

Mirosław Łukiewski, FLUXCOM JEE, Koszęcin
 Agnieszka Łukiewska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa
 Leszek Pawlaczyk, Politechnika Wroclawska, Wrocław

WIELOSZCZELINOWE RDZENIE W DŁAWIKACH FILTRÓW SINUSOIDALNYCH

MULTI-GAP CORES IN CHOKES APPLIED IN SINE-WAVE FILTERS

Streszczenie: W artykule omówiono wybrane zagadnienia związane z budową dławików rdzeniowych stosowanych w filtrach sinusoidalnych układów napędowych. Przedstawiono porównanie wyników badań oraz symulacji wpływu konstrukcji rdzenia wieloszczelinowego na straty dławika i pole akustyczne wokół filtru. Badania przeprowadzono dla filtru sinusoidalnego typu FluxSIN. Parametry symulacyjne wyznaczono wykorzystując oprogramowanie projektowe firmy RALE Engineering GmbH.

Abstract: Selected issues related to the construction of the core chokes applied in sine wave filters were described in this paper. Comparison of test results and simulations of the impact of multi-gap core construction on the losses and acoustic field around the filter were presented. The tests were performed for the sine wave FluxSIN type filter. Simulation parameters were calculated with the help of the design software by RALE Engineering GmbH.

Słowa kluczowe: filtry sinusoidalne, dławiki rdzeniowe, rdzenie wieloszczelinowe
Keywords: sine wave filters, core reactors, multi-gap cores

1. Wstęp

Zasilanie układów napędowych za pomocą przekształtników z modulacją impulsów wyjściowych PWM (*Pulse Width Modulation*) przy dużych częstotliwościach kluczenia oraz dużych stromościach impulsów napięcia du/dt jest przyczyną występowania szeregu zjawisk pasożytniczych w silnikach. Napięcia i prądy łożyskowe, prądy doziemne i ekranowe, przepięcia na zaciskach silnika, wzrost strat i hałasu są zjawiskami, które wpływają na obniżenie trwałości oraz efektywności pracy silnika [1, 2, 3]. Impedancja kablowej linii zasilającej maleje wraz ze wzrostem częstotliwości impulsów napięcia zasilającego i długości kabla. Potęguje to przepływ prądów przez pojemności układu izolacyjnego kabla i silnika, co prowadzi do przeciążenia przekształtnika [4]. W celu ograniczenia niebezpiecznego oddziaływania odkształconego napięcia na silnik i linię kablową stosuje się na wyjściu przekształtnika dławiki silnikowe, dławiki du/dt (L) lub filtry sinusoidalne (LC). Dławiki wyjściowe ograniczają wartości prądów pojemnościowych płynących przez pojemności kabla oraz łagodzą stromość narastania impulsów napięcia du/dt , co zabezpiecza układ izolacyjny silnika i kabla. Filtry sinusoidalne oprócz skutecznego ograniczenia

stromości du/dt eliminują również napięcia refleksyjne na silniku [5]. W elementach indukcyjnych lub filtrach pracujących na wyjściu przemiennika powstają podobnie jak w silniku straty dodatkowe. Straty te są trudne do wyliczenia na etapie projektowania. Powodem trudności jest występowanie strumienia rozproszenia wokół szczelin powietrznych występujących w rdzeniu [6, 7, 8].



Rys. 1. Wieloszczelinowy rdzeń dławika filtru

Prostym rozwiązaniem technologicznym ograniczającym straty w rdzeniu jest zastosowanie materiału magnetycznego o wąskiej pętli histerezy oraz pakietowanie rdzenia z izolowanych blach o możliwie małej grubości w kierunku przebiegu strumienia. Zabiegi te dają oczekiwane efekty w przypadku transformatorów gdzie zachowana jest ciągłość rdzenia. W rdzeniach dużych dławików, gdzie mamy do czynienia z nieciągłością rdzenia w miejscach poprzecznych szczelin powietrznych, pakietowanie i niskostratny materiał magnetyczny nie rozwiązuje problemu nadmiernych strat dodatkowych. W obszarach przyszczelinowych następuje zmiana kierunku przebiegu strumienia oraz wydostawanie się strumienia rozproszenia w przestrzeń poza rdzeniem. Powoduje to powstawanie dodatkowych strat o podłożu wiroprądowym w rdzeniu, uzwojeniu i elementach konstrukcyjnych znajdujących się w zasięgu strumienia rozproszenia.

W dławikach filtrów stanowiących część układu rezonansowego ważnym parametrem użytkowym jest wydłużona liniowość charakterystyki magnetycznej dławika. Uzyskanie wymaganej liniowości charakterystyki wymusza zastosowanie szerokich szczelin powietrznych w rdzeniu. W efekcie zwiększa się strumień rozproszenia wokół szczelin i zasięg jego oddziaływania [9].

Technologia produkcji wieloszczelinowych rdzeni, dzięki precyzyjnemu klejeniu poszczególnych segmentów rdzenia, umożliwia wprowadzenie na wysokości kolumny dużej liczby (kilkunastu – kilkudziesięciu) bardzo wąskich szczelin powietrznych [10]. Ograniczeniu w ten sposób ulega strumień rozproszenia wokół szczelin, a tym samym straty dodatkowe w obszarach przyszczelinowych rdzenia, uzwojeniu i elementach konstrukcyjnych dławika. Konstrukcja wieloszczelinowego rdzenia klejonego pozwala uniknąć otworowania rdzenia w obszarze uzwojonej kolumny, co nie zaburza dodatkowo drogi przebiegu strumienia w rdzeniu.

2. Badany filtr sinusoidalny

Testowano filtr sinusoidalny typu FluxSIN przeznaczony do pracy na wyjściu falownika o mocy znamionowej 45kW i poziomie napięcia 400V, 50Hz. Badany filtr jest układem rezonansowym o strukturze LC. Dławik filtru zbudowany jest na rdzeniu wieloszczelinowym wykonanym z klasycznej blachy transformatorowej typu ET150 o grubości 0,3 mm.

Konstrukcja rdzenia w trakcie badań podlegała modyfikacji – zmieniano ilość i szerokość szczelin powietrznych w rdzeniu. Uzwojenia dławika wykonano w postaci cewki warstwowej z czołowym kanałem chłodzącym, przewodami profilowymi o łącznym przekroju 37,5 mm². Klasa temperaturowa zastosowanych materiałów izolacyjnych i konstrukcyjnych pozwala na pracę filtru w temperaturze maksymalnej 155°C. W uzwojeniu umieszczony jest bimetaliczny łącznik temperaturowy (AO3-NC155) sygnalizujący przekroczenie maksymalnej dopuszczalnej temperatury pracy urządzenia.

Tabela 1. Parametry katalogowe badanego filtru sinusoidalnego

FluxSIN-45/85	
Moc falownika	45kW
Napięcie znamionowe	400V
Prąd znamionowy	85A
Częstotliwość	50Hz
Częstotliwość kluczowania	4-16kHz
Spadek napięcia	10%
THDu % wyjściowe	< 5%
du/dt wyjściowe	< 50 V/μs

Układ izolacyjny filtru zaprojektowany jest do pracy przy zasilaniu napięciem odkształconym z modulacją PWM o dużej szybkości narastania impulsów du/dt. Przeprowadzono próbę napięciową filtru napięciem doprowadzonym 3,5 kV testując izolację główną oraz próbę napięciem indukowanym badając izolację zwojową.

3. Symulacje obliczeniowe

Filtr sinusoidalny typu FluxSIN-45/85 zaprojektowany został przy użyciu programu do projektowania elementów indukcyjnych w oparciu o normę PN-EN60076-6 oraz przyjęte w praktyce projektowej założenia i algorytmy obliczeniowe [11, 12, 13, 14]. Wykonano szereg symulacji obliczeniowych dla konstrukcji rdzenia z różną ilością szczelin przypadających na kolumnę. W symulacjach wykorzystano model strat i model temperaturowy zastosowany w programie RALE. Założeniem wspólnym były w każdym przypadku takie same warunki zasilania. Otrzymane wyniki przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Symulacyjne wyniki strat jałowych dla filtru sinusoidalnego typu FluxSIN-45/85, częstotliwość klucowania 4kHz.

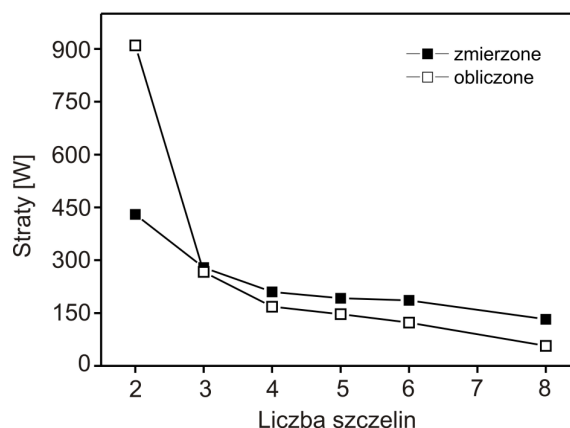
Ilość szczelin	Szerokość szczeliny	Straty w rdzeniu	ΔT rdzenia
2	3,40 mm	910 W	211 K
3	2,26 mm	267 W	103 K
4	1,70 mm	168 W	83 K
5	1,36 mm	147 W	77 K
6	1,14 mm	123 W	72 K
8	0,85 mm	57 W	55 K

4. Układ pomiarowy

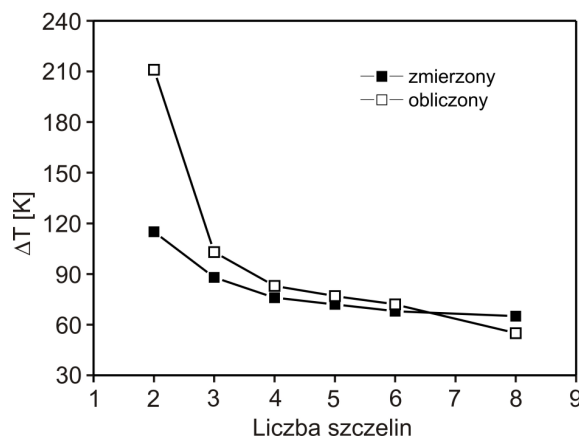
Układ pomiarowy składał się z trójfazowego falownika wektorowego typu MFC-710 o mocy znamionowej 11 kW zasilającego filtr sinusoidalny pracujący w stanie jałowym. Filtr zbudowany był w oparciu o trójfazowy dławik oraz trzy jednofazowe kondensatory połączone w trójkąt przyłączone do końców uzwojeń dławika. Pomiar mocy wykonano przy użyciu analizatora jakości energii typu PQ-BOX 100. Przyrząd dokonuje pomiaru napięć i prądów w obwodzie trójfazowym w klasie dokładności „A” zdefiniowaną w normie PN-EN 61000-4-30. Do wyznaczenia poziomu dźwięku użyto sonometru UT-352 o klasie dokładności 1,5. Pomiar ciśnienia akustycznego wykonano zgodnie z metodologią zdefiniowaną w normie PN-EN 60076-10. Temperaturę mierzono przy zastosowaniu dwukanałowego cyfrowego miernika temperatury typu UT-325. Sondy do pomiaru temperatury to termopary typu K. Dokładność pomiaru temperatury mieści się w granicach $\pm(0,2\%+0,6)$.

5. Wyniki badań

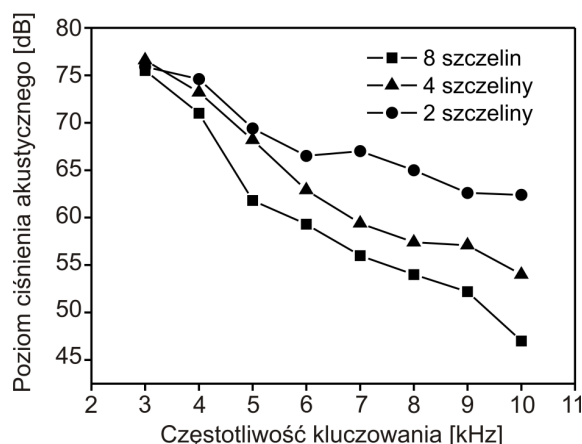
Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 2 należy stwierdzić, iż straty w rdzeniu dławika zwiększają się w miarę wzrostu szerokości szczelin powietrznych w rdzeniu. Poziom strat w rdzeniu przekłada się bezpośrednio na wyliczone wartości przyrostów temperatury rdzenia. Podobne wyniki uzyskano w trakcie pomiarów strat i przyrostu temperatury w badanym dławiku (Rys. 2 i 3). Jak widać z Rys. 2 największe rozbieżności pomiędzy wynikami symulacyjnymi, a pomiarowymi występują dla układu z dwoma szerokimi szczelinami powietrznymi w rdzeniu.



Rys. 2. Obliczeniowe i pomiarowe straty w rdzeniu dla różnej szerokości i ilości szczelin w rdzeniu, częstotliwość klucowania 4kHz



Rys. 3. Przyrost temperatury rdzenia dla różnej szerokości i ilości szczelin w rdzeniu, częstotliwość klucowania 4kHz



Rys. 4. Poziom ciśnienia akustycznego dla 2, 4 i 8 szczelin w rdzeniu, częstotliwość klucowania w zakresie 4-10 kHz

Na Rys. 4 przedstawiono zależność poziomu ciśnienia akustycznego od częstotliwości klucowania falownika dla trzech konfiguracji

rdzenia. Dla każdego układu zaobserwowano obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego ze wzrostem częstotliwości kluczenia. Dla niskich częstotliwości kluczenia poziom ciśnienia akustycznego słabo zależy od szerokości szczelin w rdzeniu. Najniższy poziom ciśnienia akustycznego uzyskano w przypadku rdzenia z 8 wąskimi szczelinami.

6. Wnioski

Zastosowanie konstrukcji rdzenia z ilością szczelin powyżej 4, gdzie szerokość szczeliny stanowi 3,4% szerokości kolumny, nie wpływa znacząco na zmniejszenie strat i przyrost temperatury rdzenia. Duża liczba wąskich szczelin w rdzeniu powoduje ograniczenie pola akustycznego wokół dławika.

7. Literatura

- [1]. P. Zientek, "Wpływ parametrów wyjściowych falowników PWM i kabla zasilającego na zjawiska pasożytnicze w silnikach indukcyjnych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 71, str. 119 - 124, 2005.
- [2]. J. Bamberski, "Efektywność silnika elektrycznego zasilanego z przemiennika częstotliwości", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 78, str. 129 - 134, 2007
- [3]. P. Zientek, R. Niestrój, "Metody eliminacji prądów łożyskowych i prądu uziomu w układach napędowych zasilanych z falowników PWM", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 82, str. 193 - 202, 2009
- [4]. M. Trajdos, R. Pastuszka, I. Sosnowski, "Znaczenie pojemności kabla w układach zasilających silniki indukcyjne za pośrednictwem przekształtników częstotliwości", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 74, str. 97 - 101, 2006
- [5]. A. Pozowski, H. Krawiec, "Wpływ filtrów wyjściowych napięciowych falowników częstotliwości na pracę silników indukcyjnych klatkowych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 85, str. 111 - 115, 2010
- [6]. D. M. Ionel, M. Popescu, C. Cossar, M. I. McGilp, A. Boglietti, A. Cavagnino, "A General Model for Estimating the Laminated Steel Losses under PWM Voltage Supply", *IEEE Transactions on Industry Applications*, VOL.46, 07-08.2010
- [7]. A. Van den Bossche, V.C. Valchev, "Improved calculation of winding losses in gapped inductors", *Journal of Applied Physics*, 97, 10Q703, 2005
- [8]. X. Mao, W. Chen, Y. Li, "Winding Loss Mechanism Analysis and Design for New Structure High-Frequency Gapped Inductor", *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL41, NO10, 10.2005
- [9]. J. Czornik, M. Łukiewski, "Filtry harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2 str. 106-114 2015
- [10]. C. Świeboda, P. Pinkosz, M. Kwiecień, M. Soiński, M. Łukiewski, J. Leszczyński, R. Pytlech, "Measurement of magnetic features of nanocrystalline stacked and block cores", 12th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, 3-6.09.2012, Vienna.
- [11]. D. Maiti, S.K. Biswas, "A Simple and Generalized Design Procedure for Inductors in Power Electronics", 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, December 16-19, 2012, Bengaluru, India.
- [12]. U. Reggiani, G. Grandi, G. Sancineto, M.K. Kazimierzczak, A. Massarini, "High-Frequency Behavior of Laminated Iron-Core Inductors for Filtering Applications", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2000*, 6-10 Feb.2000, 2012, Bengaluru, India.
- [13]. K.H. Ahmed, S.J. Finney, B.W Williams, "Passive Filter Design for Three-Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation", *Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XIII*, No.2, 2007
- [14]. R. Hadzimanovic, "Design Motor Filter Chokes with Rale Design Sytem", www.rale.ch

Autorzy

mgr inż. Mirosław Łukiewski
FLUXCOM Jakość Energii Elektrycznej,
mlukiewski@fluxcom.pl

dr Agnieszka Łukiewska
Politechnika Częstochowska, Instytut Fizyki
aluk@wip.pcz.pl

dr hab. inż. Leszek Pawlaczyk
Politechnika Wroclawska,
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów
Elektrycznych
leszek.pawlaczyk@pwr.edu.pl