

# Optymalizacja konstrukcji transformatorów w aplikacjach elektromobilnych

Mirosław Łukiewski, Agnieszka Łukiewska

## 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 wg. 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



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

**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.

Słowa kluczowe: transformatory przetwornic statycznych, materiały amorficzne, materiały nanokrystaliczne

**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

Keywords: transformers static converters, amorphous materials, nanocrystalline materials

częstotliwości i amplitudy drgań działających w różnych płaszczyznach na transformator w zależności od miejsca zainstalowania urządzenia na pojeździe szynowym.

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 histerezowe 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 x 10 <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 x 10 <sup>-6</sup> ]	27	0,1

Bardzo dobre tzw. miękkie właściwości magnetyczne stopów amorficznych związane są z ich strukturą, w której brak długozasięgowego uporządkowania atomów, co skutkuje zanikiem

reklama

Zdrowych i radosnych  
Świąt Bożego Narodzenia,  
spędzonych w gronie rodzinnym

życzą Zarząd i Pracownicy  
firmy TRAFECO Sp. J.



**trafeco**

Transformers & Inductive Components

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

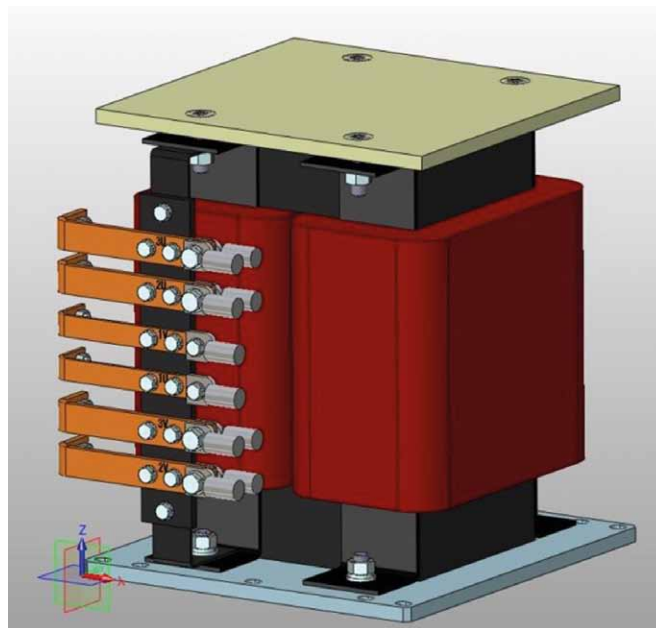
1TTF - 50 kVA 1100 / 350 V		
Moc znamionowa	50 kVA	
Napięcie pierwotne	1100 V	
Napięcie wtórne	350 V	
Częstotliwość	1,5 kHz	
Straty	260 W	320 W
Sprawność	99,5%	99,3%
Masa	68,6 kg	51,4 kg
Materiał rdzenia	Ferryt 3C97	Metglas FeSiB

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.

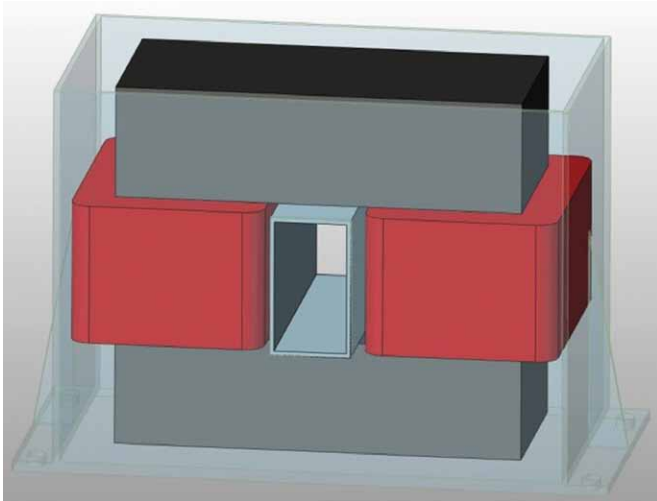
**Tabela 4.** Parametry techniczne transformatora z rdzeniem ferrytowym i nanokrystalicznym

1TTF - 70 kVA 1200/ 800 V		
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

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. 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



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

Uzwojenia transformatorów w zakresie niskich częstotliwości 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 cieplne żywic epoksydowych wypełniających wolne objętości pozostające w obudowie wokół transformatora. Materiał epoksydowy ma podwójne znaczenie, łącząc system chłodzenia i izolacji transformatora. Parametry fizyczne żywic, 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 wzmożone generowanie lub kumulowanie strat wywołujących nadmierne przyrosty temperatury (rys. 2).

W aplikacjach wysokoczęstotliwościowych (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.

## 6. Wnioski

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

Wadą magnetyków amorficznych jest duża wartość współczynnika magnetostrykcji.

## Literatura

- [1] CIURZYŃSKA W.H.: *Relaksacje magnetyczne w strukturalnie uporządkowanych i nieuporządkowanych stopach metali przejściowych*. Prace naukowe WIPMiFS Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [2] SOIŃSKI M.: *Materiały magnetyczne w technice*. COSiW, SEP, 2001.
- [3] KOLANO-BURIAN A. (RED.): *Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych*. Projekt POIG.01.03.01-00-058/08, Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice 2015.
- [4] ZBROSZCZYK J.: *Mikrostruktura i miękkie właściwości magnetyczne amorficznych, nanokrystalicznych i mikrokrystalicznych stopów metali przejściowych*. Monografie nr 3, WIPMiFS Fizyka 2009, Struktura i własności materiałów funkcjonalnych, Częstochowa 2009.
- [5] McHENRY M.E., WILLARD M.A., LAUGHLIN D.E.: *Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets*. „Progress in Materials Science” 44/1999.
- [6] HADZIMANOVIC R.: *How should one design a 50 kHz, 1200 VA transformer as per IEC 61558?* www.rale.ch

Artykuł był prezentowany podczas XXVIII Konferencji Naukowo-Technicznej PEMINE, która odbyła się w dniach 22-24.05.2018 r. w Rytrze.

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