

Straty mocy w uzwojeniach dławików energoelektronicznych

Dławiki rdzeniowe pracujące w obwodach energoelektronicznych stanowią znaczące źródło strat mocy. Straty w elementach indukcyjnych wzmacniane są oddziaływaniem wyższych harmoniczných napięcia i prądu na rdzeń i uzwojenia. W artykule omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące strat mocy w uzwojeniach elementów indukcyjnych.

Uzwojenia dławików

Dławiki rdzeniowe stanowią bardzo szeroką grupę elementów indukcyjnych. Parametry techniczne dławików rdzeniowych definiują dwie normy PN-EN 60076-6 oraz PN-EN 61558-2-20. Grupę tworzą dławiki jednofazowe oraz trójfazowe przeznaczone do różnych zastosowań, budowane na zróżnicowanych typach rdzeni wykonanych z materiałów



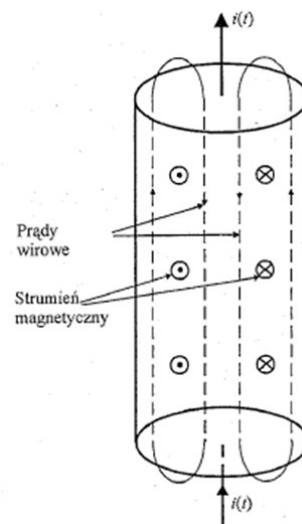
Rys.1 Jednofazowy dławik rdzeniowy.

o tak zwanych miękkich własnościach magnetycznych. Podobnie zróżnicowane konstrukcyjnie i technologicznie są uzwojenia dławików. Materiałami przewodowymi stosowanymi powszechnie do budowy uzwojeń dławików są miedź oraz aluminium, w postaci balach, przewodów okrągłych i profilowych oraz przewodów typu lica. Uzwojenia dławików

pracujących w obwodach dużych mocy obwodów energoelektronicznych najczęściej budowane są z cienkich blach miedzianych lub aluminiowych oraz równoległych wiązek przewodów profilowych.

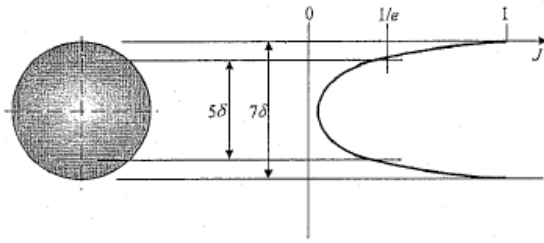
Zjawisko naskórkowości

Podczas przepływu prądu zmiennego $i(t)$ w uzwojeniu, wewnątrz i na zewnątrz przewodów wytwarzane jest zmienne pole magnetyczne, które zgodnie z regułą Lentza indukuje w przewodzie prądy wirowe o kierunku przepływu przeciwnym do głównego prądu uzwojenia. Indukowane prądy wirowe (*ang. eddy currents*) wytwarzają własne pole magnetyczne, które powoduje wypieranie pola głównego ze środka przewodnika [1,2,3].



Rys.2 Ilustracja prądów wirowych w przewodzie o przekroju kołowym.[2]

Prowadzi to do nierównomiernego rozkładu prądu w przekroju przewodu. Największa gęstość prądu występuje przy powierzchni, a najmniejsza w osi przewodu. Oznacza to, że efektywna, przewodząca powierzchnia przekroju przewodu jest mniejsza niż rzeczywisty obszar fizyczny. Zjawisko to nazywamy naskórkowością lub efektem wypierania prądu (*ang. skin effect*).



Rys.3 Ilustracja głębokości wnikania prądu w przewód o przekroju kołowym. [2]

Intensywność zjawiska naskórkowości rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości prądu w uzwojeniu. Składowe wysokoczęstotliwościowe prądy w uzwojeniach dławików płyną warstwą powierzchniową przekroju przewodów zwiększając gęstość prądu w tym obszarze. Dodatkowe straty mocy wywołane zjawiskiem naskórkowości w przewodach noszą nazwę strat na prądy wirowe. Wielkością definiującą intensywność zjawiska jest głębokość wnikania prądu δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\gamma\mu f}}$$

$$\gamma = \gamma_{cu} = 0,5882 \times 10^6 \text{ } [\Omega^{-1} \times \text{cm}^{-1}]$$

$$|T_{cu} = 20^{\circ} \text{C}$$

$$\mu = \mu_{cu} = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-9} \text{ } [\Omega \times \text{cm}^{-1}]$$

$$\delta_{20} = \frac{2,1}{\sqrt{f}} \text{ } [\text{mm}]$$

$$|f = [\text{kHz}]$$

Głębokość wnikania maleje wraz ze wzrostem przewodności właściwej materiału γ , lub częstotliwości prądu w obwodzie. Im mniejsza jest głębokość wnikania prądu tym rezystancja przewodu osiąga wyższą wartość. Współczynnik wzrostu rezystancji uzwojenia z uwzględnieniem zjawiska naskórkowości w przewodzie okrągłym o średnicy d wynosi:

$$k_{skin} = \left[1 + \frac{1}{768} \left(\frac{d}{\delta} \right)^4 \right]$$

Dla przewodów płaskich o wymiarze h dla dowolnej częstotliwości prądu zależność na współczynnik rezystancji przybiera postać [2]:

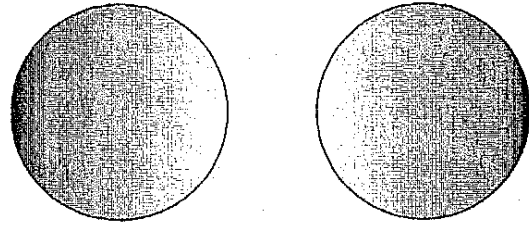
$$k_{skin} = Y \times \frac{\sinh 2Y + \sin 2Y}{\cosh 2Y - \cos 2Y}$$

$$Y = \frac{h}{\delta}$$

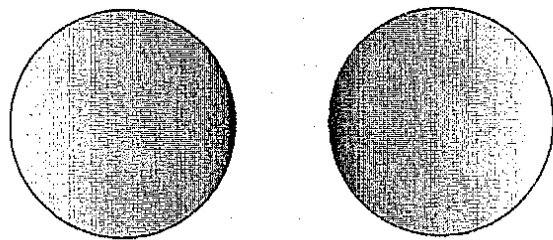
Efekt zbliżenia

Uzwojenia dławików dużej mocy budowane są z wiązek równoległych płaskich przewodów profilowych lub blach, izolowanych i nawijanych z dużą siłą naciągu. W przypadku równoległych torów prądowych przylegających bezpośrednio

do siebie obserwujemy wzajemne oddziaływanie pól magnetycznych poszczególnych przewodów zwane efektem zbliżenia (*ang. proximity effect*). Skutkiem oddziaływań zmiennych pól magnetycznych są prądy wirowe wywołujące wzrost strat mocy w przewodach dodatkowo do strat wynikających ze zjawiska naskórkowości [2,3,5].



Rys.4 Ilustracja rozkładu prądu w przewodach równoległych przy zgodnym kierunku przepływu prądów. [2]



Rys.5 Ilustracja rozkładu prądu w przewodach równoległych przy przeciwnych kierunkach przepływu prądów. [2]

Dla przewodów okrągłych o średnicy d , ułożonych w odległości s od siebie, przy tym samym kierunku przepływu prądu współczynnik wzrostu rezystancji uzwojenia wynosi:

$$k_{prox} = \frac{2s^2 + d^2}{2s^2}$$

Straty mocy w uzwojeniu

Uzwojenie dławika podczas pracy przewodzi najczęściej odkształcony prąd elektryczny. Część energii elektrycznej dostarczonej do dławika, zgodnie z prawem Joule'a, transformowana jest w energię cieplną na rezystancji uzwojenia. Powstające w ten sposób ciepło zostaje rozproszone w przestrzeni otaczającej dławik. Podstawowe straty mocy czynnej P_{dc} są proporcjonalne do rezystancji uzwojenia R_{dc} oraz kwadratu prądu I_{rms} płynącego w uzwojeniu:

$$P_{dc} = I_{rms}^2 \times R_{dc} = \frac{4I_{rms}^2 N l_z}{\gamma \pi d^2}$$

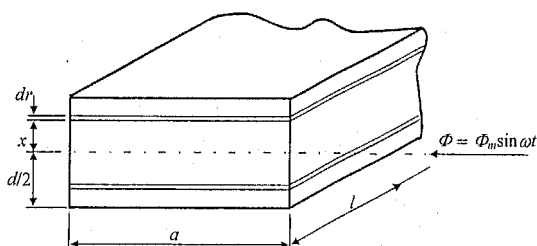
Straty uzwojenia N -zwojowego wykonanego przewodem walcowym o średnicy d zależą od oporności materiału przewodowego, średniej długości zwoju l_z oraz przekroju uzwojenia. Rezystancję uzwojenia i jednocześnie straty można ograniczyć, zwiększając przekrój poprzeczny przewodów, zmniejszając długość uzwojenia lub stosując inny materiał przewodowy. Całkowite straty mocy czynnej w powyższym uzwojeniu z uwzględnieniem efektów naskórkowości i zbliżenia dla prądu sinusoidalnego przedstawia zależność:

$$P_{tot} = P_{dc} + P_{wir}$$

$$P_{tot} = \frac{4I_{rms}^2 Nl_z}{\gamma\pi d^2} + \frac{2\gamma\pi(\omega\mu NI_{rms})^2 \times Nl_z d^4 k}{3 \times 128a^2}$$

Dla uzwojenia wykonanego przewodami płaskimi zależność przyjmuje postać:

$$P_{tot} = \frac{I_{rms}^2 Nl_z}{\gamma ha} + \frac{2\gamma(\omega\mu NI)^2 \times Nl_z h^3 k}{3 \times 24a}$$



Rys.6 Przewód płaski umieszczony w sinusoidalnym polu magnetycznym. [2]

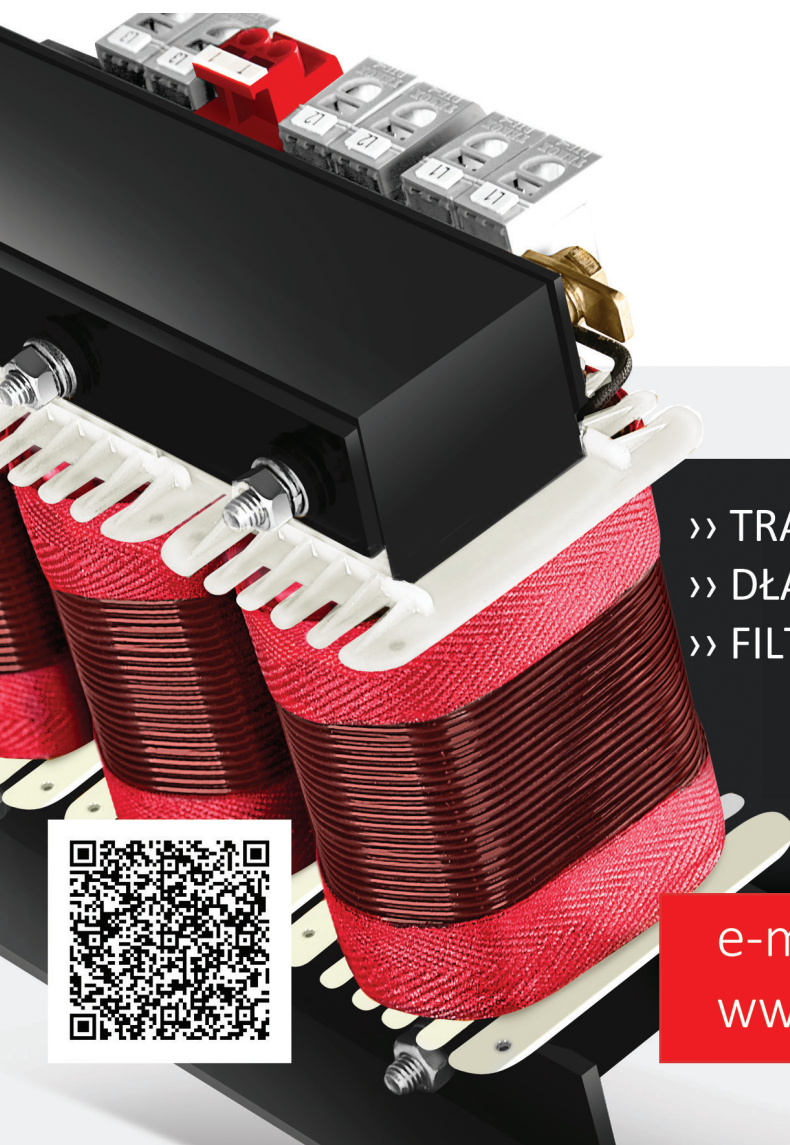
Poprawne wyznaczenie wartości strat w uzwojeniach dławików energoelektronicznych jest trudne z uwagi na występowanie szerokiego spektrum prądów harmonicznnych w obwodzie, co skutkuje odkształceniem przebiegu prądu. W takim przypadku należy wyodrębnić składowe harmoniczne

rozkładając przebieg prądu w szereg Fouriera i wyznaczyć oddzielnie współczynnik rezystancji dla każdej znaczącej składowej prądu.

W dławikach rdzeniowych dodatkowym i dominującym składnikiem strat w uzwojeniach są straty wiropądowe związane z oddziaływaniem strumienia rozproszenia wokół szczelin powietrznych w rdzeniu [3,4]. Ograniczenie tej części strat możliwe jest poprzez zastosowanie technologii wieloszczelinowej rdzenia CoreECO™, która pozwala na zmniejszenie dyspersji indukcji magnetycznej w przestrzeni wokół rdzenia [3,6].

Literatura

- [1]. Alex Van den Bossche, Vencislav Cekov Valchev "Inductors and Transformers for Power Electronics", Taylor & Francis Group, 2005.
- [2]. K. Rumatowski, „Straty mocy w uzwojeniach transformatorów zasilaczy impulsowych”, WPP, Poznań 2002.
- [3]. Kazimierzczuk M.K. "High-frequency magnetic components," 2009 A John Wiley and Sons, Ltd.
- [4]. A. Stadler, R. Huber, T. Stolzke, C. Gulden „Analytical Calculation of Copper Losses in Litz-Wire Windings of Gapped Inductors”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 2, FEBRUARY 2014
- [5]. A. Młot, M. Łukaniszyn, M. Korkosz "Wpływ efektu zbliżeniowego i naskórkowości na straty mocy w uzwojeniu silnika elektrycznego" Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 100/2013 cz. I
- [6]. M. Łukiewski "Dławiki układów napędowych z rdzeniami w technologii wieloszczelinowej CoreECO" Urządzenia dla Energetyki 3/2019



trafeco

Transformers & Inductive Components

- >> TRANSFORMATORY
- >> DŁAWIKI
- >> FILTRY SINUS SinECO™
- >> FILTRY WYŻSZYCH HARMONICZNYCH ThdECO™
- >> URZĄDZENIA SPECJALNE

e-mail: info@trafeco.pl
www.trafeco.pl

