

Elementy indukcyjne dla energoelektroniki

Nowoczesne elementy indukcyjne wytwarzane w firmie TRAFECO na potrzeby energoelektroniki budowane są w oparciu o niskostratne materiały magnetyczne z jednoczesnym wykorzystaniem technologii CoreECO™ dodatkowo ograniczającej straty. W artykule przedstawiono parametry użytkowe i konstrukcyjne dławików wygładzających, nasyceniowych i wyrównawczych oraz dławików pracujących w aplikacjach z wysokoczęstotliwościową składową zmienną.

Dławiki wygładzające

Wynikiem pracy prostownika, jest w ogólnym przypadku, przebieg będący sumą składowej stałej oraz przebiegów zmiennych napięcia i prądu. Tętnienia przebiegu wyprostowanego wywołane obecnością składowych zmiennych w napięciu i prądzie, powodują występowanie dodatkowych strat oraz określone problemy techniczne. Zastosowanie na wyjściu prostownika elementów indukcyjnych ogranicza amplitudy składowych zmiennych napięcia i prądu dając efekt wygładzania tętnień przebiegów wyjściowych. Prąd w obwodzie prostownika ma często przebieg impulsowy, przerywany. Zastosowanie dławika magazynującego energię o odpowiednio dużej indukcyjności, pozwala przywrócić ciągłość przebiegu prądu. Skuteczność filtra indukcyjnego, jest tym większa im większe są częstotliwości składowych zmiennych napięcia [1].

Elementy indukcyjne wygładzające występują w trzech głównych odmianach różniących się znacząco liniowością charakterystyki magnetycznej $L(I)$. Pełną liniowość magnetyczną obserwujemy w bezrdzeniowych elementach indukcyjnych typu AirECO™. Są to tak zwane cewki powietrzne, składające się wyłącznie z miedzianego lub aluminiowego uzwojenia i elementów konstrukcyjnych. Cewki mogą być przystosowane do chłodzenia naturalnego lub powietrzem wymuszonym.

Kolejną grupę stanowią dławiki z rdzeniem otwartym, w którym strumień magnetyczny dławika częściowo domyka się przez otoczenie i powietrze. Dławiki te posiadają charakterystykę podlegającą stopniowemu nasyceniu, na której trudno wyznaczyć konkretny punkt nasycenia lub punkt wyraźnego załamania charakterystyki $L(I)$. Zagrożenie niebezpiecznym nasyceniem tego typu dławika podczas przeciążenia jest bardzo niewielkie.

Najwięcej zastosowań znajdują dławiki z rdzeniem domkniętym płaszczywnym lub kolumnowym.

Charakterystyka dławików z magnetowodem zamkniętym ma tendencję do gwałtownego nasycenia. Sposobem na kontrolowanie tego zjawiska jest wprowadzenie w obwód magnetyczny szczelin o dużej reluktancji. W kolumnach rdze-



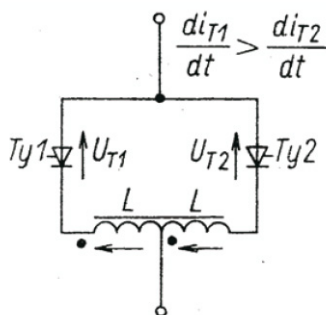
Rys. 1. Jednofazowy dławik wygładzający typu 1RTS

nia dławika wykonuje się od kilku do kilkudziesięciu szczelin powietrznych, o odpowiednio wyznaczonych szerokościach, rozmieszczonych w miarę możliwości równomiernie na wysokości kolumny. Pozwala to kontrolować i modyfikować kształt charakterystyki magnetycznej dławika oraz zakres jej liniowości. Efektem kształtowania charakterystyki jest zdolność projektowania dławików, które będą posiadały wymagane indukcyjności przy określonym obciążeniu. Dzięki temu możemy zaprojektować i wykonać elementy indukcyjne, które będą przechodziły w stan nasycenia magnetycznego przy odpowiedniej wartości prądu.

Dławiki wyrównawcze i nasyceniowe

Energoelektroniczne układy równoległe prostowników złożonych (np. 12pulsowych) przewidują zastosowanie elementów indukcyjnych wyrównawczych w miejscach połączeń między prostownikami. Zadaniem dławików sprzężonych jest wyrównywanie obciążenia pomiędzy sekcjami prostownika. Podobne zadanie mają dławiki wyrównawcze stosowane w obwodach tyrystorowych dużych mocy gdzie tyrystory pracują równoległe. Zadaniem dławika jest zachowanie rów-

nomiernego rozplywu prądów w połączonych równolegle tyrystorach. Z uwagi na nierówny rozkład napięć na tyrystorach, jeden z tyrystorów przejdzie wcześniej w stan przewodzenia. W dławiku powstaje wówczas siła elektromotoryczna przeciwdziałająca napięciu na tym tyrystorze a jednocześnie zwiększająca napięcie na drugim tyrystorze. W ten sposób dławik sprzężony balansuje rozkład napięć na tyrystorach i powoduje równe obciążenie prądem.



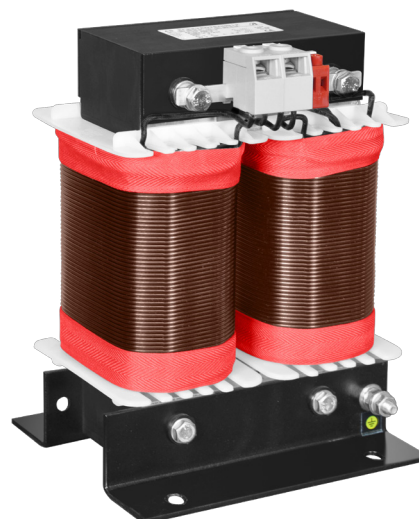
Rys. 2. Dławik wyrównawczy, sprzężony w obwodzie równoległych tyrystorów [2].

Proces przechodzenia w stan przewodzenia tyrystorów przebiega stopniowo. Zbyt szybkie narastanie wartości prądu przewodzenia tyrystora może doprowadzić do termicznego uszkodzenia. Powodem tego zagrożenia jest skończona prędkość powiększania się powierzchni złącza biorącego udział w przewodzeniu. Zastosowanie dławika nasyceniowego pozwala ograniczyć prędkość narastania prądu do wartości, co najmniej równej prędkości powiększania się powierzchni przewodzącego złącza. Charakterystyka dławika kształtowana jest w taki sposób by po wprowadzeniu opóźnienia narastania prądu ulegał nasyceniu. Dławik w tym układzie pełni funkcję zabezpieczenia tyrystora [3].

Konstrukcja i parametry dławików sterowników impulsowych

Przekształtniki bezpośrednie prądu stałego – łączniki i przerywacze (ang. „choppers”) wykorzystywane są do regulacji wartości średniej napięcia. Efekt regulacji napięcia uzyskuje się sterując czasem przewodzenia tyrystora przy stałym okresie przebiegu lub zmieniając częstotliwość łączeń przy stałym czasie przewodzenia. Regulacja taka stosowana jest między innymi w napędach prądu stałego. Pulsacje prądu na wyjściu przerywacza zmniejsza się stosując filtr indukcyjny lub indukcyjno-pojemnościowy. Układy takie pracują przy stosunkowo dużej częstotliwości łączeń, co jest korzystne dla napędu, lecz znacznie pogarsza warunki pracy elementów indukcyjnych w filtrze.

Dławiki pracujące w filtrach wyjściowych przerywaczy prądu stałego są elementami narażonymi na oddziaływanie składowej wysokoczęstotliwościowej prądu. Składowa stała prądu wyjściowego powoduje podmagnesowanie rdzenia, natomiast składowa zmienna o wysokiej częstotliwości jest głównym źródłem strat w rdzeniu oraz uzwojeniu dławika. Straty w elementach indukcyjnych bardzo silnie zależą od częstotliwości składowej zmiennej prądu oraz od jej amplitudy definiowanej w amperach wartości międzyszczytowej (Ap-p). W uzwojeniu dławika, w którym płynie prąd o stosunkowo



Rys. 3. Jednofazowy dławik „choppera” typu 2RTF

wysokiej częstotliwości występuje efekt naskórkowości (ang. *Skin effect*) oraz efekt zbliżenia (ang. *Proximity effect*). Zjawiska te często decydują o wartości strat w uzwojeniu dławika. Efekt naskórkowości wywołuje przepływ prądu jedynie w warstwie powierzchniowej przewodów, a grubość warstwy przewodzącej maleje ze wzrostem częstotliwości. Ograniczenie zjawiska naskórkowości realizuje się stosując uzwojenia nawijane wiązką równoległych, izolowanych przewodów lub cienkich blach. Przekrój pojedynczego przewodu lub grubość blachy w wiązce definiowany jest w zależności od głębokości wnikania prądu na powierzchni przewodu. Głębokość wnikania prądu (1) zależy od częstotliwości (f), przenikalności magnetycznej (μ , $\mu_0\mu_r$) oraz konduktywności (σ) przewodnika [4].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

Na straty w rdzeniu magnetycznym dławika składają się podstawowe straty histerezy i wiropądowe oraz dodatkowe straty odszczelinowe związane ze strumieniem rozproszenia, występujące silnie w miejscach nieciągłości rdzenia. Ograniczenie strat wiropądowych poprzez pakietowanie rdzenia z cienkich, izolowanych blach transformatorowych lub stosowanie nowoczesnych, niskostratnych amorficznych i nanokrystalicznych magnetyków w przypadku dławików nie wystarcza [Tabela 1]. W obszarach przyszczelinowych występuje zmiana kierunku przebiegu strumienia, który generuje dodatkowe straty wiropądowe w materiale rdzenia, uzwojeniu oraz w przewodzących elementach konstrukcyjnych.

Technologia produkcji rdzeni CoreECO™

Straty mocy w dławikach energoelektronicznych zależą silnie od amplitud i częstotliwości składowych prądu dławika. Wielkość strat mocy w dławikach równie silnie determinowana jest konstrukcją rdzenia i uzwojenia. Brak ciągłości rdzenia w dławiku jest powodem występowania przyszczelinowego magnetycznego strumienia rozproszenia. Strumień ten wy-

Własności materiału	Stop amorficzny	Blacha transformatorowa
		METGLAS 2605SA1
Grubość blach	25 μm	270 μm
Indukcja nasycenia	1,56 T	1,77 T
Stratność	$p=6,5*f^{1,51}*B^{1,74}$ [W/kg]	$p=1,4[W/kg]_{1,7T,50Hz}$
Rezystywność	137 μΩ cm	48 μΩ cm
Magnetostrykcja	$27*10^{-6}$	$\sim 1*10^{-6}$
Temperatura Curie	415 °C	746 °C

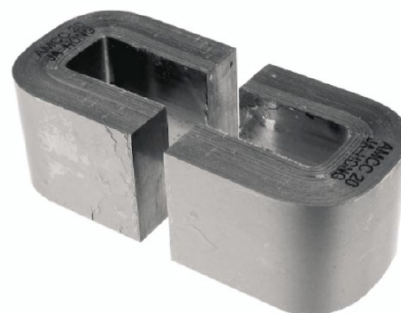
Tabela 1. Parametry materiałów magnetycznych stosowanych w produkcji dławików dla energoelektroniki

wołuje dodatkowe straty wiropądowe i histerezy w elementach konstrukcyjnych dławika i uzwojeniu. Zasięg oddziaływania przyszczelinowego strumienia rozproszenia zależy głównie od szerokości zastosowanych w rdzeniu szczelin powietrznych [5]. W przypadku szerokich szczelin w rdzeniu może dochodzić do magnetycznego sprzężenia strumienia rozproszenia z ferromagnetycznymi konstrukcjami znajdującymi się w bezpośrednim otoczeniu dławika. Tego typu indukcyjne straty generowane w pobliskich ferromagnetycznych elementach będą powodowały wzrost prądu obciążenia dławika.

Typowa konstrukcja rdzenia dławikowego zakłada wprowadzenie w obwód magnetyczny kilku szczelin powietrznych. Rdzeń najczęściej wykonany jest z ciętych elementów niskostratnej blachy transformatorowej o możliwie niewielkiej grubości blachy w kierunku przebiegu strumienia. Pozwala to ograniczyć straty histerezy i wiropądowe.

W przypadku dławików energoelektronicznych większych mocy, dławików filtrów harmonicznych, gdzie ważnym parametrem technicznym jest liniowość charakterystyki magnetycznej $L(I)$, konstrukcja rdzenia zakłada istnienie szerokich szczelin powietrznych pozwalających kształtować charakterystykę dławika. Poszczególne fragmenty materiału magnetycznego rdzenia pracują w różnych warunkach. Jest to spowodowane nierównomiernym rozkładem indukcji w rdzeniu oraz zaburzonym kierunkiem przebiegu strumienia. W rdzeniach budowanych z blach transformatorowych anizotropowych zależy nam na kształtowaniu przebiegu strumienia magnetycznego w kierunku równoległym do kierunku walcowania (najlepsze własności blachy), co pozwala osiągnąć najmniejsze straty histerezy. Nowoczesne materiały o strukturze amorficznej czy nanokrystalicznej stosowane w dławikach dla energoelektroniki (Rys.3) są przeważnie izotropowe i zmiana kierunku przebiegu strumienia nie będzie powodowała wzrostu strat histerezy. Zaburzenia kierunku strumienia w rdzeniu będą jednak silnie wpływać na wzrost strat o podłożu wiropądowym w rdzeniach zwinianych z cienkich taśm amorficznych lub rdzeniach pakietowanych z blach krystalicznych, bez względu na grubość zastosowanej blachy.

W obszarach przyszczelinowych występuje niekorzystne zakrzywienie kierunku przebiegu strumienia w rdzeniu, który przenikając niemal prostopadle, szerokie blachy generuje intensywne dodatkowe straty wiropądowe w materiale rdzenia.



Rys. 4. Jednoszczelinowy, dwukolumnowy rdzeń z materiału amorficznego.

Technologia produkcji rdzeni CoreECO™ ogranicza bezpośrednio straty w rdzeniu dławika, uzwojeniu i elementach konstrukcyjnych [5]. Rozwiązanie to zakłada stosowanie wielu bardzo wąskich szczelin powietrznych, co znacznie ogranicza zasięg oddziaływania strumienia rozproszenia.

Pole akustyczne wokół dławika jest również ważnym parametrem technicznym i środowiskowym. Powodem występowania hałasu są powstające podczas przemagnesowywania rdzenia siły magnetyczne i magnetostrykcyjne. Wielkość tych sił zależy od maksymalnych, lokalnych wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu. Działające siły wywołują zmienne naprężenia w blachach rdzenia, co skutkuje drganiami elementów konstrukcji i polem akustycznym wokół dławika.

Poszczególne bloki rdzenia w technologii CoreECO™ klejone są mieszkami epoksydowymi, co w znacznym stopniu redukuje drgania akustyczne rdzenia.

Firma TRAFECO Sp. J. produkuje oprócz, wysokiej jakości dławików dla energoelektroniki również nietypowe elementy indukcyjne zaprojektowane według indywidualnych specyfikacji, dedykowane do pracy w specjalnych, nietypowych warunkach eksploatacji.

Mirosław Łukiewski
m.lukiewski@trafeco.pl
TRAFECO Sp. J.
www.trafeco.pl

Literatura

- [1] Łukiewski M., Indukcyjny filtr prostowniczy, Napędy i Sterowanie 7-8/2009
- [2] Łastowiecki J. Elementy magnetyczne w układach napędowych, WNT W-wa 1982
- [3] Łukiewski M., Dławiki wyrównawcze i nasyceniowe, Napędy i Sterowanie 04/2009
- [4] Kazimierzczuk M.K., High-frequency magnetic components, 2009 A John Wiley and Sons, Ltd.
- [5] Łukiewski M., Łukiewska A., Pawlaczek L., Wieloszczelinowe rdzenie w dławikach filtrów sinusoidalnych; ME-ZP Nr2/2017 (114), KOMEL 2017