

DOI: 10.5604/20830157.1130210

BADANIA PRZEKSZTAŁNIKA DC/DC Z IZOLACJĄ TRANSFORMATOROWĄ PRZEZNACZONEGO DO ZASILANIA POTRZEB WŁASNYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

Marcin Parchomiuk

Instytut Elektrotechniki, Zakład Przekształtników Mocy

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania przekształtnika DC/DC z izolacją transformatorową przeznaczonych do zasilania potrzeb własnych pojazdów trakcyjnych. Zaprezentowano wyniki porównawcze z badań transformatora separującego o dużej wydajności prądowej wykonanego z rdzenia nanokrystalicznego Vitroperm500F oraz amorficznego Metglas2606SA1. Przedstawiono wyniki symulacyjne modelu transformatora separującego w 3D w programie Comsol Multiphysics.

Słowa kluczowe: DC/DC, transformator, pojazdy trakcyjne

RESEARCH OF DC/DC CONVERTER WITH ISOLATION TRANSFORMER TO SUPPLY THE NEEDS OF TRACTION VEHICLES

Abstract. This paper presents research results of DC/DC converter with isolation transformer designed to supply the needs of traction vehicles. It also presents comparative research of isolation transformer with high output current made of nanocrystalline material Vitroperm 500F and amorphous Metglas 2605SA1. There was also a simulation model of isolation transformer in 3D in Comsol Multiphysics presented.

Keywords: DC/DC, transformer, traction vehicles

Wstęp

Z roku na rok zwiększane jest zapotrzebowanie na energię elektryczną zarówno w gospodarstwach domowych, przemyśle jak i wszelkiego rodzaju pojazdach. Dodatkowo rosną również wymagania stawiane urządzeniom zasilającym odbiorniki (wyższa sprawność, mniejsze gabaryty). Identyczna sytuacja występuje również w pojazdach trakcyjnych. Dynamicznie rozwijający się rynek urządzeń przekształtnikowych, technologii przyrządów półprzewodnikowych jak również materiałów magnetycznych, ułatwia konstruowanie nowych urządzeń. W związku z powyższym autor niniejszej pracy podjął prace związane z zaprojektowaniem zasilacza o dużej wydajności prądowej, niskim napięciu wyjściowym, mając na uwadze takie wymagania jak wysoka sprawność urządzenia oraz małe gabaryty.

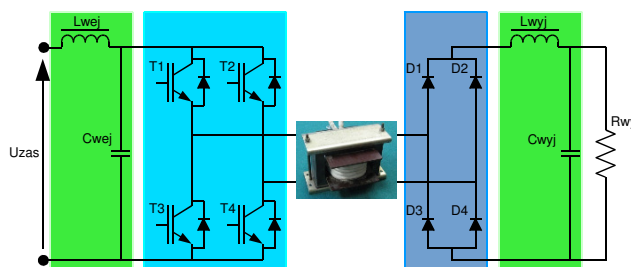
W artykule przedstawiono wyniki badań przekształtnika DC/DC z izolacją transformatorową dostosowanego do pracy w sieci trakcyjnej komunikacji miejskiej. Porównano wyniki pracy przekształtnika z zastosowaniem materiału nanokrystalicznego Vitroperm 500F firmy Vacuumschmelze oraz amorficznego Metglas 2506SA1. Przeprowadzono analizę strat mocy przekształtnika.

W celu weryfikacji założeń projektowych oraz budowy transformatora przedstawiono model przestrzenny transformatora w 3D w programie Comsol Multiphysics. Do obliczeń połowych wykorzystano metodę elementów skończonych MES. Przedstawiono rozkład indukcji oraz natężenia pola magnetycznego wewnątrz i na zewnątrz transformatora stosując rzeczywistość, zmierzoną charakterystykę magnesowania, zachowując docelowe wymiary transformatora.

1. Opis badanego przekształtnika

Na rys. 1 przedstawiono klasyczną strukturę przekształtnika trakcyjnego w układzie pełnego mostka, na podstawie której zbudowano przekształtnik oraz przeprowadzono badania. Składa się ona z filtra wejściowego, falownika napięcia, transformatora izolującego, prostownika oraz filtra wyjściowego.

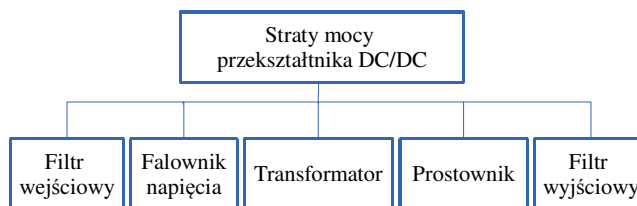
Zgodnie z normami urządzenia trakcyjne komunikacji miejskiej zasilane są napięciem 600 V (+30% -25%) [6]. Zadaniem przetwornicy DC/DC jest przekształcenie napięcia wejściowego do separowanego galwanicznie napięcia wyjściowego. Ze względu na zapotrzebowanie określonych źródeł zasilania w pojazdach trakcyjnych, zaprojektowano przekształtnik o napięciu wyjściowym 24 V DC i prądzie wyjściowym ok. 400 A.



Rys. 1. Widok badanej struktury przekształtnika DC/DC

2. Opis strat mocy w przekształtniku

Straty mocy w przekształtniku można podzielić na kilka obszarów (rys. 2). W celu wyznaczenia całkowitych strat mocy przeprowadzono analizę w każdym podzespolu badanego przekształtnika.



Rys. 2. Podział strat mocy w trakcyjnym przekształtniku DC/DC

W filtrze wejściowym typu LC w głównej mierze straty mocy wydzielane są w uzwojeniu dławika i można je przedstawić jako:

$$P_{Lwe} = i_{Lwe}^2 R_{Lwe} \quad (1)$$

gdzie: R_{Lwe} – rezystancja uzwojeń dławika.

W identyczny sposób można wyznaczyć straty dla filtra wyjściowego wg równania (1).

Straty mocy w falowniku to przede wszystkim straty w tranzystorach IGBT. W literaturze szeroko opisywane są metody pomiarowe strat mocy w półprzewodnikach [1, 5, 7]. Zgodnie z literaturą straty mocy w tranzystorze IGBT P_{IGBT} można podzielić na straty w tranzystorze P_T i diodzie zwrotnej P_D . Dodatkowo straty w tranzystorze można podzielić na straty przewodzenia P_{T-COND} i straty przełączeniowe $P_{T-SWICH}$. Analogicznie występuje podział strat mocy w diodzie zwrotnej, otrzymując P_{D-COND} i $P_{D-SWICH}$.

Powyższe parametry można wyznaczyć następująco:

$$P_{T-COND} = \int_0^{t_1} u_{CE} i_C dt \Rightarrow P_{T-COND} = \frac{t_1}{t_2} U_{CE} I_{CE} \quad (2)$$

$$P_{T-SWICH} = f(E_{ON} + E_{OFF}) \quad (3)$$

$$P_{D-COND} = \int_{t_1}^{t_2} u_F i_F dt \Rightarrow P_{D-COND} = (1 - \frac{t_1}{t_2}) U_F I_F \quad (4)$$

$$P_{D-SWICH} = f(E_{rr}) \quad (5)$$

gdzie: t_1/t_2 – współczynnik wypełnienia, u_{CE} , u_F – chwilowe wartości napięcia, U_{CE} , U_F – wartości średnie napięć, i_C , i_F – chwilowe wartości prądu kolektora, I_{CE} , I_F – wartości średnie prądów, E_{ON} , E_{OFF} , E_{rr} – odpowiednio energia załączenia, wyłączenia, energia związana z prądem wstecznym diody.

Straty mocy w prostowniku wyjściowym można wyznaczyć analogicznie jak straty mocy w diodzie zwrotnej tranzystora IGBT zgodnie z wyrażeniami (4-5).

Analiza strat mocy w transformatorze podejmowana jest w literaturze [2, 3, 4]. Zgodnie z publikacjami, straty mocy w transformatorze można podzielić na straty w rdzeniu i uzwojeniach transformatora. Jeśli chodzi o straty w uzwojeniach to można je wyznaczyć analogicznie jak straty w dławiku (1). Natomiast straty w rdzeniu transformatora można podzielić na straty histerezowe, wiropądowe i nadmiarowe. W materiałach ferromagnetycznych pierwsze dwie grupy mają największy wpływ na całkowite straty mocy P_C (6).

$$P_C = P_h + P_w \quad (6)$$

W materiałach amorficznych jak i nanokrystalicznych wpływ prądów wirowych na całkowite straty mocy jest pomijalny dla częstotliwości do kilkudziesięciu kHz. W celu weryfikacji wielkości strat prądów wirowych, można posłużyć się wyrażeniem:

$$P_w = \frac{\pi^2}{6} \gamma_F d^2 B_m^2 f^2 \quad (7)$$

gdzie: γ_F – konduktywność materiału, d – grubość taśmy.

Wyrażenie (7) słuszne jest dla przebiegów sinusoidalnych, natomiast dla przebiegów prostokątnych należy wprowadzić współczynnik korekcyjny:

$$k_B = 2 \left(\frac{2U_{sk}}{\pi U_{sr}} \right)^2 \quad (8)$$

Do wyznaczenia histerezowych strat mocy można się posłużyć zmodyfikowanym wzorem Steinmetza:

$$P_h = k_h f^a B_m^b \quad (9)$$

gdzie: k_h – współczynnik materiału (1-14), $a=1.35-1.55$, $b=2-2.7$.

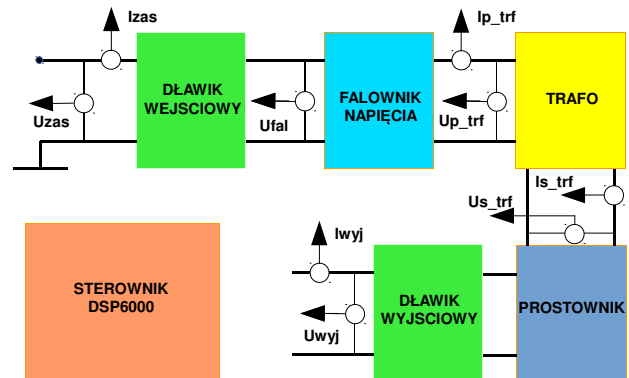
Powyższe wzory pozwalają wstępnie oszacować straty mocy w transformatorze, natomiast nie uwzględniają one rzeczywistego stanu materiałów magnetycznych, które są zależne od procesów technologicznych. Często kupiony materiał magnetyczny odbiega od parametrów katalogowych deklarowanych przez producentów. Stąd konieczna jest weryfikacja eksperymentalna parametrów badanych obiektów. Brak weryfikacji parametrów materiałowych może prowadzić do niepoprawnej pracy przekształtników, przegrzewania się urządzeń, a nawet ich uszkodzeń.

3. Wyniki badań

Badania eksperymentalne przekształtnika przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch różnych transformatorów, wykonanych z materiału nanokrystalicznego (Vitroperm 500F) i amorficznego, (Metglas2605SA1). Parametry transformatorów zestawiono poniżej (tab. 1).

Pomiary wielkości elektrycznych przeprowadzono przyrządami takimi jak: Oscyloskop Tektronix model DPO7254 o paśmie przenoszenia 2.5 GHz oraz próbkowaniu 40 Gs/s, sondą napięciową firmy Tektronix typu P5102 o paśmie przenoszenia 100 MHz 10x 1000 V, sondą napięciową firmy Tektronix P6139B

o paśmie przenoszenia 500 MHz x10 300 V, sondą prądową TCP0030 firmy Tektronix o paśmie przenoszenia 120 MHz (30 A RMS) oraz sondą prądową ILA SMZ800 (1500 A/μs). Do sterowania przekształtnikiem wykorzystano mikroprocesorowy układ sterowania bazujący na procesorze sygnałowym DSP6000 firmy Texas Instruments, gdzie wykorzystując modulację szerokości impulsów z trójkątną falą nośną możliwe było dostosowanie parametrów pracy przekształtnika oraz przeprowadzenie badań.



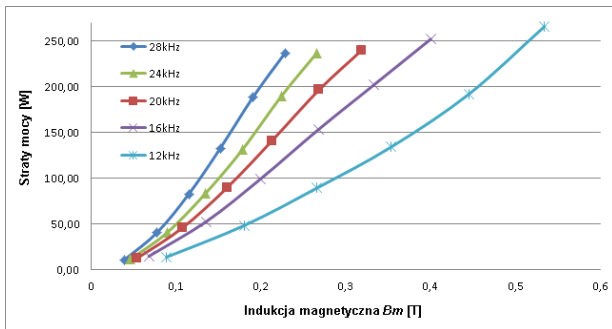
Rys. 3. Schemat blokowy przekształtnika DC/DC z izolacją transformatorową z zaznaczonymi miejscami pomiarowymi. Oznaczenia: I_{zas} , U_{zas} – prąd i napięcie zasilania, U_{fal} – napięcie na falowniku, I_{p_trf} , U_{p_trf} – prąd i napięcie w uzwojeniu pierwotnym transformatora, I_{s_trf} , U_{s_trf} – prąd i napięcie w uzwojeniu wtórnym transformatora, I_{wyj} , U_{wyj} – prąd i napięcie na wyjściu przekształtnika

Schemat pomiarowy badanego przekształtnika DC/DC przedstawiono na rysunku 3. Pokazuje on sposób podłączenia czujników pomiarowych niezbędnych do realizacji badań w niniejszej pracy. Pomiary wielkości elektrycznych w obwodach wysokiej częstotliwości mierzono z wykorzystaniem oscyloskopu, co pozwoliło wyznaczyć moc chwilową przebiegów odkształconych zgodnie z definicją mocy chwilowej.

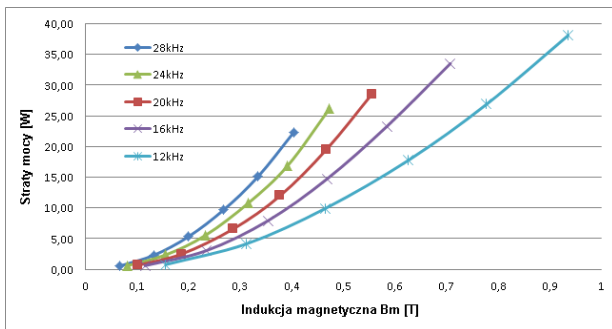
Tabela 1. Parametry badanych transformatorów

	Transformator 1	Transformator 2
Materiał	Nanokrystaliczny Vitroperm 500F	Amorficzny Metglas 2605SA1
Kształt	Toroidalny	Toroidalny
Maks. Indukcja	1.2 T	1.45 T
Napięcie pierwotne	600 V	600 V
Napięcie wtórne	40 V	40 V
Ilość zwojów pierwotnych	23	23
Ilość zwojów wtórnych	1.75	1.75
Prąd wyjściowy	Max. 420 A	Max.420 A
Częstotliwość pracy	16-28 kHz	16-28 kHz
Przekrój efektywny rdzenia	570 cm ²	10167 cm ²
Objętość transformatora	1711 cm ³	2419 cm ³

Wykreślono stratności mocy w zależności od częstotliwości pracy i indukcji magnetycznej (rys. 4, 5). Transformatory w badaniach przekształtnika zasilane były napięciem prostokątnym o modulowanej szerokości impulsów. Jak widać na rysunku 4, straty w transformatorze amorficznym w zależności od częstotliwości pracy (12 kHz – 28 kHz) zmieniają się nieznacznie i w porównaniu z transformatorem z rdzeniem nanokrystalicznym są zdecydowanie większe. W transformatorze z rdzeniem nanokrystalicznym wpływ częstotliwości pracy ma większe znaczenie, gdyż moc strat jałowych transformatora zwiększa się niemal dwukrotnie pomiędzy badanymi skrajnymi częstotliwościami. Poniższe rysunki pozwalają ocenić straty mocy w zależności od częstotliwości i indukcji magnetycznej rdzenia, co między innymi ma wpływ na ustalenie się temperatury pracy całego transformatora.

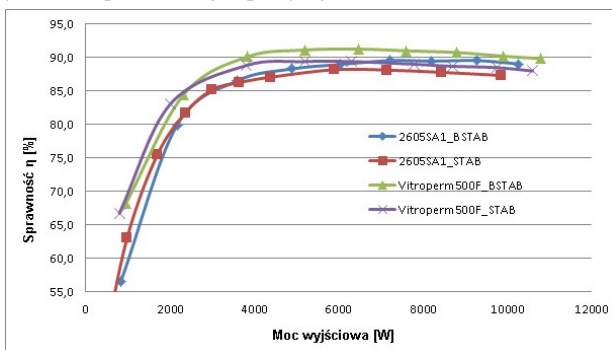


Rys. 4. Badanie eksperymentalne strat jałowych w transformatorze z rdzeniem amorficznym Metglas 2605SA1 dla różnych częstotliwości pracy



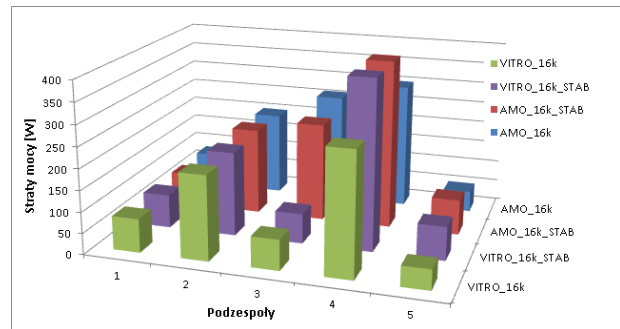
Rys. 5. Badanie eksperymentalne strat jałowych w transformatorze z rdzeniem nanokrystalicznym Vitroperm 500F dla różnych częstotliwości pracy

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki przekształtnika DC/DC z izolacją transformatorową, gdzie porównano sprawności przekształtnika przy pracy z dwoma różnymi transformatorami. Dodatkowo wyznaczone charakterystyki sporządzono dla pracy przekształtnika ze stabilizacją napięcia wyjściowego oraz bez stabilizacji. Jak widać na poniższym rysunku, sprawność całego przekształtnika była minimalnie wyższa w przypadku, kiedy zastosowano transformator z rdzeniem nanokrystalicznym i dla znamionowego obciążenia wyniosła 87,5 % (ze stabilizacją napięcia wyjściowego) oraz 89,5 % (bez stabilizacji). W przypadku pracy przekształtnika z transformatorem amorficznym sprawność układu dla obciążenia znamionowego wyniosła odpowiednio jak powyżej 87 % i 88,5 %.



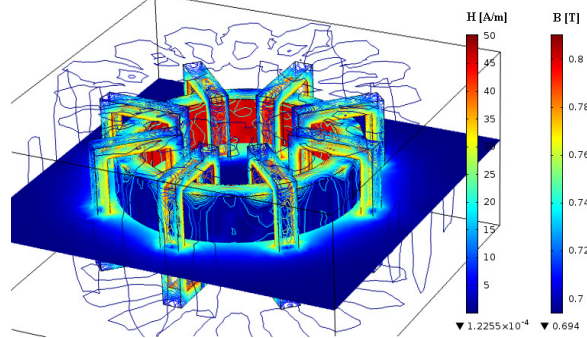
Rys. 6. Badanie porównawcze sprawności przekształtnika DC/DC z izolacją transformatorową z dwoma różnymi transformatorami: nanokrystalicznym Vitroperm500F oraz amorficznym Metglas2605SA1, dla pracy przekształtnika ze stabilizacją napięcia wyjściowego i bez stabilizacji. Badanie przeprowadzono dla pracy przekształtnika przy 16 kHz.

Poniżej (rys. 7) zestawiono porównanie strat mocy w poszczególnych podzespołach przekształtnika DC/DC z izolacją transformatorową z dwoma różnymi transformatorami: nanokrystalicznym Vitroperm 500F i amorficznym Metglas 2605SA1, dla pracy przekształtnika ze stabilizacją napięcia wyjściowego i bez stabilizacji. Wynik badania przedstawiony jest dla pracy przekształtnika przy częstotliwości 16 kHz. Analizując wyniki widzimy, że w podzespołach 2, 3 i 4 występują największe straty mocy i to one w większości mają wpływ na sprawność przekształtnika. Przy pracy przekształtnika ze stabilizacją uwidocznione są większe straty, związane większym prądem i modulacją szerokości impulsów.



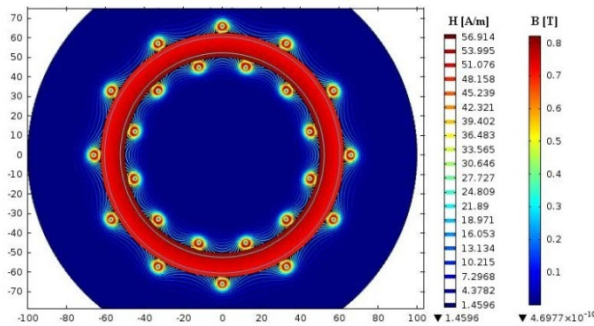
Rys. 7. Porównanie strat mocy w poszczególnych podzespołach przekształtnika przy obciążeniu znamionowym. 1. Dławik wejściowy, 2. Falownik, 3. Transformator (Vitroperm500F, Metglas2605SA1), 4. Prostownik WZ, 5. Dławik wyjściowy.

Na rysunku 8 przedstawiono przestrzenny model transformatora separującego zrealizowany w programie Comsol Multiphysics [8, 9]. W modelu zdefiniowano właściwości nanokrystalicznego materiału magnetycznego Vitroperm500F, gdzie wprowadzono rzeczywistą charakterystykę magnesowania, zachowując docelowe wymiary transformatora. W modelu zastosowano uproszczenia, które umożliwiły uzyskanie rozwiązania zadania, min. rdzeń zamodelowany został z jednolitej struktury o zdefiniowanej charakterystyce magnesowania. Dodatkowym uproszczeniem są kwadratowe, a nie cylindryczne uzwojenia rozmieszczone równomiernie wokół rdzenia. Takie zdefiniowanie problemu pozwoliło na stworzenie modelu do 0,5 miliona stopni swobody i jego pomyślne rozwiązanie. Uzyskane wyniki obrazują równomierny rozkład pola magnetycznego wokół rdzenia. Na rysunku 8 można zaobserwować, że dla maksymalnego natężenia pola magnetycznego o wartości 50 A/m (linie ekwipotencjalne) odpowiada indukcja magnetyczna w rdzeniu równa 0,8 T (powierzchnie gradientowe).

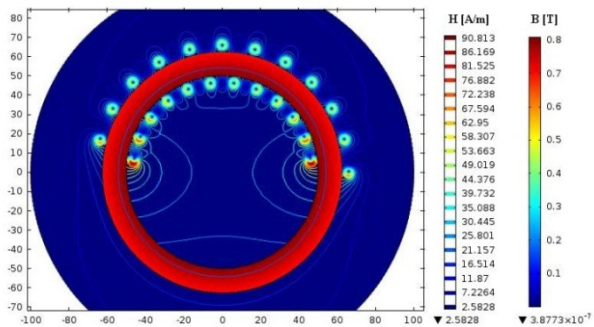


Rys. 8. Rozkład natężenia pola magnetycznego H oraz indukcji magnetycznej B w przestrzennym modelu symulacyjnym transformatora z wykorzystaniem rzeczywistych charakterystyk magnesowania materiałów magnetycznych [9]

Program Comsol umożliwia również tworzenie modeli dwuwymiarowych. Są to zazwyczaj modele o mniejszym stopniu złożoności, dzięki którym możliwe jest o wiele szybsze niż w przypadku modeli 3D uzyskanie i analizowanie wyników symulacji. Na rysunkach 8, 9 przedstawiono modele dwuwymiarowe rzeczywistego transformatora, w którym również zdefiniowano rdzeń nanokrystaliczny o rzeczywistej charakterystyce magnesowania. W pierwszym przypadku (rys. 9) uzwojenia pierwotne transformatora rozłożone są równomiernie na rdzeniu, co skutkuje również równomiernym rozkładem natężenia pola magnetycznego wokół rdzenia i uzwojeń. Dodatkowo na zewnątrz jak i wewnątrz transformatora rozkład natężenia pola magnetycznego jest symetrycznie rozmieszczony. W drugim przypadku (rys. 10), kiedy uzwojenia pierwotne transformatora rozmieszczono na jednej połowie rdzenia, uwidocznione jest nierównomierne rozłożenie natężenia pola magnetycznego, co można również odczytać z legendy. Może to prowadzić do miejscowego przegrzewania się transformatora, uszkodzenia rdzenia, lub nawet uszkodzenia uzwojeń transformatora, co często prowadzi do ich zwarcia i uszkodzenia przekształtnika.

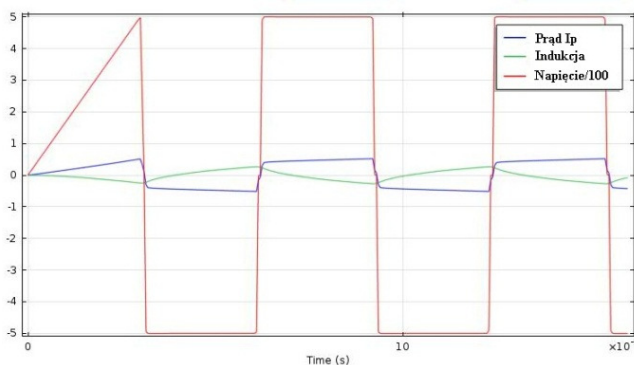


Rys. 9. Rozkład natężenia pola magnetycznego H oraz indukcji magnetycznej B w dwuwymiarowym modelu symulacyjnym transformatora o równomiernie rozłożonych uzwojeniach



Rys. 10. Rozkład natężenia pola magnetycznego H oraz indukcji magnetycznej B w dwuwymiarowym modelu symulacyjnym transformatora o nierównomiernie rozłożonych uzwojeniach.

Bardzo ważną zaletą oprogramowania Comsol Multiphysics jest możliwość implementacji odwodów elektrycznych do symulowanego modelu magnetycznego (transformatora, dławika), co pozwala odzwierciedlić pracę podzespołu w badanym przekształtniku. Istnieje również możliwość formowania impulsów sterujących o zadanym kształcie, np. sinusoidalne źródło zasilania czy też prostokątne, o zmiennej częstotliwości i wypełnieniu (rys. 11).



Rys. 11. Przebiegi napięcia zasilającego transformator, prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora oraz indukcji magnetycznej w wybranym punkcie rdzenia w przestrzennym modelu transformatora zrealizowanego w programie Comsol Multiphysics

4. Wnioski

Zastosowanie nowoczesnych materiałów magnetycznych pozwala zwiększyć częstotliwość pracy urządzeń przekształtnikowych, a tym samym zmniejszyć wymiary całego urządzenia. Wykorzystanie w pełni właściwości tych materiałów umożliwi uzyskanie wysokiej sprawności urządzeń oraz sprostać wymaganiom użytkowników.

Porównanie dwóch różnych materiałów magnetycznych o strukturze amorficznej i nanokrystalicznej pokazuje możliwości

i obszary ich zastosowań. Transformator zbudowany na rdzeniu nanokrystalicznym posiada zdecydowanie mniejsze straty mocy w stosunku do transformatora z rdzeniem amorficznym, chociaż na tle strat mocy całego urządzenia zaznacza się to w niewielkim stopniu. Z praktycznego punktu widzenia wygodniej jest zastosować materiał nanokrystaliczny, ze względu na niskie straty mocy w szerokim zakresie zmieniającej się indukcji magnetycznej, czego nie można powiedzieć o rdzeniu amorficznym. Z drugiej jednak strony w aspekcie konstrukcyjnym wygodniej jest zastosować materiał amorficzny, z którego można formować toroidalne kształty rdzeni, zaplatane kształty typu „u” dowolnej wielkości, co można wykorzystać do urządzeń dużych mocy (kilkaset kilowatów). W porównaniu z materiałami nanokrystalicznymi (Vitoperm 500F) najbardziej popularnymi i przystępnymi cenowo rdzeniami są gotowe rdzenie toroidalne, z których można zbudować transformator mocy rzędu kilkudziesięciu kilowatów, składając kilka rdzeni równolegle. Natomiast w przypadku potrzeby zaprojektowania transformatora o większych gabarytach na większą moc, należy liczyć się z dużymi kosztami samego materiału magnetycznego i w połączeniu z kosztami miedzi może znaleźć zastosowanie jedynie w specjalnych zastosowaniach.

Wykonanie modelu przestrzennego 3D transformatora dla przetwornicy DC/DC pozwala ocenić warunki pracy przygotowanej konstrukcji podzespołu. Można analizować takie parametry jak natężenie pola magnetycznego, rozkład indukcji magnetycznej, energię pola i wiele innych wielkości elektrycznych i magnetycznych, zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz modelu. Podstawowym ograniczeniem przy opracowywaniu modelu przestrzennego jest stopień złożoności, stąd konieczność stosowania uproszczeń. Do obliczenia tego typu zagadnienia wymagane są wydajne komputery wieloprocesorowe, o jak największej ilości pamięci RAM (min.8GB), gdzie i tak czas rozwiązania dochodzi do kilku godzin.

Literatura

- [1] Drogenik U., Kolar J. W.: A general scheme for calculating switching and conduction losses of power semiconductors in Numerical Circuit Simulations of power Electronic, 2010.
- [2] Du Y., Baek S., Bhattacharya S., Huang A. Q.: High-voltage High-frequency Transformer Design for 7.2kV to 120V/240V 20kVA solid State Transformer, IEEE, 2010.
- [3] Muhlethaler J., Biela J., Kolar J.W., Ecklebe A.: Core Losses under DC Bias Condition based on Steimetz Parameters, The International Power Electronics Conference, 2010.
- [4] Sullivan Ch. R., Harris J. H.: Testing Core Loss from Rectangular Waveforms, Power Sources Manufacturers Association, 2010.
- [5] Wu R., Wen J. L., Han J., Chen Z., Wei Q., Jia N., Wang C.: A power loss Calculation Method of IGBT Three-Phase SPWM Converter, International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Application, IEEE, 2012.
- [6] EN50160:2004 – Railway Application Standards. Supply voltages of traction systems.
- [7] Fuji IGBT modules application manual, 2004.
- [8] <http://www.comsol.com/>
- [9] Wykorzystanie usług kampusowych PLATON U3, ACK CYFRONET AGH.

Mgr inż. Marcin Parchomiuk
e-mail: m.parchomiuk@iel.waw.pl

Mgr inż. Marcin Parchomiuk studia ukończył w 2005 roku na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej na kierunku Automatyka i Inżynieria Komputerowa o specjalności Energoelektronika. Od 2005 roku pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Elektrotechniki w Zakładzie Przekształtników Mocy. Zajmuje się projektowaniem, programowaniem i uruchamianiem przekształtników energoelektrycznych, a w szczególności przekształtników AC/DC, DC/DC do zastosowań trakcyjnych i elektroenergetycznych. Obecnie jest uczestnikiem studiów doktoranckich w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie.



otrzymano/received: 2013.10.10

przyjęto do druku/accepted: 2014.10.31