność (dla optymalnie dobranego obciążenia) oraz odpowiadająca jej gęstość mocy przekazywanej przez transformator. Analiza przeprowadzona była dla częstotliwości pracy transformatora $f = 1$ MHz. Analiza właściwości konstrukcji bazowej wykazała, że dla zastosowanego typu rdzenia magnetycznego (3F4 Ferroxcube [6]) jest to optymalna częstotliwość pracy. Zastosowanie transformatora przy innych częstotliwościach wymagałoby użycia rdzenia wykonanego z innego, odpowiednio dobranego materiału.

Określenie wartości strat mocy w uzwojeniach oparto na czwórnikowym modelu zastępczym transformatora. W pierwszym etapie wyznaczono parametry impedancji czwórnika na podstawie analizy stanu jałowego oraz stanu zwarcia transformatora, przeprowadzonej z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS. Następnie wyznaczone parametry pozwoliły na określenie wartości strat mocy jako funkcji napięcia zasilającego oraz rezystancji i prądu obciążenia.

Straty mocy w rdzeniu określane były pośrednio na podstawie katalogowej charakterystyki [6] całkowitych strat mocy w rdzeniu jako funkcji maksymalnej wartości indukcji magnetycznej. Metodą elementów skończonych wyznaczono rozkład indukcji w rdzeniu dla optymalnego obciążenia. Dla każdego elementu skończonego rdzenia wyznaczono odpowiadające mu straty w rdzeniu. Zsumowanie strat we wszystkich elementach dało sumaryczne straty mocy. Procedurę powtórzono dla kilkunastu wartości napięcia, dzięki czemu uzyskano charakterystykę sumarycznych strat w rdzeniu w funkcji napięcia zasilającego.

Na podstawie znajomości strat w uzwojeniach oraz w rdzeniu jako funkcji napięcia zasilającego zbudowano charakterystykę strat całkowitych w funkcji napięcia zasilającego. Wartość całkowitych strat przyrównana do strat maksymalnych $\Delta P = 10$ W określa wartość napięcia zasilającego (zwanego dalej jako znamionowe), to z kolei pozwala na określenie mocy wyjściowej (znamionowej) i sprawności transformatora. Uzyskaną charakterystykę sprawności w funkcji prądu obciążenia (przy napięciu znamionowym) przedstawiono na rys. 6.



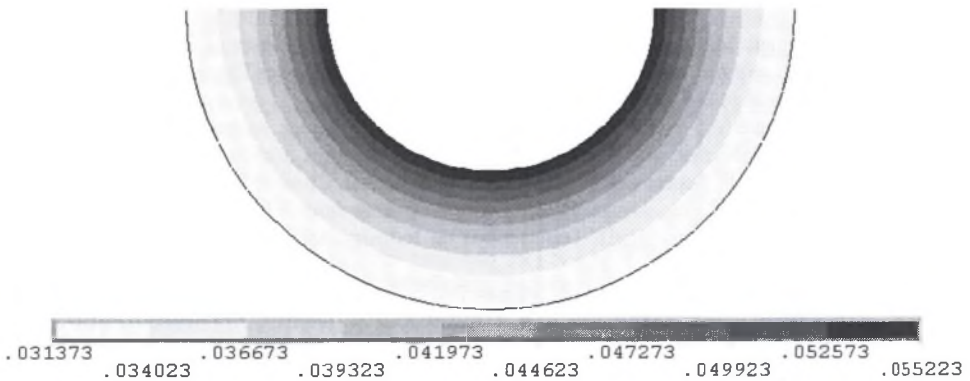
Rys. 6. Charakterystyka sprawności transformatora liniowego w funkcji prądu obciążenia
Fig. 6. The efficiency characteristic of straight line transformer vs. output current

Dla transformatora liniowego pracującego przy częstotliwości $f = 1$ MHz otrzymano: napięcie znamionowe $U_1 = 73$ V, moc znamionowa $P_2 = 2,50$ kW, sprawność $\eta = 99,6\%$ oraz gęstość mocy $\alpha = 130$ kW/kg przy rezystancji obciążenia $R_o = 2,1 \Omega$ i prądzie $I_2 = 33,1$ A.

4. PORÓWNANIE KONSTRUKCJI LINIOWEJ Z KONSTRUKCJĄ BAZOWĄ

Porównanie transformatora liniowego ze spiralnym dotyczy przede wszystkim rozkładów przestrzennych prądu i indukcji magnetycznej. Wyznaczone parametry energetyczne są bardzo podobne. Należy pamiętać jednak, że są one określone dla takiej samej wartości dopuszczalnych strat mocy w transformatorze. Uzyskanie równomiernych rozkładów prądu i indukcji magnetycznej pozwoli na lepsze odprowadzanie ciepła z transformatora.

Rozkład indukcji w rdzeniu transformatora spiralnego (rys. 3) charakteryzuje się znaczną niejednorodnością. Na rys. 7 przedstawiony jest rozkład indukcji magnetycznej transformatora liniowego. Uzyskany rozkład jest najkorzystniejszym przypadkiem możliwym do uzyskania w przypadku transformatora współosiowego.



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu transformatora liniowego
Fig. 7. The flux density in magnetic core of straight line transformer

Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu liniowym jest korzystniejszy nie tylko ze względu na równomierność rozkładu indukcji, ale także ze względu na maksymalne wartości indukcji. Rdzeń transformatora liniowego, pracujący w dokładnie takich samych warunkach, co rdzeń transformatora spiralnego, osiąga maksymalną wartość indukcji o około 15% niższą niż rdzeń transformatora spiralnego (maksymalna indukcja transformatora liniowego 55 mT, transformatora spiralnego 66 mT). Mniejszy zakres zmian indukcji w rdzeniu pozwala na ograniczenie strat mocy wynikających ze zjawiska histerezy magnetycznej.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania dowodzą, że transformator współosiowy liniowy wykazuje dobre właściwości energetyczne. Wynika to z jednorodności gęstości prądu oraz indukcji wzdłuż obwodu odpowiednio zwoju i rdzenia.

Transformator liniowy wykazuje nieco gorsze właściwości energetyczne niż transformator spiralny. Dla liniowego: moc wyjściowa $P_2 = 2,5$ kW, sprawność $\eta = 99,6\%$ przy $f = 1$ MHz. Dla porównania transformator spiralny przy $f = 1$ MHz: moc wyjściowa $P_2 = 2,65$ kW, sprawność $\eta = 99,6\%$.

Zaletami transformatora liniowego są jego modularność i korzystniejsza technologia pozwalająca na zmniejszenie kosztów produkcji.

Modularność konstrukcji liniowej jest atutem poszerzającym spektrum jej możliwych zastosowań. Takie rozwiązanie pozwala również na uzyskanie bardzo szerokiego zakresu mocy możliwych do uzyskania.

Planuje się przeprowadzenie dalszych kompleksowych badań symulacyjnych i eksperymentalnych dotyczących właściwości konstrukcji liniowej. W badaniach tych analizowany będzie model 3D, w którym uwzględnione będą zjawiska występujące na czołach transformatora i w jego obszarach bezszczelinowych. Badania te będą miały na celu przede wszystkim określenie rozmiarów reaktancji rozproszenia powstającej w obszarze połączeń uzwojeń transformatora.

LITERATURA

1. Grzesik B., Stępień M.: *Analysis of effects of the coaxial transformer design on distribution of winding currents and flux density*, 10th European Conference on Power Electronics and Applications, CD-ROM Proceedings 2-4.09.2003, Toulouse, France.
2. Grzesik B., Stępień M.: *The coaxial transformer – the influence of primary winding shape on the transformer properties*, 10th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2002, 9-11 September 2002, Dubrovnik & Cavtat, Croatia, Proceedings, p. 380 & CD.
3. Rauls M.S., Novotny D.W., Divan D.M.: *Design Considerations For High Frequency Co-Axial Winding Power Transformer*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993, pp. 375-381.
4. Rauls M.S., Novotny D.W., Divan D.M., Bacon R.R., Gascoigne R.W.: *Multiturn High-Frequency Coaxial Winding Power Transformers*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 1, Jan. 1995, pp.112-118.
5. Sum K. K., Lau J. L.: *How to Design a Sophisticated 200 watt to 600 watt Brick dc-to-dc Power Converter*. Thirteenth International Power Conversion Conference PCIM 1999, 22 – 24 June 1999, Nürnberg, Germany, pp. 167-172.
6. Web page: *Ferrocube*, URL: <http://www.ferrocube.com/>
7. ANSYS Software Manual.

Pracę wykonano w ramach projektu finansowanego przez KBN nr 4 T10A 001 25, 2004/05.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

Wpłynęło do Redakcji dnia: 28 kwietnia 2004 r.