

Najnowsze materiały magnetyczne szansą rozwoju jakościowego transformatorów trakcyjnych

Do niedawna transformatory trakcyjne nie były produktami krajowego przemysłu elektrotechnicznego, dlatego też nie były przedmiotem opracowań technicznych. Sytuacja ta uległa zmianie w miarę rozwoju energoelektroniki i jej aplikacji w trakcji. W rozwiązaniach krajowych transformatory są bowiem obecnie stosowane w przetwornicach statycznych, które zasilają obwody i napędy pomocnicze pojazdów trakcyjnych.

Przetwornice statyczne stanowią teraz standardowe wyposażenie nowych pojazdów. Wymiana przetwornic maszynowych na statyczne bywa punktem programów napraw i modernizacji taboru.

Wobec stałoprądowego zasilania trakcji elektrycznej w Polsce, nie ma w zasadzie zapotrzebowania na transformatory obwodów głównych. Wyjątkiem jest transformator do zamówionych przez PKP lokomotyw wielosystemowych, lecz będący rozwiązaniem zagranicznym.

Szansa projektowania transformatora do obwodu napędowego głównego pojawiła się w związku z pomysłem budowy tramwaju dwusystemowego na napięcie 3000/600 V, który nie wszedł jednak dotąd w fazę realizacji.

Na skutek rosnącego zapotrzebowania, jednym z kierunków prac badawczych Zakładu Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki (ZTE IEI) są przetwornice statyczne i stosowane w nich transformatory. Prace te dotyczą między innymi rdzeni transformatorowych, ich konstrukcji i własności materiałów magnetycznych, z których są wykonywane.

Czynniki wpływające na jakość transformatora

W zależności od potrzeb użytkownika, jakość transformatora mogą stanowić różne czynniki. W przypadku zastosowań trakcyjnych, chyba do najważniejszych należą: mała masa (objętość) i wysoka niezawodność przy rozsądnej cenie wyrobu. Istotne znaczenie mogą też mieć: zakres obsługi, rodzaj chłodzenia, sprawność, przebieg charakterystyki, poziom hałasu.

W większości przypadków masa transformatora może więc być uznana za najważniejszy wymierny czynnik jakościowy. Jej minimalizacja jest zwykle głównym celem przy projektowaniu na potrzeby trakcji. Według ogólnego wzoru, masa M zależy od ilorazu mocy P przez amplitudę indukcji magnetycznej B_m , gęstości prądu w uzwojeniach J oraz częstotliwości f :

$$M = \text{const} \left(\frac{P}{B_m \cdot J \cdot f} \right) \quad (1)$$

Chcąc zmniejszyć masę, należy stosować możliwie duże wartości parametrów występujących w mianowniku zależności (1). Spośród nich największe znaczenie może mieć częstotliwość. W przypadku transformatorów sieciowych wartość częstotliwości f jest narzucona i wynosi 50–60 Hz. Jeśli natomiast transformator jest zasilany falownikiem, częstotliwość znamionowa może być wielokrotnie większa, stając się parametrem pozwalającym efektywnie zmniejszyć masę urządzenia. Rozwój przyrządów półprzewodnikowych umożliwia bowiem stosowanie dużych częstotliwości rzędu 10⁴ kHz.

Ze względu na straty, trzeba przyjmować coraz mniejsze wartości indukcji roboczej w miarę wyższych częstotliwości znamionowych. Ogranicza to minimalizację masy.

Wpływ stosowanych w praktyce gęstości prądu na masę jest dużo mniejszy niż częstotliwości. Forsowanie wartości J dokonuje się w oparciu o nowe materiały izolacyjne bardziej odporne termicznie, jak również o specjalne rozwiązania konstrukcyjne uzwojeń i bardziej wydajne odprowadzenie ciepła.

Postęp w wykorzystaniu materiałów przewodzących, który charakteryzuje parametr J , zachodzi na razie względnie wolno i jest wynikiem mozolnego rozwoju techniki materiałowej oraz konstrukcji transformatorów.

Wartość indukcji B_m we wzorze (1) jest wskaźnikiem wykorzystania materiału rdzenia, jego zwiększenie uzyskuje się przez:

- 1) odpowiednią konstrukcją magnetowodu,
- 2) poprawę chłodzenia,
- 3) stosowanie nowoczesnych materiałów magnetycznych.

Aktualnie, trzeci z tych czynników spowodował „skokowy” postęp w dziedzinie transformatorów.

Nowoczesne materiały magnetyczne źródłem postępu jakościowego

Znacza się podział materiałów magnetycznie miękkich na stosowane przy częstotliwości przemysłowej oraz przeznaczone do pracy przy częstotliwościach podwyższonych, wielokrotnie większych od 50 Hz.

Spośród tych pierwszych należy wymienić blachę o podwyższonej magnesowalności i obniżonej stratności (Hi-B) oraz amorficzne stopy Fe-Si-B. Blachy te są stosowane na rdzenie transformatorów o częstotliwości przemysłowej, w celu zwiększenia sprawności. Efekt zmniejszenia masy nie jest jednak duży.

W przypadku transformatorów o podwyższonej częstotliwości, minimalizację masy limitują straty w rdzeniu, toteż pożądane są materiały o szczególnie małej stratności. Do niedawna stosowane były stopy krystaliczne Ni-Fe (permaloje), ferryty miękkie, anizopermy, następnie stopy mikrokrystaliczne 6,5% Si-Fe, wreszcie amorficzne stopy na bazie Fe. Bardzo dobre własności wykazała taśma amorficzna na bazie Co, która jest jednak relatywnie droga.

W ostatnich latach, po opanowaniu produkcji na dużą skalę taśmy o strukturze nanokrystalicznej, można natomiast mówić o „skokowym” postępie w dziedzinie magnetyków miękkich.

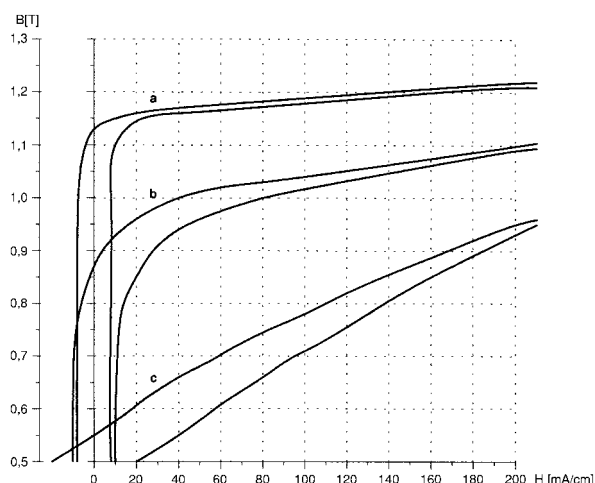
Materiały nanokrystaliczne wytwarza się w pierwszym etapie produkcji tak jak amorficzne, kierując strumień płynnego stopu, np. Fe-Si-B-Ni-Cu, na powierzchnię wirującego walca. Przez szybkie chłodzenie cieczy z prędkością rzędu 106 K/s uzyskuje się szklisty materiał wyjściowy o strukturze amorficznej. Następnie jest on wygrzewany w temperaturze około 550°C w polu magnetycznym. Zależnie od kierunku pola kształtowany jest typ histerezy materiału. W rezultacie można uzyskać prostokątny, okrągły lub płaski przebieg histerezy magnetycznej (rys. 1) [3].

Najcenniejszą właściwością materiałów o strukturze rozdrobionej jest ich bardzo mała stratność. Wynika ona z nie-

oczekiwanego faktu. Okazało się mianowicie, że nadzwyczajnie rozdrobiona struktura krystaliczna stopu o wymiarach ziaren poniżej 30 nm owocuje dużym zmniejszeniem się natężenia koercji H_c , przeciwnie niż w przypadku konwencjonalnych materiałów magnetycznie miękkich, których natężenie H_c zmniejsza się wraz ze zwiększaniem się ziarnistości. Mała wartość natężenia koercji jest warunkiem minimalizacji strat histerezowych, a małą grubością taśmy ogranicza się straty wiroprądowe. Warunki te spełnia produkowany już na dużą skalę stop nanokrystaliczny. Małą wartość natężenia koercji uzyskano w tym przypadku dzięki wymiarom ziaren w granicach 10–20 nm, zaś małą grubością taśmy charakterystyczna dla materiałów amorficznych zapewnia małe straty wiroprądowe.

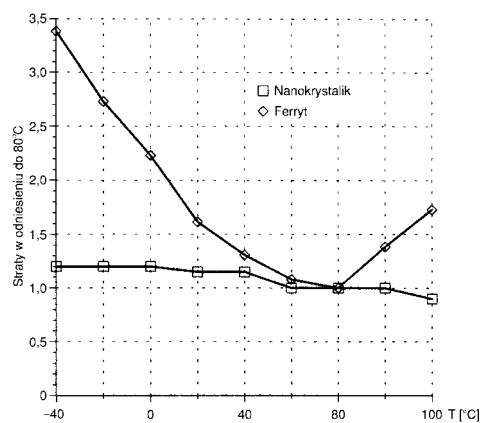
Warto wymienić pozostałe zalety taśmy amorficznej. Należą do nich: duża przenikalność magnetyczna, względnie duża indukcja nasycenia (zwłaszcza w odniesieniu do ferrytów), mały współczynnik temperaturowy, znikomą małą magnetostrykcja – co zapewnia cichą pracę rdzeni, wreszcie duża stabilność temperaturowa. Na wykresach (rys. 2) [5] można porównać stabilność strat w ferrytach i nanokrystalikach w zakresie temperatury od –40 do 120°C.

W tabelicy 1 zestawiono według [3] własności kilku materiałów magnetycznych miękkich. Z zawartych w niej danych można się zorientować, jak dużym postępowaniem inżynierii materiałowej w dziedzinie magnetyków jest opanowanie produkcji rdzeni nanokrystalicznych. Szczególnie cenna jest bardzo mała stratność tych materiałów, przy $f = 20$ Hz i $B_m = 0,2$ T, jest ona ponad 4 razy mniejsza niż ferrytu N67, indukcja nasycenia ma zaś wartość 2,4 razy większą. Bardzo duża jest ich względna przenikalność magnetyczna $\mu = (30 \div 80) \times 10^3$.



Rys. 1. Trzy rodzaje histerezy magnetycznej materiału nanokrystalicznego

a - prostokątny, b - okrągły, c - płaski



Rys. 2. Względne straty ferrytu i materiału nanokrystalicznego przy temperaturze odniesienia 80°C

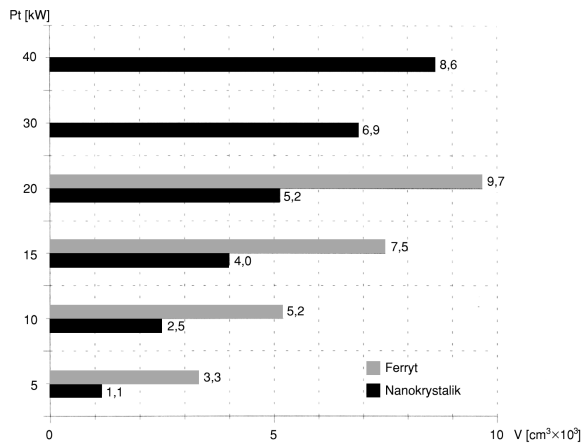
Tabela 1

Porównanie właściwości różnych materiałów magnetycznych miękkich (na podstawie literatury)

Materiał	Grubość [μm]	Stratność 100°C, 20 kHz 0,2 T [W/kg]	Indukcja nasycenia [T]	Magnetostrykcja	Maksymalna temperatura pracy [°C]
Ni60Fe40 krystaliczny	50	45	1,2	$10,0 \times 10^{-6}$	130
Fe93.5Si6.5 krystaliczny	50	40	1,3	$<0,1 \times 10^{-6}$	130
Fe76(SiB)24 amorficzny	25	18	1,5	$25,0 \times 10^{-6}$	150
MnZn (ferryt N67)	—	17	0,5	—	100
Co77(SiB)23 amorficzny	25	5	0,8	$<0,2 \times 10^{-6}$	120
(FeCuNb)77.5(SiB)22.5 nanokrystaliczny	20	4	1,2	$0,1 \times 10^{-6}$	150

Dzięki wymienionym właściwościom, stosowanie materiałów nanokrystalicznych na rdzenie transformatorów o podwyższonej częstotliwości pozwala na nawet kilkakrotne zmniejszenie objętości i masy wyrobu.

Dane porównawcze w odniesieniu do objętości transformatorów z rdzeniami ferrytowymi opracowane przez producenta rdzeni nanokrystalicznych pokazano na rysunku 3 [5].



Rys. 3. Objętość transformatorów z rdzeniem ferrytowym i nanokrystalicznym w zależności od mocy

Warto dodać, że rdzenie ferrytowe o dużych rozmiarach, które należałoby użyć do transformatorów w wyższym zakresie mocy, są bardzo drogie, a mała wytrzymałość mechaniczna ferrytów może nie odpowiadać warunkom pracy trakcyjnej.

W ZTE IEL są prowadzone badania własności rdzeni z rozmaitych materiałów magnetycznych. Wyniki tych badań są następnie wykorzystywane przy projektowaniu i wykonywaniu transformatorów do przetwornic statycznych. W oparciu o dotychczasowe doświadczenia ZTE IEL można określić w przybliżeniu ile razy lżejszy jest transformator z rdzeniem nanokrystalicznym od transformatora z rdzeniem ferrytowym przeznaczonego do trakcyjnej przetwornicy statycznej. W przypadku częstotliwości 10 kHz przy mocy 10 kW stosunek odpowiednich mas wynosi 3,5.

Rdzenie nanokrystaliczne są produkowane jako toroidalne zamknięte, ale też jako cięte proste z owalnym jarzmem. Ich wadą jest jednak wysoka cena (około 460 zł/kg), dlatego opłaca się je stosować począwszy od częstotliwości kilku kHz. Pomimo wysokiej ceny, rdzenie te rozpowszechniają się wśród producentów urządzeń energoelektronicznych, gdyż dzięki szczególnym właściwościom taśm nanokrystalicznych opracowywane są transformatory o niespotykanym dotąd poziomie jakości.

Rdzenie nanokrystaliczne są stosowane do transformatorów wykonywanych w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki z przeznaczeniem do przetwornic statycznych zasilających napędy i obwody pomocnicze.

W miarę rozwoju produkcji tych rdzeni możliwe stanie się wykorzystywanie ich do transformatorów obwodów głównych. Uzyskano mianowicie informację o realizacji transformatora trakcyjnego o mocy 300 kW. We wstępnych pra-

cach studyjnych nad układem napędowym tramwaju dwusystemowego prowadzonych w ZTE IEL, wariant transformatora z rdzeniem nanokrystalicznym uznano za realny.

Przykładowe rozwiązanie

Poniżej są podane dane jednego spośród transformatorów wykonywanych w ZTE IEL. W transformatorze jest zastosowany toroidalny rdzeń nanokrystaliczny. Transformator ma cztery uzwojenia wtórne. Znajduje się on w obudowie aluminiowej i jest zalany tworzywem utwardzalnym. Masa transformatora wraz z zalewą i obudową wynosi 4.7 kg.

Dane znamionowe transformatora

Moc		Typ T-9/300
– pierwotna	[kW]	9,0
– wtórna I	[kW]	7,3
– wtórna II	[kW]	1,6
Napięcie		
– pierwotne	nominalne [V]	600/2
	minimalne [V]	400/2
	maksymalne [V]	900/2
– wtórne I	dwa uzwojenia	UK1K2 = UK3K4 = 520 V
– wtórne II	dwa uzwojenia	UB1B2 = UB3B4 = 30 V
Prąd		
– pierwotny	[A]	30,0
– wtórny I	[A]	13,8
– wtórny II	[A]	50,0
– częstotliwość	[Hz]	10 000

Spośród wyników badań warto wymienić niezwykle wysoką sprawność energetyczną uzwojenia wtórnego I, która wynosi 99,5%. Przyrosty temperatury uzwojeń nie przekraczają 67°C. Daje to duży zapas termiczny przy zastosowanej izolacji klasy F.

Badania izolacji między uzwojeniami dały bardzo dobre wyniki. Zależność prądu upływności od napięcia ma bowiem charakter prostoliniowy, a jego wartość przy napięciu 10 kV wynosi 0,04 μA w stanie nie nagrzanym. Wyniki prób nagrzewania, badań układu izolacyjnego oraz zastosowana wzmocniona izolacja międzyuzwojowa sugerują wysoką niezawodność i długą żywotność transformatora.

Napięcie zwarcia względem uzwojeń wtórnych: $\Delta\text{UK1K2} = 3,07\%$, $\Delta\text{UK3K4} = 2,05\%$, co zapewnia tzw. sztywną charakterystyką obciążenia.

Podsumowanie

1. Opanowanie produkcji na dużą skalę taśmy nanokrystalicznej jest „skokowym” postępem w dziedzinie materiałów magnetycznie miękkich. Charakteryzują się one:

- niezwykle małą stratnością (przy $f = 20$ kHz oraz indukcji $B_m = 0,2$ T wynosi ona ok. 4 W/kg),
- względnie dużą indukcją nasycenia $B = 1,2$ T,
- bardzo dużą przenikalnością magnetyczną $\mu' = (30 \div 80) \cdot 10^3$,
- pomijalnie małą magnetostrycją, około 0,1.

Dokończenie na s. 42 □