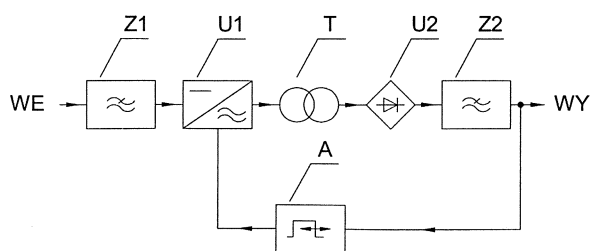


Transformator do przetwornicy trakcyjnej o podwyższonej częstotliwości pracy

Prezentowany transformator jest częścią przetwornicy trakcyjnej. Na pojeździe trakcyjnym przetwornice są instalowane w celu zasilania odbiorników takich, jak: oświetlenie, ogrzewanie, wentylatory, sprężarki, ładowanie baterii akumulatorów itp. Ogólnie są to urządzenia pomocnicze obok urządzeń głównych napędowych. Wraz z rozwojem techniki oraz rosnących wymagań użytkownika dotyczących komfortu i bezpieczeństwa pasażerów rosną moce przetwornic. Jednocześnie w jeszcze większym stopniu rosną wymagania konstrukcyjne, gdyż zwiększeniu mocy towarzyszy ograniczenie dysponowanej przestrzeni.

Wymiary zewnętrzne taboru nie mogą przekroczyć skrajni, zaś zwiększa się liczba urządzeń instalowanych na pojeździe oraz przestrzeń dla przewożonych pasażerów lub towaru. Stąd ogólna tendencja szukania rozwiązań o dużej sprawności. Jedną z metod jest stosowanie podwyższonej częstotliwości pracy przetwornicy, co pozwala zmniejszyć podzespoły magnetyczne takie, jak np. transformatory. W niniejszym artykule przedstawiono postępowanie, które doprowadziło do wyznaczenia uproszczonego modelu cieplnego transformatora prototypowej przetwornicy do tramwaju, następnie porównano obliczenia z wynikami pomiarów.



Rys. 1. Podstawowa struktura przetwornicy

WE – wejściowe napięcie zasilające, Z1 – dolnoprzepustowy filtr wejściowy, U1 – falownik, A – sterownik, T – transformator mocy, U2 – prostownik, Z2 – dolnoprzepustowy filtr wyjściowy

Struktura przetwornicy trakcyjnej

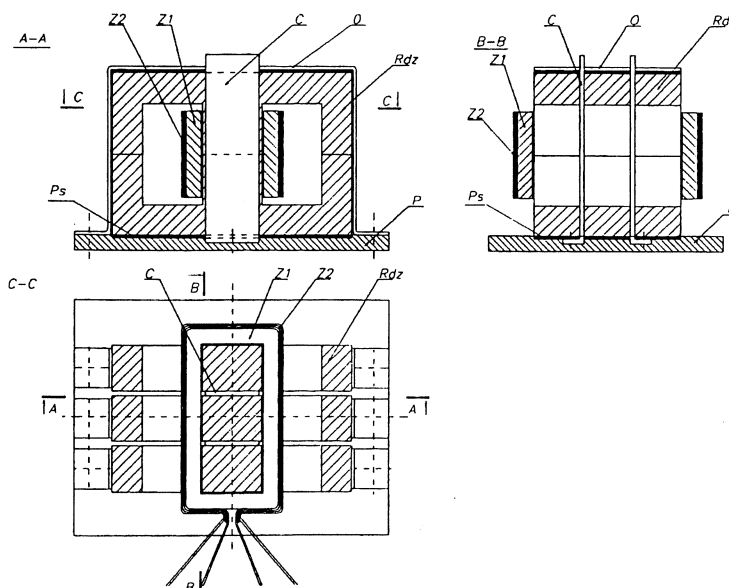
Zaprojektowana i wykonana przetwornica ma strukturę pokazaną na rysunku 1. Jest to typowa struktura, jaka ustaliła się w ostatnim czasie w pojazdach trakcyjnych.

Wejściowe napięcie zasilające (WE) jest doprowadzane z sieci trakcyjnej przez pantograf do dolnoprzepustowego filtra wejściowego (Z1), dalej do falownika (U1) zbudowanego z tranzystorów mocy lub tyrystorów (GTO). Falownik sterowany jest ze sterownika (A) najczęściej według zasady MSI i wytwarza na swoim wyjściu modulowaną prostokątną falę napięcia, która jest doprowadzana do uzwojenia (lub kilku uzwojeń) pierwotnego transformatora mocy (T). Transformator pracuje z podwyższoną częstotliwością, czasem ponad akustyczną. Jest on konieczny ze względów konstrukcyjnych dla zapewnienia separacji galwanicznej między wejściem i wyjściem przetwornicy, aby uniknąć przedostania się wysokiego napięcia sieci trakcyjnej do wnętrza pojazdu. Do transformatora podłączony jest prostownik (U2) i dolnoprzepustowy filtr wyjściowy (Z2). Jest to najprostsza struktura przetwornicy, ale bywają bardziej skomplikowane, które mają 2 lub więcej wyjść również prądu przemiennego. W przypadku małych napięć wyjściowych i dużych prądów wyjściowych przetwornicy, najbardziej kłopotliwym podzespołem do zaprojektowania i wykonania staje się transformator mocy. Zmusza to do specjalnej analizy konstrukcji i zjawisk wymiany ciepła ze względu na stosunkowo dużą przenoszoną moc przy małych gabarytach.

Budowa transformatora

Budowę typowego transformatora pokazano na rysunku 2. Rdzeń (Rdz) złożony jest z sześciu kształtek ferrytowych E-160.

Uzwojenie pierwotne (Z1) zostało nawinięte cienką taśmą miedzianą. Uzwojenie wtórne (Z2), nawinięte taśmą miedzianą, ma dwie sekcje po 1 zwoju i zasilają dwudiodowy dwupulsowy prostownik wyjściowy.



Rys. 2. Budowa transformatora

Straty mocy w obu uzwojeniach wtórnych określa zależność:

$$\Delta P_{CU2} = 2r_{20} \frac{255 + (v - 20)}{255} k_2 I_{RMS2}^2 \quad (1)$$

gdzie:

r_{20} – rezystancja jednego uzwojenia wtórnego (Z2) w temperaturze 20°C [Ω],

k_2 – współczynnik strat dodatkowych uzwojenia (Z2),

I_{RMS2} – prąd skuteczny uzwojenia wtórnego.

Objemy (O) wiązą mechaniczne kształtki rdzenia z aluminiową podstawą (P). W celu poprawienia odprowadzania ciepła z rdzenia do podstawy zastosowano podkładki silikonowe (P₃) oraz miedziane ciepłowody (C).

Straty mocy w rdzeniu określa zależność:

$$P_{FE} = \rho V_o \quad (2)$$

gdzie:

ρ – stratność ferrytu $\left[\frac{\mu W}{mm^2} \right]$

V_o – objętość rdzenia [mm³]

Model cieplny transformatora

W transformatorze są trzy główne miejsca powstawania strat mocy: rdzeń, uzwojenie wtórne, uzwojenie pierwotne. Straty na przyłączach przewodów zostały pominięte jako mało istotne. Ciepło z transformatora jest odprowadzane dwoma drogami przez:

- przewodzenie z aluminiowej podstawy do konstrukcji przetwornicy;
- konwekcję naturalną i promieniowanie do powietrza otaczającego transformator wewnątrz przetwornicy.

Analizując wymianę ciepła między transformatorem i jego otoczeniem, zastępczy model cieplny transformatora można

przedstawić za pomocą uproszczonego schematu przedstawionego na rysunku 3.

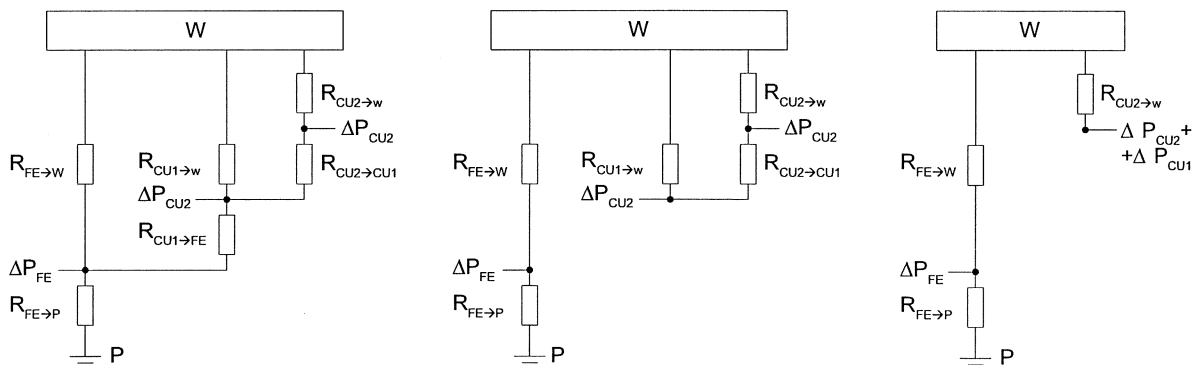
Pierwsze uproszczenie wynika z przyjęcia, że wymiana ciepła między cewką a rdzeniem jest pomijalnie mała. Wynika to z faktu, że dla lepszego wykorzystania materiału zakłada się w projektowaniu transformatora, iż temperatury pracy rdzenia i uzwojenia są stosunkowo wysokie i zbliżone do siebie. Wobec maksymalnej dopuszczalnej przez producenta kształtek ferrytowych temperatury 200°C, rdzeń może nagrzewać się do 110°C. Również cewka może nagrzewać się do 110°C. Ponadto, jak wynika z budowy transformatora (rys. 2), cewka nie przylega ściśle do kolumny rdzenia, tym samym jest utrudniona wzajemna wymiana ciepła.

Biorąc pod uwagę fizyczne wymiary cewki można przyjęć dalsze uproszczenie, że ciepło z obu uzwojeń jest odprowadzane tylko przez powierzchnię boczną, jaką tworzy jeden zwój taśmy miedzianej zewnętrznej sekcji uzwojenia wtórnego. Inne możliwe drogi odprowadzania ciepła, tj. przez pozostałe powierzchnie cewki oraz przez przyłącza elektryczne, zostały uznane jako mało istotne i pominięto je w schemacie.

Wyniki pomiarów

Obliczenia wykonano dla przetwornicy o następujących parametrach:

- napięcie wejściowe 600 V DC
- napięcie wyjściowe 26 V DC
- prąd wyjściowy 250 A DC
- moc wyjściowa 6,5 kW
- częstotliwość pracy 12 kHz
- współczynnik wysterowania falownika $\alpha = 0,7$
- liczba zwojów uzwojenia pierwotnego (Z1) = 14
- liczba zwojów uzwojenia wtórnego (Z2) = 1
- rodzaj falownika – pełny mostek
- prostownik dwudiodowy dwupulsowy
- transformator z rdzeniem ferrytowym $f = 12$ kHz



Rys. 3. Uproszczony model cieplny transformatora

$R_{FE \rightarrow W}$ – opór cieplny między rdzeniem a powietrzem otaczającym rdzeń wewnątrz obudowy,

$R_{FE \rightarrow P}$ – opór cieplny między rdzeniem a podstawą aluminiową transformatora (P),

ΔP_{CU2} – straty mocy w uzwojeniu wtórnym (Z2),

ΔP_{CU1} – straty mocy w uzwojeniu pierwotnym (Z1),

ΔP_{FE} – straty mocy w rdzeniu (Rdz).

Weryfikacji obliczeń dokonano metodą pomiarową na wykonanym już prototypowym transformatorze. Transformator zamontowano wewnątrz przetwornicy, a następnie zasilono i obciążono znamionowymi parametrami, aż do ustalenia się temperatury urządzenia. Uzyskane wyniki i obliczenia zestawiono w tabeli 1. Temperaturę pomierzono miernikiem THERM 2220-3 i sondą dotykową (termopara) T121-2. Niewielka rozbieżność wyników była wywołana trudnymi do oszacowania w fazie projektowania: wzajemnym cieplnym oddziaływaniem różnych podzespołów w przetwornicy, niestabilnością produkcyjną parametrów cieplnych użytych materiałów, niedokładnością montażu (szczeliny powietrzne).

□ R-60/96

Zestawienie wyników obliczeń i pomiarów transformatora

Objekt pomiaru	Pomiar [°C]	Obliczenia [°C]	Różnica [°C]
Podstawa	60	50	+10
Powietrze otaczające transformator	50	50	0
Powierzchnia rdzenia	105	110	-5
Powierzchnia bocznej cewki	115	*110	+5

Literatura

- [1] Bereza J.: *Obliczenia i badania transformatorów do przetwornic trakcyjnych*. Opracowanie dla ABB-Elta. Łódź 10.05.1994.
- [2] Hering M.: *Termokinetyka dla elektryków*. Warszawa, PWN 1980.
- [3] Michiejew M.: *Zasady wymiany ciepła*. Warszawa, PWN 1953.
- [4] *Ferryty rdzenia, magnesy, podzespoły indukcyjne i podzespoły mikrofalowe*. POLFER 1995.

Przetwornice statyczne z ABB Transportation w Łodzi

Typ przetwornicy	Przeznaczenie	Moc wyjściowa	Napięcie wejściowe	Napięcie wyjściowe
U/T-600/40/380/6,5	Zasilanie obwodów 40 V, ładowania baterii, zasilanie silników asynchronicznych wentylatorów w tramwaju 105N, 805N	6,5 kW	420 ÷ 800 V prądu stałego	40 V prądu stałego i 3 × 380 V 50 Hz
U/T-600/26/8	Zasilanie obwodów 26 V, ładowania baterii w tramwaju 112N	8 kW	400 ÷ 800 V prądu stałego	26 V prądu stałego
U/T-600/26/380/8,5	Zasilanie obwodów 26 V, ładowania baterii, zasilanie silników asynchronicznych wentylatorów w tramwaju	8,5 kW	400 ÷ 800 V prądu stałego	40 V prądu stałego i 26 × 380 V 50 Hz
U/WKD-600/40/3	Zasilanie obwodów oświetlenia w zespole trakcyjnym	3 kW	420 ÷ 800 V	40 V prądu stałego
U/WA-3000/28/6,5	Zasilanie obwodów pomocniczych w wagonach pasażerskich	6,5 kW	1000 ÷ 4000 V prądu stałego i przemiennego (wysokonapięciowa)	28 V prądu stałego
U/SL-3000/28/10	Zasilanie obwodów pomocniczych w wagonach sypialnych	10 kW	1000 ÷ 4000 V prądu stałego i przemiennego (wysokonapięciowa)	28 V prądu stałego
U/PSO-110/220/3	Zasilanie obwodów oświetlenia w zespołach EN57	3 kW	110 V prądu stałego	220 V 50 Hz
U/EN57-3000/110/20	Zasilanie obwodów pomocniczych w zespołach EN57	20 kW	2000 ÷ 4000 V	110 V prądu stałego

ABB Transportation Sp. z o.o.
Zakład Aparatury Trakcyjnej
i Dźwignicowej w Łodzi
ul. Aleksandrowska 67/93
91-224 Łódź
tel. + 48 42 526041
fax + 48 42 521856

