

Elementy indukcyjne i transformatory chłodzone wodą

Mirosław Łukiewski, Agnieszka Łukiewska

1. Wstęp

Transformatory i dławiki rdzeniowe są ważnymi elementami układów energoelektroniki. Przetwarzanie energii elektrycznej odbywa się przy wysokich częstotliwościach łącznie z jednoczesnym dążeniem do wysokiej sprawności procesu.

Jest to bezpośrednią przyczyną szybkiego rozwoju technologicznego elementów indukcyjnych przeznaczonych do pracy przy wysokich częstotliwościach lub w obwodach o dużych amplitudach wyższych harmonicznych prądu.

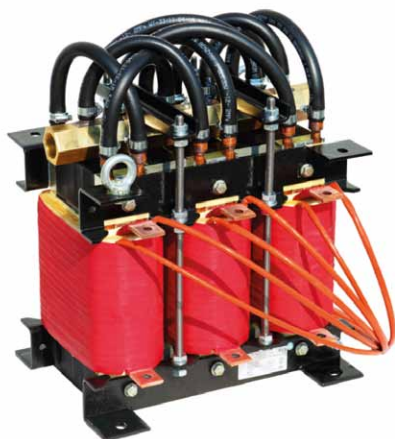
Dławiki do takich zastosowań budowane są w oparciu o wieloszczelinową technologię konstrukcji rdzenia typu CoreECO™ oraz niskostratne materiały magnetyczne nanokrystaliczne, proszkowe lub ferrytowe.

W aplikacjach energoelektronicznych występuje stałe sprzężenie pomiędzy wymaganiami mechanicznymi i elektrycznymi, gdzie oprócz możliwie niskich strat i dużej liniowości magnetycznej oczekuje się minimalnych wymiarów oraz masy dławików i transformatorów.

Pomocne przy osiągnięciu tak postawionych celów jest zastosowanie odpowiedniego systemu wspomagania procesu chłodzenia. W wielu aplikacjach do chłodzenia modułów energoelektronicznych stosowana jest woda w systemie otwartym lub zamkniętym z wymiennikiem ciepła. Pozwala to na wykorzystanie istniejącego obiegu wody do chłodzenia dławików lub transformatorów. W dławikach rdzeniowych pracujących często na potencjale kilku kilowoltów z uwagi na bezpieczeństwo izolacyjne stosuje się pośrednie chłodzenie wodne, w którym elementy systemu chłodzenia są w odpowiedni sposób izolowane.

W systemach chłodzenia pośredniego występują dodatkowe elementy – chłodnice, które ściśle przylegają do powierzchni rdzenia lub uzwojeń chłodzonego transformatora lub dławika.

Rys. 1. Dławik filtru LC z pośrednim chłodzeniem wodnym z zastosowanymi chłodnicami panelowymi



Streszczenie: W artykule omówiono wybrane zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne stosowane w produkcji elementów indukcyjnych i transformatorów z chłodzeniem wodnym. Przedstawiono wyniki symulacji wpływu rodzaju materiału magnetycznego rdzenia na wymiary dławika filtru sinusoidalnego typu SinECO™ pracującego przy częstotliwości sieciowej oraz dla transformatora mocy typu 1TTFW pracującego przy częstotliwości 10 kHz. Przedstawiono również konstrukcję dławika z odczepami typu 1RTFW przeznaczonego do pracy z częstotliwością 25 kHz. Parametry obliczeniowe wyznaczono, wykorzystując oprogramowanie projektowe firmy RALE Engineering GmbH.

Słowa kluczowe: transformatory, dławiki, chłodzenie wodne, panele chłodzące, chłodnice rurowe, rdzenie proszkowe, materiały amorficzne i nanokrystaliczne

Abstract: In this article selected issues related to the construction and technology of the water cooling transformers and induction elements were discussed. The impact of the magnetic core material type on the size of the SinECOTM type choke working with 50 Hz frequency and 1TTFW type power transformer working with 10 kHz frequency was simulated. Moreover, the construction of the 1RTFW type choke working with 25 kHz frequency was introduced. The parameters were simulated using design software by RALE Engineering GmbH.

Keywords: transformers, chokes, water cooling, cooling panels, tubular coolers, powder cores, amorphous and nanocrystalline material

2. Budowa i materiał rdzenia

Ze względu na różnorodne zastosowania i związane z tym specyficzne warunki pracy oraz wymogi gabarytowe transformatorów i dławików podczas ich projektowania konieczna jest niejednokrotnie modyfikacja budowy i materiału rdzenia. Ważnymi parametrami materiałów magnetycznych decydującymi o ich przeznaczeniu na rdzenie są: jak najmniejsza stratność, wysoka indukcja magnetyczna nasycenia, duża przenikalność magnetyczna i niewielka magnetostrykcja. Wśród materiałów magnetycznych wykorzystywanych na rdzenie dławików i transformatorów najczęściej stosowane są ferryty, niskostratne blachy prądnicowe i transformatorowe, a coraz częściej także stopy amorficzne i nanokrystaliczne w postaci cienkich taśm lub rdzenie proszkowe.

Tabela 1. Podstawowe właściwości materiału krystalicznego i materiału amorficznego [1]

Materiał magnetyczny	STALPRODUKT ET-150-30	HITACHI 2605 SA1
Skład	Fe ~3,2%Si	Fe Si B
Grubość blachy	300 [μm]	~ 25 [μm]
Indukcja nasycenia	1,84 [T]	1,56 [T]
Rezystywność	0,48 [$\mu\Omega\text{m}$]	13,7 [$\mu\Omega\text{m}$]
Stratność 10/400	7,9 [W/kg]	1,5 [W/kg]
Magnetostrykcja [λ 10/400 x 10^{-6}]	-0,8	~27

W kontekście zastosowań istotne jest dość łatwe kształtowanie pożądanych właściwości rdzeni poprzez modyfikację składu chemicznego, budowy krystalicznej, odpowiednią obróbkę plastyczną i termomagnetyczną materiałów magnetycznych użytych na rdzenie.

Ciągły rozwój technologii produkcji materiałów prowadzi do polepszania właściwości konwencjonalnych materiałów, szczególnie blach transformatorowych oraz do uzyskania materiałów amorficznych, a następnie nanokrystalicznych o bardzo dobrych tzw. miękkich właściwościach magnetycznych. Materiały te posiadają dużą wartość przenikalności magnetycznej rzędu 10^6 , indukcję nasycenia (w zależności od składu

Tabela 2. Podstawowe własności magnetyków proszkowego i nanokrystalicznego [1]

Materiał magnetyczny	HKR PA2	IMN-GLIWICE FINEMET
Skład	Fe	Fe Cu Nb Si B
Grubość blachy	proszek	~ 25 [μm]
Indukcja nasycenia	1,65 [T]	1,24 [T]
Rezystywność	- [$\mu\Omega\text{m}$]	11,5 [$\mu\Omega\text{m}$]
Stratność 0,1/1 kHz	32 [$\mu\text{Ws}/\text{cm}^3$]	- [W/kg]
Magnetostrykcja [λ 10/400 x 10^{-6}]	-	0,1

chemicznego stopu) w granicach 1,2–1,9 T, bliską zera magnetostrykcję (λ_s rzędu 10^{-6}), małe pole koercji ($H_C < 1\text{A}/\text{m}$) oraz straty w rdzeniu rzędu 0,1 W/kg (przy 50 Hz) [2].

Ważną grupą materiałów magnetycznych są kompozyty proszkowe. Występuje wiele kombinacji składu kompozytów, począwszy od proszków żelaza, do sproszkowanych materiałów amorficznych i nanokrystalicznych. Kompozytowa struktura rdzenia proszkowego w zależności od rozdrobnienia magnetyka oraz składu chemicznego pozwala osiągnąć niskie straty wiropądowe i histerezy w rdzeniach o złożonych kształtach składanych z modułów [3]. Poważną wadą rdzeni z materiałów proszkowych jest ich niska przenikalność magnetyczna,



Rys. 2.
Wieloszczelinowy rdzeń trójfazowego dławika wykonany z blach transformatorowych typu ET-140. Producent TRAFECO



Rys. 3.
Wieloszczelinowy rdzeń jednofazowego dławika wykonany z taśm materiału nanokrystalicznego FINEMET. Producent IMN GLIWICE



Rys. 4.
Kubekowy rdzeń jednofazowego dławika wykonany z materiału proszkowego na bazie żelaza. Producent HKR

co prowadzi do rozpraszania strumienia w kierunku bliskich konstrukcji ferromagnetycznych i może wpływać na wartość indukcyjności dławików.

3. Uzwojenia i system izolacyjny

Uzwojenia transformatorów i dławików pracujących przy wysokich częstotliwościach prądu wykonane są najczęściej z miedzianych przewodów typu lica lub plecionka. W przypadku urządzeń przewodzących duże prądy uzwojenia buduje się z kilku równoległych nawijanych cienkich taśm miedzianych lub aluminiowych. Uzwojenia transformatorów lub dławików z pośrednim systemem chłodzenia wodnego projektowane są z odpowiednimi kanałami lub przestrzeniami, w których podczas nawijania umieszczane są chłodnice panelowe lub rurowe. Głównym założeniem chłodzenia pośredniego jest praca elementów systemu chłodzenia oraz czynnika chłodzącego na potencjale uziemienia. Założenie to wymusza zastosowanie

odpowiedniej izolacji głównej pomiędzy chłodnicami i uzwojeniami dławika. Dobór grubości i typu zastosowanej izolacji powinien zostać dokonany precyzyjnie bez zbędnych zapasów. Izolacja główna pomiędzy uzwojeniem i chłodnicami panelowymi lub rurowymi jest podstawą systemu izolacyjnego dławika i jest zależna od potencjału, na którym pracuje uzwojenie. Izolacja ta stanowi jednocześnie barierę termiczną utrudniającą przepływ strumienia ciepła do chłodnicy. W celu ograniczenia oporu przejścia uzwojenie powinno przylegać do chłodnicy możliwie największą powierzchnią bez zbędnych szczelin powietrznych. Izolacja zwojowa uzwojeń wykonanych licą jest nawijana bezpośrednio na przewodzie z odpowiednią zakładką. W uzwojeniach nawijanych blachą izolacja zwojowa znajduje się między blachami uzwojenia. Parametrem decydującym o sprawności odprowadzania ciepła z uzwojeń jest opór termiczny pomiędzy chłodnicą i uzwojeniem. W transformatorach i dławikach chłodzonych wodą najczęściej stosuje się izolacje o dużym współczynniku przewodzenia ciepła typu NOMEX lub KAPTON. Uzwojenia dławików poddaje się procesowi impregnacji zanurzeniowej lub próżniowej. W trakcie impregnacji wszelkie wolne objętości powietrzne, które pozostały w uzwojeniach, zostaną wypełnione żywicą impregnacijną, co dodatkowo zwiększa sprawność odprowadzania ciepła.

4. Chłodzenie i konstrukcja transformatorów i dławików

Chłodzenie elementów indukcyjnych i transformatorów w powietrzu odbywa się głównie poprzez zjawisko konwekcji. Systemy chłodzenia wodnego pośredniego lub bezpośredniego w procesie chłodzenia wykorzystują dodatkowo przewodnictwo cieplne. Skuteczność chłodzenia jest wówczas znacznie wyższa i pozwala odprowadzić część strat dławika lub transformatora poza obudowę urządzenia [4].

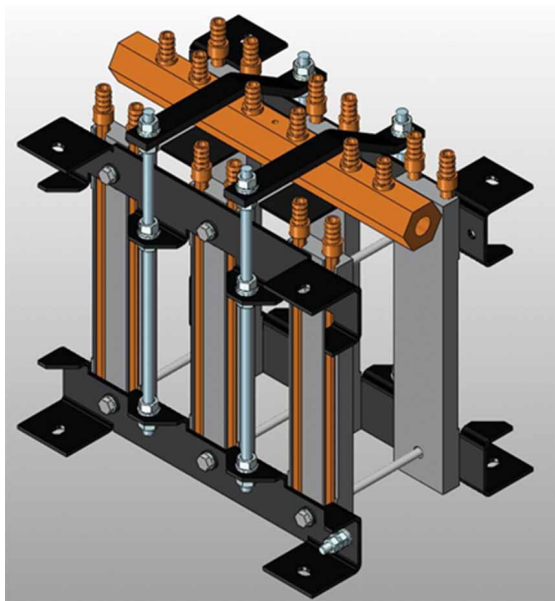
Bezpośrednie chłodzenie uzwojeń czynnikiem chłodzącym jest najskuteczniejszą metodą odprowadzania strat z uzwojeń. Czynnikiem chłodzącym jest najczęściej woda z uwagi na jej dostępność. Bezpośrednie chłodzenie realizuje się poprzez wykonanie uzwojeń transformatora/dławika rurami bądź innymi zamkniętymi profilami miedzianymi lub aluminiowymi, w których bezpośrednio płynie czynnik chłodzący. Uzwojenie jest wówczas jednocześnie chłodnicą. Oprócz optymalnego chłodzenia rozwiązanie to jest oszczędne.

W pośrednim chłodzeniu wodnym stosuje się rurowe lub panelowe chłodnice, które nie stanowią części uzwojeń lub rdzenia i tworzą odrębny system chłodzenia.

Kształt i konstrukcja chłodnic powinny umożliwiać dobry kontakt i możliwie największą powierzchnię przylegania pomiędzy chłodnicami a częściami transformatora lub dławika, w których powstają straty mocy. W obwodach wysokiej częstotliwości często rdzeń jest elementem o największych stratach. Chłodzenie rdzenia skutecznie realizowane jest przy zastosowaniu chłodnic panelowych (rys. 5). Chłodnice umieszczane są wewnątrz rdzenia w połowie grubości pakietu lub przylegają do powierzchni bocznych kolumn rdzenia, chłodząc jednocześnie rdzeń i uzwojenie (rys. 6). W celu zwiększenia efektywności przewodnictwa cieplnego pomiędzy panelami i rdzeniem często stosuje się pasty lub taśmy z materiałów o bardzo wysokim



Rys. 5. Chłodnice panelowe dławika filtru LC z pośrednim chłodzeniem wodnym



Rys. 6. Elementy konstrukcyjne oraz system chłodnic panelowych z kolektorem w dławiku filtru LC z pośrednim chłodzeniem wodnym

współczynnika przewodnictwa cieplnego. Uzupełnieniem systemu chłodzenia są kolektory i rury rozprowadzające oraz wymuszające obieg czynnika chłodzącego (rys. 6).

Chłodnice rurowe w systemach chłodzenia pośredniego umieszczane są wewnątrz uzwojeń, między warstwami uzwojenia lub wokół dławika/transformatora jako chłodnica zewnętrzna (rys. 7–9).

5. Wyniki obliczeń

W artykule zaprezentowano konstrukcję jednofazowego dławika typu 1RTFW z odczepami (rys. 9). Do budowy dławika wykorzystano rdzenie proszkowe na bazie żelaza typu HKR. Uzwojenia dławika nawinięto przewodami typu lica. Zastosowano pośrednie chłodzenie wodne dławika. Uzwojenia i rdzeń dławika złożone są z trzech połączonych sekcji chłodzonych wspólną zewnętrzną chłodnicą rurową. Z uwagi na wysoką częstotliwość i duże natężenie prądu na rdzeń wybrano niskostratny materiał proszkowy typu PA2. Parametry dławika uzyskane w obliczeniach przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry jednofazowego dławika typu 1RTFW-0,05-0,12-0,16 mH / 300A 25 kHz z rdzeniem proszkowym z materiału typu PA2

1RTFW-0,16-0,12-0,05 mH 300 Adc 1 kV	
Indukcyjność	0,16-0,12-0,05 mH
Napięcie znam.	1000 Vdc
Prąd znam.	300 Adc
Częstotliwość	1,25-25 kHz
Klasa temp.	Ta40 H (Tmax = 180°C)
Chłodzenie	WF = 4 l/min
Straty	~ 2100 W
Masa	55,5 kg
Materiał rdzenia	HKR P2 (Fe)



Rys. 7. Chłodnica rurowa dławika odczepowego z pośrednim chłodzeniem wodnym



Rys. 8. Zamontowana wewnątrz obudowy chłodnica rurowa przylegająca do powierzchni rdzenia kulekowanego



Rys. 9. Jednofazowy dławik z odczepami typu 1RTFW-0,05-0,12-0,16 mH / 300 A 25 kHz z pośrednim chłodzeniem wodnym

Podczas prac rozwojowych nad konstrukcją dławików filtrów LC pracujących w szczelnych obudowach wykonano projekty porównawcze dla dławika trójfazowego typu 3RTNW (rys. 1). Dławik ten jest elementem, w którym zastosowano chłodzenie pośrednie wodne, używając sześciu chłodziń panelowych. Chłodziń, przylegając do rdzenia, chłodzą jednocześnie uzwojenia dławika (rys. 5, 6). Uzwojenia tego dławika nawinięto cienką blachą miedzianą.

Porównano otrzymane wyniki obliczeń dla dławika zaprojektowanego na rdzeniu z blachy transformatorowej ET-140 oraz z rdzeniem nanokrystalicznym. Przy zastosowaniu rdzenia

Tabela 4. Parametry techniczne trójfazowego dławika filtru LC z rdzeniem z blachy transformatorowej i materiału typu FINEMET

3RTNW-0,19 mH 390 A 1,2 kV 50 Hz WF		
Indukcyjność	0,19 mH	
Napięcie znam.	1200 V	
Prąd znam.	390 A	
Częstotliwość	50 Hz	
Klasa temp.	Ta40 H (Tmax = 180°C)	
Chłodzenie	WF = 4 l/min	
Straty	~960 W	~900 W
Masa	78,8 kg	62,5 kg
Materiał rdzenia	ET-140 FeSi3,2%	FINEMET FeSiBCu

Tabela 5. Parametry jednofazowego transformatora mocy z rdzeniem z materiału typu FINEMET i METGLAS

1TTFW-90 550//15 V 6 kA 10 kHz WF T40H		
Moc znam.	90 kVA	
Napięcie pierwotne	550 V	
Napięcie wtórne	15 V	
Prąd znam.	6000 A	
Częstotliwość	10 kHz	
Cykl pracy	S3	
Klasa temp.	Ta40 H (Tmax = 180°C)	
Chłodzenie	WF = 4 l/min	
Straty	~14,9 kW	~11,3 kW
Masa	~18,8 kg	~14,5 kg
Materiał rdzenia	METGLAS FeSiB	FINEMET FeSiBCu

z materiału FINEMET uzyskano ponad 20% obniżenie masy dławika oraz niższe straty. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 5 przedstawia wyniki obliczeń dla jednofazowego transformatora typu 1TTFW o mocy 90 kVA. Transformator pracuje w obwodzie zgrzewarki o prądzie chwilowym 6000 A i częstotliwości 10 kHz (rys. 11). W transformatorze zastosowano bezpośrednie chłodzenie wodne. Uzwojenia wykonano miedzianymi przewodami rurowymi połączonymi miedzianymi szynami, które pełnią też rolę kolektorów wodnych (rys. 10).

Obliczenia transformatora wykonano dla rdzenia nanokrystalicznego FINEMET oraz amorficznego METGLAS. Transformator z rdzeniem nanokrystalicznym ma masę niższą o ok. 23% i straty mniejsze o blisko 25%.

6. Wnioski

Zastosowanie chłodzenia wodnego oraz rdzeni z magnetycznych materiałów proszkowych pozwala zaprojektować elementy indukcyjne o zredukowanej masie i wymiarach oraz stabilnej indukcyjności w szerokim zakresie zmian częstotliwości.

Niskostratne rdzenie nanokrystaliczne mogą znaleźć zastosowanie w trudnych technicznie aplikacjach wysokoczęstotliwościowych, gdzie straty w rdzeniu są zbyt duże przy zastosowaniu tradycyjnych materiałów.



Rys. 10.
Rdzeń oraz elementy uzwojenia transformatora typu 1TTFW-95 550//15 V 10 kHz 6 kA S3 WF = 4 l/min



Rys. 11.
Jednofazowy transformator mocy typu 1TTFW-95 550//15 V 10kHz 6kA S3 WF = 4 l/min z wymuszonym bezpośrednim chłodzeniem wodnym

Kombinacje chłodnic panelowych i rurowych pozwalają wdrożyć system chłodzenia wodnego w każdym elemencie indukcyjnym i transformatorze.


Jedną z najskuteczniejszych metod odprowadzania ciepła z uzwojeń jest chłodzenie wodne bezpośrednie.

Literatura

- [1] SOIŃSKI M.: *Materiały magnetyczne w technice*. COSiW, SEP.
- [2] MCHENRY M.E., WILLARD M.A., LAUGHLIN D.E.: *Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets*. Progress in Materials Science, 44, 1999.
- [3] HaKRon, Technical data, HKR-2012.
- [4] KOSTOWSKI E. [RED.]: *Zbiór zadań z przepływu ciepła*. WPSi, Gliwice 2006.

Praca została zrealizowana w ramach projektu
TECHMATSTRATEG1/347200/11/NCBR/201

Artykuł był oryginalnie wysłany na XXIX Konferencję Naukowo-Techniczną „Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych” i opublikowany w: „Maszyny elektryczne – Zeszyty Problemowe”.

 mgr inż. Mirosław Łukiewski
TRAFECO Sp. j., e-mail: m.lukiewski@trafeco.pl
FLUXCOM JEE, e-mail: mlukiewski@fluxcom.pl;
dr Agnieszka Łukiewska
Politechnika Częstochowska, Instytut Fizyki, e-mail: aluk@wip.pcz.pl