

Mariusz STĘPIEŃ

NOWA KONSTRUKCJA TRANSFORMATORA WYSOKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych nowej konstrukcji transformatora energoelektronicznego wysokiej częstotliwości. Przedmiotem analizy jest transformator współosiowy o konstrukcji modularnej z rdzeniem ferromagnetycznym. Badania przeprowadzone zostały przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES). Wykonana analiza pozwoliła na wyznaczenie sprawności i parametrów znamionowych transformatora przy zadanej częstotliwości oraz określenie parametrów schematu zastępczego w postaci macierzy impedancji czwórnik.

A NOVEL DESIGN OF HIGH FREQUENCY TRANSFORMER

Summary. This paper contains results of simulations of a novel design of power electronics transformer. The analysis deals with a coaxial transformer of modular design with a ferromagnetic core. The simulations were performed using Finite Element Method (FEM). The accomplished analysis allowed determination of efficiency and rating of the transformer at the given frequency, as well as calculations of the parameters of the equivalent circuit in the form of two-port network impedance matrix.

1. WPROWADZENIE

Współczesna energoelektronika poszukuje rozwiązań konstrukcyjnych transformatorów o maksymalnej sprawności i możliwie dużej mocy znamionowej, osiąganych przy jak najmniejszych gabarytach. Uzyskanie takich właściwości transformatora jest możliwe przy względnie wysokich częstotliwościach pracy, rzędu 1 MHz i wyższych.

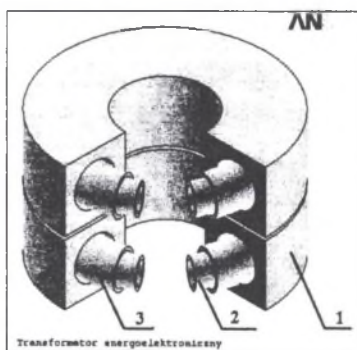
Zjawiska zachodzące przy wysokiej częstotliwości sprawiają, że przestaje obowiązywać klasyczny schemat zastępczy transformatora [2], a tym samym nie jest możliwa jego analiza metodami obwodowymi. Przeprowadzenie pełnej analizy transformatorów wysokiej częstotliwości jest możliwe przy zastosowaniu programów symulacyjnych, wykorzystujących metody polowe [5], np. metodę elementów skończonych (MES). Przykładem tego typu programów jest program ANSYS [8].

W artykule przedstawiony został transformator całkowicie nowego typu [4]. Charakteryzuje się on bardzo dobrym sprzężeniem magnetycznym między uzwojeniami, co

pozwała na osiągnięcie wysokiej sprawności oraz bardzo wysokich wskaźników masowej i objętościowej gęstości mocy w uzwojeniach. Przedstawiona konstrukcja jest konstrukcją modułową pozwalającą na tworzenie konstrukcji pokrewnych o dowolnej wartości przekładni zwojowej.

2. OPIS KONSTRUKCJI TRANSFORMATORA

Przedmiotem artykułu jest transformator energoelektroniczny wysokiej częstotliwości o konstrukcji modułowej [1] przedstawionej na rys.1. Transformator posiada rdzeń ferromagnetyczny oraz ułożone współosiowo wewnątrz rdzenia uzwojenia w postaci cienkich rurek miedzianych przedzielonych warstwą materiału izolacyjnego. Konstrukcja modułowa pozwala na uzyskanie żądanej wartości przekładni zwojowej transformatora [3]. Do badań przyjęto przekładnię 2:1.



Rys. 1. Idea budowy transformatora współosiowego (2 moduły)
 1 – rdzeń magnetyczny, 2, 3 – uzwojenie pierwotne, wtórne
 Fig. 1. Idea of coaxial transformer design (2 modules)
 1 – magnetic core, 2, 3 – primary, secondary

Konstrukcja przedstawiona na rys. 1 stanowi ideę budowy transformatora. W rzeczywistości uzwojenie pierwotne ma kształt spirali i stanowi trzon transformatora, natomiast uzwojenie wtórne jest na niego naniesione metodami elektrochemicznymi. Pomiędzy uzwojeniami wprowadzona jest cienka warstwa izolacyjna dwutlenku krzemu SiO_2 . Całość umieszczona jest wewnątrz rdzenia ferromagnetycznego. Transformator charakteryzuje się następującymi parametrami geometrii:

- 1) zewnętrzna / wewnętrzna średnica modułu 25 / 15 mm,
- 2) wysokość modułu 5 mm,
- 3) średnica przekroju izolacji 2 mm,
- 4) grubość uzwojeń / izolacji 0.13 / 0.1 mm.

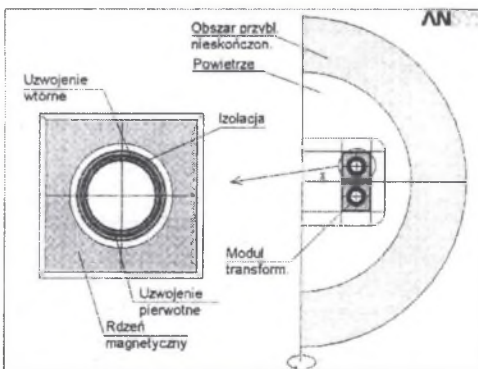
Grubość uzwojeń transformatora związana jest z głębokością wnikania pola magnetycznego w przewodnik przy wysokiej częstotliwości. Dobrana grubość stanowi podwójną głębokość wnikania pola elektromagnetycznego do miedzi przy częstotliwości 1 MHz. Przy tak dobranej grubości straty mocy w uzwojeniach są minimalne.

3. MODEL KOMPUTEROWY

Przeprowadzenie symulacji pracy transformatora wymaga stworzenia właściwego modelu numerycznego. Zjawiska zachodzące przy wysokiej częstotliwości sprawiają, że przestaje obowiązywać klasyczny schemat zastępczy transformatora, nie jest więc możliwa analiza obwodowa. Model stosowany w MES musi być dobrany tak, aby gęstość siatki elementów skończonych zapewniała poprawne rozwiązanie problemu w obszarach, gdzie wartości szukanej wielkości ulegają szybkim zmianom.

Do przeprowadzenia symulacji metodą elementów skończonych zastosowano program ANSYS 5.6, zawierający pakiet do obliczeń elektromagnetycznych [8].

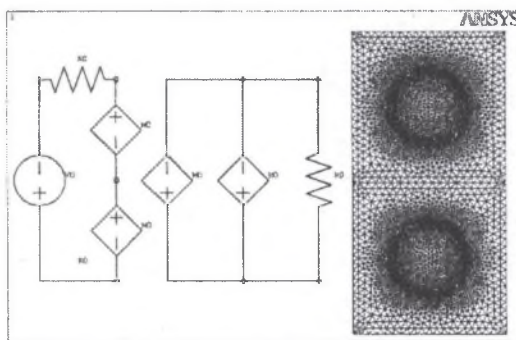
Wykorzystanie symetrii badanego transformatora pozwoliło na zbudowanie modelu numerycznego w przestrzeni 2D. Zastosowanie takiego uproszczenia pozwoliło na bardzo duże ograniczenie ilości elementów skończonych, a nie wprowadziło żadnych zmian w wynikach symulacji. Ze względu na własności metody obliczeń, konieczne było uwzględnienie w modelu otaczającego transformator powietrza oraz zastosowanie sztucznego obszaru, przybliżającego pole elektromagnetyczne w nieskończoności. Model geometryczny przedstawiony został na rys. 2.



Rys. 2. Model geometrii transformatora w programie ANSYS
Fig. 2. ANSYS model of transformer geometry

Wymuszenia w modelu zrealizowane zostały za pomocą analizatora obwodowego, poprzez dołączenie do zamodelowanego obszaru zewnętrznego obwodu elektrycznego, zawierającego z jednej strony źródło napięcia przemiennego, z drugiej zaś rezystancję obciążenia. Poprzez zmianę wartości rezystancji obciążenia możliwa była zmiana prądu wtórnego. Parametry źródła napięcia: amplituda 50 V, częstotliwość 1 MHz.

Bardzo ważnym elementem modelu, gwarantującym poprawność obliczeń, jest gęstość siatki elementów skończonych. Rys.3 przedstawia siatkę elementów skończonych w badanym modelu. Odpowiedni dobór gęstości pozwala na zwiększenie dokładności obliczeń w miejscach występowania dużych zmian rozkładu szukanej wielkości polowej (taka sytuacja występuje w obszarze wnikania pola magnetycznego do przewodnika).

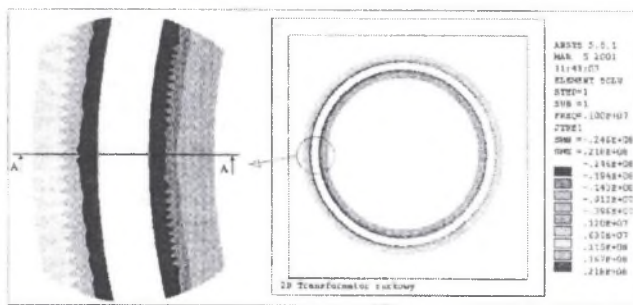


Rys. 3. Siatka elementów skończonych w obszarze uzwojeń
Fig. 3. Mesh of finite elements in windings region

Przedstawiony model geometrii zawierał 38 000 elementów i 19 000 węzłów. W obszarze zawierającym moduły transformatora (obszar z rys.3) znalazło się 33 000 elementów i 17 000 węzłów. Czas obliczeń dla danego stanu pracy wynosił około 20 minut (komputer P2, 233 MHz). Do wyznaczenia charakterystyki sprawności wyznaczono 30 punktów pomiarowych.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

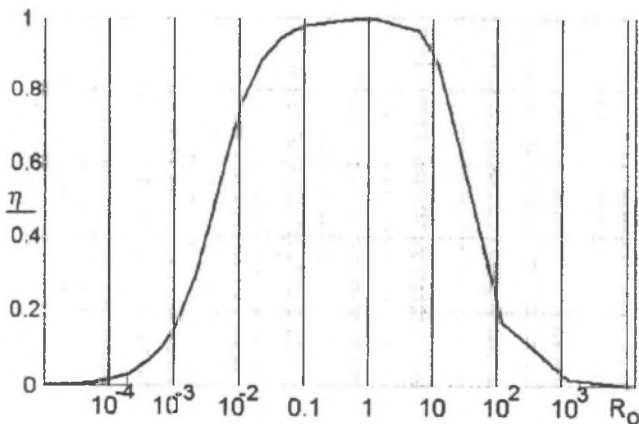
Przeprowadzone symulacje pozwoliły na wyznaczenie rozkładu prądu w uzwojeniach transformatora. Na rys. 4 przedstawiony został rozkład części rzeczywistej prądu. Płynność zmian prądu w uzwojeniach zapewnia poprawność przeprowadzonych obliczeń. Wynika to z faktu, że w MES wyniki otrzymywane są w węzłach i aproksymowane liniowo pomiędzy nimi. Niewłaściwe rozmieszczenie węzłów spowodowałoby błędy w aproksymacji liniowej.



Rys. 4. Rozkład części rzeczywistej prądu w uzwojeniach

Fig. 4. Distribution of the real part of current in windings of the transformer

Wyznaczenie prądów i napięć w uzwojeniach posłużyło do wyznaczenia charakterystyki sprawności transformatora. Charakterystykę tę wyznaczono dla 30 wartości rezystancji obciążenia zmieniając tym samym prąd obciążenia od stanu jałowego do zwarcia. Na podstawie symulacji otrzymano charakterystykę przedstawioną na rys.5. Charakterystyka wykazuje bardzo wysoką sprawność transformatora (powyżej 95%) w szerokim zakresie rezystancji obciążenia (od 0.5 do 5 Ω). Maksymalna sprawność osiągana dla rezystancji 1 Ω wyniosła 0.999. W symulacjach nie uwzględniono strat mocy w rdzeniu ferromagnetycznym, na skutek czego sprawność przyjmuje wyższe wartości niż w układzie rzeczywistym.



Rys. 5. Sprawność transformatora w funkcji rezystancji obciążenia

Fig. 5. Efficiency of transformer versus load resistance

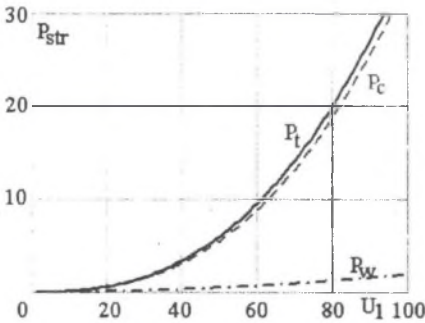
Parametry stanu zwarcia i stanu jałowego pozwalają na wyznaczenie parametrów transformatora w postaci macierzy impedancji Z według zależności:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Otrzymano następujące parametry macierzy Z:

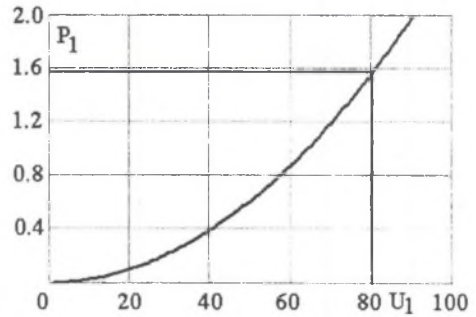
$$Z = \begin{bmatrix} 0.01 + j71.63 & 1.45 \cdot 10^{-3} + j35.69 \\ 1.45 \cdot 10^{-3} + j35.60 & 9.83 \cdot 10^{-4} + j17.85 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Obliczenie wartości elementów macierzy pozwoliło na wyznaczenie charakterystyki mocy oddawanej z transformatora oraz strat mocy w funkcji napięcia zasilającego. Określenie dopuszczalnych strat pozwoliło na znalezienie wartości znamionowej mocy transformatora. Na podstawie analizy parametrów cieplnych transformatora ustalono dopuszczalne straty mocy na poziomie 20 W. Rys. 6 przedstawia sposób wyznaczenia dopuszczalnego napięcia zasilającego transformator przy maksymalnej sprawności. Napięcie to stanowi napięcie znamionowe transformatora.



Rys. 6. Straty mocy w funkcji napięcia zasilającego transformator

Fig. 6. Power losses vs. supply voltage



Rys. 7. Moc wejściowa w funkcji napięcia zasilającego

Fig. 7. Input power vs. supply voltage

Do wyznaczenia całkowitych strat mocy (krzywa P_i) przyjęto straty w miedzi wynikające z parametrów macierzy Z (krzywa P_w) oraz straty w rdzeniu (krzywa P_c). Straty w rdzeniu obliczono na podstawie rdzenia proszkowego TN24/15/7.5 z materiału 3F4 firmy Philips [7]. Dla wyznaczonego napięcia znamionowego $U_1=80$ V maksymalna wartość indukcji magnetycznej w rdzeniu wynosiła 0.25 T, co odpowiadało 12 W/cm^3 strat mocy (rys. 8).

Znajomość napięcia znamionowego pozwala na wyznaczenie mocy znamionowej transformatora i określenie dla niego wskaźników mocy (masowego i objętościowego). Jako moc znamionowa przyjmowana jest moc wejściowa P_1 . Moc ta jest w przybliżeniu równa mocy wyjściowej P_2 , ponieważ straty mocy są znikomo małe w porównaniu z wartościami mocy transformatora. Charakterystykę mocy wejściowej P_1 w funkcji napięcia wraz z zaznaczoną mocą znamionową przedstawia rys. 7.



Rys. 8. Rozkład modułu indukcji magnetycznej w rdzeniu

Fig. 8. Distribution of absolute value of magnetic flux density in the magnetic core

Na podstawie przedstawionych obliczeń określona została moc znamionowa transformatora $P_1=1.6$ kW, przy napięciu zasilania $U_1=80$ V (pracującego przy maksymalnej sprawności, wynikającej z wartości rezystancji obciążenia). Określone zostały także wskaźniki mocy: objętościowy $\alpha_v=1.05$ kW/cm³ oraz masowy $\alpha_m=0.12$ kW/g. Określają one zdolność transformatora do przekształcania energii.

Wyznaczona moc P_1 oraz straty mocy P_c pozwalają na wyznaczenie rzeczywistej wartości sprawności transformatora (po uwzględnieniu strat w rdzeniu magnetycznym). Obliczona sprawność:

$$\eta_r = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_c}{P_1} = 1 - \frac{P_c}{P_1} = 0.9875 = 98.75\%. \quad (3)$$

Obiekt rzeczywisty nie będzie w pełni symetryczny, gdyż konieczne jest wykonanie wyprowadzeń z uzwojeń. Wprowadzi to zakłócenia w rozkładzie pola magnetycznego i będzie miało wpływ na właściwości transformatora. Zagadnienie to będzie rozpatrywane w dalszej części badań nad przedstawioną konstrukcją.

5. WNIOSKI

Przedstawiona w artykule analiza pozwala na sformułowanie następujących stwierdzeń:

- o Badany transformator, stanowiący całkowicie nową konstrukcję, charakteryzuje się bardzo dobrym sprzężeniem magnetycznym między uzwojeniami, co pozwala na znaczne zmniejszenie strat mocy w transformatorze.
- o Przeprowadzona analiza wykazała wysoką sprawność transformatora $\eta_r=98.75\%$. W szerokim zakresie obciążeń (od 0.5 do 5 Ω) sprawność była wyższa od 95%.

- Dla częstotliwości 1 MHz przy założonych stratach mocy $\Delta P=20$ W transformator miał następujące parametry znamionowe: moc znamionowa $P_1=1.6$ kW oraz napięcie znamionowe $U_{1N}=80$ V.
- Odniesienie mocy znamionowej do masy i objętości transformatora dało następujące wskaźniki mocy: masowy $\alpha_m=0.12$ kW/g i objętościowy $\alpha_v=1.05$ kW/cm³.
- Analiza strat mocy w rdzeniu magnetycznym wykazała ich dominujący udział w całkowitych stratach transformatora. Straty te w warunkach znamionowych wynosiły około 18 W i były około 10-krotnie większe od strat w uzwojeniach.
- Przedstawiona konstrukcja nie została dotychczas przebadana. Weryfikację przedstawionych badań symulacyjnych stanowił będzie eksperyment laboratoryjny.

LITERATURA

1. Stępień M.: Wykorzystanie metody elementów skończonych do analizy transformatorów wysokiej częstotliwości na przykładzie współosiowej konstrukcji modularnej, 22 Międzynarodowe Sympozjum Studentów i Młodych Pracowników Nauki, 14-15.05.2001, Zielona Góra, tom Elektrotechnika i Elektronika, s.21 – 29.
2. Stępień M.: Analiza transformatora powietrznego wysokiej częstotliwości z wykorzystaniem programu ANSYS, Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 1999.
3. Sum K. K., Lau J. L.: How to Design a Sophisticated 200 to 600 watt Brick dc-to-dc Power Converter, Proceedings of the Thirteenth International Power Conversion Conference, June 1999, Nurnberg, Germany.
4. Grzesik B., Stępień M.: Transformator współosiowy koncentryczny, Zgłoszenie patentowe nr. 3254/20/2000, 31.07.2000 (Urząd Patentowy RP).
5. Bolkowski S. [red]: Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego, WNT, Warszawa 1993.
6. Serwis internetowy: The Revolutionary Flat Transformer, URL: <http://bytemark.com/flattransformer/>
7. Serwis internetowy: Ferroxcube, URL: <http://www.ferroxcube.com/prod/assets/torion.htm>
8. ANSYS User's Manual.

Recenzent: Dr hab. Sławomir Wiak, prof. Politechniki Łódzkiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 września 2001 r.

Abstract

This paper contains results of simulations of a novel design of power electronics transformer. The analysis deals with a coaxial transformer of modular design with a ferromagnetic core. The paper describes transformer with ratio 1:2. The primary windings of the transformer are connected in series and placed inside the core. The secondary ones are connected in parallel and placed between the primary windings and the core (see Fig. 1). The thickness of the windings is equal to double skin depth (about 0.13 mm at 1 MHz). The windings are separating by a thin layer of insulation SiO₂ (≈ 0.1 mm). The toroidal magnetic core of the transformer is a ferrite one. The technology of the transformer manufacture is considerably difficult. It needs application of the means used in semiconductor industry.

The simulations based on Finite Element Method (FEM) were realized using ANSYS software. The axial symmetry allowed application of a 2D model. The boundary conditions in the model were defined on the outside edge of the core area for the magnetic vector potential and on negative nodes of a voltage source and a load resistance for the voltage potential. Since the skin effect occurred the mesh density in the windings should be considerably greater than that in the air and the core.

The performed analysis allowed determination of efficiency and rating of the transformer at the given frequency as well as calculations of the parameters of the equivalent circuit in the form of two-port network impedance matrix. The maximum efficiency values are above 99.0 % and they grow with frequency. The transformer efficiency exceeds 95% within the wide range of load resistance. This range increases with frequency. The high efficiency results in small power losses in the transformer.

Determination of the impedance matrix values enabled analysis of the transformer power losses as a function of the supply voltage. The total power losses contain losses in the windings and losses in the magnetic core.

The proposed high frequency modular transformer is completely a new one. It has very high performance: the efficiency above 99%, good coupling between the windings and the relatively high power density.