

Mirosław Łukiewski\*, Agnieszka Łukiewska\*\*

\*TRAFECO Sp. J., Boronów, \*\*Politechnika Częstochowska, Częstochowa

## OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI TRANSFORMATORÓW W APLIKACJACH ELEKTROMOBILNYCH

### OPTIMIZATION OF TRANSFORMER CONSTRUCTIONS IN ELECTROMOBILE APPLICATIONS

**Streszczenie:** W artykule omówiono wybrane zagadnienia optymalizacyjne związane z budową transformatorów pracujących w przetwornicach pojazdów elektromobilnych. Porównano wyniki symulacji wpływu materiału magnetycznego rdzenia na straty i wymiary gabarytowe transformatora. Przedstawiono również optymalizację konstrukcji transformatora w celu zwiększenia skuteczności wymuszonego chłodzenia. Parametry symulowano wykorzystując oprogramowanie projektowe firmy RALE Engineering GmbH.

**Abstract:** In this article selected optimizing issues related to the construction of the transformers worked in static converters of electro-mobile vehicles were discussed. The simulation of the effect of core magnetic material on the losses and transformer sizes have been compared. Moreover, the increase of effected – cooling due to solution of transformer construction were performed. The parameters were simulated using design software by RALE Engineering GmbH

**Słowa kluczowe:** transformatory przetwornic statycznych, materiały amorficzne, materiały nanokrystaliczne  
**Keywords:** transformers static converters, amorphous materials, nanocrystalline materials

#### 1. Wymagania stawiane transformatorom kolejowym

Transformatory statycznych przetwornic pojazdów szynowych pracują w trudnych warunkach. Zasilanie z trakcji kolejowej w połączeniu z oczekiwaniem szczególnej niezawodności definiuje parametry i ostre wymagania dla systemu izolacyjnego transformatorów. Dodatkowymi obostrzeniami, które mają wpływ na przyjęte rozwiązania konstrukcyjne oraz zastosowane materiały są warunki klimatyczne i oddziaływania mechaniczne.

Norma techniczna PN-EN 60310 definiuje ogólne wymagania dla transformatorów i dławików stosowanych w taborze kolejowym. Z punktu widzenia transformatorów na szczególną uwagę zasługują wymagania normy PN-EN 50124-1 dotyczące koordynacji izolacji w/g klasy przepięciowej (OVx), która wyznacza przewidywane narażenia przepięciowe izolacji. Wprowadzone zostaje pojęcie strefy zabrudzeniowej (PDx), która ma wpływ na odstępy izolacyjne oraz stosowane rozwiązania technologiczne. Norma PN-EN 600721 klasyfikuje grupy czynników środowiskowych i ich intensywność w miejscu lokalizacji transformatorów biorąc pod uwagę oddziaływania o charakterze klimatycznym, biologicznym, chemicznym i mechanicznym.

Oddziaływania mechaniczne są niezwykle ważnym aspektem w zastosowaniach elektromobilnych. Metody badań odporności transformatorów na drgania powstające w trakcie ruchu pojazdu i przenoszone na urządzenia zainstalowane na pokładzie definiuje norma PN-EN 61373. Dokument precyzuje częstotliwości i amplitudy drgań działających w różnych płaszczyznach na transformator w zależności od miejsca zainstalowania urządzenia na pojeździe szynowym.



Rys. 1. Trójfazowy transformator przetwornicy elektromobilnej dla stref zabrudzenia PD4.

Transformatory i dławiki w mobilnych kolejowych aplikacjach muszą spełniać ostre wymagania wszystkich przedmiotowych norm. Podwyższone wymagania techniczne powodują, iż są one urządzeniami niestandardowymi, zaawansowanymi technologicznie.

## 2. Materiały magnetyczne

Wśród materiałów magnetycznych wykorzystywanych na rdzenie transformatorów mocy w aplikacjach elektromobilnych wyróżnić można ferryty miękkie, niskostratne blachy prądnicowe i transformatorowe oraz stopy amorficzne i nanokrystaliczne w postaci rdzeni z cienkich taśm. Materiał magnetyczny rdzenia dobiera się do specyficznych warunków zasilania i obciążenia transformatora, rozmiarów i przeznaczenia urządzenia, biorąc pod uwagę parametry magnetyków, takie jak stratność, magnetyczną indukcję nasycenia czy magnetostrykcję.

Kształtowanie zadawalających właściwości stopów możliwe jest poprzez modyfikacje ich składu chemicznego, budowy krystalicznej, obróbkę plastyczną i termomagnetyczną. W przypadku blach nisko- i wysokokrzemowych ze wzrostem zawartości krzemu wzrasta ich przenikalność magnetyczna, zmniejszają się straty w żelazie podczas przemagnesowania, co prowadzi do zmniejszenia strat z prądów wirowych, gdyż rośnie rezystywność stopu. Maleje również natężenie koercji, a tym samym zmniejszają się straty histerezy oraz współczynnik magnetostrykcji [1]. Niekorzystne natomiast, z punktu widzenia zastosowań, jest zmniejszanie się magnetycznej indukcji nasycenia.

Tabela 1. Podstawowe właściwości blach krzemowych o strukturze krystalicznej [2]

Materiał magnetyczny	Stalprodukt ET-150-27	JFE Steel Corp. 10JNEX900
Skład	Fe ~3,2%Si	Fe ~6,5%Si
Grubość blachy	270 [μm]	100 [μm]
Indukcja nasycenia	1,84 [T]	1,8 [T]
Rezystywność	0,48 [μΩm]	0,82 [μΩm]
Stratność 10/400	7,8 [W/kg]	5,7 [W/kg]
Magnetostrykcja [λ 10/400 x10 <sup>-6</sup> ]	-0,8	0,1

Znacznie większymi, w porównaniu z blachami krzemowymi, wartościami przenikalności magnetycznej, a przy tym niewielkim polem koercji i mniejszą stratnością charakteryzują się stopy amorficzne na bazie żelaza. Ważną, z punktu widzenia zastosowań przemysłowych, właściwością materiałów amorficznych jest

niewielki wzrost strat całkowitych na jednostkę masy w zakresie podwyższonych częstotliwości. Stopy te otrzymuje się w postaci cienkich taśm techniką szybkiego chłodzenia roztopionego materiału na wirującym walcu [3].

Tabela 2. Podstawowe właściwości materiałów amorficznych i nanokrystalicznych [2]

Materiał magnetyczny	Hitachi 2605 SA1	Hitachi FINEMET
Skład	Fe Si B	Fe Cu Nb Si B
Grubość blachy	~ 25 [μm]	~ 25 [μm]
Indukcja nasycenia	1,56 [T]	1,24 [T]
Rezystywność	13,7 [μΩm]	11,5 [μΩm]
Stratność 10/400	1,5 [W/kg]	-- [W/kg]
Magnetostrykcja [λ 10/400 x10 <sup>-6</sup> ]	27	0,1

Bardzo dobre tzw. miękkie właściwości magnetyczne stopów amorficznych związane są z ich strukturą, w której brak długo zasięgowego uporządkowania atomów, co skutkuje zanikiem anizotropii magnetokrystalicznej, granic ziaren i innych defektów strukturalnych typowych dla materiałów polikrystalicznych [4]. Niewątpliwym atutem tego typu materiałów jest łatwość poprawy ich właściwości poprzez zmianę składu chemicznego i wygrzewania w odpowiednich warunkach. Dążenie do poprawy efektywności przetwarzania energii i poszerzenie zakresów temperatury czy częstotliwości pracy urządzeń doprowadziło do wytworzenia materiałów nanokrystalicznych. Otrzymuje się je poprzez częściową krystalizację stopów amorficznych w procesie wygrzewania optymalizującego. Proces ten prowadzi do powstania krystalitów o średnicy poniżej 100 nm osadzonych w matrycy amorficznej. Do tej grupy stopów należą dobrze znane materiały typu FINEMET, NANOPERM czy HITPERM. Materiały te posiadają dużą wartość przenikalności magnetycznej rzędu 10<sup>6</sup>, indukcję nasycenia (w zależności od składu chemicznego stopu) w granicach 1,2 - 1,9 T, bliską zera magnetostrykcję (λ<sub>s</sub> rzędu 10<sup>-6</sup>), małe pole koercji (H<sub>C</sub> < 1A/m) oraz straty w rdzeniu rzędu 0,1 W/kg (przy 50Hz) [5]. Materiały ferrytowe stosowane są często w aplikacjach wysokich częstotliwości ze względu na relatywnie niską cenę i dostępność. Charakteryzują się niską indukcją nasycenia ok. 0,4 T, niewielką przenikalnością magnetyczną oraz mniejszą stratnością w porównaniu z innymi materiałami do produkcji rdzeni.

### 3. Projekty i optymalizacja konstrukcji

Głównym celem optymalizacyjnym prac nad konstrukcją transformatorów kolejowych jest uzyskanie najniższej możliwej masy elementu przy zachowaniu parametrów elektrycznych, odporności klimatycznej i mechanicznej.

Podczas prac rozwojowych nad konstrukcją transformatorów do zastosowań kolejowych wykonano szereg symulacji obliczeniowych dla konstrukcji rdzeni wykonanych z różnych materiałów magnetycznych. W symulacjach wykorzystano algorytm strat oraz model temperaturowy zastosowany w programie do projektowania transformatorów firmy RALE Engineering GmbH [6].

Niskie częstotliwości napięcia zasilającego (ok. 1kHz) pozwalają rozważać zastosowanie do budowy rdzeni transformatorów niskostratnych blach izotropowych, anizotropowych i magnetyków amorficznych. (tabela 3).

Tabela 3. Parametry techniczne transformatora z rdzeniem ferrytowym i amorficznym

1TTF - 50kVA 1100 /350 V		
Moc znamionowa	50 kVA	
Napięcie pierwotne	1100 V	
Napięcie wtórne	350 V	
Częstotliwość	1,5 kHz	
Straty	260 W	320 W
Sprawność	99,5%	99,3%
Masa	68,6 kg	51,4 kg
Materiał rdzenia	Ferryt 3C97	Metglas FeSiB

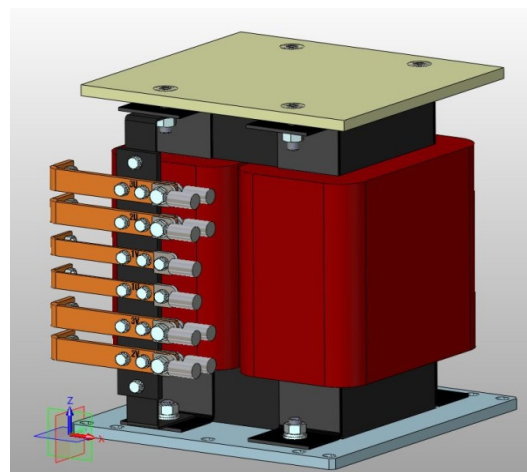
Osiągnięcie oczekiwanego poziomu strat mocy w rdzeniu zbudowanym z blach transformatorowych możliwe jest poprzez ograniczenie indukcji magnetycznej w rdzeniu. Powoduje to jednak niezamierzone, duże zwiększenie masy rdzenia, która jest jednym z ważniejszych ograniczeń. W takiej sytuacji zastosowanie znajdują materiały o niższych stratnościach. Magnetyki amorficzne z uwagi na niewielką grubość blach w przypadku transformatorów wykazują znacznie mniejsze straty pochodzące od prądów wirowych.

Niewielka stratność materiału amorficznego pozwala na uzyskanie odpowiednich strat w rdzeniu przy zachowaniu dopuszczalnej masy urządzenia. W przypadku tej grupy materiałów problemem jest jednak duży współczynnik magnetostrykcji.

Tabela 4. Parametry techniczne transformatora z rdzeniem ferrytowym i nanokrystalicznym

1TTF - 70kVA 1200/800V		
Moc znamionowa	70 kVA	
Napięcie pierwotne	1200 V	
Napięcie wtórne	800 V	
Częstotliwość	140 kHz	
Straty	140 W	270 W
Sprawność	99,8%	99,6%
Masa	12,5 kg	24,2 kg
Materiał rdzenia	Ferryt 3C97	Finemet FeSiBCu

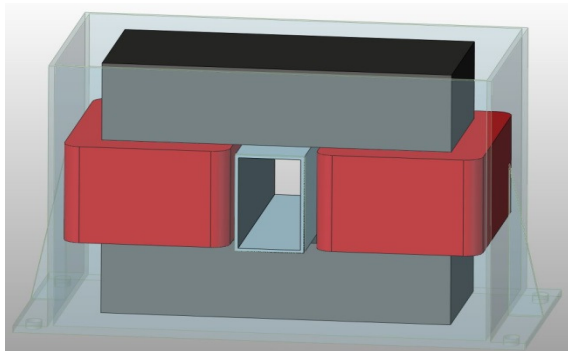
Wywołuje to intensywne pole akustyczne wokół pracującego transformatora, co jest efektem niedopuszczalnym z punktu widzenia docelowego zastosowania.



Rys. 2. Transformator przetwornicy elektromobilnej w wykonaniu bez obudowy

Uzwojenia transformatorów w zakresie niskich częstotliwościach wykonuje się wiązkami przewodów równoległych lub blachami nawojowymi o niewielkiej grubości ograniczając w ten sposób efekty zbliżenia i naskórkowości oraz pochodzące stąd dodatkowe straty mocy. Ostre wymagania ograniczenia wymiarów lub zachowania minimalnej masy elementów w określonych wymiarach gabarytowych, wymusza stosowanie aluminium jako alternatywy dla uzwojeń miedzianych, mimo mniejszej przewodności elektrycznej tego materiału. Obwody elektryczne transformatora są trwale połączone z systemem izolacyjnym, który zapewnia ochronę między innymi przed przepięciami pochodzącymi z trakcji kolejowej. Materiały izolacyjne stanowią jednocześnie przegrody termiczne utrudniające chłodzenie.

Optymalna konstrukcja i technologia wykonania transformatora pozwala skutecznie wyprowadzić straty powstające w rdzeniu i uzwojeniu urządzenia na zewnątrz obudowy, a następnie do otoczenia przy zachowaniu założonych, nieprzekraczalnych przyrostów temperatury. By osiągnąć tak postawione założenie optymalizacyjne konieczne jest analizowanie konstrukcji transformatora i obudowy łącznie. Obudowa staje się elementem systemu chłodzenia transformatora. Straty z powierzchni rdzenia i uzwojeń transformatora zostają przeniesione na termowody oraz obudowę przez przewodzenie ciepłe żywic epoksydowych wypełniających wolne objętości pozostające w obudowie wokół transformatora. Materiał epoksydowy ma podwójne znaczenie łącząc system chłodzenia i izolacji transformatora. Parametry fizyczne żywicy, takie jak przewodność i rozszerzalność cieplna, klasa temperaturowa, wytrzymałość napięciowa, mają kluczowe znaczenie przy chłodzeniu oraz trwałości urządzenia. Naturalna lub wymuszona konwekcyjna wymiana ciepła z otoczeniem może zostać wzmocniona przez odpowiedni kształt obudowy transformatora. Modyfikacja kształtu ma na celu osiągnięcie maksymalnych efektów chłodzenia i ochrony przed oddziaływaniami mechanicznymi oraz środowiskowymi. Niestandardowe podejście do koncepcji obudowy pozwala eliminować powstawanie obszarów, w których następuje wzmoczone generowanie lub kumulowanie strat wywołujących nadmierne przyrosty temperatury (rys. 2). W aplikacjach wysoko częstotliwościowych (tabela 4) otrzymujemy znacznie mniejsze masy i gabaryty transformatorów. Rdzenie w tym zakresie częstotliwości buduje się z ferrytów lub magnetyków nanokrystalicznych. Uzwojenia z uwagi na duże straty dodatkowe budowane są wyłącznie z miedzianych przewodów typu lica.



Rys. 3. Transformator przetwornicy elektromobilnej dla stref zabrudzenia PD3-PD4

#### 4. Wnioski

Rdzenie ferrytowe pozwalają na spełnienie wszystkich wymagań dla transformatorów trakcyjnych przy wysokich częstotliwościach.

Wadą magnetyków amorficznych jest duża wartość współczynnika magnetostrykcji.

#### 5. Literatura

- [1]. W. H. Cieurzyńska, "Relaksacje magnetyczne w strukturalnie uporządkowanych i nieuporządkowanych stopach metali przejściowych", Prace naukowe WIPMiFS Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [2]. M. Soiński, "Materiały magnetyczne w technice", COSiW, SEP
- [3]. Red. A. Kolano – Burian "Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych", Projekt POIG.01.03.01-00-058/08, Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice 2015
- [4]. J. Zbroszczyk "Mikrostruktura i miękkie właściwości magnetyczne amorficznych, nanokrystalicznych i mikrokrystalicznych stopów metali przejściowych", Monografie nr 3, WIPMiFS Fizyka 2009, Struktura i własności materiałów funkcjonalnych, str. 28, Częstochowa 2009
- [5]. M.E. McHenry, M. A. Willard, D. E. Laughlin "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets", Progress in Materials Science, 44, str. 291-433, 1999
- [6]. R. Hadzimanovic "How should one design a 50kHz, 1200VA transformer as per IEC 61558 ?", www.rale.ch

#### Autorzy

mgr inż. Mirosław Łukiewski  
TRAFECO Sp. J., m.lukiewski@trafeco.pl

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